

**ANALISIS MODUL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
PIKOHIDRO PORTABEL BERKAPASITAS 1 KW
DENGAN MENGGUNAKAN TURBIN AIR**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**WAHYU NUR FIRDAUSY
NIM. 105060300111043**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2016



LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS MODUL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO
PORTABEL BERKAPASITAS 1 kW
DENGAN MENGGUNAKAN TURBIN AIR**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



WAHYU NUR FIRDAUSY
NIM. 105060300111043

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 26 Januari 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Teguh Utomo, M.T.

NIP. 19650913 199103 1 003

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

NIP. 19680122 199512 2 001

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19741203 200012 1 001

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



JUDUL SKRIPSI :

ANALISIS MODUL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO PORTABEL
BERKAPASITAS 1 KW DENGAN MENGGUNAKAN TURBIN AIR

Nama Mahasiswa : WAHYU NUR FIRDAUSY

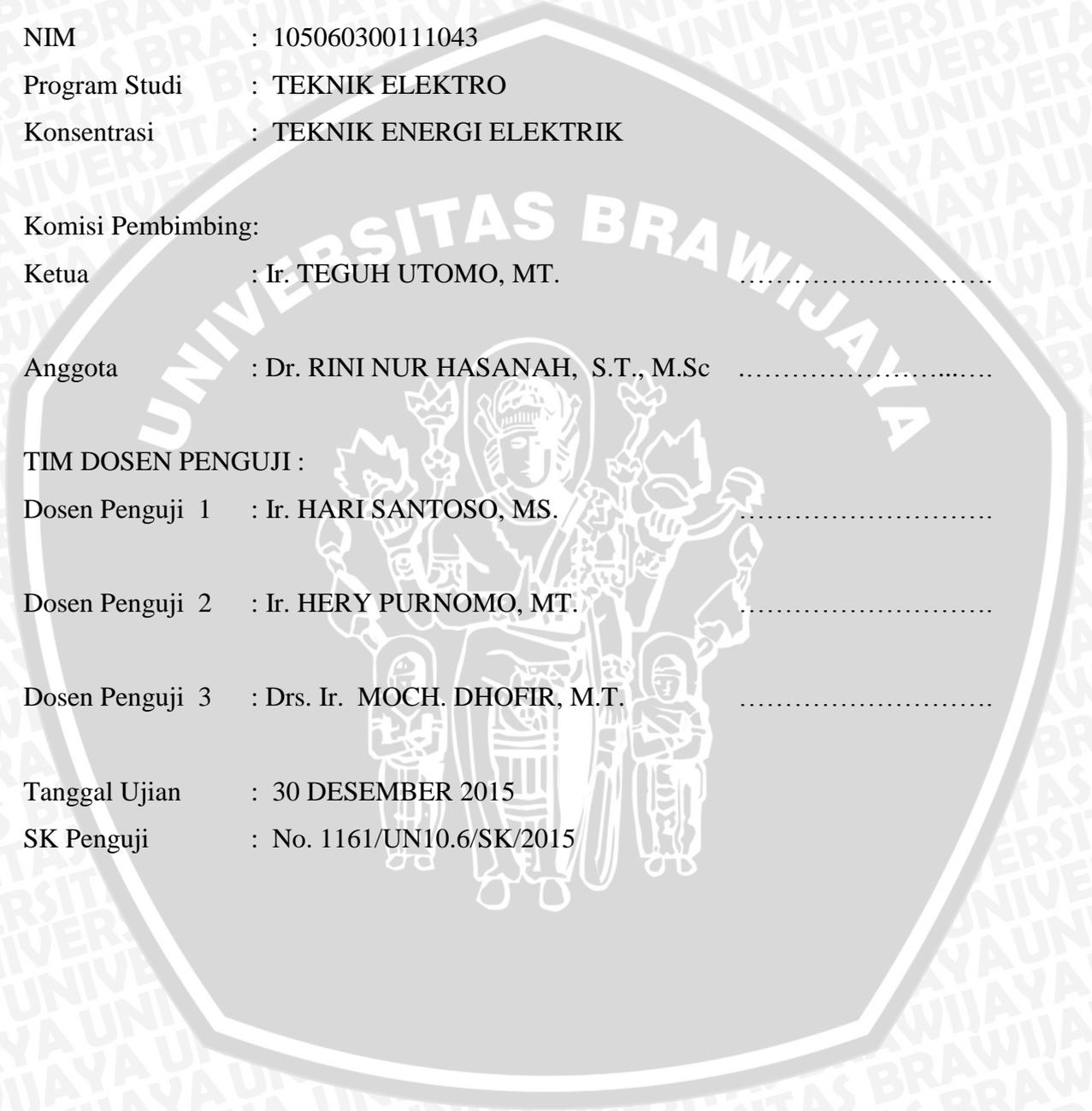
NIM : 105060300111043

Program Studi : TEKNIK ELEKTRO

Konsentrasi : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Komisi Pembimbing:

Ketua : Ir. TEGUH UTOMO, MT.

Anggota : Dr. RINI NUR HASANAH, S.T., M.Sc


TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Ir. HARI SANTOSO, MS.

Dosen Penguji 2 : Ir. HERY PURNOMO, MT.

Dosen Penguji 3 : Drs. Ir. MOCH. DHOFIR, M.T.

Tanggal Ujian : 30 DESEMBER 2015

SK Penguji : No. 1161/UN10.6/SK/2015



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 26 Januari 2016

Mahasiswa,

Wahyu Nur Firdausy

NIM. 105060300111043



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



RINGKASAN

Wahyu Nur Firdausy, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Desember 2015, **Analisis Modul Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Portabel berkapasitas 1kW dengan Menggunakan Turbin Air**, Dosen Pembimbing: Ir. Teguh Utomo, M.T. dan Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

Kebutuhan energi listrik di beberapa desa terpencil di Indonesia sampai saat ini belum terpenuhi semuanya. Potensi energi air dari aliran air sungai di daerah-daerah terpencil yang pada umumnya digunakan untuk sistem saluran irigasi juga mempunyai potensi untuk dimanfaatkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), dalam hal ini sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH). Desa-desanya dengan kondisi seperti ini adalah Desa Sumberwuluh, Kecamatan Pronojiwo, Kabupaten Lumajang dan Desa Sumbersuko, Kecamatan Dampit, Kabupaten Malang. Pada saat ini sudah digunakan PLTPH yang menggunakan turbin air sederhana untuk membangkitkan tenaga listrik pada daerah-daerah terpencil, namun perancangan dan pembuatannya lebih didasarkan pada analisis teknis. Untuk itu di dalam skripsi ini dilakukan analisis terhadap dua modul pembangkit listrik tenaga pikohidro portabel yang menggunakan turbin air untuk menghasilkan daya yang mencapai 1 kW.

Kata kunci—PLTA, PLTPH, turbin air, generator.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



SUMMARY

Wahyu Nur Firdausy, Electrical Engineering Department, Engineering Faculty, Brawijaya University, December 2015, **Analysis of Portable Module for Picohydro Power Generating Unit of 1-kW Capacity using Water Turbine**, Under the guidance of : Ir. Teguh Utomo, M.T. and Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

The need of electricity in the most remote rural areas in Indonesia has not been entirely fulfilled up until now. River currents, where in those remote areas are used for irrigation, have the potential of being used for Hydro Power Plant, one of them is Pico Hydro Power (PHP). Some of the villages whose electricity need has not been fulfilled and has the potential water energy from river currents is Sumberwuluh Village, Pronojiwo Subdistrict, Lumajang Regency and Summersuko Village, Dampit Subdistrict, Malang Regency. At this point, noncomplex Pico Hydro Power (PHP) are used to generate electricity in remote areas. However, the design and production are more based on technical analysis. For that matter, in this essay, analysis is done for two portable Pico Hydro Power (PHP) modules which use waterwheel dan water turbine to generate the power up to 1 kW.

Keywords— Hydro Power, PHP, water turbine, generator

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul ” **Analisis Modul Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Portabel Berkapasitas 1 kW dengan Menggunakan Turbin Air** ”.

Penulisan skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan lancar tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Ibunda Tercinta Nuzul Wahyuning Diyah dan Ayahanda Teddy Wahyudie yang dengan penuh kasih sayang dan kesabaran telah mengasuh, membesarkan, mendidik, memberikan pelajaran hidup dan semangat yang tak ternilai harganya. Serta kepada Adik Shabrina Wahyu Hidayati yang telah menjaga dan merawat Ayah dan Ibu saat Penulis sedang sibuk menyelesaikan skripsi.

Selain itu, tak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T, Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc selaku KKDK Konsentrasi Teknik Energi Elektrik Teknik Elektro dan juga dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dan membantu penulis dalam penelitian ini.
5. Bapak Ir. Teguh Utomo, M.T selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dan memberi pengarahan penulis dalam penelitian ini.
6. Bapak Ir. Erfan Achmad Dahlan, M.T. selaku dosen pembimbing akademik.
7. Bapak Mahfudin dan Ibu Sumini yang selalu membantu dalam pengambilan data di Desa Slorok.

8. Teman - teman khususnya Abdul Azis, Rizal Firmansyah, Syahrir Aditya, Nizar Anugrahadi, Rizky Adhi, Reza Dwi yang selalu membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
9. Rekan - rekan yang selalu memberi semangat, motivasi dan bantuan Nandha P., Reza Dwi, Gumilang Saphta, Rizqi Wahyu, M. Wildan, Enov, Rainer, Dikma H., Dany Oktodo, Harfin, Rafdi, Novi Rahmawati, Riesa Putri.
10. Bapak Suparno dan keluarga yang selalu memberikan bantuan saat melakukan pengujian di Desa Summersuko, Dampit.
11. Bapak Endry dan keluarga yang selalu memberikan bantuan saat melakukan pengujian di Desa Sumberwuluh, Lumajang..
12. Rekan - rekan mahasiswa Teknik Elektro angkatan Magnet 2010
13. Teman - teman Pendekar Sepanjang Masa yang telah memberikan banyak wawasan tentang kehidupan.
14. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan oleh penulis agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan berguna. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Wassalammualaikum Wr. Wb.

Malang, Desember 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN.....	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan Hasil Skripsi.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sumber Energi	5
2.2 Pembangkit Listrik.....	6
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).....	7
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH).....	7
2.5 Daya yang dihasilkan PLTPH.....	8
2.6 Debit Air	10
2.7 Tinggi Jatuh Air (<i>Head</i>).....	13
2.8 Turbin Air	15
2.8.1 Turbin Pelton	15
2.8.2 Turbin <i>Cross Flow</i>	16
2.9 Daya Turbin Air.....	17
2.10 Sistem Transmisi Mekanik	18
2.11 Generator	20
2.11.1 Generator untuk PLTPH.....	20
2.11.2 Kapasitas Generator.....	21
2.11.3 Efisiensi Generator	21

BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1 Diagram Alir Penulisan	23
3.2 Survei.....	24
3.3 Studi Literatur.....	24
3.4 Pengujian dan Pengambilan Data.....	24
3.5 Analisis Data	26
3.6 Penarikan Kesimpulan dan Saran.....	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro yang Digunakan	29
4.2 Daya yang Dibangkitkan	32
4.3 Pengujian Pertama.....	32
4.3.1 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton.....	32
4.3.2 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	34
4.3.3 Hasil Analisis dari Pengujian Pertama	36
4.4 Pengujian Kedua.....	37
4.4.1 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air jenis Pelton	37
4.4.2 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	38
4.5 Pengujian Ketiga	40
4.5.1 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton.....	40
4.5.2 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	41
4.6 Daya yang Dibangkitkan PLTPH saat Pengujian.....	43
4.6.1 PLTPH yang menggunakan Turbin Air jenis <i>Cross Flow</i>	43
4.6.2 PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton.....	43
4.7 Perbandingan Nilai Daya yang Dihasilkan oleh Setiap PLTPH	44
4.7.1 PLTPH yang Menggunakan Turbin Air jenis Pelton	44
4.7.2 PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	45
BAB V PENUTUP	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	51

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Spesifikasi Teknis Turbin	18
Tabel 4.3	Data pengukuran sungai 1	32
Tabel 4.4	Data Pengujian Pertama PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton.....	33
Tabel 4.5	Data perhitungan berdasarkan data pada tabel 4.4.....	34
Tabel 4.6	Data Pengujian Pertama PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	35
Tabel 4.7	Data perhitungan berdasarkan data pada tabel 4.5.....	36
Tabel 4.8	Data pengukuran sungai 2	37
Tabel 4.9	Data Pengujian kedua PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton.....	37
Tabel 4.10	Data Pengujian Kedua PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	38
Tabel 4.11	Data Perhitungan Secara Teori berdasarkan Data Pengujian Kedua	40
Tabel 4.12	Data Pengujian Ketiga PLTPH yang Menggunakan Tincir Air Jenis Pelton.....	40
Tabel 4.13	Data Perhitungan Berdasarkan Data pada Tabel 4.12.....	41
Tabel 4.14	Data Pengujian Ketiga PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	42
Tabel 4.15	Data Perhitungan Berdasarkan Data pada Tabel 4.14.....	43
Tabel 4.16	Data Daya yang Dihasilkan PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	43
Tabel 4.17	Data Daya yang Dihasilkan PLTP yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton.....	44
Tabel 4.18	Perbandingan Daya Teori dan Pengujian PLTPH Turbin Air Jenis Pelton	44
Tabel 4.19	Perbandingan Daya Teori dan Pengujian pada PLTPH Turbin Air Jenis <i>Cross Flow</i>	45

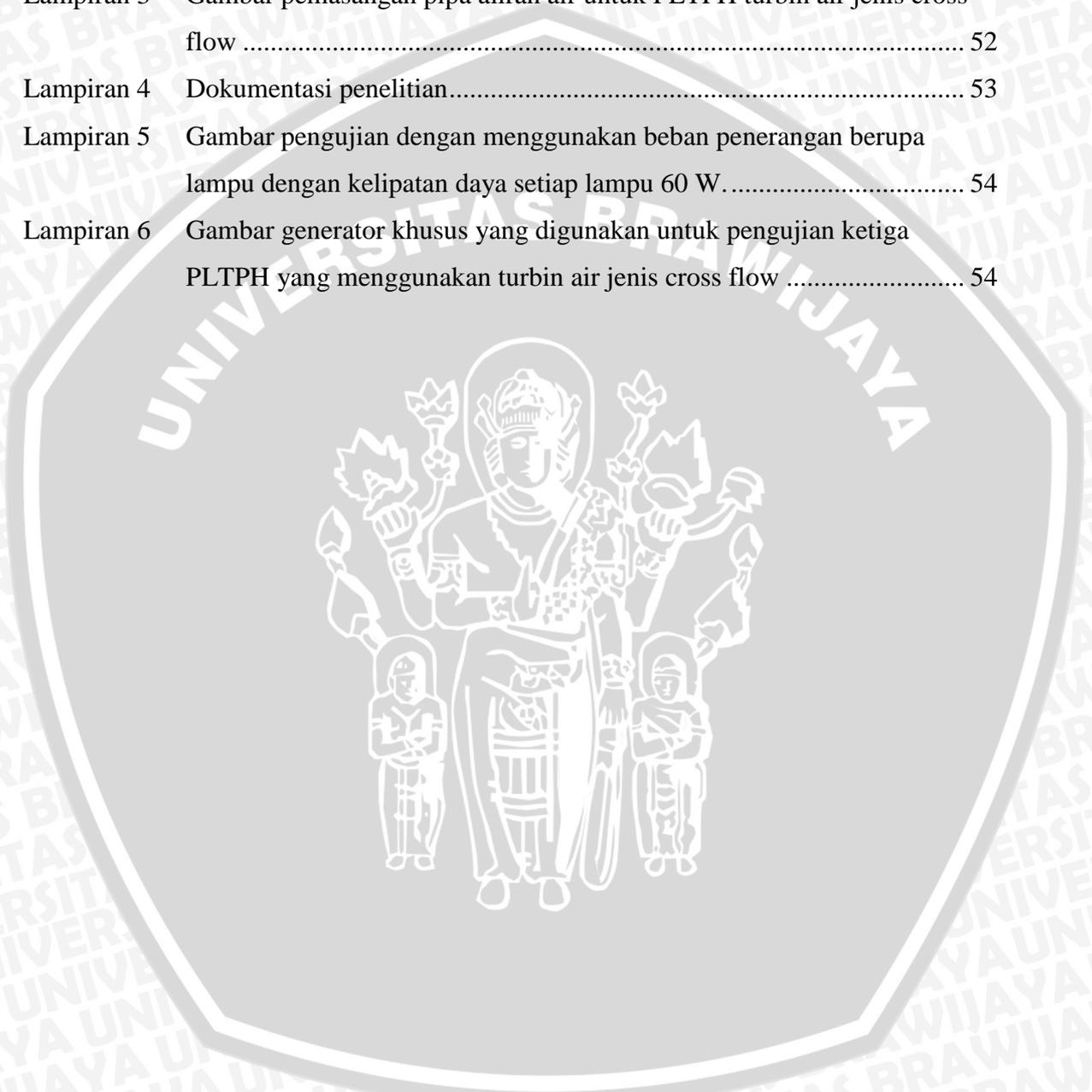


DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Klasifikasi Sumber Energi Berdasarkan Sifatnya.....	6
Gambar 2.2	Pengukuran Luas Penampang Melintang Sungai	12
Gambar 2.3	Metode Pengukuran Water-Filled Tube-1	14
Gambar 2.4	Metode Pengukuran Water-Filled Tube-2	14
Gambar 2.5	Metode Pengukuran Water-Filled Tube-3	14
Gambar 2.6	Turbin Pelton	15
Gambar 2.7	Turbin air <i>cross flow</i> inlet horisontal (kiri) dan inlet vertikal (kanan)	16
Gambar 2.8	Konstruksi turbin <i>crossflow</i> (banki)	17
Gambar 2.9	Sistem Transmisi Puli beserta Sabuk.....	19
Gambar 2.10	Transmisi sabuk a) Sabuk Rata; b) Sabuk V; c) Sabuk Gigi.....	19
Gambar 2.11	Bagian-Bagian Generator	20
Gambar 3.1	Diagram Alir Metode Penelitian.....	23
Gambar 4.1	PLTPH untuk Pengujian yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton ...	29
Gambar 4.2	Ilustrasi transmisi mekanik PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton	30
Gambar 4.3	Generator buatan Pak Andum untuk PLTPH turbin air jenis pelton	30
Gambar 4.4	PLTPH yang menggunakan turbin air <i>cross flow</i> untuk pengujian	31
Gambar 4.5	Ilustrasi transmisi mekanik PLTPH yang menggunakan turbin air jenis <i>cross flow</i>	31
Gambar 4.6	Generator buatan Pak Andum untuk PLTPH turbin air jenis <i>cross flow</i>	32
Gambar 4.7	Generator dan Pulley Baru untuk Pengujian PLTP	36
Gambar 4.8	Lokasi Penelitian dengan tinggi jatuh air maksimal 3 meter.....	38
Gambar 4.9.	Air yang Masuk ke Corong Turbin Air Jenis Cross Flow	39

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Gambar PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton	51
Lampiran 2	Gambar pengukuran debit air	52
Lampiran 3	Gambar pemasangan pipa aliran air untuk PLTPH turbin air jenis cross flow	52
Lampiran 4	Dokumentasi penelitian	53
Lampiran 5	Gambar pengujian dengan menggunakan beban penerangan berupa lampu dengan kelipatan daya setiap lampu 60 W	54
Lampiran 6	Gambar generator khusus yang digunakan untuk pengujian ketiga PLTPH yang menggunakan turbin air jenis cross flow	54



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik memiliki peranan yang sangat penting dalam usaha meningkatkan mutu kehidupan dan pertumbuhan ekonomi. Saat ini hampir semua aktivitas dari semua kalangan masyarakat di Indonesia berhubungan dengan energi listrik, baik dari yang berekonomi tinggi sampai ekonomi rendah.

Kebutuhan energi listrik di negara Indonesia, yang mempunyai area luas dan lokasi desa-desanya yang tersebar sampai saat ini belum terpenuhi semuanya. Untuk pulau Jawa yang hampir seluruh pulaunya mempunyai infrastruktur memadai, rasio elektrifikasinya masih belum mencapai 90% (Prakosa, 2014). Berdasarkan data Perusahaan Listrik Negara (PLN) tahun 2013 di Provinsi Jawa Timur sekitar 40 persen atau 8.506 desa belum teraliri listrik. Sebagian besar wilayah yang belum mendapatkan aliran listrik merupakan daerah terpencil di beberapa wilayah, seperti: Madura, Jember, Lumajang, Bojonegoro dan Probolinggo (Sutrisna, 2011).

Umumnya daerah pedesaan terpencil mempunyai potensi energi air dari aliran air sungai. Beragam cara pemanfaatan aliran air sungai pun dilakukan warga desa untuk memenuhi kebutuhan hidup, salah satunya yaitu untuk memenuhi kebutuhan pertanian dengan membuat sistem saluran irigasi.

Saat ini di Indonesia sudah banyak saluran irigasi pada daerah pedesaan dataran tinggi maupun rendah, namun saluran irigasi tersebut hanya digunakan untuk mengairi areal pertanian saja. Saluran irigasi mempunyai potensi untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga air dengan konsep yang bersifat ramah lingkungan, tidak mengganggu kepentingan irigasi, karena hanya menggunakan air irigasi dan tidak mengurangi kuantitas air yang digunakan untuk saluran irigasi.

Aliran air pada saluran irigasi mempunyai debit air yang lebih stabil dibandingkan dengan debit air di sungai. Debit air pada aliran saluran irigasi relatif tidak terpengaruh oleh perubahan musim atau cuaca. Kondisi ini sangat menguntungkan untuk pemanfaatan pembangkit listrik tenaga air yang menuntut kesinambungan suplai air yang tinggi.

Pada daerah pedesaan terpencil, Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro merupakan solusi alternatif penyediaan listrik bagi masyarakat yang sama sekali belum menikmati aliran energi listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN). Ukurannya yang kecil, tidak membutuhkan lahan yang luas serta perbedaan tinggi jatuh air yang tidak terlalu tinggi dapat dipadukan dengan macam-macam aliran sungai dan saluran irigasi. Selain itu biaya pembuatan yang relatif murah, tidak membutuhkan perawatan yang rumit dan dapat digunakan untuk jangka waktu yang cukup lama sangat cocok untuk digunakan oleh masyarakat pedesaan terpencil.

Pada studi kasus yang dilakukan, di Desa Sumberwuluh, Kecamatan Pronojiwo, Kabupaten Lumajang yang sama sekali tidak terjangkau aliran energi listrik, baik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) maupun dari PLTMH yang sudah ada, warga secara mandiri berupaya memenuhi kebutuhan energi listrik dengan memanfaatkan aliran sungai dan saluran irigasi, dengan membuat alat pembangkit listrik tenaga pikohidro menggunakan turbin air sederhana yang menghasilkan energi listrik berkisar antara 200 watt sampai 1000 watt. Meskipun biaya pembuatannya relatif terjangkau, alat ini dibuat secara coba-coba (*trial and error*) karena belum ada panduan yang tetap tentang ukuran tinggi jatuh dan debit air yang sesuai.

Dengan memperhatikan beberapa hal yang telah disebutkan di atas, maka perlu dilakukan analisis pada modul pembangkit listrik tenaga pikohidro portabel berkapasitas 1 kW yang menggunakan turbin air. Parameter yang digunakan adalah tinggi jatuh air (head) dan debit air yang diperlukan untuk mengoptimalkan kinerja dari pembangkit listrik tenaga pikohidro agar menghasilkan daya terpasang 1 kW. Berdasarkan data tinggi jatuh dan debit air yang telah didapatkan dapat dijadikan pedoman bagi warga desa sehingga potensi sumber daya air yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal untuk memenuhi kebutuhan listrik di desa-desa pada daerah terpencil.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dalam skripsi ini sebagai berikut.

1. Berapa tinggi jatuh dan debit air yang diperlukan untuk menggerakkan turbin air yang digunakan pada modul PLTPH sehingga dihasilkan daya terpasang 1 kW.
2. Bagaimana perbandingan daya yang dihasilkan antara kedua modul pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air.

1.3 Batasan Masalah

Skripsi ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut.

1. Pembahasan pada saluran air irigasi yang dikondisikan untuk pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air.
2. Pembahasan pada satu titik tinggi jatuh dan debit air yang diperlukan untuk menghasilkan daya terpasang 1 kW.
3. Pembahasan ditinjau dari aspek teknis (mekanik dan elektrik).
4. Turbin air yang digunakan merupakan turbin air jenis pelton dan cross flow.
5. Generator dibahas secara umum.
6. Beban yang digunakan adalah beban penerangan berupa lampu.
7. Tidak membahas masalah ekonomis dan aspek sosial.

1.4 Tujuan

Mendapatkan hasil analisis dari modul pembangkit listrik tenaga pikohidro portabel dengan dua model yang menggunakan turbin air jenis pelton dan *cross flow* untuk menghasilkan daya terpasang 1 kW yang memenuhi aspek teknis termasuk perbandingan energi listrik yang dihasilkan.

1.5 Sistematika Penulisan Hasil Skripsi

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan hasil skripsi.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : METODE PENELITIAN

Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam skripsi ini, meliputi metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi pembahasan dan analisis terhadap hasil penelitian.

BAB V : PENUTUP

Berisi penutup yang terdiri dari kesimpulan dan saran.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sumber Energi

Energi adalah sesuatu yang bersifat abstrak yang sukar dibuktikan tetapi dapat dirasakan adanya. Energi merupakan kemampuan untuk melakukan kerja. Availabilitas adalah kemampuan sistem untuk menghasilkan kerja yang berguna. Keberadaan availabilitas lebih realistis, mudah dibuat dan dapat dirasakan kegunaannya.

Menurut hukum termodinamika pertama, energi bersifat kekal, tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan, tetapi dapat dikonversi dari bentuk energi yang satu ke bentuk energi lain. Availabilitas adalah kemampuan suatu sistem untuk menghasilkan suatu pengaruh yang berguna bagi kebutuhan manusia secara positif (Pudjanarsa, 2008:1).

Secara garis besar energi dapat diklasifikasikan menjadi dua:

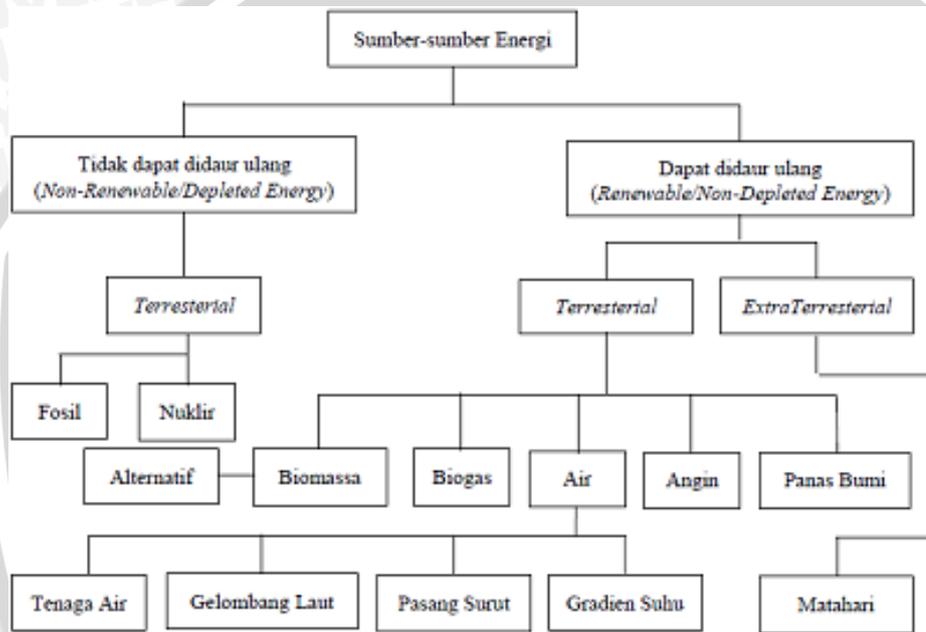
1. Energi dalam transisi; merupakan energi yang sedang bergerak melintasi batas sistem.
2. Energi tersimpan; merupakan energi yang tersimpan dalam suatu sistem atau massa, biasanya berbentuk massa atau medan gaya, mudah dikonversi menjadi energi transisi.

Secara umum energi dapat dikategorikan menjadi berbagai macam, yaitu :

1. Energi mekanik
2. Energi listrik
3. Energi elektromagnetik
4. Energi kimia
5. Energi nuklir
6. Energi termal

Berdasar sumbernya, energi dapat dibedakan menjadi energi yang berasal dari bumi (*terrestrial*) dan yang berasal dari luar bumi (*extraterrestrial*). Sumber energi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan sifatnya, yaitu:

1. Energi Tak Terbarukan (*unrenewable energy*), yang dikenal dengan istilah energi fosil, adalah jenis sumber daya energi yang habis dipakai, dan tidak dapat diperbaharui lagi, baik secara alamiah maupun dengan bantuan teknologi, yaitu : minyak bumi, batubara, dan gas alam.
2. Energi Terbarukan (*renewable energy*), yang dikenal dengan istilah energi regeneratif, adalah jenis sumber daya energi yang tidak habis dipakai, dalam artian dapat diperbaharui lagi, baik secara alamiah maupun dengan bantuan teknologi regenerasi, yaitu : matahari, air, angin, geothermal, biomassa, dan biogas.



Gambar 2.1 Klasifikasi Sumber Energi Berdasarkan Sifatnya
Sumber : Pudjanarsa, 2008:6

Tiga sumber energi yang sangat penting dan sudah digunakan sebagai pembangkit energi secara besar-besaran sehingga sering disebut sebagai energi konvensional yaitu tenaga uap, tenaga air dan tenaga nuklir. Selain itu, sumber daya energi yang tidak diklasifikasikan sebagai sumber energi konvensional antara lain tenaga pasang surut air laut, tenaga panas matahari, tenaga panas bumi, tenaga angin dan tenaga medan magnet hidrodinamik (Dandekar,1991:1-2).

2.2 Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik merupakan suatu bagian dari alat industri yang digunakan untuk memproduksi dan membangkitkan tenaga listrik dari berbagai sumber energi seperti uap, nuklir, air, panas bumi dan gas.

Secara umum, pembangkit listrik terdiri dari 7 macam yaitu (Marsudi, 2011:2):

1. PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap)
2. PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir)
3. PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap)
4. PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel)
5. PLTPB (Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi)
6. PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas)
7. PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air)

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) merupakan suatu pemanfaatan sumber energi yang berasal dari potensi tenaga air melalui konversi menjadi tenaga listrik yang pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah volume air per detik (debit) yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar turbin/kincir sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik pada turbin diteruskan menggunakan poros yang terhubung dengan generator. Energi listrik yang dihasilkan generator ini kemudian dihubungkan dengan jaringan transmisi ke para pengguna. (Arismunandar, 2004 : 1).

Berdasarkan daya yang dihasilkan, Pembangkit Listrik Tenaga Air dibedakan menjadi (Kurniawan, 2009:6):

- a. *Largehydro* : daya yang dihasilkan lebih dari 100 MW
- b. *Mediumhydro* : daya yang dihasilkan antara 15 sampai 100 MW
- c. *Smallhydro* : daya yang dihasilkan antara 1 sampai 15 MW
- d. *Minihydro* : daya yang dihasilkan antara 100 kW sampai 1 MW
- e. *Microhydro* : daya yang dihasilkan antara 5 kW sampai 100 kW
- f. *Picohydro* : daya yang dihasilkan dibawah 5 kW

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH)

Pembangkit listrik tenaga pikohidro (PLTPH) merupakan bagian dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dimana energi air (potensial kinetik) sebagai sumber energi dengan kapasitas daya terbangkitkan tidak lebih dari 5 kW (Basar *et all*, 2011).

Pada umumnya pembangkit listrik tenaga pikohidro yang dibangun merupakan jenis *run of river* dimana tinggi jatuh air yang diperoleh tidak dengan cara membangun bendungan besar, melainkan dengan cara mengalihkan aliran air sungai atau saluran

irigasi dan menjatuhkannya lagi ke sisi lain dari sungai di suatu tempat dimana perbedaan ketinggian bisa didapatkan.

Ciri dari pembangkit listrik tenaga pikohidro yaitu mempunyai sebuah kincir atau turbin yang terhubung langsung dengan generator dengan menggunakan sabuk (*belt*). Sistem Pembangkit ini berdiri sendiri, menyuplai hanya beberapa rumah, menggunakan pengatur beban secara elektronik untuk mengatur tegangan keluaran dan frekuensi keluaran yang dihasilkan. Energi listrik yang dihasilkan sistem ini hanya mampu untuk memenuhi kebutuhan beban rumah tangga saja dan tidak dapat meningkatkan kapasitas daya (Williamson *et all*, 2011).

2.5 Daya yang dihasilkan PLTPH

Besarnya daya listrik yang dihasilkan PLTPH yaitu tergantung dari tinggi jatuh aliran air (H) dan debit air (Q). Berikut adalah persamaan sederhana yang mendasar yang merupakan inti dalam karya desain PLTA (Basar *et all*, 2011).

$$P_{bersih} = \eta \cdot P_{hidrolik} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$P_{bersih} = \eta \cdot Q \cdot g \cdot H \dots\dots\dots (2.2)$$

Pada dasarnya, berat dari air yang jatuh mengacu pada gaya tarik ke bawah yang dikenakan air. Gaya tarik ke bawah dapat digantikan oleh massa (m) dan percepatan (a) karena gravitasi (g). Energi yang dikeluarkan (dalam satuan joule) oleh air yang jatuh dapat diperkirakan dengan mengalikan jarak vertical (H) dengan massa (m) dan gaya gravitasi (g) atau berat (mg). Persamaannya:

$$\text{Energi yang dikeluarkan} = m g H \dots\dots\dots (2.3)$$

Massa air dapat diganti dengan massa jenis air (ρ) dan volume air yang menghasilkan.

$$\text{Energi yang dikeluarkan} = \rho V g H \dots\dots\dots (2.4)$$

Selanjutnya, volume (V) dalam persamaan (1.4) dapat diganti dengan volume laju aliran atau debit air (Q) dengan satuan meter kubik per detik. Energi yang dikeluarkan dalam Joule dapat dinyatakan sebagai daya bruto dalam satuan Joule per detik atau dalam Watts, seperti pada persamaan (Basar *et all*, 2011)

$$P_{hidrolik} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad \text{kW} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dalam persamaan ini, daya adalah energi yang dikeluarkan per unit waktu atau juga dikenal sebagai estimasi daya air yang tersedia yang juga merupakan perhitungan untuk input daya atau total daya yang diterima oleh sistem pikohidro. Oleh karena itu, rumus untuk daya bersih atau daya yang berguna untuk dinikmati yaitu (Basar *et all*, 2011) :

$$P_{bersih} = (0,5) (1000) (10)QH \quad W \dots\dots\dots(2.6)$$

Atau, secara ekuivalen;

$$P_{bersih} = 5 Q \cdot H \quad kW \dots\dots\dots(2.7)$$

Sedangkan Patty (1995:14) mengemukakan bahwa untuk mendapatkan daya hidrolik P_h yang merupakan potensi sumber daya energi air pada suatu wilayah, didapatkan dengan persamaan:

$$P_{hidrolik} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

- P_h : Daya hidrolik (kW)
- Q : Debit air (m^3/s)
- ρ : Massa jenis air ($= 1000 \text{ kg}/m^3$)
- g : Gravitasi bumi ($= 9.8 \text{ m}/s^2$)
- h : Tinggi jatuh air (m)

Apabila nilai gravitasi bumi g dan massa jenis air ρ dimasukkan ke Persamaan 2.8, maka persamaannya menjadi

$$P_{hidrolik} = 9,8 \cdot Q \cdot H \dots\dots\dots(2.9)$$

Dalam prosesnya air akan mengalir melalui pipa pesat dan melewati turbin air. Dengan mengabaikan rugi-rugi gesekan pada pipa pesat dan efisiensi turbin air diketahui maka besar daya mekanik turbin P_{tb} adalah

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot P_h \quad (kW) \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

- P_{tb} : Daya mekanik turbin (kW)
- P_h : Daya hidrolik (kW)
- η_{tb} : Efisiensi turbin



Jika di antara turbin dan generator terdapat sistem transmisi mekanik (η_{tm}) dan efisiensi generator (η_g) diketahui, maka besar daya keluaran elektrik P_{out} dari generator adalah (Wibawa, 2001):

$$P_{out} = \eta_{tm} \cdot \eta_g \cdot P_{tb} \text{ (kW)} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

$$P_{out} = \eta_{total} \cdot P_h \text{ (kW)} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan:

P_{out} : Daya keluaran elektrik (kW)

P_{tb} : Daya mekanik turbin (kW)

P_h : Daya hidrolis (kW)

η_{tm} : Efisiensi transmisi mekanik

η_g : Efisiensi generator

Efisiensi total (η_{total}) adalah efisiensi dari seluruh sistem yang mencakup efisiensi turbin sampai efisiensi generator ($\eta_{total} = \eta_{tb} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_g$).

2.6 Debit Air

Debit adalah laju aliran air (dalam bentuk volume air) yang melewati suatu penampang melintang sungai per satuan waktu. Debit dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti curah hujan, keadaan geologi, flora, temperatur dan lainnya di sebelah hulu sungai (Arismunandar, 2000 : 9).

Dalam sistem satuan SI besarnya debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik (m^3 /detik). Dalam laporan - laporan teknis, debit aliran biasanya ditunjukkan dalam bentuk hidrograf aliran. Hidrograf aliran adalah suatu perilaku debit sebagai respon adanya perubahan karakteristik biogeofisik yang berlangsung dalam suatu daerah aliran sungai (oleh adanya kegiatan pengelolaan DAS) dan atau adanya perubahan (fluktuasi musiman atau tahunan) iklim lokal. Apabila curah hujan dan aliran sungai pada daerah tertentu sangat rendah maka debit air pada daerah tersebut akan rendah pula dan begitu juga sebaliknya (Asdak, 1995).

Debit air merupakan data pokok untuk perencanaan suatu pembangkit listrik tenaga air, harus diukur secara teliti dan diukur dalam jangka waktu sepanjang mungkin. Beberapa cara untuk mengukur debit air adalah sebagai berikut.

1. Metode Tampung

Metode ini pada umumnya digunakan pada sungai-sungai kecil. Cara yang digunakan yaitu dengan membendung air untuk sementara yang kemudian mengalirkan aliran air yang telah dibendung tersebut ke suatu wadah yang sudah diketahui volumenya. Secara bersamaan menghitung waktu yang diperlukan air aliran air untuk memenuhi wadah. Maka debitnya adalah :

$$Q = \frac{V}{t} \text{ (liter/detik)} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

t = waktu yang diperlukan untuk memenuhi wadah (detik)

V = volume wadah (liter)

2. Metode Apung

Untuk menggunakan metode ini, luas penampang melintang sungai dan kecepatan aliran sungai yang akan diukur harus diketahui serta alat pendukung untuk metode ini yaitu alat ukur apung (*surface float*) dan tongkat ukur apung (*rod float*).

Luas penampang melintang sungai harus ditentukan di tempat yang mudah untuk dilakukan pengukuran (sebaiknya di tengah aliran sungai yang lurus). Selanjutnya mengukur lebar sungai dan kedalaman sungai dengan menggunakan tongkat ukur apung yang kemudian diambil nilai kedalaman rata-ratanya. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.

Sehingga luas penampang melintang sungai akan didapatkan dengan persamaan (Mismail, 1991/1992:111):

$$A = w d \dots\dots\dots(2.14)$$

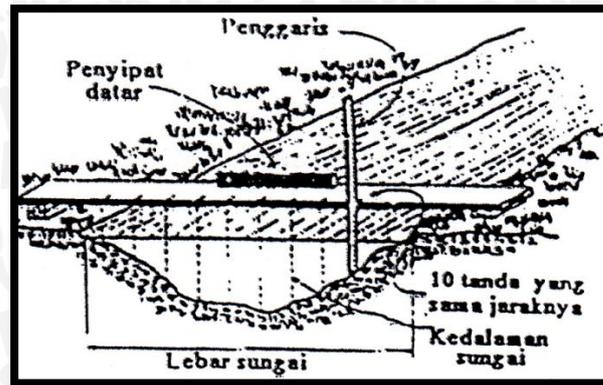
Dengan :

A = Luas penampang melintang (m^2)

w = Lebar sungai (m)

d = Kedalaman rata-rata (m)





Gambar 2.2 Pengukuran Luas Penampang Melintang Sungai
Sumber: Mismail, 1991/1992

Dalam menentukan kecepatan aliran sungai, dipilih aliran sungai yang mendekati lurus dan memiliki luas penampang yang hampir sama untuk jarak yang kira-kira cukup untuk pengukuran. Tentukan titik awal dan titik akhir pada aliran sungai kemudian beri tanda di setiap titik. Letakkan alat ukur apung pada titik awal, biarkan mengalir sampai titik akhir. Pada saat bersamaan catat waktu yang diperlukan alat ukur apung dari titik awal hingga sampai ke titik akhir. Kecepatan aliran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (Mismail, 1991/1992:112):

$$v = \frac{l}{t} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan :

v = Kecepatan aliran air ($m/detik$)

l = Jarak antara titik awal dengan titik akhir (m)

t = Waktu tempuh ($detik$)

Debit air dapat diketahui dengan mengalikan kecepatan aliran air v dengan luas penampang melintang A sesuai dengan persamaan (Mismail, 1991/1992:114):

$$Q = v A \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

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

v = Kecepatan aliran air ($m/detik$)

A = Luas penampang melintang (m^2)

Kecepatan alat ukur apung itu tidak mewakili kecepatan air di semua titik di sungai. Ditepian dan dasar sungai, air mengalir lebih lambat dibandingkan dengan aliran

di tengah atau di dekat permukaan air karena gesekan dengan dasar dan tepian sungai. Oleh karena itu, perlu dikalikan dengan sebuah faktor koreksi (f_k) yang tergantung kepada kekasaran atau kehalusan dasar dan tepian sungai. Faktor koreksi tersebut berkisar antara 0.6 untuk sungai pegunungan yang berbatu-batu sampai 0.86 untuk sungai dengan tepian dan dasar yang licin (Mismail, 1991/1992:112).

3. Metode Bendung (*Weir*)

Merupakan metode yang cukup rumit untuk dilaksanakan, namun cara ini akurat dan dapat digunakan untuk mengukur debit sungai yang dangkal yang terasa menyulitkan jika menggunakan metode apung.

Diawali dengan membuat bendung pengukur yang tegak lurus terhadap aliran sungai dengan bukaan pelimpah berbentuk segi empat di tengah-tengahnya. Perlu diperkirakan besar debit itu sebelum membangun bendung tersebut. Ukuran lebar bukaan (W) minimal tiga kali tingginya dan tepi bawahnya harus benar-benar mendatar. Alas dan tepi samping bukaan harus dimiringkan bersudut sekurang-kurangnya 45^0 , dengan bagian yang tajam terletak di hulu. Bendung tersebut dapat dibuat dari kayu dengan semua tepi dan alasnya dilapisi dengan tanah liat dan karung pasir. Penduga kedalaman dapat dilakukan dengan memasang tongkat meteran di arah hulu sekurang-kurangnya 2 meter dari bendung. Titik nol penduga dibuat sama dengan tinggi alas bukaan. Kedalaman air (d) dihitung dari alas bukaan bendung sampai dengan tinggi muka air. Selanjutnya debit air yang melalui bendung dapat dihitung dengan persamaan (Mismail, 1991/1992:115):

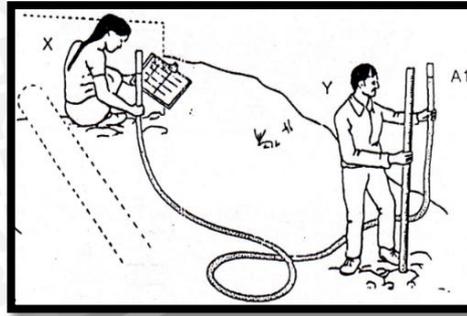
$$Q = 0,544 W d \sqrt{(2gd)} \text{ m}^3/\text{detik} \dots\dots\dots(2.17)$$

2.7 Tinggi Jatuh Air (*Head*)

Tinggi jatuh air (*head*) merupakan tinggi jatuhnya air dari permukaan sungai sampai ke turbin. *Head* bersih dapat dihitung dengan cara mengurangi tinggi jatuhnya kotor yang telah diperkirakan dengan kehilangan energi yang ditunjukkan dalam satuan meter. Kehilangan energi ini terjadi disebabkan karena timbulnya gesekan dan turbulensi (Mismail, 1991/1992).

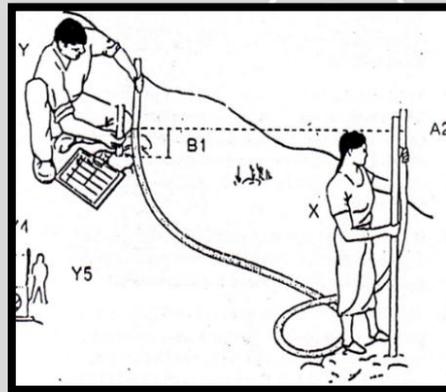
Metode Water-Filled Tube merupakan metode yang digunakan untuk mengukur tinggi jatuh air untuk tempat dengan ketinggian yang rendah. Peralatan yang digunakan adalah selang, air, meteran, batang kayu sebagai penanda dan alat tulis. Cara melakukan pengukuran beda ketinggian dengan menggunakan metode ini adalah sebagai berikut:

1. Pengamat Y mengukur ketinggian A1 pada tempat yang sudah ditentukan.



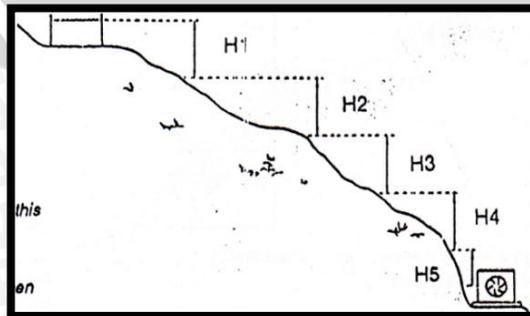
Gambar 2.3 Metode Pengukuran Water-Filled Tube-1
Sumber: Harvey,1993: 45

2. Pengamat Y tetap pada tempat yang sebelumnya dan mengukur ketinggian B1. Sedangkan pengamat X turun pada tempat yang sudah ditentukan kedua dan mengukur ketinggian A2.



Gambar 2.4 Metode Pengukuran Water-Filled Tube-2
Sumber: Harvey,1993: 45

3. Ulangi langkah-langkah diatas sampai menuju titik pembungan air.
4. Jumlahkan ketinggian yang sudah diukur mulai dari titik atas yang sudah ditentukan hingga titik bawah pembuangan air.
5. Head = $H1 + H2 + H3 + H4 + H5$



Gambar 2.5 Metode Pengukuran Water-Filled Tube-3
Sumber: Harvey,1993: 45

2.8 Turbin Air

Turbin air adalah turbin yang menggunakan air sebagai fluida kerja. Turbin air berfungsi untuk merubah atau mengkonversi energi potensial dari tinggi jatuh air (*head*) yang dimiliki oleh air ke bentuk energi mekanik pada poros turbin. Sebelum diubah menjadi energi mekanik pada turbin, energi potensial yang dimiliki oleh air terlebih dahulu dikonversi menjadi energi kinetik. (Pudjanarsa,2006:116).

Klasifikasi turbin air yang utama yaitu berdasarkan cara turbin merubah energi potensial air menjadi energi kinetik, berdasarkan klasifikasi ini turbin air dibedakan menjadi turbin impuls dan turbin reaksi (Luknanto,2007).

1. Turbin Impuls

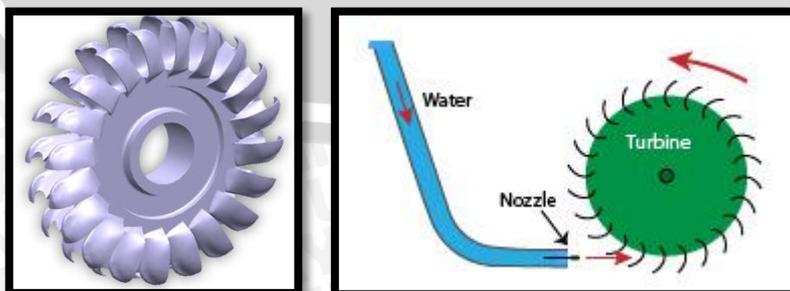
Turbin impuls adalah turbin air yang cara bekerjanya merubah seluruh energi air (yang terdiri dari energi potensial + tekanan + kecepatan) yang tersedia menjadi energi kinetik untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi kinetik. Yang termasuk jenis turbin impuls adalah turbin pelton dan turbin cross flow.

2. Turbin Reaksi

Turbin reaksi adalah turbin air yang cara kerjanya dengan merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi kinetik. Yang termasuk jenis turbin reaksi adalah turbin francis dan turbin propeller.

2.8.1 Turbin Pelton

Turbin ini ditemukan pada tahun 1870 oleh Lester Allan Pelton, termasuk golongan turbin impuls karena selama air mengalir di sepanjang sudu-sudu turbin tidak terjadi penurunan tekanan, sedangkan perubahan seluruhnya terjadi pada bagian pengarah pancaran air (*nozzle*). Turbin ini memiliki sudu-sudu (*runner*) yang terdiri dari poros 1 tangki piringan dan beberapa mangkok. Turbin pelton terutama digunakan untuk potensi hidro yang memiliki tinggi jatuh yang tinggi dengan aliran kecil (Isabima,2011).

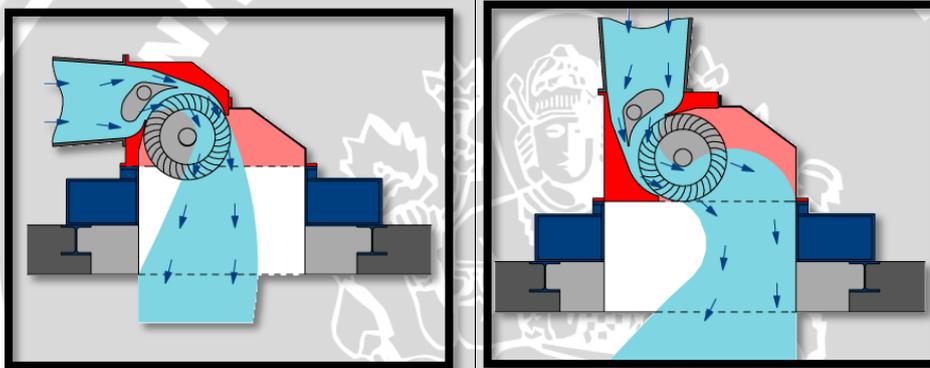


Gambar 2.6 Turbin Pelton
sumber : www.flovel.net

2.8.2 Turbin Cross Flow

Turbin *Crossflow* adalah salah satu turbin air dari jenis turbin aksi (*impulse turbine*). Prinsip kerja turbin ini mula-mula ditemukan oleh seorang insinyur Australia yang bernama *A.G.M. Michell* pada tahun 1903. Kemudian turbin ini dikembangkan dan dipatenkan di Jerman Barat oleh *Prof. Donat Banki* sehingga turbin ini diberi nama Turbin *Banki* kadang disebut juga Turbin *Michell-Ossberger* (Haimerl, L.A., 1960).

Turbin *Cross Flow* (Banki) menghasilkan pancaran air yang melebar dan tidak melingkar. Pancaran aliran air bertemu dengan roda turbin dan mengenai bagian sudu melengkung dan terjadilah proses konversi energi. Konstruksi turbin Banki relatif sederhana dan mudah untuk disesuaikan dengan volume air yang tersedia. Selain itu, dengan fleksibilitas pengaturan lebar celah, menyebabkan turbin ini mampu mengantisipasi fluktuasi debit air (Wibawa, 2001:6-10).



Gambar 2.7 Turbin air *cross flow* inlet horisontal (kiri) dan inlet vertikal (kanan)
Sumber : cink-hydro-energy.co

Dimana komponen-komponen turbin *cross flow* :

1. Rumah turbin
Berfungsi untuk mengarahkan aliran masuk sudu pengarah.
2. Alat pengarah
Dapat diatur untuk mengontrol kapasitas aliran yang masuk turbin.
3. Roda jalan atau *Runner*

Pada bagian ini terjadi peralihan energi potensial fluida menjadi energi mekanik. *Runner* turbin dibuat dari beberapa sudu yang dipasang pada sepasang piringan paralel. Besarnya tenaga air yang tersedia dari suatu sumber air bergantung pada besarnya *head* dan debit air. Dalam hubungan dengan *reservoir* air maka *head* adalah beda ketinggian antara muka air pada *reservoir* dengan muka air keluar dari kincir air/turbin air.

4. Bantalan utama (poros turbin)

Pada poros turbin terdapat *runner* dan ditumpu dengan bantalan radial dan bantalan axial.

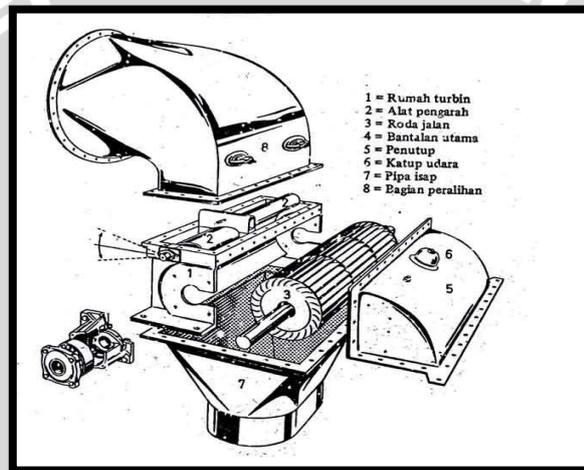
5. Penutup

6. Katup udara

7. Pipa hisap

Berfungsi mengalirkan air yang ke luar turbin ke saluran luar. Turbin *Crossflow* menggunakan *nozzle* persegi panjang yang lebarnya sesuai dengan lebar *runner*. Pancaran air masuk turbin dan mengenai sudu sehingga terjadi konversi energi kinetik menjadi energi mekanis.

8. Bagian peralihan air



Gambar 2.8 Konstruksi turbin *crossflow* (banki)

Sumber: Dietzel, 1988:37

2.9 Daya Turbin Air

Daya turbin air adalah suatu turbin air yang memanfaatkan tinggi jatuh air efektif dan debit air. Berikut ini persamaan daya turbin air (Antara, 2015:17):

$$WHP (Watt) = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \dots\dots\dots(2.29)$$

dimana:

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

ρ = Massa jenis air (= $1000 \text{ kg}/m^3$)

g = Gravitasi bumi (= $9.8 \text{ m}/detik^2$)

h_n = Tinggi jatuh air efektif (m)

Daya poros adalah daya yang dihasilkan oleh poros turbin. Daya poros didapatkan dengan persamaan:



$$BHP \text{ (kWatt)} = \frac{P_{out \text{ generator}}}{\eta_g \cdot \eta_{tm}} \dots\dots\dots (2.30)$$

Menurut Antara (2015:17), Efisiensi turbin merupakan perbandingan antara daya poros dengan daya air. Besarnya efisiensi dapat dihitung dari persamaan:

$$\eta = \frac{BHP}{WHP} \times 100\% \dots\dots\dots (2.31)$$

Tabel 2.1 Spesifikasi Teknis Turbin

Spesifikasi	Pelton	Francis	Kaplan	Crossflow
Ketinggian jatuh air (m)	20 – 500	8 – 150	2 – 50	2 – 120
Debit air (m^3/s)	0.002 – 2	Maks. 10	Maks. 20	0.02 – 1
Kec. Putaran roda turbin (rpm)	12 – 30	80 – 400	340 – 1000	20 – 80
Daya pembangkitan (kW)	10 – 5000	± 3000	± 3000	5 – 200
Efisiensi maksimum (%)	90	90	90	60 – 80

Sumber: Wibawa 2001

Apabila besar tenaga kuda P suatu turbin diketahui, maka efisiensi suatu turbin bisa didapatkan dengan persamaan berikut (Dandekar,1991:396):

$$P = \frac{w \cdot Q \cdot h}{75} \eta_0 \dots\dots\dots (2.32)$$

Dimana:

P = tenaga kuda (tk)

w = satuan berat (1000 kg/m^3)

Q = debit air ($m^3/detik$)

h = tinggi jatuh efektif (m)

η_0 = efisiensi turbin

2.10 Sistem Transmisi Mekanik

Menurut Dharmayana (2011:30), Pada umumnya pembangkit listrik skala kecil, turbin atau kincir yang berputar akan dikopelkan langsung dengan generator. Untuk pengkopelan ke generator terlebih dahulu harus dipertimbangkan kecepatan putar antara turbin atau kincir dengan generator. Apabila kecepatan putar turbin atau kincir berbeda dengan kecepatan putar generator, maka dalam pengkopelannya dapat digunakan sistem transmisi mekanik. Pada umumnya efisiensi sistem transmisi mekanik berkisar 85%.

1. Puli (*Pulley*)

Dengan sistem transmisi puli, maka kecepatan putar generator dapat diatur pada nilai tertentu berdasarkan kecepatan putar turbin atau kincir. Dengan mengubah

perbandingan jari-jari puli sistem transmisi, maka akan didapatkan nilai kecepatan putar yang berbeda-beda tergantung nilai perbandingannya.

Pada sistem transmisi puli (*pulley*) dan sabuk (*belt*) berlaku (Hagendoorn, 1989:20):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1} \dots\dots\dots(2.33)$$

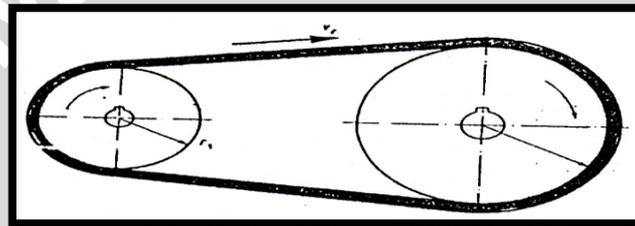
Dimana:

n_1 = kecepatan putar puli 1 (rpm)

n_2 = kecepatan putar puli 2 (rpm)

r_1 = jari – jari puli 1 (m)

r_2 = jari – jari puli 2 (m)

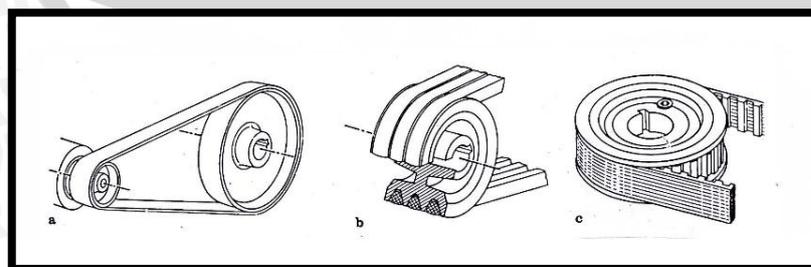


Gambar 2.9 Sistem Transmisi Puli beserta Sabuk
Sumber : Hagendoorn, 1989:23

2. Sabuk Transmisi (*Belt*)

Jarak yang jauh antara dua buah poros sering tidak memungkinkan transmisi langsung dengan menggunakan roda gigi. Dalam hal demikian, cara transmisi putaran daya yang lain dapat diterapkan, dimana sebuah sabuk luwes atau rantai dibelitkan sekeliling puli atau sproket pada poros.

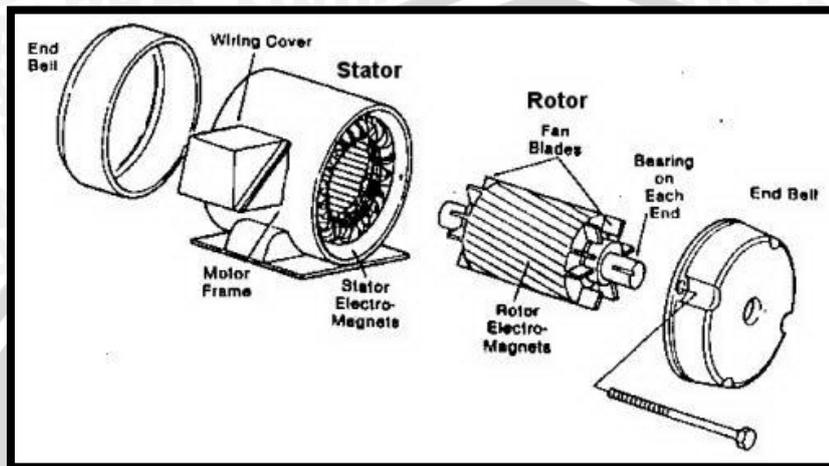
Adanya slip antara puli dan sabuk, sabuk tidak dapat meneruskan putaran dengan perbandingan yang tepat. Slip yang terjadi antara 1% - 2% (Hagendoorn, 1989 : 47).



Gambar 2.10 Transmisi sabuk a) Sabuk Rata; b) Sabuk V; c) Sabuk Gigi.
Sumber : Nieman, 1992:11

2.11 Generator

Generator adalah suatu alat konversi energi yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Komponen utama dari generator adalah rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang berputar, yang dikopel dengan poros turbin atau kincir sebagai tenaga putarnya. Stator merupakan bagian generator yang tidak bergerak. Stator akan menghasilkan tegangan apabila rotor diberi penguatan atau magnetisasi.



Gambar 2.11 Bagian-Bagian Generator
Sumber : elektronika-dasar.web.id

Generator arus bolak balik merupakan alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak balik melalui proses induksi elektromagnetik. Generator arus bolak balik sering disebut juga sebagai alternator atau generator AC ataupun generator sinkron. Generator arus bolak balik dibagi menjadi dua jenis yaitu :

- Generator arus bolak balik 1 fasa
- Generator arus bolak balik 3 fasa

2.11.1 Generator untuk PLTPH

Mesin induksi merupakan opsi yang menarik untuk PLTA skala kecil dengan daya lebih dari 1 kW karena harganya murah dan dapat diandalkan, meskipun efisiensinya lebih rendah dibandingkan dengan mesin sinkron magnet permanen yang setara dan perlu dijalankan pada kecepatan yang lebih atau kurang tetap. Ketika mesin induksi yang digunakan sebagai generator, maka kapasitor diperlukan untuk operasi *off-grid*.

Untuk sistem pembangkit listrik tenaga pikohidro skala terkecil (dibawah 1 kW), mesin sinkron magnet permanen lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan mesin induksi dalam hal biaya dan kinerja. Hal ini dibuktikan dalam praktek, sistem

pembangkit listrik tenaga pikohidro terkecil menggunakan generator radial fluks magnet permanen (RFPM) (Howey, 2009).

2.11.2 Kapasitas Generator

Kapasitas generator dinilai dalam kilovoltampere (kVA) dan biasanya dalam kilowatt (kW) pada faktor daya tertentu. Data lain tercantum pada plat nama (*name plate*) generator termasuk nilai tegangan, arus, frekuensi, jumlah fasa, arus penguatan, dan temperatur kerja. Pada sistem satu fasa, besarnya daya listrik yang disalurkan dapat dihitung dengan persamaan: (Mismail, 1984:258)

$$P = V_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi \text{ watt} \dots \dots \dots (2.34)$$

$$S = V_p \cdot I_p^* \text{ VA} \dots \dots \dots (2.35)$$

dengan :

P = daya satu fasa (Watt)

V_p = tegangan fasa (V)

I_p = arus fasa (A)

$\cos \varphi$ = faktor daya

S = daya kompleks (VA)

2.11.3 Efisiensi Generator

Efisiensi generator dapat ditentukan dengan pengukuran langsung masukan dan keluaran atau dengan perhitungan setelah rugi-rugi ditentukan. Efisiensi generator umumnya berkisar 85% - 90% (Mismail, 1991/1992:177).

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

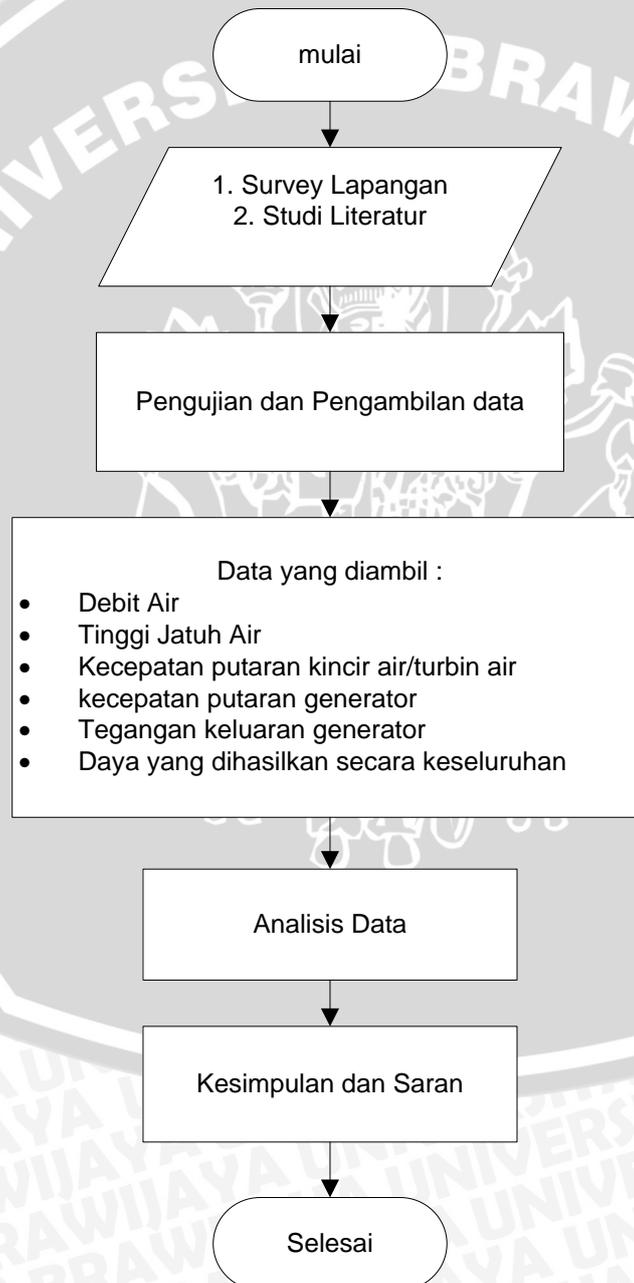
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penulisan

Diagram alir metode penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian

Penelitian awal tentang pembangkit listrik tenaga pikohidro ini dilakukan di sungai Besuk Semut Desa Sumberwuluh Kecamatan Candipuro Kabupaten Lumajang Jawa Timur dengan rentang waktu antara bulan Oktober 2014 hingga Desember 2014.

3.2 Survei

Penelitian awal tentang pembangkit listrik tenaga pikohidro ini dilakukan di sungai Besuk Semut Desa Sumberwuluh Kecamatan Candipuro Kabupaten Lumajang Jawa Timur dengan rentang waktu antara bulan Oktober 2014 hingga Desember 2014.

3.3 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan dengan mempelajari buku-buku dan literatur yang menunjang dalam penyusunan skripsi, yaitu tentang:

- Teknologi pembangkit listrik tenaga pikohidro (PLTP).
- Kelayakan hidrologi (Debit air, tinggi jatuh air).
- Kelayakan sipil (bangunan penampung air dan pengalir air).
- Kelayakan mekanikal (kincir air, turbin air dan transmisi mekanik).
- Kelayakan elektrik (generator dan energi listrik yang dihasilkan dari PLTP).
- Metode – metode pengukuran yang diperlukan.

3.4 Pengujian dan Pengambilan Data

Data-data yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah dari data primer. Peralatan yang digunakan untuk memperoleh data primer adalah :

1. Modul pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan kincir air
2. Modul pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air
3. Generator
4. Tachometer
5. Multimeter

Spesifikasi dari pembangkit listrik tenaga pikohidro yang digunakan untuk memperoleh data primer tertera pada bab hasil dan pembahasan.

3.4.1 Pengujian

1. Memasang pembangkit listrik tenaga pikohidro pada saluran irigasi yang telah dikondisikan.
2. Menguji pembangkit listrik tenaga pikohidro pada saluran irigasi yang telah dikondisikan untuk mendapatkan nilai putaran kincir dan turbin air yang maksimal.

3. Yang dikondisikan pada saluran irigasi adalah debit air dan tinggi jatuh air dengan metode *trial and error*.
4. Untuk mendapatkan debit air yang diinginkan, dilakukan dengan cara menambah atau mengurangi luas penampang dari saluran irigasi, serta dengan membendung atau membuka saluran irigasi.
5. Melakukan pemasangan pipa pada ujung saluran irigasi yang mengarah tepat pada sudu kincir air dan turbin, posisi pipa diatur untuk mendapatkan tinggi jatuh air yang diinginkan.
6. Setelah didapatkan nilai putaran kincir air dan turbin air yang maksimal, kincir air atau turbin air dikopel dengan *pulley* yang kemudian dikopel ke generator.
7. Mengukur nilai kecepatan putaran generator dan tegangan yang dihasilkan oleh generator.
8. Setelah mendapatkan nilai- nilai yang diharapkan, generator dihubungkan ke beban penerangan berupa lampu.
9. Setelah terhubung ke beban, dilakukan pengukuran arus dan daya yang dihasilkan.
10. Menguji berapa daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh setiap PLTPH.
11. Membandingkan daya yang dihasilkan dari PLTP yang menggunakan kincir air dengan yang menggunakan turbin air pada posisi tinggi jatuh dan debit air yang sama.
12. Semua data yang didapatkan seperti kecepatan putaran kincir, kecepatan putaran generator, tegangan, arus, daya, debit air, dan tinggi jatuh dicatat untuk dilakukan analisis perhitungan.

3.4.2 Pengambilan Data

Data yang digunakan merupakan data primer yaitu data yang diperoleh dari hasil pengukuran, perhitungan, dan pengamatan langsung di lokasi penelitian. Adapun data primer yang digunakan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut.

- Tegangan Generator

Tegangan generator diperlukan untuk mengetahui daya keluaran dari generator. Tegangan yang diukur adalah tegangan terminal generator. Pengukuran tegangan generator dilakukan dengan menggunakan multimeter.

- Arus

Arus yang diukur adalah arus dari generator yang mengalir ke beban dengan menggunakan multimeter. Beban yang digunakan yaitu beban penerangan, yaitu lampu.

- Kecepatan Putaran

Kecepatan putaran dari turbin air, kincir air, *pulley*, dan generator diperlukan untuk mendukung keakuratan perhitungan data. Pengambilan data kecepatan putaran dilakukan dengan menggunakan tachometer.

- Debit air

Untuk mendapatkan data debit air pada saat pengujian, pada skripsi ini digunakan metode tampung dan metode apung. Data debit air yang diperoleh pada saat pengujian akan digunakan untuk analisis data selanjutnya.

- Tinggi Jatuh Air (*head*)

Untuk mendapatkan data ketinggian jatuh air, digunakan metode water-filled tube di mana pertama kali yang diukur adalah kedalaman dari sungai bagian atas yang merupakan tinggi dari air permukaan atas. Kemudian mengukur ketinggian tempat yang sudah ditentukan dengan menggunakan selang yang sudah diisi air (*waterpass*) yang diletakkan pada dasar sungai bagian atas dan tempat yang sudah ditentukan. Pengukuran dilakukan sampai pada titik air permukaan bawah dan kemudian data ketinggian hasil pengukuran dijumlahkan untuk menentukan ketinggian jatuh air (*head*).

3.5 Analisis Data

Setelah semua data yang diperlukan terkumpul maka dilakukan analisis data dan pembahasan dengan mengacu pada rumusan masalah.

1. Menghitung secara teori potensi daya yang dihasilkan dengan menggunakan debit air (Q) dan tinggi jatuh air (*head*) yang didapatkan dari hasil pengujian dengan menggunakan persamaan 2.8 dan 2.9 :

$$P_{hidrolik} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \text{ watt}$$

$$P_{hidrolik} = 9,8 \cdot Q \cdot H \text{ watt}$$

2. Membandingkan hasil pengujian alat secara langsung dengan hasil perhitungan secara teori potensi daya, kemudian dari kedua data tersebut dianalisis. Analisis

data yang dilakukan yaitu analisis daya terbangkitkan, debit air, dan tinggi jatuh air.

3. Setelah mendapatkan data-data yang sudah dianalisis dan layak untuk diolah selanjutnya dibuat kesimpulan.

3.6 Penarikan Kesimpulan dan Saran

1. Didapatkan nilai tinggi jatuh dan debit air yang diperlukan untuk menggerakkan kincir air ataupun turbin air sehingga dihasilkan daya terpasang yang mencapai 1 kW.
2. Didapatkan hasil analisis dan perbandingan daya yang dihasilkan antara penggunaan pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air jenis pelton dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air jenis *cross flow*.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembangkit listrik tenaga pikohidro merupakan solusi bagi warga desa terpencil yang tidak sepenuhnya mendapatkan pasokan listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) namun memiliki sumber daya air berupa sungai dan saluran irigasi.

Salah satu desa yang memenuhi kondisi tersebut adalah Desa Sumpersuko, Kecamatan Dampit, Kabupaten Malang dan Desa Sumberwuluh, Kecamatan Pronojiwo, Kabupaten Lumajang. Aliran sungai dan saluran irigasi yang terdapat di Desa tersebut dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga pikohidro maupun mikrohidro.

4.1 Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro yang Digunakan

A. Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton.



Gambar 4.1 PLTPH untuk Pengujian yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton

Spesifikasi PLTPH :

- Turbin air :
 - Jenis : Pelton
 - Jumlah sudu : 16

- Ukuran turbin air :

Tabel 4.1 Spesifikasi Turbin Air Jenis Pelton

Bagian	Ukuran (cm)
Diameter luar (D_1)	77
Diameter dalam (D_2)	41
Lebar (l)	23
Jarak antar sudu bagian luar (t_1)	16
Jarak antar sudu bagian dalam (t_2)	8

- o Sistem transmisi mekanik :
 - Pulley dari *velg* sepeda dengan ukuran diameter 60 cm
 - Pulley dari *velg* sepeda dengan ukuran diameter 65 cm
 - Pulley piringan dengan ukuran diameter 18 cm
 - 2 buah *V-belt*
 - Pulley pada generator ukuran 8 cm
 - Perbandingan pulley yang digunakan pada PLTPH ini yaitu $1 : 3 = 1 : 8$



Gambar 4.2 Ilustrasi transmisi mekanik PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton

- o Generator :
 - Generator arus bolak balik 1 fasa.
 - Selanjutnya generator pada gambar 4.3 disebut dengan generator A



Gambar 4.3 Generator buatan Pak Andum untuk PLTPH turbin air jenis pelton

B. Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*



Gambar 4.4 PLTPH yang menggunakan turbin air *cross flow* untuk pengujian

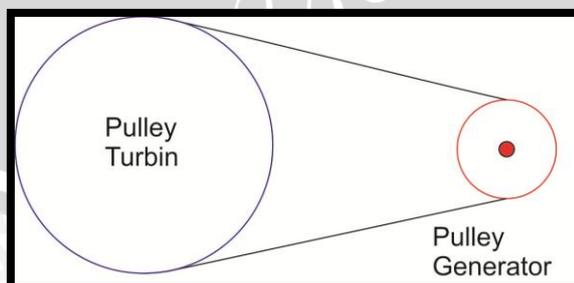
Spesifikasi ukuran :

- Turbin air :
 - Jumlah sudu runner : 16
 - Model Inlet : Horisontal

Tabel 4.2 Spesifikasi Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Bagian	Ukuran (cm)
Diameter luar (D_1)	21
Diameter dalam (D_2)	6
Lebar (l)	17
Jarak antar sudu (t)	5
α sudut antar sudu	15°

- Sistem transmisi mekanik :
 - *Pulley* dengan ukuran diameter 30 cm
 - *V-belt*
 - Perbandingan *Pulley* yang digunakan yaitu 1 : 3



Gambar 4.5 Ilustrasi transmisi mekanik PLTPH yang menggunakan turbin air jenis *cross flow*

- Generator :
 - Generator arus bolak balik 1 fasa.

Selanjutnya generator pada gambar 4.4 disebut dengan generator B.



Gambar 4.6 Generator Buatan Pak Andum Untuk Pltph Turbin Air Jenis *Cross Flow*

4.2 Daya yang Dibangkitkan

Daya yang akan dicoba untuk dibangkitkan oleh kedua PLTPH yang digunakan dalam skripsi ini yaitu 1 kilowatt. Dimana daya 1 kilowatt tersebut didapatkan dengan menggunakan parameter debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H) yang diubah-ubah sesuai persamaan daya untuk PLTP pada persamaan (2.9):

$$P_h = 9,8 \cdot Q \cdot H \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot P_h \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = \eta_{TM} \cdot \eta_G \cdot P_{tb} \quad \text{kW}$$

4.3 Pengujian Pertama

4.3.1 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton

Pengujian pertama, dilakukan di Desa Slorok, Kecamatan Kromengan, Kabupaten Malang. Menggunakan Pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan kincir air. Pengujian PLTP ini menggunakan generator buatan Pak Andum sendiri. Setelah dilakukan pengujian didapatkan data seperti tabel 4.3 dan tabel 4.4:

Tabel 4.3 Data pengukuran sungai 1

Data Pengukuran di Lapangan	
Lebar sungai (w)	0,45 m
Kedalaman rata-rata (d)	10,44 cm
Jarak titik pengukuran A ke B (l)	2,3 m
Waktu tempuh benda dari titik A ke B (t)	4,5 s

Dengan menggunakan persamaan (2.14) akan didapatkan nilai dari luas penampang (A) :

$$A = w \cdot d$$

$$A = 0,45 \times 0,1044$$

$$A = 0,0470 \text{ m}^2$$

Dengan menggunakan persamaan (2.15) akan didapatkan nilai dari kecepatan aliran air (v) :

$$v = \frac{l}{t}$$

$$v = \frac{2,3}{4,5}$$

$$v = 0,51111 \text{ m/s}$$

Sehingga akan diketahui nilai debit air (Q) dengan menggunakan persamaan (2.16) :

$$Q = v \cdot A$$

$$Q = 0,024 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabel 4.4 Data Pengujian Pertama PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton

Kecepatan Putaran Turbin Air (rpm)	Kecepatan Putaran Generator A (rpm)	Tegangan Generator A (V)	Kecepatan putaran generator B (rpm)	Tegangan Generator B (V)	Tinggi Jatuh yang diperlukan (m)	Debit air (liter/detik)
32	790	60	650	40	0,75	24
36	875	75	745	55	1	24
70	1742	122	1535	100	2	24
64	1635	110	1380	82	3	24

Menurut data yang didapatkan dari pengujian, penulis berpendapat bahwa generator buatan Pak Andum memiliki putaran nominal 2200 rpm. Namun generator ini pada saat digunakan tidak memenuhi standar, karena saat putaran generator mencapai 1742 rpm, tegangan yang dihasilkan generator hanya 122 volt. Seharusnya dengan kecepatan putaran itu dapat dihasilkan tegangan yang berkisar 170-180 volt. Untuk pencapaian berapa daya yang dihasilkan oleh PLTPH ini masih belum bisa didapatkan, karena didapatkan masalah dari generator yang tidak memenuhi standar.

Berikut perhitungan daya yang dapat dibangkitkan dengan menggunakan salah satu data data debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H) pada Tabel 4.3. Dengan menggunakan persamaan (2.9) :

$$P_h = 9,8 \cdot Q \cdot H \quad \text{kW}$$

$$P_h = 9,8 \cdot 0,024 \cdot 0,75 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 0,17658 \quad \text{kW}$$

Untuk turbin air jenis pelton, nilai efisiensinya maksimum berkisar 90% (Wibawa, 2001). Dalam hitungan ini penulis menggunakan nilai efisiensi 60%, dengan menggunakan persamaan 2.10

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot P_h \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,6 \cdot 0,1768 \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,105948 \quad \text{kW}$$

Efisiensi generator pada umumnya adalah 85%-90% (Mismail, 1991), Pada perhitungan ini nilai efisiensi generator yang digunakan adalah 90% dengan beberapa pertimbangan adanya rugi-rugi yang terjadi pada generator.

Antara kincir air dan generator terdapat perangkat sistem transmisi mekanik yang digunakan. Sistem transmisi mekanik yang digunakan adalah *pulley* berupa roda dan sabuk (*belt*). Untuk efisiensi transmisi mekanik berupa *pulley* dan sabuk, nilainya sebesar 85% (Dharmayana, 2011). Maka dengan persamaan 2.11 daya bersih yang dihasilkan :

$$P_{out} = \eta_{TM} \cdot \eta_G \cdot P_{tb} \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,105948 \text{ kW}$$

$$P_{out} = 0,08105 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 81,05 \quad \text{W}$$

Berikut disajikan data hasil perhitungan secara teori dalam bentuk tabel dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti sebelumnya yang ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data perhitungan berdasarkan data pada tabel 4.4

Tinggi Jatuh Air (m)	Debit Air (m ³ /s)	Daya Hidrolik (kW)	Daya Mekanik (kW)	Daya Bersih (W)
0,75	0,024	0,17658	0,105948	81,050
1	0,024	0,23544	0,141264	108,067
2	0,024	0,47088	0,282528	216,234
3	0,024	0,70632	0,423792	324,201

4.3.2 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Pengujian selanjutnya, menggunakan pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air jenis *cross flow*. Setelah Pengujian, didapatkan data seperti tabel 4.3 dan 4.6 :

Tabel 4.6 Data Pengujian Pertama PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Kecepatan Putaran Turbin Air (rpm)	Kecepatan Putaran Generator A (rpm)	Tegangan Generator A (V)	Kecepatan putaran generator B (rpm)	Tegangan Generator B (V)	Tinggi Jatuh yang diperlukan (m)	Debit air (liter/detik)
250	300	22	-	-	0,75	24
269	330	25	-	-	0,85	24
282	351	30	-	-	1	24

Pada saat pengujian, generator B tidak dapat berputar dikarenakan generatornya terlalu berat untuk berputar. Sehingga data kecepatan turbin yang diambil yaitu kecepatan putaran turbin saat tidak dikopel dengan generator.

Berikut perhitungan daya yang dapat dibangkitkan secara teori melalui persamaan 2.9 dengan menggunakan data debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H) yang didapatkan dalam pengujian pada tabel 4.4.

$$P_h = 9,8 \cdot Q \cdot H \quad \text{kW}$$

$$P_h = 9,8 \cdot 0,024 \cdot 0,85 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 0,200124 \quad \text{kW}$$

Untuk turbin air jenis *cross flow*, nilai efisiensinya berkisar antara 60%-80% (Wibawa, 2001). Dalam perhitungan ini digunakan nilai efisiensi 60% dengan menggunakan persamaan 2.10.

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot P_h \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,6 \cdot 0,200124 \text{ kW}$$

$$P_{tb} = 0,120074 \quad \text{kW}$$

Efisiensi generator pada umumnya adalah 85%-90%, pada perhitungan ini digunakan efisiensi generator 90%. Untuk efisiensi transmisi mekanik berupa pulley dan sabuk, nilainya sebesar 85%. Maka daya bersih yang dihasilkan melalui persamaan 2.11.

$$P_{out} = \eta_{TM} \cdot \eta_G \cdot P_{tb} \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,120074 \text{ kW}$$

$$P_{out} = 0,091857 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 91,857 \quad \text{W}$$

Berikut disajikan data perhitungan secara teori dalam bentuk tabel pada tabel 4.7 dengan perhitungan yang sama seperti sebelumnya.

Tabel 4.7 Data perhitungan berdasarkan data pada tabel 4.5

Tinggi Jatuh Air (m)	Debit Air (m ³ /s)	Daya Hidrolik (kW)	Daya Mekanik (kW)	Daya Bersih (W)
0,7	0,024	0,164808	0,098885	75,647
0,85	0,024	0,200124	0,120074	91,857
1	0,024	0,23544	0,141264	108,067

4.3.3 Hasil Analisis dari Pengujian Pertama

Dari hasil pengujian pertama dan kedua, penulis mendapatkan kesimpulan sementara yaitu :

- Generator buatan Pak Andum merupakan generator AC 1 fasa, 110 V, 50 Hz, 1500 rpm
- Pulley yang digunakan tidak memenuhi standar, yaitu dari velg bekas roda sepeda dan pulley buatan sendiri yang tidak rata permukaannya. Sehingga slip yang dihasilkan besar
- V-belt yang digunakan tidak memenuhi standar, karena menggunakan karet dari ban bekas.

Dari beberapa masalah tersebut, akhirnya penulis mengganti beberapa peralatan yang digunakan dengan yang baru. Di antaranya yaitu :

- Generator buatan Pak Andum diganti dengan Generator AC 1 fasa, 2 kVA, 220 V, 50 Hz, 2200 rpm.
- Pulley buatan Pak Andum untuk generator diganti dengan Pulley ukuran 10 cm
- V-Belt Pulley dari karet ban bekas diganti dengan V-Belt ukuran B98 untuk yang menggunakan kincir air dan V-belt ukuran A56 untuk yang menggunakan turbin air.



Gambar 4.7 Generator dan Pulley Baru untuk Pengujian PLTP

4.4 Pengujian Kedua

4.4.1 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air jenis Pelton

Kali ini pengujian dilakukan dengan menggunakan generator berkapasitas 2 kVA yang pada as generator dipasang Pulley ukuran 10 cm. Sedangkan peralatan lainnya masih tetap seperti pengujian sebelumnya. Untuk nilai perbandingan pulley yang digunakan menjadi $1 : 3,33 = 1 : 8$ dengan ilustrasi pada gambar 4.2, sehingga didapatkan data seperti pada tabel 4.8 dan 4.9:

Tabel 4.8 Data pengukuran sungai 2

Data Pengukuran di Lapangan	
Lebar sungai (w)	0,45 m
Kedalaman rata-rata (d)	10,50 cm
Jarak titik pengukuran A ke B (l)	2,3 m
Waktu tempuh benda dari titik A ke B (t)	4,35 s

Dengan menggunakan persamaan (2.14) akan didapatkan nilai dari luas penampang (A):

$$A = w \cdot d$$

$$A = 0,45 \times 0,1050$$

$$A = 0,0473 \text{ m}^2$$

Dengan menggunakan persamaan (2.15) akan didapatkan nilai dari kecepatan aliran air (v):

$$v = \frac{l}{t}$$

$$v = \frac{2,3}{4,35}$$

$$v = 0,5285 \text{ m/s}$$

Sehingga akan diketahui nilai debit air (Q) dengan menggunakan persamaan (2.16):

$$Q = v \cdot A$$

$$Q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabel 4.9 Data Pengujian kedua PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton

Kecepatan Putaran Turbin Air (rpm)	Kecepatan Putaran Generator (rpm)	Tegangan Generator (V)	Tinggi Jatuh yang diperlukan (m)	Debit air (liter/detik)
49	1226	132	1	25
63	1524	165	2	25
77	1892	192	3	25

Dari data yang didapatkan, penulis masih belum bisa mendapatkan tegangan nominal generator 220 V, jika tinggi jatuh air mencapai 4 m, tegangan 220 V bisa

didapatkan. Akan tetapi karena lokasi dari tempat penelitian yang tidak mendukung sehingga data tinggi jatuh air yang digunakan hanya sampai 3 m saja.



Gambar 4.8 Lokasi Penelitian dengan tinggi jatuh air maksimal 3 meter

4.4.2 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Kali ini pengujian dilakukan dengan menggunakan generator berkapasitas 2 kVA yang pada as generator dipasang Pulley ukuran 10 cm. Sedangkan peralatan lainnya masih tetap seperti pengujian sebelumnya pada PLTPH yang menggunakan turbin air. Sehingga nilai perbandinga *pulley*nya 1 : 3 seperti ilustrasi pada gambar 4.5. Data yang didapat saat pengujian ditunjukkan pada tabel 4.8 dan 4.10:

Tabel 4.10 Data Pengujian Kedua PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Kecepatan Putaran Turbin Air (rpm)	Kecepatan Putaran Generator (rpm)	Tinggi Jatuh yang diperlukan (m)	Debit Air (liter/detik)	Tegangan yang dihasilkan Generator (V)
141	420	1	25	63
164	486	2	25	75
186	610	3	25	85

Pada pengujian kali ini tetap saja didapatkan kecepatan putaran generator dan tegangan generator yang rendah. Banyak sekali rugi – rugi energi yang terjadi pada corong masuk ke turbin, air yang masuk bertumbukan dengan air yang keluar hal ini karena ketidaksesuaian antara ukuran corong dengan debit air yang masuk.



Gambar 4.9. Air yang Masuk ke Corong Turbin Air Jenis Cross Flow

Berikut perhitungan daya yang dapat dibangkitkan secara teori melalui persamaan 2.9 dengan menggunakan data debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H) yang didapatkan dalam pengujian kedua.

$$P_h = 9,81 \cdot Q \cdot H \quad \text{kW}$$

$$P_h = 9,81 \cdot 0,025 \cdot 1 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 0,24525 \quad \text{kW}$$

Untuk turbin air jenis pelton efisiensi turbin air maksimum berkisar 90% (Wibawa, 2001). Untuk turbin air jenis *crossflow*, efisiensi turbin berkisar antara 60%-80% (Wibawa, 2001). Dalam perhitungan ini digunakan efisiensi 60%, dengan menggunakan persamaan 2.10

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot P_h \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,6 \cdot 0,24525 \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,14715 \quad \text{kW}$$

Efisiensi generator pada umumnya adalah 85%-90% (Mismail, 1991). Pada perhitungan ini digunakan efisiensi generator 90%. Untuk efisiensi transmisi mekanik berupa *pulley* dan sabuk, nilainya sebesar 85% (Dharmayana, 2011). Maka daya bersih yang dihasilkan melalui persamaan 2.11 adalah :

$$P_{out} = \eta_{TM} \cdot \eta_G \cdot P_{tb} \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,14714 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,11257 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 112,569 \quad \text{W}$$

Berikut disajikan data perhitungan secara teori dalam bentuk tabel yang ditunjukkan pada Tabel 4.11 dengan perhitungan yang sama seperti sebelumnya.

Tabel 4.11 Data Perhitungan Secara Teori berdasarkan Data Pengujian Kedua

Tinggi Jatuh Air (m)	Debit Air (m ³ /s)	Daya Hidrolik (kW)	Daya Mekanik (kW)	Daya Bersih (W)
1	0,025	0,24525	0,14715	112,569
2	0,025	0,4905	0,2943	225,139
3	0,025	0,73575	0,44145	337,709

4.5 Pengujian Ketiga

4.5.1 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton

Pengujian menggunakan pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air jenis pelton. Pengujian dilakukan di Desa Sumpersuko, Kecamatan Dampit, Kabupaten Malang.

Pada as generator dipasang *pulley* dengan diameter 6 cm dengan tujuan mempercepat putaran dari generator. Seperti ilustrasi pada gambar 4.2 nilai perbandingan *pulley* yang digunakan menjadi 1 : 3 = 1 : 10. Setelah dilakukan pengujian didapatkan data seperti pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Data Pengujian Ketiga PLTPH yang Menggunakan Tincir Air Jenis Pelton

Kecepatan Putaran Turbin Air (rpm)	Kecepatan Putaran Generator (rpm)	Tegangan Generator (V)	Tinggi Jatuh yang diperlukan (m)	Debit air (liter/detik)
56	1486	98	1,25	30
109	1504	149	4	30
116	1642	169	4,2	30
157	2242	227	4,2	40
181	2600	245	4,2	50

Berikut perhitungan daya yang dapat dibangkitkan melalui persamaan 2.9 dengan menggunakan salah satu data data debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H) pada tabel 4.8

$$P_h = 9,8 \cdot Q \cdot H \quad \text{kW}$$

$$P_h = 9,8 \cdot 0,030 \cdot 4 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 1,176 \quad \text{kW}$$

Untuk turbin air jenis pelton, nilai efisiensi maksimum berkisar 90% (Wibawa, 2001). Dalam hitungan ini penulis menggunakan nilai efisiensi 60%, dengan menggunakan persamaan 2.10.

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot P_h \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,6 \cdot 1,176 \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,7056 \quad \text{kW}$$

Efisiensi generator pada umumnya adalah 85%-90% (Mismail, 1991), Pada perhitungan ini nilai efisiensi generator yang digunakan adalah 90% dengan beberapa pertimbangan adanya rugi-rugi yang terjadi pada generator.

Antara turbin air dan generator terdapat perangkat sistem transmisi mekanik yang digunakan. Sistem transmisi mekanik yang digunakan adalah *pulley* berupa roda dan sabuk (*belt*). Untuk efisiensi transmisi mekanik berupa *pulley* dan sabuk, nilainya sebesar 85% (Dharmayana, 2011). Maka daya bersih yang dihasilkan melalui persamaan 2.11 :

$$P_{out} = \eta_{TM} \cdot \eta_G \cdot P_{tb} \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,7056 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,53978 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 539,78 \quad \text{W}$$

Berikut disajikan data hasil perhitungan secara teori dalam bentuk tabel yang ditunjukkan dalam Tabel 4.13 dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti sebelumnya

Tabel 4.13 Data Perhitungan Berdasarkan Data pada Tabel 4.12

Tinggi Jatuh Air (m)	Debit Air (m ³ /s)	Daya Hidrolik (kW)	Daya Mekanik (kW)	Daya Bersih (W)
1,25	0,030	0,3675	0,2205	168,68
4	0,030	1,176	0,7056	539,78
4,2	0,030	1,2348	0,74088	566,77
4,2	0,040	1,6464	0,98784	755,69
4,2	0,050	2,058	1,2348	944,62

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.11, daya bersih sekitar 1 kW akan diperoleh pada tinggi jatuh 4,2 m dengan debit air 0,050 m³/s.

4.5.2 Pengujian PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Pengujian dengan pembangkit listrik tenaga pikohidro yang menggunakan turbin air jenis *cross flow*. Pada as generator dipasang *pulley* dengan diameter 8 cm dengan tujuan mempercepat putaran dari generator. Ilustrasi transmisi mekanik ditunjukkan pada gambar 4.5, sehingga nilai perbandingan pulley nya 1 : 3,75.

Pengujian PLTPH ini dilakukan di Desa Sumberwuluh, Pronojiwo, Lumajang. Khusus untuk pengujian ini digunakan generator AC 1 fasa, 3 kVA, 220 V, 50 Hz, 1500 rpm. Setelah dilakukan pengujian didapatkan data seperti pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Data Pengujian Ketiga PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Kecepatan Putaran Turbin Air (rpm)	Kecepatan Putaran Generator (rpm)	Tegangan Generator (V)	Tinggi Jatuh yang diperlukan (m)	Debit air (liter/detik)
470	1600	240	2,5	106
380	1360	195	2,5	63,87
350	1290	180	2	63,87

Berikut perhitungan daya yang dapat dibangkitkan melalui persamaan 2.9 dengan menggunakan data debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H) yang didapatkan dalam pengujian ketiga.

$$P_h = 9,8 \cdot Q \cdot H \quad \text{kW}$$

$$P_h = 9,8 \cdot 0,06387 \cdot 2,5 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 1,5648 \quad \text{kW}$$

Untuk turbin air jenis *crossflow*, efisiensi turbin berkisar antara 60%-80% (Wibawa, 2001). Dalam perhitungan ini digunakan efisiensi 60%, dengan menggunakan persamaan 2.10

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot P_h \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,6 \cdot 1,5648 \quad \text{kW}$$

$$P_{tb} = 0,93889 \quad \text{kW}$$

Efisiensi generator pada umumnya adalah 85%-90% (Mismail, 1991). Pada perhitungan ini digunakan efisiensi generator 90%. Untuk efisiensi transmisi mekanik berupa *pulley* dan sabuk, nilainya sebesar 85% (Dharmayana, 2011). Maka daya bersih yang dihasilkan melalui persamaan 2.11 :

$$P_{out} = \eta_{TM} \cdot \eta_G \cdot P_{tb} \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,93889 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,71825 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 718,25 \quad \text{W}$$

Berikut disajikan data perhitungan secara teori dalam bentuk tabel yang ditunjukkan pada Tabel 4.15 dengan perhitungan yang sama seperti sebelumnya.

Tabel 4.15 Data Perhitungan Berdasarkan Data pada Tabel 4.14

Tinggi Jatuh Air (m)	Debit Air (m ³ /s)	Daya Hidrolik (kW)	Daya Mekanik (kW)	Daya Bersih (W)
2	0,06387	1,2518	0,75111	574,60
2,5	0,06387	1,5648	0,93889	718,25
2,5	0,106	2,5970	1,5582	1192,02

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.13, daya bersih sekitar 1 kW akan diperoleh pada tinggi jatuh 2,5 m dengan debit air 0,106 m³/s. Selanjutnya akan dilakukan pengujian daya yang dihasilkan dengan menggunakan beban.

4.6 Daya yang Dibangkitkan PLTPH saat Pengujian

4.6.1 PLTPH yang menggunakan Turbin Air jenis *Cross Flow*

Data daya yang dihasilkan pada saat pengujian ditunjukkan pada tabel 4.16. Beban yang digunakan berupa beban penerangan lampu dengan kelipatan daya 60 W.

Tabel 4.16 Data Daya yang Dihasilkan PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Cross Flow

Tinggi jatuh air yang diperlukan (m)	Debit air (liter/detik)	Kecepatan putaran turbin air (rpm)	Kecepatan putaran generator (rpm)	Tegangan generator (V)	Arus (A)	Daya (w)
1	25	141	420	63	0,4	60
2	25	164	486	75	0,4	60
3	25	186	610	85	0,5	120
2	63,87	350	1290	180	1,8	780
2,5	63,87	380	1360	195	1,9	900
2,5	106	470	1600	240	2,4	1180

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 4.14, daya bersih 1,180 kW dapat diperoleh pada tinggi jatuh 2,5 m dengan debit air 106 liter/detik (0,106 m³/s).

4.6.2 PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton

Data daya yang dihasilkan dalam pengujian PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton ditunjukkan pada tabel 4.17. Beban yang digunakan berupa beban penerangan lampu dengan kelipatan daya 60 W.

Tabel 4.17 Data Daya yang Dihasilkan PLTP yang Menggunakan Turbin Air Jenis Pelton

Tinggi Jatuh Air (m)	Debit air (liter/detik)	Kecepatan Putaran Turbin Air (rpm)	Kecepatan Putaran Generator (rpm)	Tegangan Generator (V)	Arus (A)	Daya yang dibangkitkan (W)
1	25	49	1226	132	0,5	120
2	25	63	1524	165	0,8	240
3	25	77	1892	192	0,9	300
1,25	30	56	1486	98	0,5	120
4	30	109	1504	149	1,4	480
4,2	30	116	1642	169	1,4	540
4,2	40	157	2242	227	1,7	720
4,2	50	180	2600	245	1,9	900

4.7 Perbandingan Nilai Daya yang Dihasilkan oleh Setiap PLTPH

4.7.1 PLTPH yang Menggunakan Turbin Air jenis Pelton

Perbandingan nilai daya yang dihasilkan PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton secara teori dan praktek disajikan pada tabel 4.18.

Tabel 4.18 Perbandingan Daya Teori dan Pengujian PLTPH Turbin Air Jenis Pelton

Debit air (m ³ /s)	Tinggi jatuh air (m)	Daya yang dihasilkan	
		Teori (W)	Praktek (W)
0,025	1	112,569	120
0,025	2	225,139	240
0,025	3	337,709	300
0,030	1,25	168,68	120
0,030	4	539,78	480
0,030	4,2	566,77	540
0,040	4,2	755,69	720
0,050	4,2	944,62	900

Dengan debit air yang sama yaitu 0,025 m³/s dan tinggi jatuh air yang sama yaitu sebesar 1 m didapatkan nilai daya secara teori melalui persamaan 2.9 sampai 2.11 yaitu 112,569 W, nilai tersebut mendekati nilai daya yang didapatkan dari pengukuran yaitu 120 W. Begitu juga dengan data lainnya.

4.7.2 PLTPH yang Menggunakan Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Perbandingan nilai daya yang dihasilkan PLTPH yang menggunakan turbin air jenis cross flow secara teori dan praktek disajikan pada tabel 4.19.

Tabel 4.19 Perbandingan Daya Teori dan Pengujian pada PLTPH Turbin Air Jenis *Cross Flow*

Debit air (m ³ /s)	Tinggi jatuh air (m)	Daya yang dihasilkan	
		Teori (W)	Pengujian (W)
0,025	1	112,569	60
0,025	2	225,139	120
0,025	3	337,709	180
0,06387	2	574,68	780
0,06387	2,5	718,25	900
0,106	2,5	1192,02	1180

Dengan debit air yang sama yaitu 0,025 m³/s dan tinggi jatuh air yang sama yaitu sebesar 1 m didapatkan nilai daya secara teori melalui persamaan 2.9 sampai 2.11 yaitu 112,569 W, nilai tersebut berbeda dengan nilai daya yang didapatkan dari pengukuran yaitu 60 W. Begitu juga dengan data lainnya. Untuk nilai daya yang dihasilkan secara teori dan secara pengukuran yang paling mendekati hanyalah pada nilai debit air 0,106 m³/s dan tinggi jatuh 2,5 m.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa:

1. Untuk menghasilkan daya 900 watt pada PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton membutuhkan debit air (Q) 50 liter/detik dan tinggi jatuh air (H) 4,2 meter. Sedangkan untuk menghasilkan daya 1180 watt dibutuhkan debit air (Q) 106 liter/detik dan tinggi jatuh air (H) 2,5 meter.
2. Untuk PLTPH yang menggunakan turbin air jenis *cross flow* lebih membutuhkan debit air yang deras dibandingkan PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton. Sedangkan PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton lebih membutuhkan tinggi jatuh air yang lebih tinggi dibandingkan dengan PLTPH yang menggunakan turbin air jenis *cross flow*.
3. Daya yang dihasilkan oleh PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton dan turbin air jenis *cross flow* tidak jauh berbeda. Daya yang dihasilkan PLTPH yang menggunakan turbin air jenis *cross flow* sedikit lebih besar dibandingkan dengan PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton.

5.2 Saran

Saran yang disampaikan terkait dengan penelitian ini adalah sebagai berikut::

1. Agar dibuat dan digunakan pintu air yang dapat digunakan untuk mengatur jumlah debit air yang masuk ke sistem PLTPH sehingga dapat mempermudah dalam penggunaan dan pengukuran.
2. Supaya menghitung efisiensi dari turbin air atau kincir air secara detail, agar mempermudah mendapatkan data perhitungan yang lebih akurat.
3. Agar dapat melengkapi hasil penelitian ini maka disarankan agar peneliti lain membandingkan hasil ini menggunakan metode alternatif yang umum digunakan. Juga menggunakan alat ukur yang mendukung agar data yang didapat lebih akurat.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- Antara, I. D. 2015. *Hubungan Tenaga Air Terhadap Keluaran Daya Listrik dan Aspek Ekonomis di PLTMH Gunung Sawur 2 Lumajang*. Malang: Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Arismunandar, A. dan Susumu Kuwahara. 2000. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik I*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Asdak, C. 1995. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- D.A. Howey. 2009. *Axial Flux Permanent Magnet Generators for Pico-Hydropower*. EWB-UK Research Conference 2009.
- Dandekar, M.M dan K.N Sharma. 1991. *Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Dharmayana, I Gusti Agung. 2011. *Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Kincir Air DI Desa Bendosari Kecamatan Pujon Kabupaten Malang*. Malang : Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Dietzel, F. 1992. *Turbin, Pompa dan Kompresor*. Jakarta: Erlangga.
- Hagendoorn, J.J.M. 1989. *Konstruksi Mesin 2*. Jakarta: PT Rosda Jayaputra.
- Haimerl, L.A. 1960. *The Cross Flow Turbine*. Jerman Barat
- Harvey, A. 1993. *Micro-Hydro Design Manual*. London : Intermediate Technology Publications
- Isabima. 2012. *Analisis Kinerja Kincir Air Sistem Sudu Datar dengan Variasi Sistem Aliran Fluida*. Malang : Universitas Brawjaya.
- Kadir, A. 1996. *Pembangkit Tenaga Listrik*. Jakarta : Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
- Kurniawan, A., & dkk. (2009). *Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal*. Jakarta: Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Luknanto, Djoko.2007. *Bangunan Tenaga Air*. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada.
- M.F. Basar, A. Ahmad, N.Hasim. 2011. *Introduction to the Pico Hydro Power and the Status of Implementation in Malaysia*. IEEE Student Conference on Research and Development 2011. 978-1-4673-0102-2.
- Mismail Budiono. 1991/1992. *Pelistrikan Desa di Indonesia*. Depok: Kampus Baru UI.

Niemann, G. dan Winter, H. 1992. *Elemen Mesin*. Jakarta : Penerbit Erlangga.

Wibawa Unggul. 2001. *Sumber Daya Energi Alternatif*. Malang: Universitas Brawijaya.

Patty, O. 1995. *Tenaga Air*. Jakarta: Erlangga.

Prakosa, Giri. 2012. Rasio elektrifikasi 2012 capai 75,83%. Sindonews.

<http://ekbis.sindonews.com>. (diakses 20 September 2014).

Pudjanarsa, Astu dan Nursuhud, Djati. 2006. *Mesin Konversi Energi*. Yogyakarta :

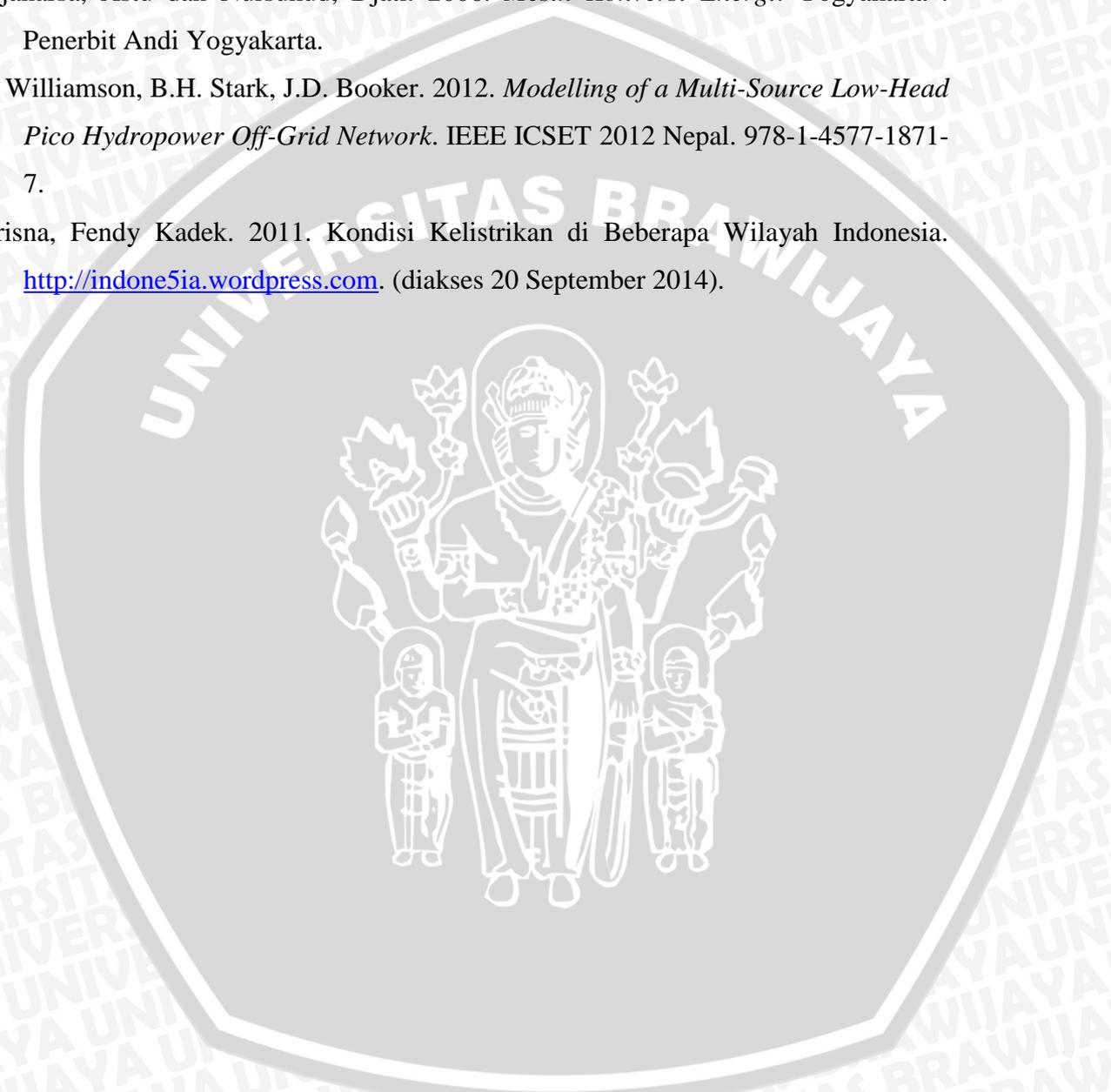
Penerbit Andi Yogyakarta.

S.J. Williamson, B.H. Stark, J.D. Booker. 2012. *Modelling of a Multi-Source Low-Head*

Pico Hydropower Off-Grid Network. IEEE ICSET 2012 Nepal. 978-1-4577-1871-7.

Sutrisna, Fendy Kadek. 2011. Kondisi Kelistrikan di Beberapa Wilayah Indonesia.

<http://indone5ia.wordpress.com>. (diakses 20 September 2014).



LAMPIRAN

Lampiran 1

Gambar PLTPH yang menggunakan turbin air jenis pelton

Lokasi : Desa Sumberwuluh, Kabupaten Lumajang

Waktu : Desember 2014



Lampiran 2**Gambar pengukuran debit air**

Lokasi : Desa Sumberwuluh, Kabupaten Lumajang

Waktu : Agustus 2015

**Lampiran 3****Gambar pemasangan pipa aliran air untuk PLTPH turbin air jenis cross flow**

Lokasi : Desa Sumberwuluh, Kabupaten Lumajang

Waktu : Agustus 2014



Lampiran 4 Dokumentasi penelitian



Lampiran 5

Gambar pengujian dengan menggunakan beban penerangan berupa lampu dengan kelipatan daya setiap lampu 60 W.

**Lampiran 6**

Gambar generator khusus yang digunakan untuk pengujian ketiga PLTPH yang menggunakan turbin air jenis cross flow

