

**455/TEKNIK KENDALI (Atau
Instrumentasi dan Kendali**

**LAPORAN
PENELITIAN PRODUK TERAPAN**



**PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL CERDAS (*SMART CONTROL*) PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MINIHIDRO (PLTMH) DALAM RANGKA
MENINGKATKAN EFEKTIFITAS DAN EFISIENSI POTENSI AIR**

Oleh :

**Peneliti Utama : Dr. Hidayat, S.T., M.T.
NIDN : 1031057001**

**Anggota/ : Ir. Arnita, M.T/ 0024116201
NIDN : Mirza Zoni, S.T., M.T/0020027405
Ir. Cahayahati, M.T./ 1010106201**

Dibiayai Oleh:

**Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Dirjen RISTEK DIKTI
Sesuai dengan Kontrak Penelitian Nomor 001/KONTRAK-
PENELITIAN/K10/KM/2017 Tanggal 10 April 2017**

**UNIVERSITAS BUNG HATTA
OKTOBER 2017**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Pengembangan Sistem Kontrol Cerdas (Smart Control) pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Dalam Rangka Meningkatkan Efektifitas dan Efisiensi Potensi Air

Peneliti/Pelaksana
Nama Lengkap : Dr HIDAYAT, S.T, M.T
Perguruan Tinggi : Universitas Bung Hatta
NIDN : 1031057001
Jabatan Fungsional : Lektor
Program Studi : Teknik Elektro
Nomor HP : 081267048037
Alamat surel (e-mail) : hdyttanjung@yahoo.com

Anggota (1)
Nama Lengkap : Ir. ARNITA MT
NIDN : 0024116201
Perguruan Tinggi : Universitas Bung Hatta

Anggota (2)
Nama Lengkap : MIRZA ZONI S.T, M.T
NIDN : 0020027405
Perguruan Tinggi : Universitas Bung Hatta

Anggota (3)
Nama Lengkap : Ir. CAHAYAHATI MT.
NIDN : 1010106201
Perguruan Tinggi : Universitas Bung Hatta

Institusi Mitra (jika ada)
Nama Institusi Mitra : -
Alamat : -
Penanggung Jawab : -
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 2 dari rencana 2 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp 70,000,000
Biaya Keseluruhan : Rp 120,000,000

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknologi Industri



(Dr. Hidayat, S.T., M.T)
NIP/NIK 960700420

Kota Padang, 26 - 10 - 2017

Ketua,

(Dr HIDAYAT, S.T, M.T)
NIP/NIK 960700420

Menyetujui,
Ketua LPPM

(Dr. Ir. Abdullah Munzir, M.Si)
NIP/NIK 196005111986121001

RINGKASAN

Sumatera Barat memiliki banyak potensi air yang dapat dijadikan sebagai Pusat Listrik Energi Baru dan Terbarukan (PLT-EBT) dalam skala besar, menengah dan kecil. Pembangkit listrik skala kecil disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) sudah banyak beroperasi di Sumatera Barat. Sebagai alat kontrol frekuensi umumnya menggunakan *Electric Load Control* (ELC). ELC bekerja dengan cara menambahkan *dummy load*, yang berfungsi menyalurkan kelebihan daya pembangkitan ke elemen pemanas pada saat terjadi fluktuasi beban. Akibatnya, generator dan turbin selalu bekerja pada beban penuh (*full load*), sehingga berpengaruh pada keandalan dan usia PLTMH. Efisiensi potensi air yang tersedia rendah, karena energi dibuang menjadi panas. Pengendalian frekuensi pada pembangkit skala besar dan menengah tidak menggunakan ELC, tetapi dengan mengatur daya mekanik melalui pengaturan debit air masuk ke turbin.

Penelitian ini diawali dengan mengevaluasi kinerja 18 PLTMH di kabupaten Solok Selatan menggunakan metode OEE. Hasil analisis menunjukkan kualitas PLTMH yang ada masih di bawah standar. Permasalahan utamanya terletak pada generator yaitu *brush* dan *generator winding* akibat panas lebih. Hal demikian terjadi karena PLTMH selalu bekerja pada beban penuh (*full load*) dan sebagian tidak terpasang alat kontrol otomatis. Selanjutnya dirancang prototipe governor PLTMH menggunakan PLC sebagai komponen pengendali. Mode kontrol yang diterapkan adalah *On/off controller* 4 level yang diuji di bengkel produksi komponen PLTMH yaitu CV. Prowater. Sebagai motor penggerak digunakan motor AC 1 Fasa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan frekuensi dapat direspons oleh motor penggerak guna membuka atau menutup katub pengarah (*guide vane*) turbin *crossflow* yang kecepatannya sebanding dengan *error* frekuensi.

Untuk efektifitas dan efisiensi penggunaan komponen dirancang *Governor Load Control* (GLC) PLTMH menggunakan mikrokontroler arduino sebagai komponen pengendali. Mode kontrol yang diterapkan adalah PID Controller. Pengujian dilakukan di bengkel produksi komponen PLTMH yaitu CV. Prowater. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan frekuensi dapat direspons oleh motor penggerak guna membuka atau menutup katub pengarah (*guide vane*) turbin *crossflow* yang kecepatannya sebanding dengan *error* frekuensi. Implementasi GLC dilakukan pada PLTMH Lubuk Tempurung Kelurahan Kuranji Kota Padang. Hasil pengujian diperoleh respons sistem relatif baik dan perlu ditingkatkan. Hal demikian dikarenakan desain mekanis GLC dan kondisi debit air.

PRAKATA

Alhamdulillah Rabbil'aalamin, puji syukur dipanjatkan pada Allah Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga laporan tahun terakhir penelitian dengan judul “Pengembangan Sistem Kontrol Cerdas (*Smart Control*) pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTMH) dalam Rangka Meningkatkan Efektifitas dan Efisiensi Potensi Air” dapat diselesaikan. Laporan ini disusun untuk memperlihatkan hasil penelitian yang sudah didanai oleh Dikti. Penulis menyadari sepenuhnya, bahwa selesainya laporan ini karena didukung dan dibantu oleh berbagai pihak. Maka dari itu penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak/Ibu yang telah memberi dukungan moril maupun materil, khususnya kepada:

1. Bapak Mardi Selaku pengelola PLTMH Lubuk Tempurung Kelurahan Kuranji Kecamatan Kuranji Kota Padang yang telah memberikan kesempatan penulis dalam menerapkan alat yang dirancang.
2. Bapak Jhoni Ivan selaku pimpinan CV Prowater yang telah memberikan masukan dan kesempatan dalam menguji hasil rancangan di bengkel produksi turbin PLTMH..
3. Bapak Rektor Universitas Bung Hatta yang telah memberi izin untuk melakukan penelitian dibidang PLTMH
4. Bapak ketua LPPM Universitas Bung Hatta yang sudah memfasilitasi sehingga terwujudnya penelitian ini
5. Bapak Dirjen Dikti yang telah memberi bantuan dana penelitian melalui Program ini.
6. Bapak/ ibu dosen dan civitas akademika Jurusan Teknik Elektro Universitas Bung Hatta
7. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu demi satu yang telah memberi dorongan dan bantuan hingga selesainya penulisan laporan ini.

Semoga Allah SWT memberi balasan pahala yang berlipat ganda, dan paparan materi yang disajikan bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Tiada gading yang tidak retak, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran untuk kesempurnaan penelitian dimasa datang.

Padang, Oktober 2017

Penulis,

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	vii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	29
BAB 4. METODE PENELITIAN.....	30
BAB 5. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI... ..	34
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN.....	54
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Deskripsi Arduino Uno R3	22
Tabel 2.2. Karakteristik Stepper Pembangkitan Tunggal	27
Tabel 5.1. Hasil Pengujian Catu Daya	35
Tabel 5.2. Hasil Pengukuran Port Arduino Uno 1-13	37
Tabel 5.3. Hasil Pengukuran Input Analog Arduino Uno	38
Tabel 5.4. Hasil Pengujian Kendali Motor Stepper <i>Open Loop</i> (Manual)	41
Tabel 5.5. Hasil Pengujian Kendali Motor Stepper <i>Close Loop</i> (Otomatis)	42
Tabel 5.6. Analisa Perhitungan Ulir pada Governor	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Proses Konversi Energi Listrik dalam PLTA/PLTMH	7
Gambar 2. 2. Bendungan	7
Gambar 2.3. Intake (Bangunan Pengalih)	8
Gambar 2.4. Pintu Air	8
Gambar 2.5. Headrace (Saluran Pembawa)	9
Gambar 2.6 . Forbay (Bak Penenang)	9
Gambar 2.7. Saluran Pelimpah	10
Gambar 2.8. <i>Power House</i>	10
Gambar 2.9. Saluran Pembuang	10
Gambar 2.10. Rotor <i>Non-Salient</i>	12
Gambar 2.11. Pembangkitan Tegangan 3 Fasa	13
Gambar 2.12. Model <i>Governor Speed Drop</i>	16
Gambar 2.13. <i>Governor's Isachronous</i>	16
Gambar 2.14. Blok Diagram Sistem Kendali Tahun 1	17
Gambar 2.15. Blok Diagram Sistem Kendali Loop Terbuka	18
Gambar 2.16. Blok Diagram Sistem Kendali Loop Tertutup Dengan Menggunakan Motor	19
Gambar 2.17. Blok Diagram Pengendali Proportional	20
Gambar 2.18. Blok Diagram Pengendali Integral	21
Gambar 2.19. Blok Diagram Pengendali Derivative	21
Gambar 2.20. Papan Arduino Uno	23
Gambar 2.21. Motor Stepper	26
Gambar 2.22. Skema Motor Stepper	27
Gambar 2.23. Turbin <i>Cross-Flow</i>	28
Gambar 2.24. Sensor Infrared (IR)	28
Gambar 4.1. Fishbone Diagram Pengembangan Alat Smart Control PLTMH	31
Gambar 4.2. Diagram Segaris Sistem Pengontrolan PLTMH Penelitian Tahun I	32
Gambar 4.3. Diagram Segaris Sistem Pengontrolan PLTMH Penelitian Tahun II	33
Gambar 5.1. Sistem PLTMH Secara Visual	34
Gambar 5.2. Pengujian Catu Daya	35
Gambar 5.3 Pengujian Port Arduino dengan Multitester	36
Gambar 5.4 . Pengujian Port Input Analog Arduino dengan Multitester	36

Gambar 5.5 . Pengujian Tegangan Arduino dengan Multitester	37
Gambar 5.6. Grafik Pengujian Port Arduino Uno dengan Multitester	38
Gambar 5.7. Grafik Pengujian Input Analog Arduino Uno dengan Multitester	38
Gambar 5.8 . Pengujian <i>Driver Stepper Motor</i> dengan Multitester	39
Gambar 5.9. Pengujian Perangkat Lunak	39
Gambar 5.10. Perubahan Signal Kendali Pengujian Secara Manual (<i>Open Loop</i>)	41
Gambar 5.11. Perubahan Signal Kendali Pengujian Secara Otomatis (<i>Close Loop</i>)	42
Gambar 5.12. PLTMH Lubuk Tampurung Sebelum Dipasang GLC	47
Gambar 5.13. Identifikasi Posisi Pemasangan GLC	49
Gambar 5.14. PLTMH Sudah Terpasang GLC	50
Gambar 5.15. Rangkaian Driver dan Motor Penggerak GLC	51

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN I : Publikasi Jurnal Internasional terindeks scoupus “ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences”

LAMPIRAN II : Publikasi Makalah Pada Seminar Internasional ICHVEPS 2017

LAMPIRAN III : Publikasi Makalah Pada Seminar Nasional Tekmologi Tepat Guna

LAMPIRAN IV : Buku Ajar

LAMPIRAN V : Draf Paten

BAB I

PENDAHULUAN

Dalam kurun waktu 5 tahun terakhir, konsumsi listrik terus meningkat tajam dengan rata-rata pertumbuhan mencapai di atas 10%. Tingginya pertumbuhan konsumsi ini memicu terjadinya pertumbuhan beban puncak yang tidak dapat lagi dipenuhi oleh Perusahaan Listrik Negara (PT. PLN Persero), seiring dengan tingginya harga minyak dunia dan tidak mamunya PT. PLN Persero dalam menopang kebutuhan listrik di seluruh nusantara.

Pembangunan Pembangkit Tenaga Listrik Skala Kecil Tersebar (PSK) dalam hal ini Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Indonesia sudah berjalan beberapa tahun terakhir sejak dikeluarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Kepmen ESDM) No.: 1122K/30/M tanggal 12 Juni 2002 tentang Pedoman Pengusahaan Pembangkit Tenaga Listrik Skala Kecil Tersebar sehingga sampai sekarang sudah banyak PLTMH beroperasi. Keputusan tersebut disempurnakan dengan Permen ESDM No. 12 tahun 2014 tentang Pembelian Tenaga Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Air oleh PT PLN Persero. Hal tersebut mendorong para pihak swasta (IPP) ikut mengembangkan potensi air yang ada menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Air skala besar, menengah dan kecil, karena energi listrik yang dibangkitkan akan dibeli oleh PT PLN Persero dengan harga yang menjanjikan (Permen ESDM, 2014).

Energi listrik yang dibangkitkan oleh pembangkit listrik milik PLN maupun *Independent Power Plant* (IPP) diupayakan terintegrasi dalam satu jaringan transmisi dan distribusi, sebelum akhirnya energi tersebut sampai kepada pelanggan atau konsumen. Oleh karena itu sistem transmisi dan sistem distribusi perlu dilindungi dari dampak buruk yang dapat mengganggu kualitas sistem tenaga listrik. Untuk menghindari hal tersebut, maka PT. PLN (Persero) melalui Keputusan Direksi No. 0357.K/DIR/2014, tanggal 22 Juli 2014 menerbitkan buku pedoman penyambungan Pusat Listrik Energi Baru dan Terbarukan (PLT-EBT) ke Sistem Distribusi PLN. Pedoman tersebut akan digunakan oleh PLN dan pengembang PLT-EBT untuk memastikan dan memitigasi resiko gangguan terhadap sistem akibat tersambungannya PLTEBT dan menjadi dasar penandatanganan Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (PjBL) (PLN, 2014). Oleh karena itu diperlukan peralatan kontrol yang baik, sehingga kualitas dan kontinuitas pembangkitan dapat dijaga.

Suatu peralatan akan dapat bekerja sesuai yang diharapkan apabila ada pengendalian dalam peralatan maupun diluar peralatan tersebut. Kualitas sistem pengendali sangat tergantung kepada performa respons, karena kualitas respons dapat memberi kontribusi terhadap efisiensi penggunaan energi listrik. Maghfiroh dkk. (2013) mengemukakan, semakin baik performa respons suatu pengendali, maka semakin kecil penyerapan energi kontrolnya. Permasalahan pada pengendali PLTMH adalah ketersediaan instrumen kendalinya saat masih terbatas. Pengendali yang paling umum digunakan adalah metode kendali manual, kendali otomatis dengan metode on/off atau PID (*Proportional Integral Derivative*) klasik. Metode kendali ini ini simpel dan mampu memperbaiki respons *transient* melalui penyetingan parameter PID dengan tepat antara lain K_p , K_i dan K_d . Persoalan yang timbul adalah *human error* dan sulitnya mendapatkan parameter PID secara tepat (Kiam dkk., 2005). Metode kendali yang memiliki kecerdasan diantaranya adalah kendali logika fuzzy (*Fuzzy Logic Controller*, FLC). FLC bekerja berdasarkan kaidah logika kabur (*fuzzy*), yang merepresentasikan proses berfikir seorang operator ahli ketika mengendalikan suatu proses. FLC memiliki kemampuan beradaptasi, ketepatan memilih fungsi dan domain keanggotaan *input* dan *output fuzzy* sangat menentukan performa respons sistem. Persoalannya adalah menentukan fungsi dan domain keanggotaan *input* dan *output* yang sesuai dan responsnya cenderung menyisakan osilasi pada keadaan tunak (Hidayat dan Munawar, 2000; Microstar Lab, 2009). *Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems* (ANFIS) merupakan jaringan adaptif yang berbasis pada sistem inferensi *fuzzy* (Widodo, 2005). Proses adaptasi berlangsung melalui penyesuaian nilai bobot-bobot yang terdapat pada jaringan. Bobot-bobot jaringan ditentukan melalui proses pelatihan, yang menghasilkan nilai parameter premis dan parameter konsekuensi sebagai representasi dari batasan domain keanggotaan input (Moulound, 2004). Meskipun demikian, teknik implementasi algoritma ANFIS pada *microcontroller* dengan keterbatasan kapasitas memori dan kecepatan pengolahan data numeris dapat dilakukan dengan algoritma pemrograman yang efektif (Hidayat, 2014).

Arduino Uno adalah board berbasis mikrokontroler pada ATmega 328. Board ini memiliki 14 digital input / output pin (dimana 6 pin dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, jack listrik dan tombol reset. Pin – pin ini berisi semua yang diperlukan untuk mendukung mikrokontroler, hanya terhubung ke komputer dengan kabel USB atau sumber tekanan bisa didapat dari adaptor AC–DC atau baterai untuk menggunakannya (Arduino, Inc., 2009).

Permasalahannya sebahagian besar PLTMH yang ada di Sumatera Barat tidak beroperasi sebagaimana mestinya dalam usia 2 tahun pertama. Banyak faktor yang menyebabkan hal itu terjadi, diantaranya pembangunan PLTMH tidak diiringi dengan peningkatan Sumber Daya Manusia (SDM) di lingkungan PLTMH, sistem pengelolaan yang belum sepenuhnya terstruktur dengan baik, dan yang tidak kalah pentingnya dari aspek teknis adalah sistem kontrol yang digunakan pada PLTMH, sehingga PLTMH yang secara ekonomis masih bisa beroperasi dengan baik, pada kenyataannya di lapangan tidak demikian. Berdasarkan kondisi di atas, maka secara bertahap akan di gali permasalahan-permasalahan yang ada di lapangan dan dicarikan solusi agar PLTMH yang telah dan akan beroperasi dapat bekerja secara efektif.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Penelitian

Penelitian Achmad Fauzan, (2009) berkaitan dengan governor untuk pengaturan frekuensi PLTGU di PT. Indonesia Power Ubp Priok. Unit governor sebagai pengatur frekuensi dalam sistem dengan cara mengatur keluaran uap bertekanan dari ketel uap untuk menggerakkan turbin uap agar tetap berada dalam putaran dengan frekuensi 50 Hertz (standar Indonesia) dan mengantifikasi terjadinya penyimpangan terhadap frekuensi dalam sistem. Penyimpangan frekuensi dari batas nilai nominal terjadi apabila kebutuhan konsumen (beban) lebih besar dari daya aktif yang dibangkitkan dari pembangkit atau terjadinya gangguan pada sistem sehingga frekuensi sistem turun. Sedangkan frekuensi sistem naik apabila ada tambahan daya dari unit pembangkit sementara beban konsumen tetap. Untuk mempertahankan nilai frekuensi, maka pembangkitan daya aktif dalam sistem disesuaikan dengan kebutuhan konsumen (beban) melalui pengaturan pemberian uap penggerak turbin uap yang dikopel dengan generator. Pengaturan ini dilakukan oleh unit governor, yang bekerja dengan fungsinya apabila terjadinya perubahan frekuensi dalam sistem. Hal senada dilakukan oleh Sudirman Palaloi, (2009) yaitu pengaruh perubahan beban terhadap kinerja *governor generator diesel*. Governor merupakan alat pengatur kecepatan mekanik hidrolik atau sistem motor untuk pengendali mesin diesel melalui pengaturan masuknya bahan bakar ke mesin. Bila satu pembangkit yang sedang kerja paralel mengalami gangguan atau trip, maka akan berpengaruh pada pembangkit lain yang berakibat pada frekuensi dan tegangan tidak stabil.

Simulasi pengendalian frekuensi pada PLTMH dengan mode *self tuning regulator* (STR) menggunakan model governor secara elektronik melalui software Matlab 6.1 dilakukan oleh Antonius Wahyu Nugroho, (2013). STR merupakan salah satu kontroler adaptif yang pernah dikembangkan, untuk menghasilkan sifat adaptif STR memerlukan sebuah estimator dan sebuah kontroler yang dapat diubah parameternya serta desain kontroler yang diinginkan. Untuk estimator dapat digunakan algoritma estimasi *Recursive Least Square* (RLS), sedangkan untuk kontroler digunakan metode *Pole- Placement* dengan orde kontroler ditentukan dengan solusi derajat minimum yang dimodifikasi dengan menambahkan aksi integral. A.Hafid dan Riza Widia, (2010) juga melakukan analisis pengendali frekuensi generator PLTMH dengan governor sederhana. Ardha Sandy P, (2012) menerapkan governor

pada kendali frekuensi PLTMH Seloliman, Trawas Kabupaten Mojokerto. Kekurangan sistem kontrol dengan governor yang sudah dirancang adalah ketidakmampuan bereaksi cepat bila terjadi perubahan beban secara mendadak. Oleh karena itu digunakan *Electronic Load Controller* (ELC) yang dinilai lebih baik daripada governor.

Bertolak dari hal di atas, dilakukan perancangan dan pembuatan *governor load control* (GLC) untuk pengendali frekuensi PLTMH berbasis arduino uno dengan menerapkan algoritma PID. Untuk mendeteksi frekuensi digunakan *optocoupler* dan *disk* melalui pengukuran kecepatan turbin. Aktuator penggerak *guide vane* digunakan motor *stepper* yang dikopel melalui gearbox 1:300. GLC yang dirancang diterapkan pada PLTMH Lubuk Tempurung berkapasitas 10 kW.

2.2 Landasan Teori

Penelitian didasarkan pada teori-teori yang telah ada, guna mendesain sistem kendali frekuensi PLTMH. Prinsip perencanaan sistem kendali mengacu pada;

1. *Safety* (keamanan)
2. *Reliability* (keandalan)
3. *Accessibility* (kemudahan)
4. *Availibility* (ketersediaan)
5. *Impact of environment* (pengaruh lingkungan)
6. *Economic* (ekonomi)
7. *Esthetic* (keindahan)

Syarat pembangkit listrik mikro hidro yang baik;

1. Sistem pembangkitnya sederhana
 - a) *Spare part*/onderdil mudah diperoleh
 - b) Bisa dibuat/direkayasa oleh bengkel setempat, perawatan mudah, harga relatif murah
2. Listrik yg dihasilkan layak digunakan
 - a) Tegangan konstan (220 V)/(380V)
 - b) Frekuensi konstan (50Hz)
 - c) Harmonisa gelombang kecil
3. Keandalan yang baik

- a) Tidak mudah rusak (perawatannya mudah)
 - b) Gangguan jarang terjadi
 - c) Tahan lama
4. Tidak mengenal daerah teritorial
- a) Bisa dipasang di daerah terpencil maupun perkotaan asal ada potensi tenaga air
 - b) Di daerah yang sudah terjangkau listrik PLN maupun yang belum

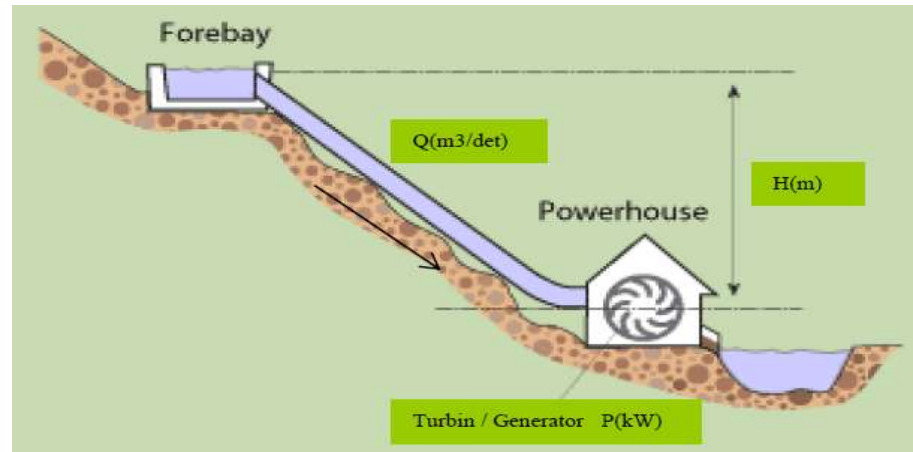
Persyaratan *output* tenaga listrik pada jaringan dan distribusi;

- a) PERMEN ESDM No. 3 tahun 2007 tentang Aturan Jaringan Sistem tenaga Listrik JAMALI
- b) PERMEN ESDM No. 4 tahun 2009 tentang Aturan Distribusi Tenaga Listrik
 - 1. Tegangan dalam peraturan disebutkan bahwa tegangan pada distribusi tenaga listrik dibatasi pada fluktuasi max +5% dan minimal -10%
 - 2. Frekuensi nominal 50 Hz dibatasi dalam rentang 49.5 -50.5 Hz
 - 3. Batas Total *Harmonic Distortion* 5%

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan suatu pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air sebagai tenaga penggeraknya seperti saluran irigasi, sungai atau air terjun alam dengan cara memanfaatkan tinggi terjun (*head*) dan jumlah debit air. Secara teknis mikrohidro memiliki tiga komponen utama yaitu air (sebagai sumber energi), turbin dan generator. Pada dasarnya, mikrohidro memanfaatkan energi potensial jatuh air (*head*). Semakin tinggi jatuh air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik. Disamping faktor geografis (tata letak sungai), tinggi jatuhnya air dapat pula diperoleh dengan membendung aliran air sehingga permukaan air menjadi tinggi. Air dialirkan melalui sebuah pipa pesat ke dalam rumah pembangkit yang pada umumnya dibangun di bagian tepi sungai untuk menggerakkan turbin atau kincir air mikrohidro. Prinsip dasar mikrohidro memanfaatkan energi potensial yang dimiliki oleh aliran air pada jarak ketinggian tertentu dari tempat instalasi pembangkit listrik. Sebuah skema mikrohidro memerlukan dua hal yaitu, debit air dan ketinggian jatuh air (*head*) untuk menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan. Sistem konversi energinya yaitu dari bentuk ketinggian dan aliran (energi potensial) ke dalam bentuk energi mekanik dan energi listrik.

Daya yang masuk (P_{gross}) merupakan penjumlahan dari daya yang dihasilkan (P_{net}) ditambah dengan faktor kehilangan energi (*loss*) dalam bentuk suara atau panas. Daya yang dihasilkan merupakan perkalian dari daya yang masuk dikalikan dengan efisiensi konversi (E_o)



Gambar 2.1. Proses Konversi Energi dalam PLTA / PLTMH

Komponen utama PLTMH adalah sebagai berikut:

1. Bendungan

Bendungan berfungsi untuk menaikkan/mengontrol tinggi air sungai sehingga air dapat dialihkan ke dalam *intake*.



Gambar 2.2 Bendungan

2. *Intake* (Bangunan Pengalih)

Intake berfungsi untuk mengalirkan air melalui sebuah pembuka dibagian sisi sungai ke dalam sebuah bak pengendap.



Gambar 2.3 *Intake* (bangunan pengalih)

3. Pintu Air

Pintu air berfungsi sebagai membatasi debit air yang akan dialirkan ke turbin.



Gambar 2.4 Pintu air

4. *Headrace* (saluran pembawa)

Headrace berfungsi sebagai saluran yang mengalirkan air dari saluran intake menuju pipa pesat dengan menjaga ketinggian muka airnya. Tipe saluran pembawa biasanya sangat tergantung pada kondisi topografi geologi daerah yang dilewati, dan dapat berupa saluran terbuka, pipa atau terowongan.



Gambar 2.5 *Headrace* (saluran pembawa)

5. *Forebay* (bak penenang)

Bak penenang terletak diujung saluran pembawa. Fungsi bak penenang ada dua jenis yaitu :

- Mengontrol perbedaan debit dalam *penstock* dan sebuah saluran pembawa karena fluktuasi beban.
- Pemindahan sampah terakhir (tanah dan pasir, kayu, dll) dalam air yang mengalir.



Gambar 2.6 *Forebay* (bak penenang)

6. Saluran Pelimpah

Saluran pelimpah berfungsi sebagai penyalur air melebihi kapasitas penampungan pada saluran bak penampungan.



Gambar 2.7 Saluran pelimpah

7. *Power house* (rumah pembangkit)

Desain rumah pembangkit yang baik akan melindungi turbin, generator, dan peralatan lain dalam jangka waktu yang cukup lama.



Gambar 2.8 *Power house* (rumah pembangkit)

8. Saluran Pembuangan

Saluran yang berfungsi untuk penyaluran air yang sudah digunakan untuk dikembalikan ke sungai atau saluran irigasi.



Gambar 2.9 Saluran pembuang

2.2.2 Generator Sinkron

Hampir semua energi listrik dibangkitkan dengan menggunakan mesin sinkron. Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik. Generator sinkron dapat berupa generator sinkron tiga fasa atau generator sinkron AC satu fasa tergantung dari kebutuhan.

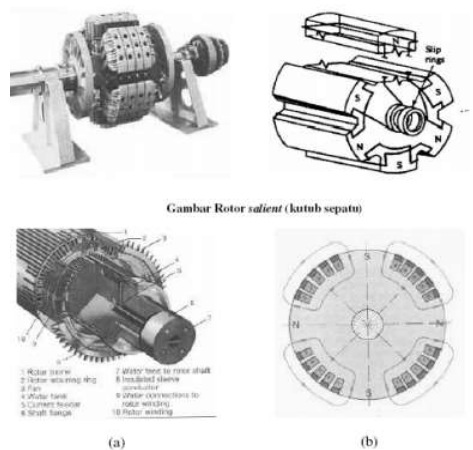
Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh *prime mover* menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan statorgenerator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa *salient* (kutub sepatu) dan *non salient* (rotor silinder). Pada kutub *salient* kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor sedangkan pada kutub *non salient* konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Rotor silinder umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub.

Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar *prime mover*, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10 MVA menggunakan rotor 130 silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu. Arus DC disuplai ke rangkaian medan rotor dengan dua cara:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC eksternal dengan sarana slip ring dan sikat
2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron.

Prinsip generator sinkron adalah, jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Pada tipe mesin ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal / *external pole generator*). Pada generator tipe ini, energi listrik dibangkitkan pada rotor kumparan rotor. Hal ini menyebabkan kerusakan pada slip ring dan karbon sikat,

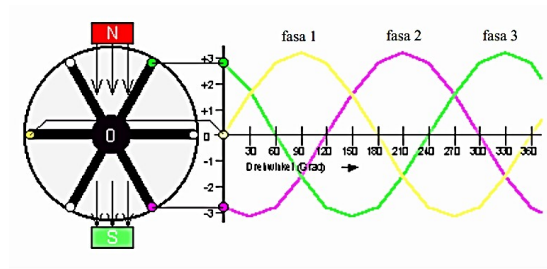
sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*). Pada tipe ini, medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor. Kemudian tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator.



Gambar 2.10 (a) Rotor *Non-salient* (rotor silinder), (b) Penampang rotor (electro-creations.blogspot.com, 2014)

Prinsip generator sinkron adalah, jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Pada tipe mesin ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal / *external pole generator*). Pada generator tipe ini, energi listrik dibangkitkan pada rotor kumparan rotor. Hal ini menyebabkan kerusakan pada slip ring dan karbon sikat, sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*). Pada tipe ini, medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor. Kemudian tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Pada rotor kutub sepatu, fluks terdistribusi sinusoidal didapatkan dengan mendesain bentuk sepatu kutub. Sedangkan pada rotor silinder, kumparan rotor disusun secara khusus untuk mendapatkan fluks terdistribusi sinusoidal ini. Suplai DC yang dihubungkan ke kumparan rotor melalui slip ring dan sikat untuk menghasilkan medan magnet merupakan eksitasi daya rendah. Jika rotor menggunakan magnet permanen, maka

tidak slip ring dan sikat karbon tidak begitu diperlukan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan pada mesin sinkron kutub internal dengan tiga kumparan stator yang diset pada sudut 120°.



Gambar 2.11 Pembangkitan tegangan 3 fasa (UPI, 2010)

Frekuensi elektris yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah:

$$f_e = \frac{n_m - P}{120} \quad (\text{Hz}) \quad (2.1)$$

Dimana :

f_e = frekuensi elektrik [Hz]

n_m = kecepatan medan magnet = kecepatan putar rotor [rpm]

p = jumlah kutub

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi elektrik yang dihasilkan. Daya listrik dibangkitkan pada 50 atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap tergantung pada jumlah kutub mesin. Sebagai contoh untuk membangkitkan frekuensi 60 Hz pada mesin dua kutub rotor harus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya dengan 50 Hz pada mesin empat kutub rotor harus berputar pada 1500 rpm.

Pada sebuah generator, beban pada dasarnya merupakan beban listrik. Apabila beban tersebut diterjemahkan sebagai torsi, maka torsi tersebut dapat diterjemahkan sebagai torsi elektrik. Sedangkan daya yang keluar atau terbangkit dari generator dapat diterjemahkan sebagai torsi mekanik. Pada pengoperasian generator dalam kondisi tetap, nilai torsi mekanik akan sama dengan nilai torsi elektrik.

$$T_m = T_e \quad (2.2)$$

Dimana, T_m = Torsi mekanik yang dihasilkan generator

T_e = Torsi elektrik beban

Namun pada prakteknya, kondisi beban seringkali akan mengalami fluktuasi. Fluktuasi beban ini dapat berupa kenaikan maupun penurunan beban. Adapun selisih daya antara sisi generator dengan sisi beban ini dapat diterjemahkan sebagai torsi percepatan.

$$T_m = T_e + T_a \quad (2.3)$$

Dimana,

$$T_a = M \times \frac{d\omega}{dt} \quad (2.4)$$

dengan T_m = Torsi mekanik yang dihasilkan generator

T_e = Torsi elektrik beban

T_a = Torsi percepatan

M = Momen inersia dari generator

$\frac{d\omega}{dt}$ = Perubahan kecepatan sudut

Torsi percepatan inilah yang menyebabkan percepatan atau perlambatan pada putaran rotor generator sinkron yang pada akhirnya mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan oleh generator. Hubungan antara torsi dengan dengan kecepatan putar rotor dapat dirumuskan sebagai :

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2.5)$$

Dimana ;

T = Torsi generator

P = Daya aktif output generator

ω = kecepatan sudut putaran generator

Sementara itu, frekuensi yang dihasilkan oleh generator merupakan fungsi dari kecepatan sudut putaran generator yang dirumuskan dengan,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.6)$$

Sehingga perubahan frekuensi terkait dengan fluktuasi/perubahan beban dapat dituliskan sebagai berikut;

$T_m - T_e = T_a < 0$, maka $\frac{d\omega}{dt} < 0$, sehingga frekuensi akan turun.

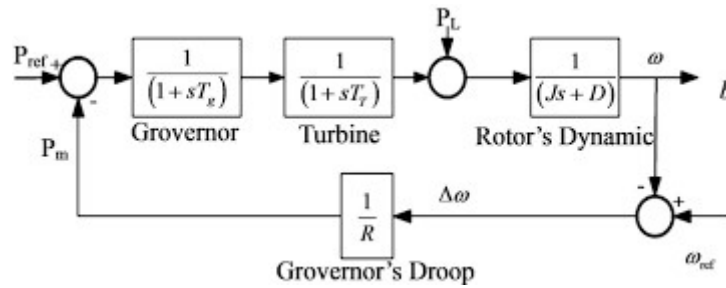
$T_m - T_e = T_a > 0$, maka $\frac{d\omega}{dt} > 0$, sehingga frekuensi akan naik.

2.2.3 Governor

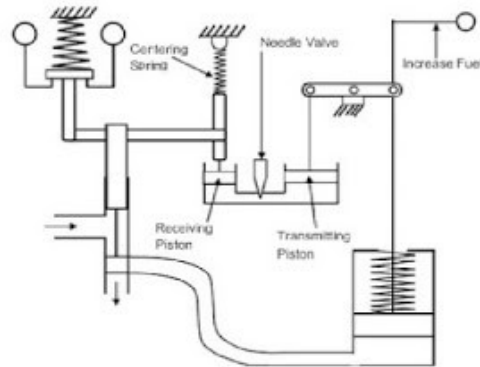
Governor adalah suatu alat yang sangat vital sebagai pengendali operasi pada satuan pembangkit (turbine generator ataupun diesel) yang dapat diatur baik secara manual atau secara otomatis. Prinsip kerjanya adalah mengatur kecepatan pada putaran tetap (*isochonous*) dan pengatur beban secara otomatis melalui *speed droop*, dengan mengatur jumlah uap yang masuk pada *steam chamber* atau pemakaian bahan bakar fuel rack unit pembangkit (*prime mover*). Governor digunakan sebagai ‘*interface*’ antara turbin penggerak dan generator. Pengaturan putaran turbin sejak turbin mulai bergerak sampai *steady state* dilakukan oleh governor, jadi bukan diambil alih oleh governor. Fungsi utama pengaturan putaran ini adalah untuk menjaga kestabilan sistem secara keseluruhan terhadap adanya variasi beban atau gangguan pada sistem.

Ada dua mode operasi governor, yaitu *droop* dan *isochronous*. Pada mode *droop*, governor sudah memiliki “setting point” P_{mech} (daya mekanik) yang besarnya sesuai dengan rating generator atau menurut kebutuhan. Dengan adanya “*fixed setting*” ini, output daya listrik generator nilainya tetap dan adanya perubahan beban tidak akan mengakibatkan perubahan putaran turbin (daya berbanding lurus dengan putaran). Sedangkan pada *mode isochronous*, “*set point*” putaran governor ditentukan berdasarkan kebutuhan daya listrik sistem pada saat itu (*real time*). Kemudian melalui internal proses di dalam governor (sesuai dengan kontrol logic dari manufaktur), governor akan menyesuaikan nilai output daya mekanik turbin supaya sesuai dengan daya listrik yang dibutuhkan sistem. Pada saat terjadi perubahan beban, governor akan menentukan *setting point* yang baru sesuai dengan aktual beban sehingga dengan pengaturan putaran ini diharapkan frekuensi listrik generator tetap berada di dalam “*acceptable range*” dan generator tidak mengalami “*out of synchronization*”.

Seperti halnya peralatan listrik yang lain, governor juga memiliki keterbatasan kemampuan. Parameter- parameter governor, seperti daya mekanik, *gas producer*, *speed droop*, dan lain-lain, umumnya memiliki nilai batas atas dan batas bawah sesuai spesifikasi dari pabrik.



Gambar 2.12 Model Governor Speed Droop



Gambar 2.13 Governor's Isochronous

2.2.4 Sistem Kendali

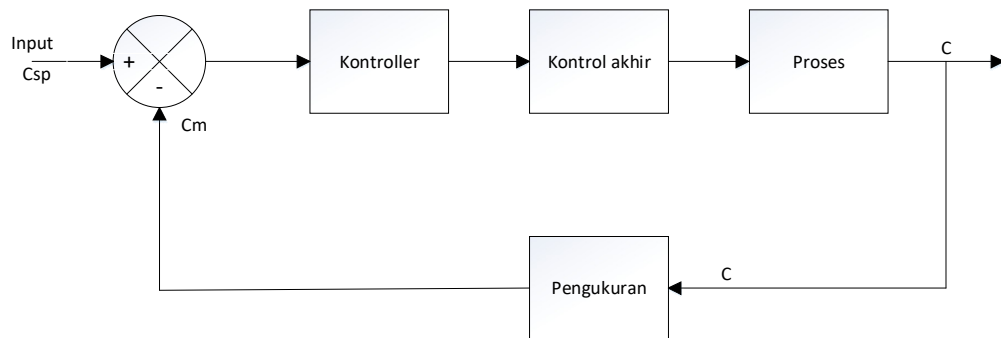
Aksi dari kendali otomatis adalah membandingkan nilai sebenarnya dari keluaran sistem secara keseluruhan dengan mengacu pada masukan (nilai yang dikehendaki), menentukan penyimpangan dan menghasilkan sinyal kendali yang akan mengurangi penyimpangan menjadi nol atau nilai yang kecil. Sistem pengaturan otomatis merupakan sistem kendali umpan balik dengan acuan masukan atau keluaran yang dikehendaki dapat konstan atau berubah secara perlahan dengan berjalannya waktu atau tugas utamanya adalah menjaga keluaran sebenarnya berada pada nilai yang dikehendaki dengan adanya gangguan. Blok diagram sistem kendali ditunjukkan pada gambar 2.14

Dalam kenyataannya suatu sistem kendali otomatis terdiri dari bagian atau elemen yang membentuk suatu sistem tersebut yaitu :

1. Proses (*plant*)

Pada umumnya terdiri atas peralatan atau komponen yang rumit berhubungan satu ama lain membentuk bagian industri. Di dalam proses atau *plant* ada beberapa variabel dinamis yang dapat hanya satu variabel yang harus dikendalikan atau banyak

variabel yang dikendalikan dalam waktu bersamaan. *Plant* dapat dikatakan sebagai suatu sistem fisis yang dikendalikan dimana yang dikendalikan adalah variabel dinamis.



Gambar 2.14 Blok diagram sistem kendali

2. Pengukuran (*measurement*)

Untuk dapat mengendalikan variabel dinamis, diperlukan informasi mengenai besaran dinamis tersebut. Informasi itu diperoleh dengan mengadakan pengukuran variabel dinamis besarnya dapat berbeda dengan besar dari masukan yang diinginkan. Alat ini dikenal dengan nama transduser (alat pengubah dari suatu besaran informasi kebesaran informasi lain dengan cara analog).

3. Pengujian (*evaluation*)

Dari hasil pengukuran harus ada tindak lanjut yaitu menentukan aksi untuk mengendalikan variabel dinamis. Tindak lanjut ini dinamakan pengujian atau *evaluation*. Pada umumnya elemen pengujian dinamakan kendali. Elemen kendali mempunyai dua tugas yaitu :

- Membandingkan nilai yang diinginkan dengan nilai yang sebenarnya dari perubahan dinamis.
- Menentukan aksi yang diperlukan agar nilai yang sebenarnya dari variabel dinamis sama dengan nilai set point.

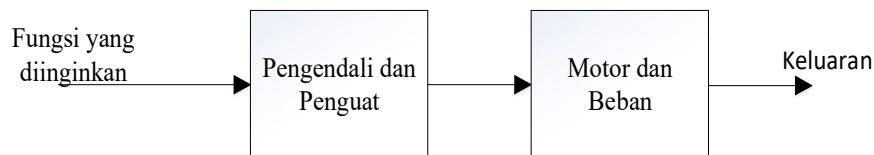
4. Kontrol akhir (*final control*)

Elemen kendali akhir yang berhubungan langsung dengan *plant*, berfungsi untuk mempertinggi daya dari aksi yang dihasilkan dari pengendali untuk mengatur *plant* agar variabel dinamis pada akhirnya sama dengan *set point*.

Banyak sekali terdapat sistem kendali loop tertutup dan loop terbuka yang biasanya tidak dapat dikendalikan dari hanya namanya. Suatu sistem kendali dapat dikatakan sistem kendali loop terbuka apabila mendapatkan fungsi yang berguna tanpa perlu dikoreksi untuk

kerjanya secara terus-menerus. Secara umum, istilah loop terbuka dan loop tertutup berlaku pada elektronik, mekanik, elektromekanik dsb. Beberapa contoh umum dari sistem loop terbuka adalah kipas angin, pemanas ruangan berlistrik, penyedot debu, dsb. Peralatan-peralatan ini biasanya diberi daya dari sistem saluran ac dan dihidup matikan dengan sebuah saklar, perubahan beban, tegangan, kecepatan motor atau lingkungan kerja dapat menyebabkan perubahan karakteristik oprasinya.

Hasilnya beberapa peralatan tersebut memiliki kendali yang memungkinkan kecepatan temperatur, aliran udara atau beberapa variabel lainnya dapat diatur dalam suatu batas tertentu. Karena pengaturan-pengaturan tersebut diimbangi dengan perubahan lingkungan atau kondisi oprasi, pengaturan yang terus menerus tidak diperlukan untuk membuat peralatan dapat melakukan fungsi yang diinginkan.

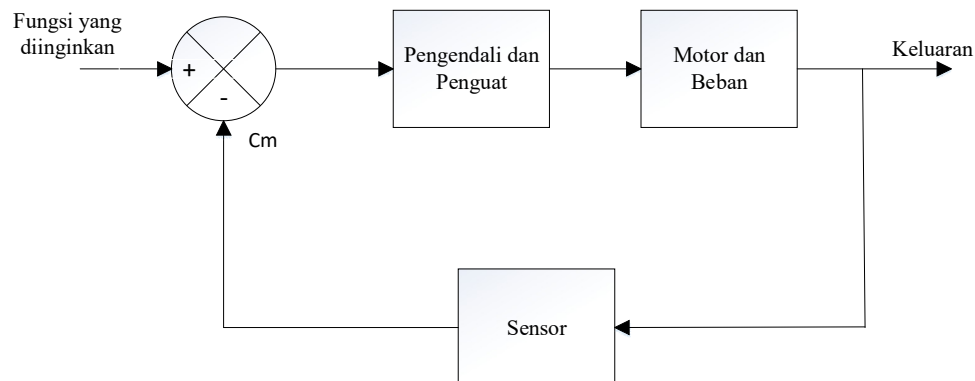


Gambar 2.15 Diagram blok sistem loop terbuka dengan menggunakan motor

Gambar 2.15 menunjukkan contoh diagram blok dari sistem loop terbuka yang digambar dengan konversi teknik pengendalian standar. Tanda panah disisi masukan dari kedua blok mewakili dari fungsi yang diinginkan. Blok pertama yang bertindak sebagai pengendali dan penguat mewakili komponen-komponen yang menerjemahkan pengaturan masukan menjadi satu cara untuk mngendalikan aktuator dalam diagram ini adalah motor dan bebannya. Keluaran mewakili untuk kerja peralatan yang diinginkan.

Dapat disimpulkan bahwa pengendali loop terbuka lebih sederhana dan lebih murah, namun hanya sesuai untuk situasi dimana semua pengaruh telah dapat diperkirakan dan tidak tergantung pada faktor-faktor luar. Perbedaan yang mendasar antara pengendali loop terbuka dan loop tertutup adalah adanya umpan balik yang akan menghasilkan sinyal umpan balik pada lintasan tertutup. Sebuah sistem pengendali loop tertutup memerlukan pemantauan dari koreksi yang berkesinambungan untuk melaksanakan fungsi dengan benar. Sistem pengendali loop tertutup, memerlukan koreksi terus-menerus untuk mendapatkan kerja yang maksimum, seperti terlihat pada gambar 2.14. Loop ditutup karna sebuah tranducer atau sensor yang mampu mengukur besaran fisik dan menerjemahkan pengukuran itu menjadi sinyal masukan

sistem, yang merupakan sinyal referensi atau titik pengaturan *set point*. Sasaran dari sistem adalah menghasilkan keluaran yang sebanding dengan masukannya.



Gambar 2.16 Diagram blok sistem pengendali *loop* tertutup dengan menggunakan motor

Sensor umpan balik mengukur variabel fisik, seperti tegangan, arus, kecepatan, posisi, temperatur atau tekanan dan satu sinyal yang sebanding dengan nilai terukur dibandingkan dengan nilai masukan. Perbedaannya disebut sinyal kesalahan atau error. Baik sinyal umpan balik maupun sinyal masukan atau referensi harus dalam domain yang sama agar dapat dicampurkan. Keluaran pencampuran sinyal kesalahan sebanding dengan perbedaan antara sinyal masukan sebagai sinyal koreksi.

Jika keluaran sama dengan masukan, perbedaannya adalah nol, dan tidak ada sinyal yang akan mencapai actuator (motor dalam diagram) dan bebanya. Karena itu keluaran sistem tetap dalam nilainya semula. Pada sistem yang dirancang dengan benar, sinyal kesalahan menyebabkan suatu tegangan actuator yang ditukan untuk menurunkan besarnya kesalahan sampai nol.

2.2.4.1 Mode Pengendali PID (*proportional integral derivative*)

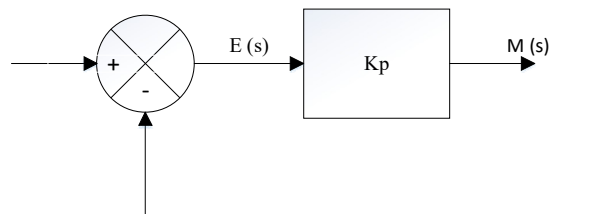
Pengendali PID adalah pengendali berumpan balik dan paling populer didunia industri. Selama lebih dari 50 tahun, kendali PID terbukti dapat memberikan perilaku kendali yang baik meski mempunyai algoritma sederhana yang mudah dipahami. Dalam sistem kendali dapat dikenal adanya beberapa macam aksi kendali, diantaranya yaitu aksi kendali *proportional*, aksi kendali *integral*, aksi kendali *derivative*. Masing-masing aksi kendali ini mempunyai keunggulan-keunggulan tertentu, dimana aksi kendali *proportional* mempunyai keunggulan *rise time* yang cepat, aksi kendali *integral* mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error*, dan aksi kendali *derivative* mempunyai keunggulan untuk meredam

overshoot/undershoot. Untuk itu agar dapat dihasilkan *output* dengan *rise time* yang cepat dan *error* yang kecil dapat digunakan ketiga aksi kendali ini menjadi kendali PID.

a. Mode Pengendali *Proportional*

Pengendalian *proportional* memiliki keluaran yang sebanding atau *proportional* dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran pengendali *proportional* merupakan perkalian antara konstanta *proportional* dengan masukannya. Perubahan sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengeluarkan output sinyal sebesar konstanta pengaliannya.

Gambar 2.17 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran seting, besaran aktual dengan besaran keluaran pengendali *proportional*. Sinyal kesalahan (*error*) merupakan selisih antara besaran seting dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi pengendali, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga *setting*) atau negatif (memperlambat tarcapainya harga yang diinginkan).



Gambar 2.17 Diagram blok pengendali *proportional*

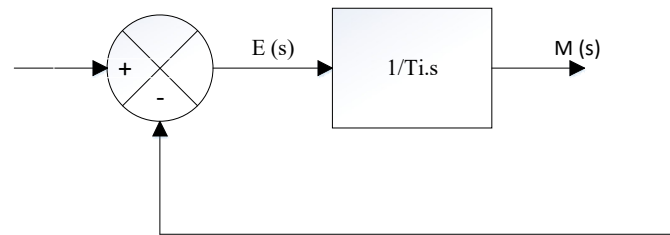
b. Mode Pengendali *Integral*

Pengendali *Integral* bekerja untuk mengatasi error menetap, fungsinya menghasilkan respon sistem yang memiliki error keadaan stabil nol. Jika sebuah *plant* tidak memiliki unsur integrator ($1/s$), pengendali *proportional* tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan stabilnya nol. Dengan pengendali *integral* respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai error keadaan stabilnya nol.

Pengendali *integral* memiliki karakteristik seperti halnya sebuah *integral*. Keluaran sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran pengendali ini merupakan penjumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran

akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan. Sinyal keluaran pengendali *integral* merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal keluaran berharga nol.

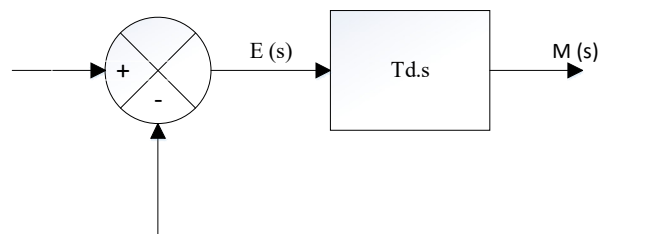
Gambar 2. 18 Menunjukkan blok diagram antara besaran kesalahan dengan keluaran suatu pengendali *integral*.



Gambar 2.18 Diagram blok pengendali *integral*

c. *Derivative controller*

Keluaran pengendali *derivative* memiliki sifat seperti halnya suatu operasi differensial. Perubahan yang mendadak pada masukan pengendali, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Gambar 2. 19 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara sinyal kesalahan dengan keluaran pengendali.



Gambar 2.19 Blok diagram pengendali *derivative*

2.2.5 Mikrokontroler Arduino Uno

Arduino Uno adalah board berbasis mikrokontroler pada ATmega 328. Board ini memiliki 14 digital input / output pin (dimana 6 pin dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, jack listrik dan tombol reset. Pin – pin ini berisi semua yang diperlukan untuk mendukung mikrokontroler, hanya terhubung ke komputer dengan kabel USB atau sumber tekanan bisa didapat dari adaptor AC – DC atau baterai untuk menggunakannya (Arduino, Inc., 2009).

Arduino Uno R3 berbeda dengan semua board sebelumnya karena Arduino Uno R3 ini tidak menggunakan chip driver FTDI USB-to-serial. Melainkan menggunakan fitur dari ATmega 16U2 yang diprogram sebagai konverter USB-to-serial.

Board Arduino Uno memiliki fitur – fitur baru sebagai berikut:

- *Pin out* : menambahkan SDA dan SCL pin yang dekat ke pin aref dan dua pin baru lainnya ditempatkan dekat ke pin RESET, dengan I/O REF yang memungkinkan sebagai *buffer* untuk beradaptasi dengan tegangan yang disediakan dari *board* sistem. Pengembangannya, sistem akan lebih kompatibel dengan prosesor yang menggunakan AVR, yang beroperasi dengan 5V dan dengan Arduino karena beroperasi dengan 3,3V. Yang kedua adalah pin yang tidak terhubung, yang disediakan untuk tujuan pengembangannya.
- Sirkuit reset
- ATmega 16U2 ganti 8U yang digunakan sebagai konverter USB-to-serial.

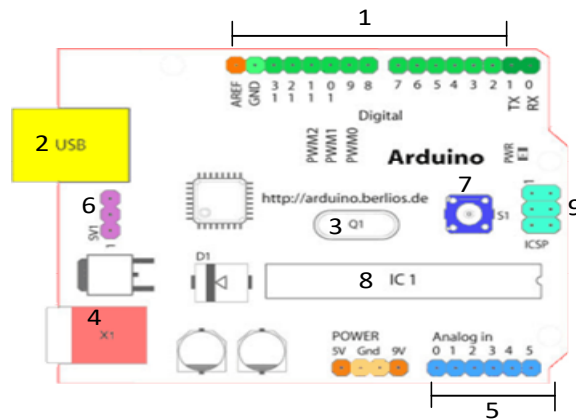
Tabel 2.1 Deskripsi Arduino Uno R3

Mikrokontroler	ATmega 328
Operating Voltage	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limit)	6-20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

Bagian utama Arduino Uno ditunjukkan pada Gambar 2.20.

1. 14 Pin Input/Output Digital (0-13)

Berfungsi sebagai input atau output, dapat diatur oleh program. Khusus untuk 6 buah pin 3, 5, 6, 9, 10 dan 11, dapat juga berfungsi sebagai pin analog output dimana tegangan output-nya dapat diatur. Nilai sebuah pin output analog dapat diprogram antara 0 – 255, dimana hal itu mewakili nilai tegangan 0 – 5V.



Gambar 2.20 Papan arduino uno

2. USB, berfungsi untuk :

- Memuat program dari komputer ke dalam papan
- Komunikasi serial antara papan dan komputer
- Memberi daya listrik kepada papan

3. Q1 – Kristal (*quartz crystal oscillator*)

Jika microcontroller dianggap sebagai sebuah otak, maka kristal adalah jantung-nya karena komponen ini menghasilkan detak-detak yang dikirim kepada microcontroller agar melakukan sebuah operasi untuk setiap detak-nya. Kristal ini dipilih yang berdetak 16 juta kali per detik (16MHz).

4. X1 – sumber daya eksternal

Jika hendak disuplai dengan sumber daya eksternal, papan Arduino dapat diberikan tegangan DC antara 9-12V.

5. Sambungan SV1

Sambungan atau jumper untuk memilih sumber daya papan, apakah dari sumber eksternal atau menggunakan USB. Sambungan ini tidak diperlukan lagi pada papan Arduino versi terakhir karena pemilihan sumber daya eksternal atau USB dilakukan secara otomatis.

7. Tombol Reset S1

Untuk me-reset papan sehingga program akan mulai lagi dari awal. Perhatikan bahwa tombol reset ini bukan untuk menghapus program atau mengosongkan microcontroller.

9. *In-Circuit Serial Programming* (ICSP)

Port ICSP memungkinkan pengguna untuk memprogram microcontroller secara langsung, tanpa melalui bootloader. Umumnya pengguna Arduino tidak melakukan ini sehingga ICSP tidak terlalu dipakai walaupun disediakan

8. IC 1 – *Microcontroller* Atmega

Komponen utama dari papan Arduino, didalamnya terdapat CPU, ROM dan RAM.

2.2.5.2 Fungsi Arduino Uno

Arduino adalah pengendali mikro single-board yang bersifat *open-source*, diturunkan dari *wiring platform*, dirancang untuk memudahkan penggunaan elektronik dalam berbagai bidang. *Hardware*-nya memiliki prosesor Atmel AVR dan *software*-nya memiliki bahasa pemrograman sendiri. Saat ini Arduino sangat populer di seluruh dunia. Banyak pemula yang belajar mengenal robotika dan elektronika lewat Arduino karena mudah dipelajari. Tapi tidak hanya pemula, para *hobbyist* atau profesional pun ikut senang mengembangkan aplikasi elektronik menggunakan Arduino.

2.2.5.3 Fungsi Unit Input dan Output Arduino Uno

Input/output digital atau digital pin adalah pin pin untuk menghubungkan arduino dengan komponen atau rangkaian digital. Contohnya, jika ingin membuat LED berkedip, LED tersebut bisa dipasang pada salah satu pin input atau output digital dan ground. Komponen lain yang menghasilkan output digital atau menerima input digital bisa disambungkan ke pin pin ini. Input analog atau analog pin adalah pin pin yang berfungsi untuk menerima sinyal dari komponen atau rangkaian analog. Contohnya, potensiometer, sensor suhu, sensor cahaya, dll.

2.2.6 Motor Stepper

Motor stepper adalah motor DC yang gerakannya bertahap (*step per step*) dan memiliki akurasi yang tinggi yang dikendalikan dengan pulsa-pulsa digital, bukan dengan

memberikan tegangan yang terus-menerus. Deretan pulsa diterjemahkan menjadi putaran *shaft*, dimana setiap putaran membutuhkan jumlah pulsa yang ditentukan. Satu pulsa menghasilkan satu kenaikan putaran atau step, yang merupakan bagian dari satu putaran penuh. Oleh karena itu, perhitungan jumlah pulsa dapat diterapkan untuk mendapatkan jumlah putaran yang diinginkan. Perhitungan pulsa secara otomatis menunjukkan besarnya putaran yang telah dilakukan, tanpa memerlukan informasi balik (*feedback*).

Ketepatan kontrol gerak motor stepper terutama dipengaruhi oleh jumlah step tiap putaran dalam satuan sudut (0.75, 0.9, 1.8); semakin banyak jumlah *step*, semakin tepat gerak yang dihasilkan. Untuk ketepatan yang lebih tinggi, beberapa driver motor *stepper* membagi step normal menjadi setengah step (*half step*) atau mikro step. Kecepatan motor stepper pada dasarnya ditentukan oleh kecepatan pemberian data pada komutatornya. Semakin cepat data yang diberikan maka motor stepper akan semakin cepat pula berputarnya. Pada kebanyakan motor stepper kecepatannya dapat diatur dalam daerah frekuensi audio dan akan menghasilkan putaran yang cukup cepat.

Elemen-elemen berikut menentukan karakteristik suatu motor stepper:

- Tegangan.

Motor stepper biasanya mempunyai tegangan nominal. Tegangan yang diberikan kadang-kadang melebihi tegangan nominal untuk mendapatkan torsi yang dibutuhkan, tetapi dapat menyebabkan panas berlebih dan mempersingkat usia motor.

- Hambatan.

Karakteristik lainnya adalah hambatan-per-lilitan. Hambatan ini akan menentukan arus yang ditarik oleh motor, dan juga mempengaruhi kurva torsi dan kecepatan kerja maksimum motor.

- Derajat per langkah (*step angle*)

Faktor ini menentukan berapa derajat poros akan berputar untuk setiap langkah penuh (full step). Operasi setengah langkah (*half step*) akan melipat-gandakan jumlah langkah-per-revolusi, dan mengurangi derajat-per-langkahnya. Derajat-per-langkah sering disebut sebagai resolusi motor.



Gambar 2.21 Motor *stepper*

2.2.6.1 Prinsip Kerja Motor Stepper

Motor Stepper adalah sebuah perangkat pengandali yang menkonversikan bit-bit menjadi posisi rotor. Motor stepper memiliki pin-pin input yang menjadi kutub-kutub magnet di dalam motor. Bila salah satu pin diberi sumber tegangan, pin tersebut akan mengaktifkan kutub di dalam magnet sebagai kutub utara dan kutub yang tidak diberi tegangan sebagai kutub selatan. Dengan terdapatnya 2 kutub di dalam motor ini, rotor di dalam motor yang memiliki kutub permanen akan mengarah sesuai dengan kutub-kutub input. Kutub utara rotor akan mengarah ke kutub selatan stator sedangkan kutub selatan rotor akan mengarah ke kutub utara stator. Pada motor stepper terdapat berbagai macam tipe, antara lain

- *Unipolar*
- *Bipolar*
- *Single-phase*
- *Multy-phase* dan sebagainya.

Skema umum motor stepper dapat dilihat seperti gambar 2.22. Penampang motor stepper dengan empat koil. Setiap koil memiliki empat kondisi kutub. Bila kondisi satu yang aktif, posisi rotor akan nampak seperti di atas. Bila kondisi bergeser ke dua, rotor akan berputar ke kiri dengan sudut putar sesuai dengan jarak kondisi satu dan dua. Namun bila setelah kondisi satu, kondisi empat yang aktif, rotor akan menuju ke koil dengan pin empat paling dekat dengan pin satu dari kondisi sebelumnya. Hal ini menyebabkan rotor berputar ke kanan dan seterusnya. ketelitian sudut putar pada motor stepper sebanding dengan banyaknya kondisi masukkannya. Pada kondisi seperti gambar stepper dengan empat koil dan empat kondisi kutub dengan metode *full step* akan mampu menghadap ke 16 sudut berbeda.



Gambar 2.22 Skema motor stepper

Ada dua tipe pengendalian dengan metoda full step yaitu dengan pembangkitan tunggal dan pembangkitan ganda. Untuk tipe pembangkitan tunggal dapat dilihat lebih jelas pada tabel 2.2. Tabel karakteristik pembangkitan stepper tersebut hanya ada satu kondisi yang aktif. Misal koil satu aktif dan lainnya mati, maka rotor akan menghadap ke kutub satu. Bila koil dua aktif, dan kutub lainnya off, rotor akan menghadap ke kutub dua dan seterusnya.

Tabel 2.2 Karakteristik Stepper Pembangkitan Tunggal

Step	1	2	3	4
Koil 1	on	off	off	Off
Koil 2	off	on	off	Off
Koil 3	off	off	on	Off
Koil 4	off	off	off	On

Pada tabel dua koil aktif bersamaan, dan dua lainnya mati. Hal ini akan menyebabkan rotor menghadap diantara kutub yang aktif. Misalkan untuk kondisi koil satu dan dua aktif, rotor akan menghadap ke titik diantara kutub satu dan dua, dan seterusnya.

2.2.7 Turbin *Cross-Flow*

Turbin *Cross-Flow* 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.

Turbin *Cross-Flow* secara umum dapat dibagi dalam dua tipe (Meier, Ueli, 1981) yaitu :

- Tipe T1, yaitu Turbin *Cross-Flow* kecepatan rendah .

- Tipe T3, yaitu Turbin *Cross-Flow* kecepatan tinggi.

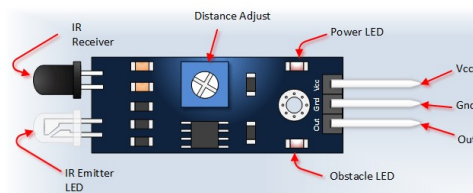


Gambar 2.23 Turbin *Cross-Flow*

Cara mengoperasikan Turbin *Cross-Flow*, pertama kali buka pintu utama disekitar bendungan agar air dapat mengalir melalui kanal ke bak penenang. Setelah permukaan air di kolam penampung naik setinggi 1,5 meter di atas mulut pipa pesat hingga sebagian air ada yang terbang melimpah melalui saluran limbah, maka pada saat itu pula pintu di mulut pipa pesat dibuka hingga pipa pesat penuh terisi namun pada saat itu air tak dapat masuk turbin sebab katup di bawah di dalam posisi menutup penuh. Selanjutnya sekarang kegiatan pengoperasian berlangsung di rumah pembangkit. Bukalah katup secara berkala dengan perantaraan regulator tangan sampai air dapat keluar dari nozel dan akhirnya memutarakan *runner*. Setelah runner berputar normal, lepaskan pasak penghubung katup – regulator, proses pengaturan katup ini selanjutnya dilakukan oleh governor mekanis. Selama pengoperasian awal ini, generator jangan dahulu dihubungkan dengan beban, namun setelah governor bekerja secara normal baru generator dihubungkan dengan beban. Untuk selanjutnya, penyesuaian pemakaian beban dengan pembukaan katup bekerja secara otomatis yang dilakukan oleh governor.

2.2.8 Sensor Infrared (IR)

Sensor infrared sebagai sensor kecepatan sensor ini digunakan untuk mengetahui berapa frekuensi yang dihasilkan oleh generator dengan cara mengukur berapa kecepatan putaran turbinnya



Gambar 2.24 Sensor infrared (IR)

BAB 3

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1. Tujuan Penelitian

1. Mengevaluasi sistem kontrol PLTMH yang sudah ada;
2. Merancang dan membuat prototipe alat pengendali frekuensi yang disebut dengan *Governor Load Control (GLC)* untuk PLTMH;
3. Menghasilkan alat kontrol untuk PLTMH yang dapat meningkatkan efisiensi dan kontinuitas operasi PLTMH.

3.2. Manfaat Penelitian

1. Setelah diperoleh permasalahan yang sering terjadi pada PLTMH yang sudah ada, dapat dilakukan langkah-langkah perbaikan dan perencanaan PLTMH dimasa datang
2. Prototipe alat *smart* kontrol dapat dikembangkan menjadi sebuah produk tepat guna untuk perbaikan kualitas PLTMH yang sudah ada dan yang direncanakan
3. Bahan pertimbangan bagi produsen turbin PLTMH dalam merencanakan sistem *guide vane* yang kompatibel dengan governor

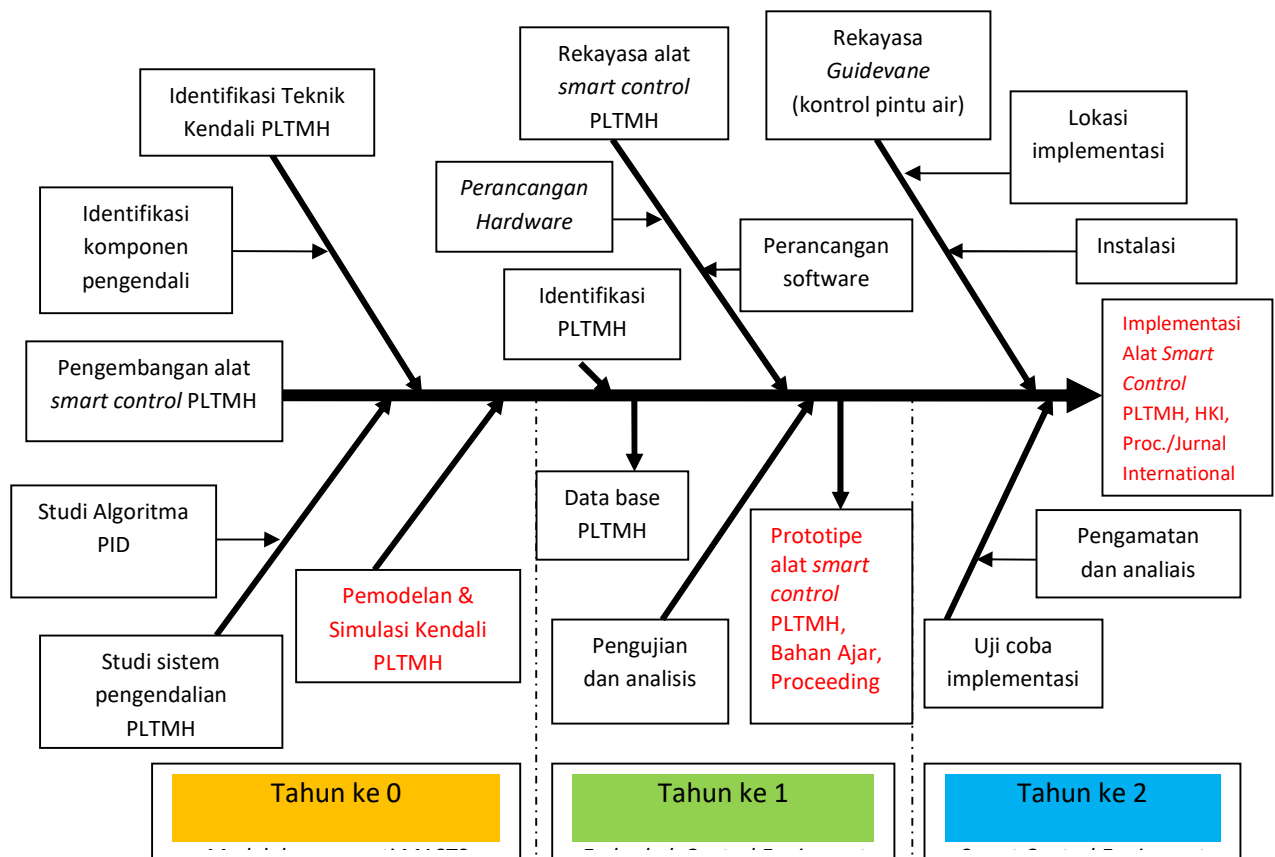
BAB 4

METODE PENELITIAN

Penelitian tentang pengembangan alat *smart control* sebagai pengendali frekuensi dan tegangan PLTMH bertempat di laboratorium **Sistem Tenaga Listrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Bung Hatta** dan **Pabrik Produksi Komponen Turbin PLTMH CV. Prowater**. Penelitian yang terkait dengan pengontrolan PLTMH merupakan lanjutan penelitian yang sudah dilakukan sejak tahun 2005. Ada empat tahapan penelitian yaitu;

1. Tahapan pertama yaitu studi literatur untuk memodelkan sistem kendali PLTMH yang kompatibel dengan program MATLAB Simulink. Luaran pada tahap ini adalah model sistem kendali PLTMH. Selanjutnya mensimulasikan untuk mendapatkan perilaku frekuensi dan tegangan PLTMH.
2. Tahap kedua yaitu simulasi dan analisis sistem kendali PLTMH menerapkan algoritma PID. Luaran dari tahap ini adalah parameter kendali PID yang sesuai.
3. Tahap ketiga adalah identifikasi sistem pengendali PLTMH. Keluarannya adalah data base dan performansi PLTMH yang sudah ada, khususnya di kabupaten Solok Selatan. Selanjutnya merancang *software* dan *hardware* sistem pengendali PLTMH, dimana parameternya mengacu pada hasil rancangan tahap kedua. Luaran dari tahapan ini adalah prototipe sistem pengendali PLTMH berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC).
4. Tahap keempat adalah merancang *governor* dan *guide vane* yang berfungsi sebagai alat pengendali katub air berbasis *microcontroller*. Alat ini disesuaikan dengan kebutuhan PLTMH yang sudah ditentukan sebelumnya. Selanjutnya menginstalasi peralatan dan menguji kinerja alat *smart control*. Pengujian meliputi *respons* dan keandalan. Hasil pengujian dianalisis dan dibuat laporannya. Untuk mempublikasikan hasil temuan, hasil penelitian ditulis dalam bentuk jurnal dan selanjutnya di-submit ke jurnal *international* dan diajukan ke HKI.

Tahapan penelitian alat *smart control* PLTMH ditunjukkan dalam bentuk *fishbone diagram* seperti pada Gambar 4.1.



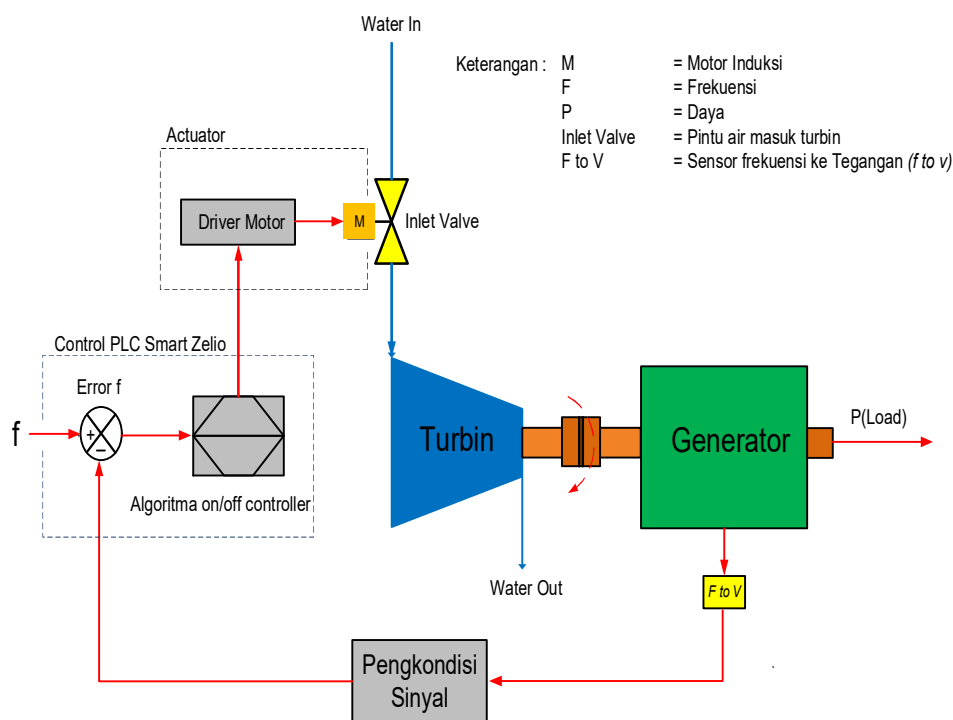
Gambar 4.1 Fisbone Diagram Pengembangan Alat Smart Control PLTMH

Deskripsi Kegiatan

Kegiatan (Tahap I dan II) dimulai dari studi literatur sehingga menghasilkan model kendali frekuensi dan tegangan pada pembangkit. Model tersebut disimulasikan menggunakan program MATLAB Simulink. Untuk memperbaiki tanggapan peralihan, ditambahkan pengendali klasik yaitu PID (*proportional integral derivative*) yang makalahnya sudah dimuat dalam proceeding The 6th Seminar on Intelligent Technology and ITS Application tahun, 2005. Penelitian yang terkait dengan pengendali cerdas yaitu pengendali ANFIS (*adaptive neuro fuzzy inference systems*) yang diterapkan pada pengendali kecepatan mesin DC *Brushless*. Hasil penelitian dipublikasi dalam proceeding *International Conference Electrica Engineering (ICEEI)* 2011. Penelitian tentang pengendali frekuensi pada PLTU menggunakan metode Linier Kuadratik Regulator (LQR) dipublikasi dalam jurnal Teknos-2K FTI Universitas Bung Hatta.

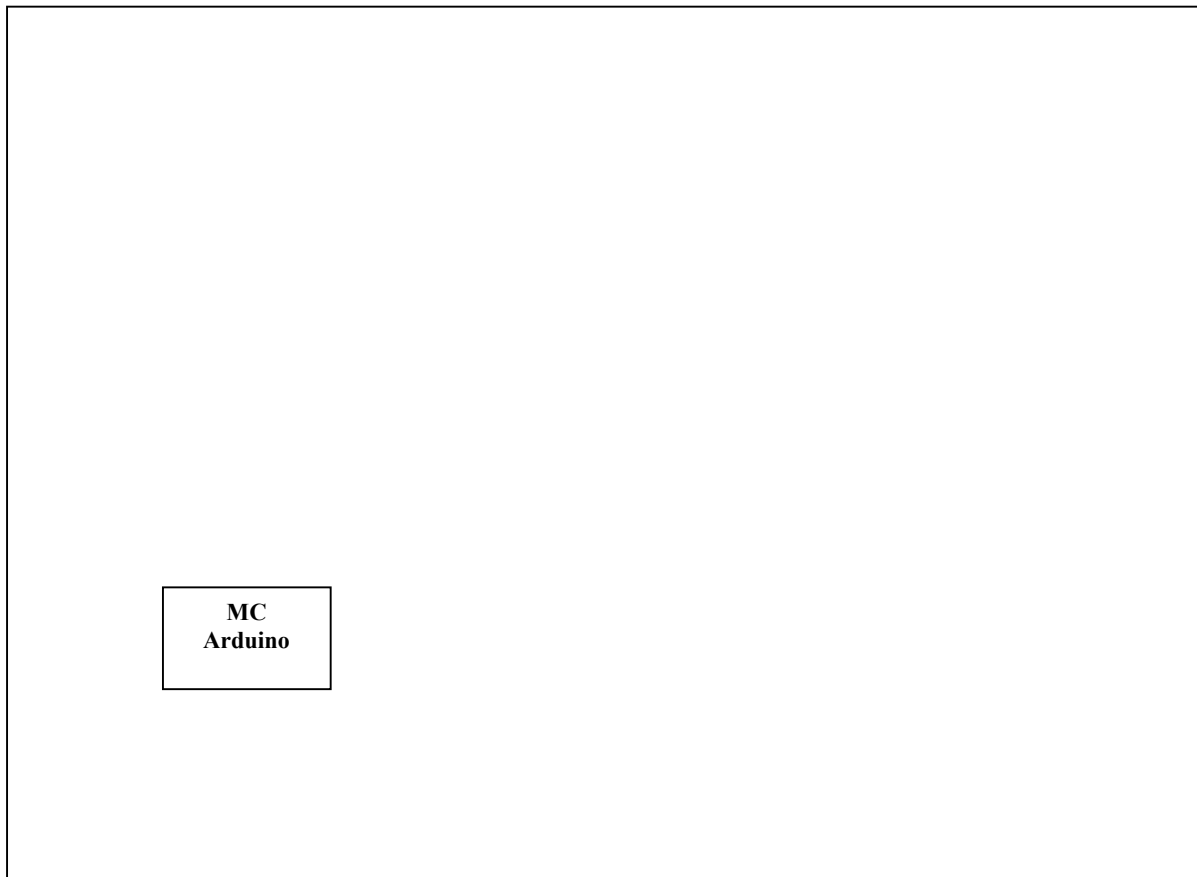
Tahap ke III, perancangan dan implementasi prototipe *Governor Load Control* (GLC) berbasis PLC yang sudah diuji kering di bengkel produksi peralatan PLTMH yaitu CV. Prowater Multi Teknik. Hasilnya menunjukkan respons yang bagus, dimana *guide vane* dapat membuka atau menutup sesuai dengan *error* frekuensi yang terjadi. Sebagai simulasi perubahan frekuensi digunakan generator frekuensi. Hasil penelitian sudah dipublikasikan pada *international conference* ESTIC IV (*Engineering Science and Technology International Conference*) pada 30-31 Agustus 2016.

Selanjutnya dirancang mekanik GLC yang sesuai dengan kapasitas dan kondisi PLTMH yang akan dijadikan sebagai objek penelitian. Komponen pengendali menggunakan *microcontroller* Arduino dengan algoritma PID dan ANFIS. Sebelumnya dilakukan identifikasi PLTMH yang sudah ada, sehingga menghasilkan data base PLTMH, khususnya di kabupaten Solok Selatan. Tahap keempat adalah menyempurnakan *hardware* dan *software* pengendali PLTMH dan menerapkannya pada PLTMH. Pada tahap sudah dirancang GLC dan *guide vane* yang berfungsi untuk mengatur frekuensi dengan cara mengatur debit air yang masuk ke turbin.



Gambar 4.2 Diagram Segaris Sistem Pengendali PLTMH Penelitian Tahun I

Pemilihan komponen *microcontroller* Arduino sebagai alat pengendali adalah karena mudah didapatkan di pasaran, harganya relatif murah, kapasitas memori besar, kecepatan pengolahan data tinggi dan mudah diprogram. Diagram segaris sistem pengendali PLTMH untuk penelitian tahun II ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.3 Diagram Segaris Sistem Pengendali PLTMH Penelitian Tahun II

Keterangan :

MDC	: Motor Stepper
Arduino Uno	: <i>Microcontroller</i>
GS	: Generator sinkron
PT	: Potensial Transformator
<i>Valve</i>	: <i>Guide vane</i>
Z	: Beban
<i>Exciter</i>	: Penguat medan generator
AVR	: <i>Automatic Voltage Regulator</i>

BAB 5

HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

5.1. Identifikasi Penerapan GLC pada PLTMH

Sistem PLTMH ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Sistem PLTMH Secara Visual

5.2. Perancangan dan Pengujian GLC di Laboratorium

Pengujian terdiri dari 3 bahagian pokok antara lain;

1. Pengujian perangkat keras (*hardware*).
2. Pengujian perangkat lunak (*software*).
3. Pengujian system keseluruhan (*hardware* dan *software*).
 - a. Pengujian kontrol Secara manual (*Open Loop*)
 - b. Pengujian Kontrol Secara Otomatis (*Close Loop*)

Komponen-komponen perangkat keras yang diuji antara lain;

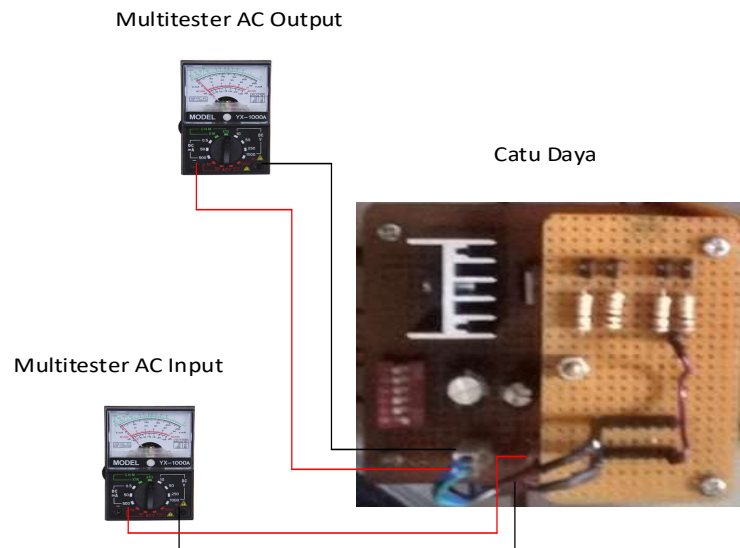
1. Pengujian Catu Daya.
2. Pengujian Arduino Uno

3. Pengujian Driver Motor Stepper

4. Pengujian Sistem Keseluruhan

5.2.1. Pengujian Catu daya.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui tegangan keluaran yang dibutuhkan kontroler. Pada rangkaian kontroler dibutuhkan tegangan kerja sebesar 9 VDC. Pengujian catu daya digambarkan oleh gambar 5.2.



Gambar 5.2. Pengujian Catu Daya.

Dari gambar 5.2. dapat diketahui bahwa kabel merah pada multi dihubungkan pada positif catu daya, dan kabel hitam dihubungkan pada keluaran negatif catu daya. Sumber PLN 220 V_{AC} diturunkan menjadi 25V_{AC} oleh transformator dan kemudian disearahkan menggunakan dioda. Untuk mendapatkan tegangan 9V_{DC}, 12V_{DC}, dan 24V_{DC} digunakan IC regulator 7809,7812,7824 untuk mendapatkan keluaran tegangan 9V_{DC}, 12V_{DC}, dan 24V_{DC} yang mana sumber ini digunakan untuk rangkaian kontrol Arduino. Hasil pengujian tegangan rangkaian catu daya ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Hasil pengujian catu daya

Voltmeter AC 1 (Primer)	Voltmeter AC 2 (Sekunder)	Voltmeter DC		
		LM7805	LM7812	LM7824
220 V	25 VAC	9VDC	11.86VDC	23.9VDC

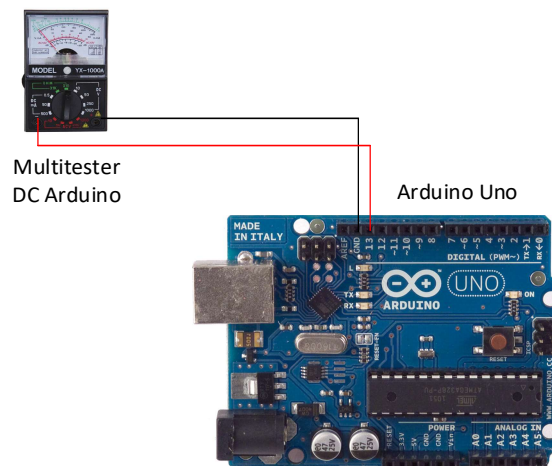
5.2.2. Pengujian Arduino Uno

Pengujian Port I/O arduino uno dilakukan untuk menguji nilai keluaran I/O arduino sehingga diketahui setiap Pin I/O arduino kondisinya baik dan siap digunakan. Pada pengujian ini alat ukur yang digunakan adalah multimeter (Voltmeter DC).

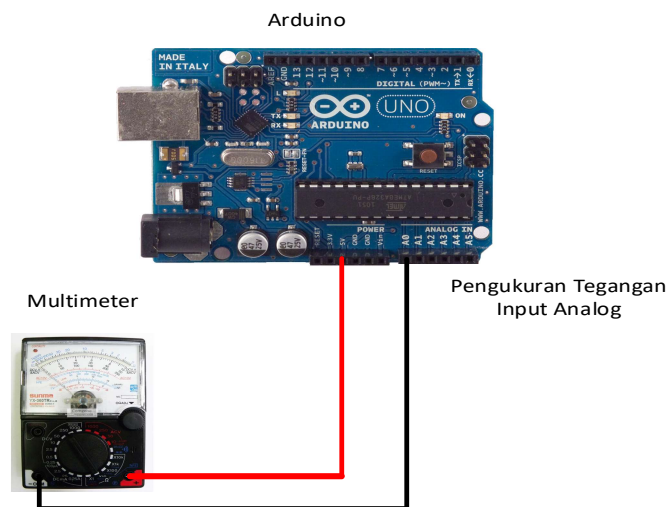
Adapun langkah-langkah pada pengujian I/O arduino uno sebagai berikut :

1. Menghubungkan arduino dengan sumber tegangan dari catu daya 9VDC. .
2. Dengan menggunakan multimeter (Voltmeter DC), menghubungkan port I/O seperti digambarkan oleh.
3. Kemudian ambil data setiap port I/O secara berurutan dari port input digital pin 2,4,7,8,12,dan 13, input analog pin A0-A5 dan Port Output pin 2-pin 13.

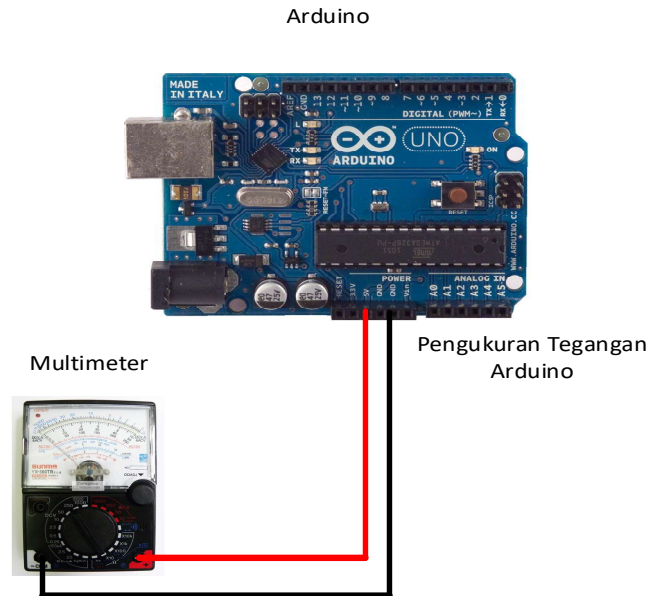
Pengukuran menggunakan multimeter bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan pada masing-masing port pada arduino uno.



Gambar 5.3 Pengujian port arduino uno dengan multitester



Gambar 5.4 Pengujian input analog arduino uno dengan multitemeter



Gambar 5.5 Pengujian tegangan arduino uno dengan multitemeter

Penjelasan dari gambar di atas sebagai berikut:

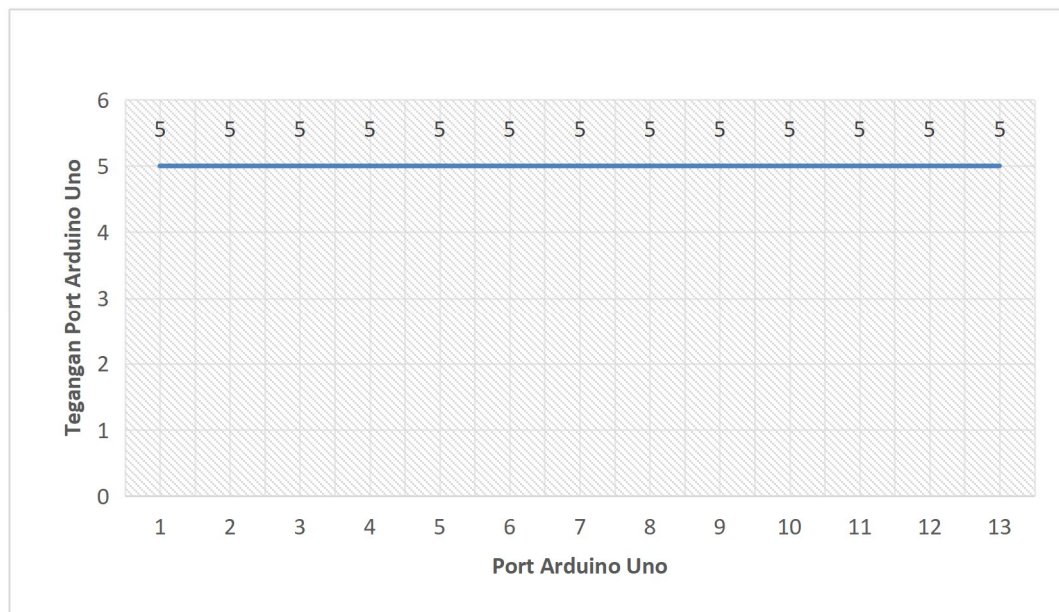
Langkah pertama yang dilakukan adalah probe positif (merah) multitester diletakan pada salah satu port arduino uno yaitu pada pin digital13, sedangkan probe negatif (hitam) multitester diletakan pada pin GRD (ground). Pengujian arduino uno dilakukan dengan memindahkan probe positif (merah) pada setiap port-port digital. Dapat dilihat hasil pengujian port mikrokontroler arduino uno pada Tabel 5.2.

Tabel Hasil Pengujian Arduino Uno

Tabel 5.2 Hasil pengukuran port Arduino Uno 1-13

Port Arduino Uno	
Port	Tegangan (Volt)
1	5
2	5
3	5
4	5
5	5
6	5
7	5
8	5
9	5
10	5
11	5
12	5
13	5

Berdasarkan hasil pengukuran port digital arduino dengan multimeter seperti yang tercatat pada tabel, maka dapat dibuat grafik seperti Gambar 5.6.

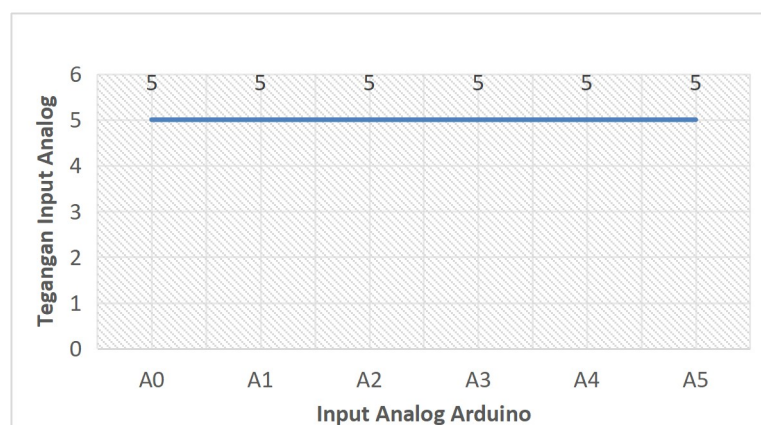


Gambar 5.6 Grafik pengujian port arduino uno dengan multimeter

Tabel 5.3 Hasil pengukuran input analog arduino ano

Port Arduino Uno	
Input Analog	Tegangan (Volt)
A0	5
A1	5
A2	5
A3	5
A4	5
A5	5

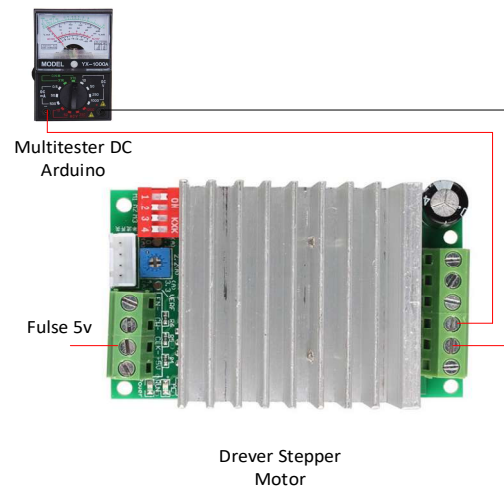
Berdasarkan hasil pengukuran input analog arduino dengan multimeter seperti yang tercatat pada tabel, maka dapat dibuat grafik seperti Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Grafik pengujian input analog arduino uno dengan multimeter

5.2.3. Pengujian Driver Motor Stepper

Driver motor stepper dilakukan pengujian dengan cara memberikan input pada driver motor dengan cara menekan tombol forward dan reverse pada rangkaian kontrol pada arduino. Dengan menekan salah satu botton forward atau reverse maka tegangan aoutput yang di keluarkan driver +24VDC.



Gambar 5.8 Pengujian driver stepper motor dengan multimeter

5.2.4. Pengujian Perangkat Lunak (*Software*)

Pengujian perangkat lunak bertujuan untuk mengamati apakah software yang telah dirancang agar dapat di-upload ke dalam Arduino Uno agar dapat mengetahui keadaan Arduino dalam kondisi baik dan bisa terhubung dengan perangkat komputer (PC) Untuk berkomunikasi dengan *arduino* menggunakan *software* arduino, Arduino harus terhubung dengan komputer menggunakan kabel USB port. Adapun peralatan yang mendukung pengujian perangkat lunak ini antara lain:

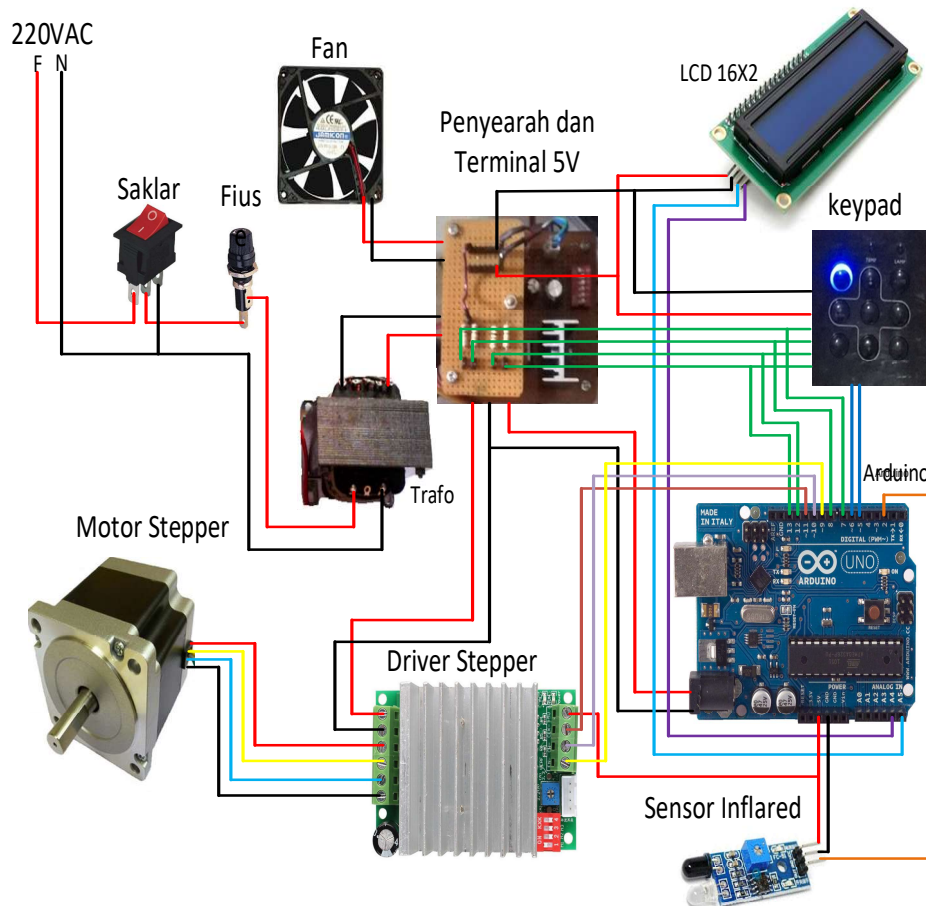
1. Kabel untuk menghubungkan modul ke PC melalui USB port
2. PC (Perangkat Komputer)/Laptop
3. Software Arduino Uno



Gambar 5.9 Pengujian perangkat lunak

5.2.5. Pengujian system keseluruhan (*hardware dan software*)

Untuk pengujian keseluruhan bisa dilihat pada gambar 5.10, pengujian alat keseluruhan dengan menggunakan frekuensi, dan hasil pengujian keseluruhan bisa dilihat pada tabel .



Gambar 5.10 Rangkaian Pengujian GLC

Dari hasil pengujian dapat disimpulkan dengan tabel hasil pengujian keseluruhan sistem pengaturan frekuensi, yaitu dengan sistem pengujian manual dan hasil pengujian secara otomatis.

➤ **Pengujian sistem manual (open loop)**

Pengujian secara manual ini dengan cara menekan keypad pada sistem kontrol, untuk merubah nilai error. Maka didapat hasil Pengujian kontrol secara manual pada tabel 5.4.

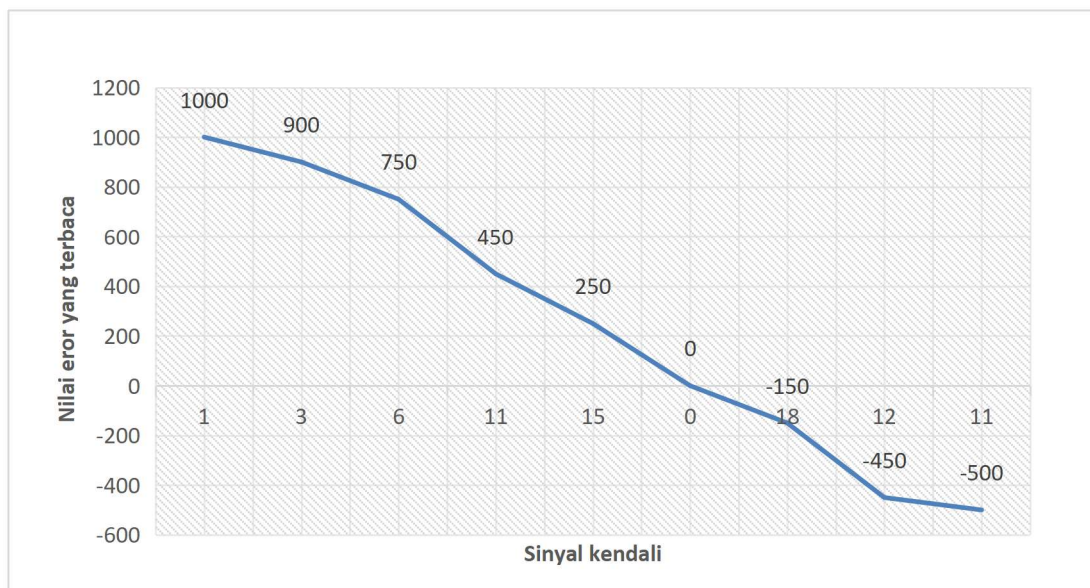
Tabel 5.4 Hasil Pengujian Kendali Motor secara Open Loop (Manual)

No	Error	Sinyal Kendali	RPM (Gear box)	Frekuensi (Hz)	Ket
1	1000	1	38	0	Forward
2	900	3	32,3	5	Forward
3	750	6	26,6	20	Forward
4	450	11	17,1	30	Forward
5	250	15	9,5	45	Forward
6	0	0	0	50	Stop
7	-150	18	7,05	55	Reverse
8	-450	12	19,5	60	Reverse
9	-500	11	17,1	65	Reverse

Keterangan:

1. Nilai error didapatkan dari pengurangan sp (set poin) dengan rpm.
2. Sinyal kendali adalah sinyal yang akan di inputkan ke driver motor.

Dari tabel 5.4 pengujian kontrol secara manual di atas dapat dibuat grafik seperti gambar 5.10.



Gambar 5.10 Perubahan sinyal kendali dari pengujian kontrol secara manual (Open Loop)

➤ **Pengujian Kontrol Secara Otomatis (*Close Loop*)**

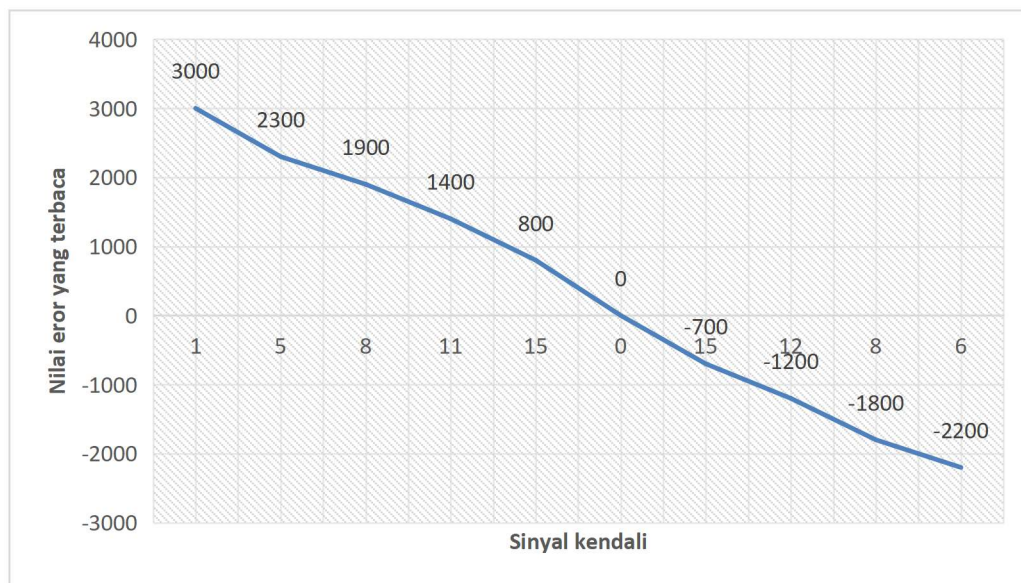
Dari tabel pengujian kontrol secara manual diatas dapat dibuat grafik seperti Gambar 5.11.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian Kendali Motor secara Close Loop (Otomatis)

No	eror	sinyal kendali	RPM (Turbin)	Frekuensi (Hz)	Ket
1	3000	1	0	0	Forward
2	2300	5	700	5	Forward
3	1900	8	1100	20	Forward
4	1400	11	1600	30	Forward
5	800	15	2200	45	Forward
6	0	0	3000	50	Stop
7	-700	15	2700	55	Reverse
8	-1200	12	1800	60	Reverse
9	-1800	8	1200	65	Reverse
10	-2200	6	800	75	Reverse

Keterangan tabel di atas :

1. Nilai eror didapatkan dari pengurangan sp (set poin) dengan rpm.
2. Sinyal kendali adalah sinyal yang akan di inputkan ke driver motor.



Gambar 5.11 Perubahan sinyal kendali dari pengujian kontrol secara otomatis (*Close Loop*)

5.3.Perhitungan dan Analisis

Perhitungan data dilakukan berdasarkan pengujian yang telah dilakukan sebelumnya.

5.3.1. Perhitungan Tegangan I/O Catu Daya

Perhitungan tegangan i/o catu daya arduino dapat dihitung dengan membandingkan nilai tegangan input dan output sesuai nilai standar data sheet komponen dengan membandingkan nilai tegangan hasil pengukuran maka dapat dihitung persentase kesalahan hasil pengukuran pada tabel 5.1. Hasil pengujian catu daya sebagai berikut:

$$\%error = \frac{\text{tegangan operasi}(\text{data sheet}) - \text{hasil pengukuran}}{\text{tegangan operasi}(\text{data sheet})} \times 100 \%$$

- Persentase kesalahan output IC LM7809

$$\%error = \frac{9 - 9}{9} \times 100 \% = 0 \%$$

- Persentase kesalahan output IC LM7812

$$\%error = \frac{12 - 11.86}{12} \times 100 \% = 0.01\%$$

- Persentase kesalahan output IC LM7824

$$\%error = \frac{24 - 23.9}{24} \times 100 \% = 1,73 \%$$

5.3.2. Perhitungan Tegangan I/O Arduino Uno

Berdasarkan hasil pengukuran multimeter seperti yang tercatat pada tabel 5.2, sehingga dapat ditentukan tegangan rata port tersebut dengan persamaan :

$$V_{rata - rata} = \frac{V1 + V2.....Vn}{n}$$

$$V_{rata - rata} = \frac{5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5}{13} = 5V$$

Pada persamaan di atas, dapat dijelaskan bahwa tegangan rata-rata dari port arduino uno 5V. Pada data sheet arduino uno tegangan operasi yaitu sebesar 5V. Maka persentase kesalahan (*error*) pada hasil pengukuran yaitu:

$$\%error = \frac{\text{tegangan operasi}(\text{data sheet}) - \text{hasil pengukuran}}{\text{tegangan operasi}(\text{data sheet})} \times 100\%$$

$$\%error = \frac{5 - 5}{5} \times 100\% = 0 \%$$

5.4. Analisa Perhitungan Ulir Pada Governor

Analisa perhitungan ulir pada governor ini bertujuan untuk menentukan berapa derajat terbukanya *guide vane* apabila poros ulir diputar, berikut adalah tabel analisa perhitungan ulir.

Tabel 5.6. Analisa perhitungan ulir pada governor

Putaran yang diberikan terhadap ulir governor	Berapa derajat terbukanya <i>guide vane</i>
1 putaran	1,5°
2 putaran	3°
3 putaran	4,5°
4 putaran	6°
5 putaran	7,5°
6 putaran	9°
7 putaran	10,5°
8 putaran	12°

Dari tabel 5.6 dapat diketahui bahwa setiap satu putaran yang diberikan pada ulir governor maka *guide vane* akan membuka atau menutup sebesar 1,5° dan bukaan maksimal *guide vane* yaitu sebesar 30° maka putaran yang harus dibutuhkan sekitar 20 putaran.

5.5. Pembahasan

1. Setelah catu daya dinyalakan, system dimulai dengan ditekannya tombol START.
2. Arduino akan berada dalam mode “*ready*”, yaitu keadaan dimana mesin siap dijalankan namun belum adanya eksekusi apapun. Keadaan motor adalah dalam posisi diam. Sedangkan sensor frekuensi terus mendeteksi nilai frekuensi output generator namun tanpa adanya eksekusi pada Arduino.
3. Tombol RUN adalah untuk memulai kerja system pengaturan tegangan secara otomatis. Jika tombol RUN tidak ditekan maka mesin mode ready ini siap untuk dikendalikan secara manual.
4. Pengendalian secara manual dengan menekan tombol “*Forward* (buka Governor)” maupun “*Reverse* (Tutup Governor)”.

5. Ketika user melihat adanya penurunan frekuensi output akibat adanya perubahan beban, maka tombol Buka Governor ditekan. Tombol akan memberikan sinyal pada Arduino dengan eksekusi berupa berputarnya motor secara clockwise. Putaran motor yang dikopel dengan valve akan membuka governor dan menyebabkan debit air yang masuk ke turbin bertambah sehingga frekuensi dapat bertambah dan mencapai frekuensi yang stabil.
6. Begitu pula sebaliknya ketika adanya peningkatan frekuensi output, maka user menekan tombol Tutup Governor sehingga motor berputar *counter clock wise* dan menyebabkan debit air turbin berkurang sehingga frekuensi pun berkurang.
7. Ketika mencapai range frekuensi normal maka user melepas push button tersebut dan putaran motor akan berhenti sehingga posisi governor terkunci dan frekuensi tetap stabil.
8. Setelah tombol RUN ditekan, system akan bekerja secara otomatis. Pengendalian manual secara langsung akan terkunci dan tidak bisa digunakan jika tombol RUN ditekan. Kemudian Arduino akan menginisialisasi input dari sensor frekuensi.
9. Sensor frekuensi akan memberikan sinyal secara terus menerus kepada Arduino sepanjang waktu, dan proses perhitungan kestabilan frekuensi dilakukan secara otomatis di dalam frekuensi dengan adanya fungsi COMPARATOR.
10. Jika terdeteksi frekuensi di bawah batas normal ($f < 49$ Hz) maka Arduino akan memberikan sinyal pada motor untuk berputar clock wise, sehingga governor membuka dan memberikan debit air yang lebih besar pada turbin.
11. Proses ini berlangsung terus hingga adanya sinyal dari sensor frekuensi bahwa frekuensi Setelah berada dalam range normal atau sensor Upper Limit yang memberikan sinyal ketika bukaan governor telah mencapai maksimal. Apabila frekuensi telah masuk range normal atau sensor Upper Limit mendeteksi valve governor telah membuka maksimal, maka Arduino akan langsung Memberikan sinyal brake motor sehingga perputaran motor berhenti.
12. Begitu pula jika terdeteksi frekuensi di atas batas normal ($f > 51$ Hz) maka Arduino akan memberikan sinyal pada motor untuk berputar counter clock wise, sehingga governor menutup dan memberikan debit air yang lebih kecil pada turbin.
13. Proses ini berlangsung terus hingga adanya sinyal dari sensor frekuensi bahwa frekuensi Setelah berada dalam range normal atau sensor Lower Limit yang memberikan sinyal ketika governor telah menutup maksimal. Apabila

frekuensi telah masuk range normal atau sensor Lower Limit mendeteksi valve governor telah menutup maksimal, maka Arduino akan langsung memberikan sinyal brake motor sehingga putaran motor berhenti.

14. Proses ini bekerja terus menerus selama adanya perubahan frekuensi dan akan mengkondisikan frekuensi output generator selalu berada dalam range normal dengan membuka atau menutup governor. o. Jika ingin menghentikan proses ini maka tombol OFF ditekan, Arduino akan memberikan sinyal kepada motor untuk berputar *counter clock wise* hingga sensor *Lower Limit on*. Ketika sensor ini on maka menandakan governor telah menutup sempurna dan akan memberikan sinyal pada Arduino untuk mengerem motor.

5.6. Instalasi Governor Load Control (GLC)

Setelah pengujian GLC di Laboratorium dan bengkel CV. Prowater, dilanjutkan pengujian di lapangan. Lokasi yang dipilih adalah PLTMH Lubuk Tempurung Kelurahan Kuranji Kecamatan Kuranji Kota Padang, PLTMH tersebut berkapasitas 10 kW.

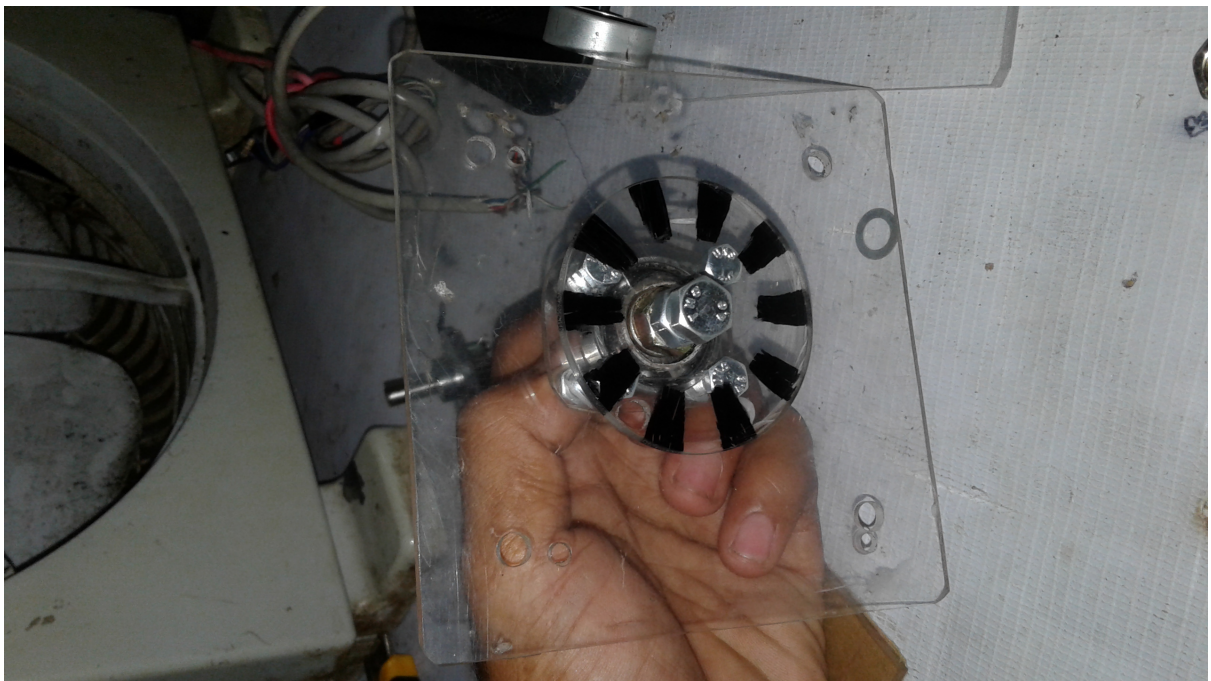
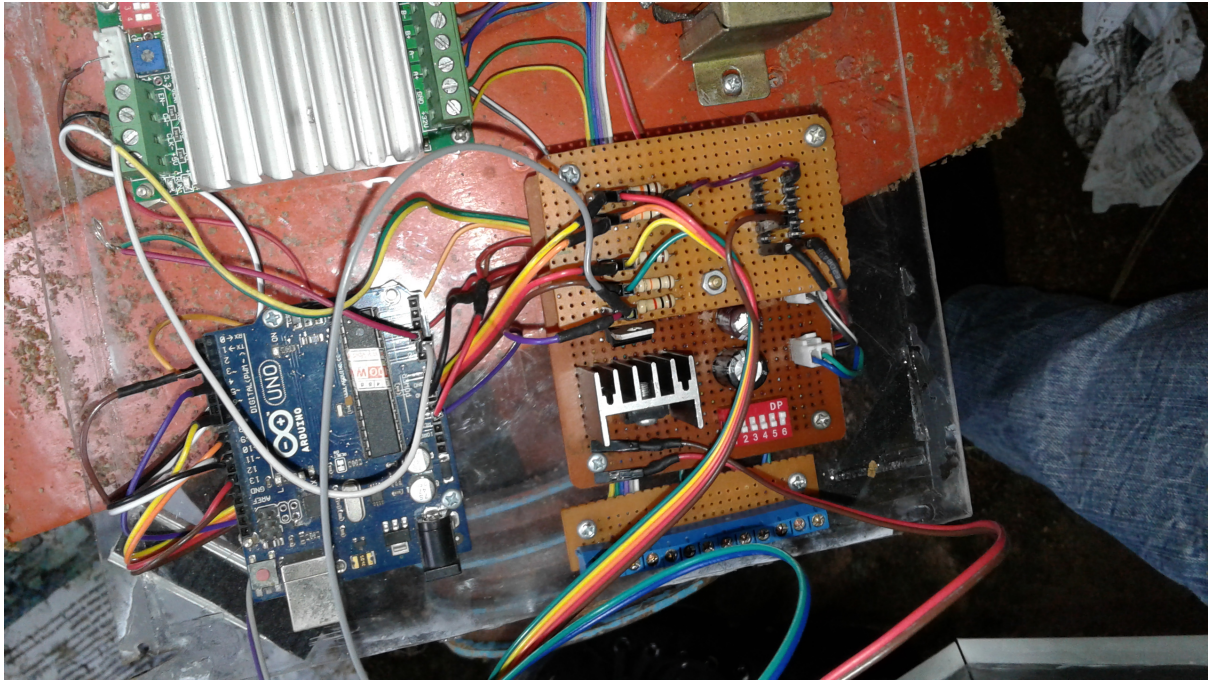
Berikut ditampilkan foto-foto PLTMH Lubuk Tempurung sebelum dan sesudah pemasangan GLC.

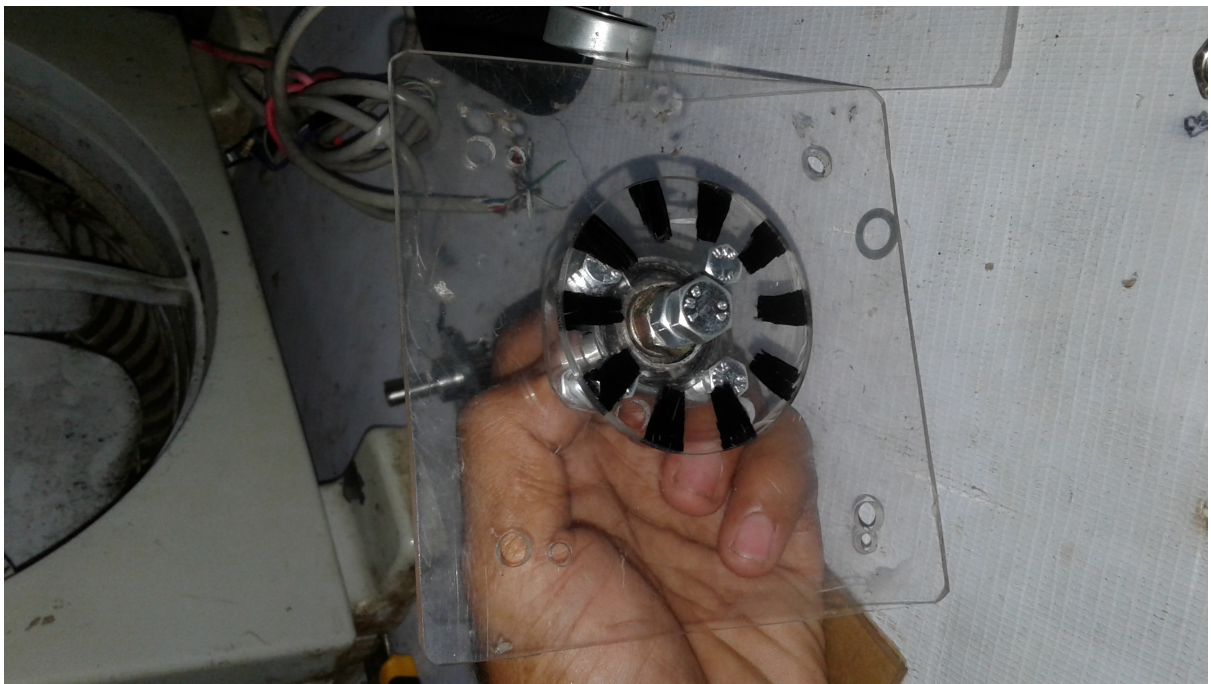


Gambar 5.12. PLTMH Lubuk Tempurung Sebelum Dipasang GLC



Gambar 5.13. Identifikasi Posisi Pemasangan GLC







Gambar 5.14. PLTMH Sudah Terpasang GLC



Gambar 5.15. Rangkaian Driver dan Motor Penggerak GLC

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1. Kesimpulan

1. Permasalahan utama pada PLTMH terdapat pada generator yaitu *brush* dan *winding*.
2. Pada umumnya PLTMH yang ada tidak memiliki sistem kontrol otomatis
3. Pengujian GLC di laboratorium dan bengkel menunjukkan hasil sesuai yang diharapkan.
4. Pengujian GLC pada PLTMH Lubuk Tempurung Kelurahan Kuranji Kecamatan Kuranji Kota Padang menunjukkan hasil respons yang relatif baik, meskipun demikian perlu ditingkatkan dari sisi mekanik GLC.

1.2. Saran

1. Diperlukan desain mekanis yang baik agar governor dapat berfungsi sesuai yang diharapkan.
2. Pengujian dilakukan pada saat beban berubah dan beban tetap.

DAFTAR PUSTAKA

1. **A.Hafid, Riza Widia.** “ Analisis Pengendali Frekuensi Generator PLTMH (Pusat Listrik Tenaga Mikro Hidro) dengan Governor Sederhana”. Jurnal Elektro Politeknik Negeri Padang
2. Antonius Wahyu Nugroho, “Simulasi Implementasi Self Tuning Regulator Pada Model Sistem Pembangkit Listrik Mikrohidro Untuk Pengendalian Frekuensi Keluaran Generator Dengan Menggunakan Matlab 6.1”, 2012.
3. **Cahayahati, Syafii,** “ Pengembangan Sistem Proteksi Digital Arus Lebih Berbasis Logika Fuzzy Sebagai Pengaman PLTMH. Jurnal Nasional Teknik Elektro UNAND 2013
4. **Cihanjung Inti Teknik, 2003,** “Studi Kelayakan dan Disain Engineering Pembangkit Tenaga Listrik Mikro Hidro (PLTMH)”, Laporan Studi Kelayakan PLTMH Tambak Baya Garut
5. **Chi-Jui Wu, Yuan-Yih Hsu,** “Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizer for Multimachine Power System”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, No. 3, August 1998
6. **Elkace. (2008).** “Menyoal Pembangkit Listrik Tenaga Listrik Mikrohidro (PLTMH)”. Lemabag Kajian Creative.
7. **Hariri A, Malik O. P,** “A Fuzzy Logic Based Power System Stabilizer with Learning Ability” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 4, December 1996.
8. **Hidayat, PH.Sasongko, Sarjiya & Suharyanto,** 2015, “The Design of The Hybrid PID-ANFIS Controller for Speed Control of Brushless DC Motor”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, pp 367-375 Vol.71 No.3.
9. **Hidayat, Sasongko.PH, Sarjiya and Suharyanto,** 2010, “The Speed and Torque Control Strategy of the Brushless DC Machine”, CITEE 2010, Yogyakarta.
10. **Hidayat, PH.Sasongko, Sarjiya & Suharyanto,** 2011, “ Performance Analysis of Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) for Speed Control of Brushless DC Motor, in Proc. ICEEI 2011,17-19 July 2011, p. 211
11. **Hidayat, PH.Sasongko, Sarjiya & Suharyanto,** 2011, “Modeling and Simulation of Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) for Speed Control of Brushless DC Motor”, Proc. CITEE 2011, Yogyakarta, 28 Juli, paper E-4-1.

12. **Hidayat, Cahayahati, 2005**, “Pengendalian Frekuensi PLTA Mikrohidro Berbasis Saving Energi”, Proceeding The 6TH Seminar on Intelligent Teknologi and ITS Application
13. **Hardiansyah, Eka Firmansyah**, “ Pengendalian Beban Generator Secara Otomatis dengan Algoritma PID pada PLTMH Berbasis PLC” Jurnal Teknologi UGM 2012
14. **Jang.J-S.R, Sun.C.T, Mizutani.E**, 1997. Neuro-Fuzzy and Soft Computing. Prentice-Hall International Inc, USA.
15. **Jacob, J. Michael, 1989**, “Industrial Control Electronics Application and Design, Prentice-Hall International, Inc.
16. **Janter Napitupulu**, “ Pembangkit Tenaga Mini Hidro (PLTMH) Dalam Pengelolaan Energi Hijau” Jurnal Darma Agung
17. **Microstar Laboratories**, Inc, All Rights Reserved, 2009. From PID to Fuzzy Control. webmaster@mstarlabas.com, : Taking The Plunge Cautiously”
18. **Muhammad H. Rasid, 1996**, “Power Elektronik Circuit, Device and Application”, Prentice Hall International, Inc.
19. **PT. PLN (Persero) Wilayah Sumatera Barat, 2005**, “Sistem dan Kondisi Kelistrikan Sumatera Ba **Refdinal Nasir**, “Pengembangan Teknologi PLTPH dalam Upaya Meningkatkan Daya gunanya Sebagai Sumber Energi Listrik Rumah Tangga” Jurnal Nasional Teknik Elektro UNAND
20. **Saiful Jamaan, MD Shah Majid, Mohd Wazir Mustafa, Hasyimah Abd Rahman**, “A Pc Base Fuzzy Logic Power System Stabilizer”, Seminar Collaborative Effort between Malaysia and Japan, Kuala Lumpur, Malaysia 24-25 June 2003.
21. **Saiful Jamaan, MD Shah Majid, Mohd Wazir Mustafa, Hasyimah Abd Rahman**, “Hardware Controller Design for Microalternator Set”, University Technology Malaysia, Johor Bahru, Johor DT, Malaysia 2003.
22. **Saiful Jamaan, MD Shah Majid, Hasyimah Abd Rahman**, “ Study of Fuzzy Logic Power System Stabilizer” University Technology Malaysia, Johor Bahru, Johor DT, Malaysia, 2003.
23. **Saiful Jamaan, MD Shah Majid, Mohd Wazir Mustafa, Hasyimah Abd Rahman, Othman B. Jais**, “An On-Line Back Propagation Neural Network-Fuzzy Logic Power System Stabilizer of a Microalternator”, International Conference on Control, Instrumentation and Mechatronics Engineering, Malaysia, 2007.

24. Sudirman Palaloi, "Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Kinerja Governor Generator Diesel", 2009
25. Sujatno, "Analisis Sistem Kendali Beban Elektronik (Elc) Sebagai Stabilisasi Energi Listrik Berbasis Mikrokontroler, 2012
26. Widyanto, D, "Mengenal ARM CortexM0", 2011 <http://www.kelas-mikrokontrol.com/e-learning/mikrokontroler/mengenal-arm-cortex%C2%ADm0.html>



EVALUATION OF MICRO HYDRO POWER PLANT (MHPP) USING OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) METHOD

Hidayat, Arnita and Ikhsan Irdas

Electrical Engineering Department, Faculty of Industrial Technology, Bung Hatta University, Padang, Indonesia

E-Mail: hdyttanjung@yahoo.com

ABSTRACT

This paper focuses on evaluation of micro hydropower plant (MHPP) that applies overall equipment effectiveness (OEE) method. MHPP are used on the rural electrification and does not necessarily supply electricity to the PLN grid. They are utilized in isolated and off-grid systems for decentralized electrification. Some identified issues or problems are the results of insufficient site assessment, poor quality of power plant facilities and electro-mechanical equipment, controller equipment and inadequate operation and maintenance. To determine performance of MHPP is done the evaluation using OEE method especially some of the MHP in districts South Solok. The first step is observing the real condition of MHPP to find technical or nontechnical of primary and secondary data. The data are classified according to which needed by OEE method. It has three main components such as availability, performance and quality. There are seven MHP as the research object. The results are obtained an availability average ie 68%, performance average ie 52% and quality average 67%. These achievements shown the MHPP production only reached a value of OEE ie 38%. Therefore, the production in the standard of the Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM) is a bad class. The strong issues or problems of MHPP that found are management 17,2%, control systems 7,3%, turbine 10,6%, generator 32,7% and transmission 31,9%. Management includes costumer payment, skill of the operator and maintenance. Generators are major contributors to the problem because there are many MHPP does not have automatic control equipment.

Keywords: evaluation, MHP, OEE, JIPM.

INTRODUCTION

Micro Hydro Power Plant (MHPP) is that utilizes the river flow (run off river). MHPP is typically used on the rural electrification and does not necessarily supply electricity to the PLN grid. They are utilized in isolated and off-grid systems for decentralized electrification. Some identified issues or problems are the results of insufficient site assessment, poor quality of power plant facilities and electro-mechanical equipment, control equipment and inadequate operation and maintenance [1]. Today, MHPP has been developed into a grid system to serve a region. The controller equipment is required to ensure the parallel operation of power plants in power system. Such controller is also required for Micro hydro power plants to work in interconnected micro hydro power plants. The approach with frequency droop to make a Mini-Grid model has been studied that describes performance of simulated droop based electronic load controller for interconnected micro hydro power plants or mini-grid [2]. Therefore, it is required quality of power generation in accordance with the standard. Similarly, the equipment that used must also be standard but it is limited. West Sumatra Province has abundant water potential to be used as a electric power generation renewable energy in the large, medium and small capacity. Utilization of water as small scale power plants, that called micro hydro power plant (MHPP) is widely used in remote areas. More than 150 power plant station in West Sumatra Province with capacity are various 10 kW, 16 kW, 20 kW, 22 kW, 24 kW, 26 kW, 40 kW, 50 kW, 64 kW etc. Base on investigation, several problems are found in MHPP such as; short life time, short duration operation, bad voltage and frequency quality [3], [4], [5]

The main objective of this study is to evaluate of MHPP quality that applies the overall equipment effectiveness (OEE). To determine the condition of MHPP is used the standard of the Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM) [6]. It is required to determine the main issues of MHPP, so it can be obtained the step to be grid system or mini grid system. In this research is taken eighteen of MHPP as sample that location in South Solok district. Recently, several researcher have found the voltage and frequency control equipment of MHPP such as micro hydro power generation based on fuzzy logic control such as micro hydro power generation based on fuzzy logic approach in order to improve voltage profile of alternative power generation [7].

MATERIAL AND METHODS

a) Overall equipment effectiveness (OEE)

OEE is the simple method to evaluate that practical and powerful to evaluate the production system. This method usually takes the most common sources of manufacturing productivity losses and places them into three categories such as; Availability (A), Performance (P) and Quality (Q). Generally, that are represented in percent (%). OEE is defined as the ratio of fully productive time to plan production time [8], [9]. The schema of OEE System is shown in Figure-1. Detemine of Overall Equipment Effectiveness (OEE) is used “the six big losses”, such as;

1. Down time loss that influence of availability.
2. Speed loss that influence of performance.
3. Quality loss that influence of quality.

In practice OEE is calculated as;



$$OEE = \text{Availability} \times \text{Performance} \times \text{Quality} \quad (1)$$

1) Availability(A); Availability is defined the ratio of operating time (which is simply planned time productionless down time) to planned production time , and accounts for loss down time. It is calculated as:

$$A = \frac{\text{Operating Time}}{\text{Planned Production Time}} \times 100\% \quad (2)$$

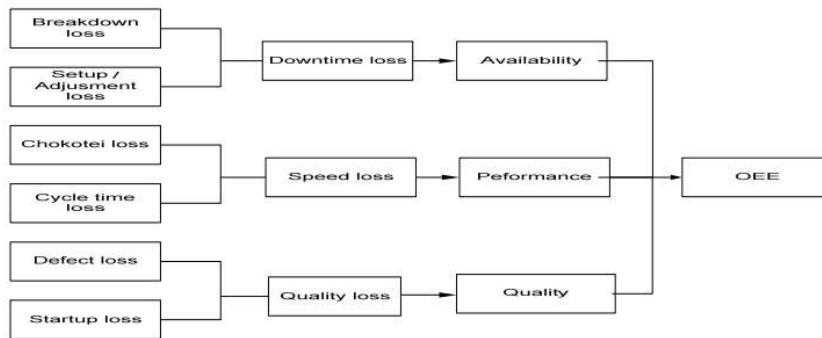


Figure-1. The schema of OEE system.

Operating time is the length of MHPP operational a year, and planned production time is length of operating expectations a year ie 8760 hours.

2) Performance (P): Performance is defined the ratio of net operating time to operating time, and accounts for speed loss. In practice it is calculated as;

$$P = \frac{\text{Ideal Cycle Time} \times \text{Total Pieces}}{\text{Operating Time}} \times 100\% \quad (3)$$

Ideal cycle time is defined the ideal time that used to result a product. Total pieces are number of product. Operating time is the real time of length operating a year ie 8760 hours.

3) Quality (Q); Quality is defined the ratio of fully productivetime (time for good pieces) to net operating time (time for total pieces). In practice it is calculated as;

$$Q = \frac{\text{Good Pieces}}{\text{Total Pieces}} \times 100\% \quad (4)$$

Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM) had been had standard benchmark of OEE that implemented in the world. OEE base on the standar benchmark JIMP that shown in Table 1.

Table-1. OEE standard benchmark of JIMP.

OEE(Overall Equipment Effectiveness) JIMP	Presentage value OEE (%)
Perfect	100 %
World Class	≥ 85 %
Normal	≥ 60% and < 85 %
Low	≥40and < 60%

Usually, OEE world class according to standard that recognized is; Availability ≥90% Performance ≥ 95% Quality 99.9% and OEE ≥ 85%.

b) Flowchart

The step-by-step process on how to evaluate the MHPP is illustrated in Figure-2.

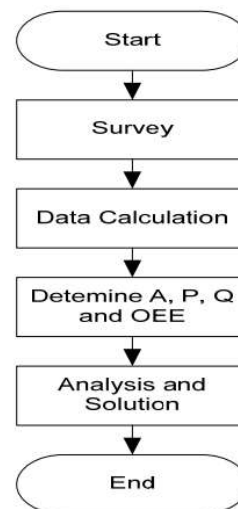


Figure-2. Flowchart evaluation of MHPP using OEE method.

The first step is survey to take the data to MHPP area excpecially South Solok Distinct. The data include MHPP equipment, operation, management, maintainance, capacity, costumer, distrubent and load.The data are grouped and calcuated in accordance with purpose of the OEE method. Further, determining value of availibiliy (A), Performance (P), Quality (Q) and the overall equipment effectiveness (OEE). These results are analyzed to asses the condition of MHPP, and then used to determine the corrective measures.The cause of disruption MHPP are recorded and calculated the percentage value



of interference. It is required to determine the cause of the biggest distrubents of MHPP.

c) Data and calculation

The data are collected by survey to each MHPP location, that include rating capacity, actual generated energy, customer amount, actual time operation, total available time, total set up time and total break down time in a year. There are eighteen MHPP as sample data, such as (1) MHPP Ulu Suliti II, (2) MHPP Ulu Suliti IV, (3) MHPP Koto Baru, (4) MHPP Pulakek, (5) MHPP Karang Putih, (6) MHPP Sungai Bangku and (7) MHPP Simancuang. (8) MHPP Manggih, (9) MHP Wonorejo, (10) MHPP Berta, (11) MHPP Liki Tengah, (12) MHPP Sungai Aia Ateh, (13) MHPP Batang Lolo, (14) MHPP Paninjauan, (15) MHPP Taratak Tinggi, (16) MHPP Pasie Panjang, (17) MHPP Sapan Salak, (18) MHPP Sapan Sungai Nan Duo. Operating data of MHPP that have been found in location can be shown in Table 2.

Base on data in Table-2, availability (A) of MHPP Ulu Suliti II can be calculated using equation. (2), where operating time can be obtained of total availability time minus time breakdown minus time set up, so;

$$A = \frac{\text{Total Time} - (\text{Time Breakdown} + \text{Time Setup})}{\text{Total Time}} \times 100\%$$

$$A = \frac{8592H - (4439H + 18,9H)}{8592H} \times 100\% = 48\%$$

Table-2. Operation data of MHPP in a year.

No MHPP	Rating Capacity (kW)	Effective Day of Operation (Days)	Loading Time		Total Operation (Hours)	Actual Time (Hours)	Energy Generated (kWh)	Energy Capacity (kWh)
			Setup (Hours)	Breakdown (Hours)				
1	10	358	17,9	4439,67	8592	4134,43	41344,3	87600
2	10	358	287	3759	8592	4546	45460	87600
3	10	351	254,5	3539,25	8424	4630,25	46302,5	87600
4	16	358	59,67	347	8592	8185,33	130965,3	140160
5	40	358	60,83	5905,67	8592	2625,5	105020	350400
6	20	358	89,5	317,16	8592	8185,34	163706,8	175200
7	20	365	73	182,5	8760	8504,5	170090	175200
8	10	365	91,25	91,25	8760	8577,5	85775	87600
9	50	358	182,5	182,5	8592	8227	411350	438000
10	20	358	182,5	182,5	8592	8227	164540	175200
11	64	358	180	180	8592	8232	526848	560640
12	24	358	358	2864	8592	5370	128880	210240
13	22	358	89,5	89,5	8592	8413	185086	192720
14	50	358	89,5	1163,5	8592	7339	366950	438000
15	50	358	89,5	89,5	8592	8413	420650	438000
16	20	358	182,5	5910,5	8592	2499	49980	175200
17	40	358	89,5	89,5	8592	8413	336520	350400
18	26	358	89,5	89,5	8592	8413	218738	227760

Several issues or problems that cause MHPP fail operate as shown in Table-3. Performance of MHPP Ulu

Suliti II can be determined using equation. (3), where ideal cycle time can be obtained by multiplied customer amount with generated energy multiplied actual time, then;

$$P = \frac{\text{Costumer} \times \text{Generated Energy} \times \text{Actual Time}}{\text{Costumer} \times \text{Energy Capacity} \times \text{Total Time}} \times 100\%$$

$$P = \frac{25 \text{ KK} \times 41344 \text{ kWh} \times 4134 \text{ h}}{825 \text{ KK} \times 87600 \text{ kWh} \times 8595 \text{ h}} \times 100\% = 23\%$$

The Quality of MHP Ulu Suliti II can be determined using equation. (4), where good peace can be obtained with to devide total generated energy with total energy capacity, then;

$$Q = \frac{\text{Total Generated Energy}}{\text{Total Energy Capacity}} \times 100\%$$

$$Q = \frac{41344 \text{ kWh}}{87600 \text{ kWh}} \times 100\% = 47\%$$

Further, OEE can be determined by using equation. (1), then;

$$\text{OEE} = 48\% \times 23\% \times 47\% = 5\%$$

The parameter A, P, Q and OEE for the others MHPP can be calculated same as way the above, further the result as shown in Table \$4.

Table-3. The causes and frequency of operation failure MHPP.

Issues/problems		Failure Frequency of MHPP									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Management	Electric payment	-	-	-	1	2	-	-	-	-	
	Operator salary	-	-	-	4	2	-	-	-	-	
Control System	ELC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ballast	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	MCB	-	1	-	-	-	-	-	-	-	
	Ampere meter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Volt meter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Hertz meter	1	1	-	-	1	-	-	-	-	
Turbine	Adapter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Runner	-	-	-	-	-	-	1	-	-	
	Guide Vane	-	-	-	-	-	1	-	-	-	
	Turbin Pulley	-	3	-	-	-	-	-	-	-	
	Bearing	-	-	-	-	-	-	1	-	-	
	BF Turbin	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
Generator	Generator winding	1	1	2	1	1	1	-	-	1	
	Brush	6	1	-	4	2	-	3	-	3	
	BF Generator	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Generator Pulley	-	1	-	-	-	-	-	-	1	
Transmission	Pole	1	-	1	1	1	-	1	-	-	
	Conductor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	V belt	1	-	1	1	1	1	1	-	-	
Issues/problems		Failure Frequency of MHPP									
		10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Management	Electric payment	-	1	2	-	1	-	1	-	1	
	Operator salary	-	-	2	-	-	-	-	-	4	
Control System	ELC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ballast	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	MCB	-	-	-	-	-	1	1	-	-	
	Ampere meter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Volt meter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Hertz meter	-	-	1	1	1	1	-	-	-	
Turbine	Adapter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Runner	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Guide Vane	-	-	-	1	-	-	-	-	-	
	Pulley Turbin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Bearing	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	BF Turbin	-	1	-	-	-	-	-	1	-	
Generator	Generator winding	1	2	1	-	1	2	-	2	1	
	Brush	1	-	2	-	-	-	-	-	4	
	BF Generator	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Generator Pulley	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Transmission	Pole	1	1	1	5	8	1	1	1	1	
	Conductor	-	-	1	-	-	-	1	-	-	
	V.belt	1	1	1	-	2	-	2	1	-	

**Table-4.** The result OEE of MHPP.

Number of MHPP	Availability (%)	Performance (%)	Quality (%)	OEE (%)
1	48%	23%	47%	5%
2	53%	27%	52%	8%
3	55%	29%	53%	8%
4	95%	89%	93%	79%
5	31%	9%	30%	1%
6	95%	89%	93%	79%
7	97%	94%	97%	89%
8	98%	96%	98%	92%
9	96%	90%	94%	81%
10	96%	90%	94%	81%
11	96%	90%	94%	81%
12	63%	38%	61%	15%
13	98%	94%	96%	88%
14	85%	72%	84%	51%
15	98%	94%	96%	88%
16	29%	8%	29%	1%
17	98%	94%	96%	88%
18	98%	94%	96%	88%
OEE Average				57%

RESULT AND ANALYSIS

The MHPP that had been studied are obtained the average OEE is 57% and it is low category based on JIPM standard. Where there are 38,8% that bad category, 27,7% the normal category and 33,3% only the world class category, as shown in Table V. The result shows that OEE of MHPP Manggih only having near in to perfect class category ie 92%. The reason is MHPP Manggih which a new MHPP that has equipment completely, operating continuously and breakdown time briefly.

Table-5. The result OEE of MHPP south Solok distinct.

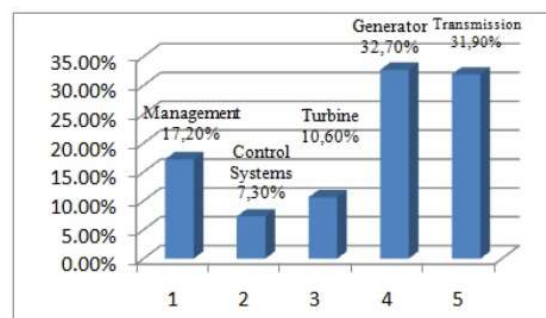
OEE(Overall Equipment Effectiveness) JIPM	% Result of OEE
Perfect : 100%	0 %
World Class : ≥ 85 %	33%
Normal : ≥ 60 % and < 85 %	27%
Low : ≥ 40 and < 60 %	38,8%

MHPP Pulakek and MHPP Sungai Bangku have OEE value ie 78% that are the normal category. These MHPP operate continuous, have equipment completely, however the total breakdown time is longer than MHPP Simancung.

While, the other MHPP having a low category because OEE value is lower than 40%. Caused of MHPP have been operated for long time, equipment incompletely, operating time 8 hours every days and also lack management. To increase the OEE value of MHPP can be done with to search main issue of MHPP. MHPP issues can be grouped in to 5 parts, such as; management, control system, turbine, generator and transmission line. Table-6 and Figure-3 are shown the issues of MHPP that studied.

The main damage that often happen in the MHPP is at the generator part ie 32,7%, especially the carbon brush and generator winding. That are caused of over load or over frequency of generator, while the generator

generally don't have an automatic controller equipment. If they have an automatic control equipment which usually use an electronic load controller (ELC). The principle of ELC is when the customer load is decreasing then ELC will throw to dummy load [1]. The impact is that the generator and turbine always operate at full load condition. It can break the generator winding or the bearing of turbine. The transmission line give a contribution to disturb an operation of the MHPP ie 20%. It is caused of a bad construction or struck a fallen tree.

**Figure-3.** The percent broken of MHPP.**Table-6.** The general issues and failure frequency of MHPP.

Issues	Freq uency	Percent damage (%)
Management	Electric payment	9 7,3 %
	Operator salary	12 9,8 %
Control System	ELC	- 0 %
	Ballast	- 0 %
	MCB	3 2,4 %
	Ampere meter	- 0 %
	Volt meter	- 0 %
	Hertz meter	6 4,9 %
Turbinee	Adapter	- 0 %
	Runner	2 1,6 %
	Guide Vane	2 1,6 %
	Pulley Turbine	3 2,4 %
	Bearing	1 0,8 %
	BF Turbine	5 4,09 %
Generator	Generator winding	16 13,11 %
	Brush	22 18,03 %
	BF Generator	- 0 %
	Pulley Generator	2 1,6 %
Transmission	Pole	24 19,6 %
	Conductor	- 0 %
	V belt	15 12,2 %



The management of MHPP is the seriously issue because it has strong impact with electricity bills and operator salary. Lack awareness costumer to pay an electricity bills that cause manager of MHPP difficult to pay maintenance cost and operation cost.

CONCLUSIONS

Evaluation of 7 MHPP in South Solok districts has been discussed. Method of evaluation that used is OEE. The result are obtained that the average OEE value is 57%. It is low category. The strong issues or problems of MHPP are management and equipment. Management include costumer payment, operator skill and maintenance while equipment issue is the automatic control equipment.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by the ministry of reseach and technology (Ristek dikti) through the desentralisation research fee of grant competition scheme.

REFERENCES

- [1] Paish Oliver. Small Hydro Power: Technology and current status, Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews 6 (2002) 537–556. UK, 2002.
- [2] Rojas Dahal, etc, Performance of droop based load controller in interconnected micro hydropower plants, 2016 4th International Conference on the Development in the Renewable Energy Technology (ICDRET), January 2016.
- [3] Hidayat and Arnita, The Survey Report of Micro Hydro Power Plant (MHPP) in South Solok, West Sumatera, 2016.
- [4] Marzuki Mahdi, West Sumatera have the potency of hydro power 1000 Mega Watt (MW), West Sumatera, 2015.
- [5] Asep Neris Bachtiar and etc, Inventory and Evaluation of MHP in West Sumatra, West Sumatra 2009.
- [6] K. E. Chong, K. C. Ng and G. Goh Improving Overall Equipment Effectiveness (OEE) through integration of Maintenance Failure Mode and Effect Analysis (maintenance-FMEA) in a semiconductor manufacturer: A case study, Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2015 IEEE International Conference.
- [7] Cahayahati, Syafii, Hidayatand Dirman. H, Voltage Control System Design for Micro Hydro Power Generation Based On Fuzzy Logic Approach in Order to Improve Voltage Profile of Alternative Power Generation, Proceedings of The International Graduate on Engineering and Science (IGCES'08) 23-24 December, 2008.
- [8] Tim Taylor, etc, Open-Ended Evolution: Perspectives from the OEE Workshop in York, MIT Press Journals, Volume: 22, Issue: 3, August 2016.
- [9] Dal. B, Overall Equipment Effectiveness (OEE) as Measure of Operational Improvement, a Practical Analysis: International Journal of Operations and production Management, Vol. 20 No.12, 2000.

Determination of Optimal Power Capacity for Run of River Hydro Power Plant Based on Flow Duration Curve Using Newton's Interpolation Method

Hidayat¹⁾ Arnita¹⁾, Cahayahati¹⁾, Mirza Zoni¹⁾

¹⁾Electrical Departement, Industrial Technology Faculty
Bung Hatta University
Padang, Indonesia
hidayat@bunghatta.ac.id, hdyttanjung@yahoo.com

Saiful Jamaan²⁾

²⁾PT. Multi Sukses Energy
Padang, Indonesia

Abstract—This paper determines the optimal power capacity installed for Run of River Hydro Power Plant (RORHPP). This is necessary in order to obtain an effective and efficient RORHPP, because the installed capacity will determine the investment and the energy produced. If the installed power capacity is too high, the investment cost will also be high, but if the installed power capacity is too low then the potential of water energy will be wasted. The main factors affecting the installed capacity of RORHPP are river flow and height of water fall. The river flow may change, while the water level falls steadily. Therefore, river flow is a variable parameter and the water falling level is a fixed parameter. Accurate determination of river flow discharge design is necessary to optimize RORHPP installed capacity. River flow discharge is obtained from hydrological data and catchment area which is then processed into flow duration curve (FDC). Based on the RORHPP design can be obtained the maximum power and energy generated by RORHPP, but this is not fixed at any time. The capacity factor (CF) is the ratio of real potential energy to the maximum energy generated in a year. Therefore, CF must be considered in determining installed power capacity. Furthermore, financial aspects such as NPV, IRR, BCR and BEP are also the considered parameters. Newton's interpolation method was used to determine CF, which is applied in RORHPP design of Lubuk Gadang. Simulation results show that installed capacity has low investment cost and high energy production as expected

Keywords—RRHPP; optimal; Installed power capacity; Newton's interpolation

I. INTRODUCTION

The demand of electrical energy increases steadily every year, so its provision should also be continuously improved. The National Power Company (PLN) and independent power purchase (IPP) which received the mandate from the government as a national electrical energy provider continues to develop a number of eco-friendly generators. To encourage this acceleration, the government issued a favorable regulation for IPP through Department of Energy and Human Resources No. 3 of 2015 for hydroelectric power capacity of 10 MW, and Regulation No. 19 of 2015 for capacities above 10 MW [1], [2].

One of the water potential development as a power plant is by utilizing river water discharge, by a direct run of river

method or by reservoir system. Run of river method is done by diverting the river flow through the water way, sand trap, penstock and then move the turbine. While the reservoir method is done by damming water and stored in the pond, then released it to drive a turbine through the penstock. This method requires a large area as a water storage [3]. The most widely developed method is run of river, because it doesn't require a large area. The disadvantage is that river water discharge fluctuations have a direct effect on the electricity generated. Therefore, RORHPP planning is always based on hydrological and catchment area data to produce flow duration curve (FDC). FDC represents the relationship between the annual probability to the river flow (Q). The planning of electric energy RORHPP generated refers to FDC.

Conventionally, Q_d is generally selected with a probability of 40 to 65% [3]. The accuracy in choosing Q_d has an impact on technical and financial aspects. A large capacity equipment and big investment is required if the Q_d selected is too large. If Q_d is too small then the equipment capacity required is small and investment cost is also low, but potential utilization of available river flow is not maximal. Therefore a method is needed to determine the optimal installed power capacity. Generally in feasibility study, the energy that can be generated by RORHPP per year is obtained from the installed power capacity multiplied by capacity factor (CF) and operating hours a year. CF obtained from FDC is calculated from the ratio of real energy (E_r) to the maximum energy (E_m) generated in a year. Newton's interpolation method was used to determine CF optimum.

II. TYPICAL AND FORMULATION OF RORMPP

A. RORMPP System

Basically, hydro power plants function to convert the water potential energy of water flow with certain discharge (Q) and high fall (H) into kinetic and mechanical energy thus generating electrical energy. The general schema and RORMPP components [4] are shown in Figure 1. The RORMPP component consists of weir, waterway, headpond, penstock, power house and distribution circuit.

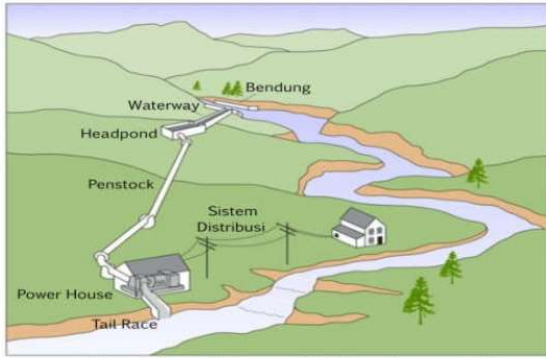


Figure.1. General Schema and RORMPP Components [4]

B. Power and RORMPP Generator Energy

Basically, energy can not be created nor destroyed, but can only be changed from one form to another, called the law of conservation energy. In terms of power, the general equation of power conversion is;

$$\text{Power In} = \text{Power Out} + \text{Loss} \quad (1)$$

$$\text{Power Out} = \text{Power In} \times \text{Conversion efficiency} \quad (2)$$

Equations (1) and (2) are usually used to describe small differences. The incoming power or total power absorbed by the hydro scheme is the gross power (P_{gross}). Power whose benefits are delivered is net power (P_{net}). All efficiency of hydropower components in the scheme of Figure 1 is called E_o .

$$P_{\text{net}} = P_{\text{gross}} \times E_o \quad (3)$$

The gross power is head gross (H_{gross}) multiplied by the water flow (Q) and then multiplied by the velocity of gravity ($g = 9.8 \text{ m}^2/\text{sec}^2$), so the basic concept of the power plant conversion equation is:

$$P_{\text{net}} = g \times H_{\text{gross}} \times Q \times E_o \quad (4)$$

Where:

P_{net}	: Net Power (BkW)
H_{gross}	: gross head (m)
Q	: Water discharge (m^3/dt)
E_o	: conversion efficiency (%)

$$E_o = E_{\text{ff civil construction}} \times E_{\text{ff penstock}} \times E_{\text{ff turbin}} \times E_{\text{ff generator}} \times E_{\text{ff control}} \times E_{\text{ff sistem}} \times E_{\text{ff network}} \times E_{\text{ff trafo}} \quad (5)$$

$E_{\text{ff civil construction}}$: 1,0– (length of channel $\times 0,002 \sim 0,005$) / H_{gross}

$E_{\text{ff penstock}}$: 0,90 ~ 0,95 (Depend on its length)

$E_{\text{ff turbin}}$: 0,70 ~ 0,85 (Depend on the turbine type)

$E_{\text{ff generator}}$: 0,80~0,95(Depend on generator capacity)

$E_{\text{ff sistem control}}$: 0,97

$E_{\text{ff jaringan}}$: 0,90 ~ 0,98 (Depend on the length of network)

$E_{\text{ff trafo}}$: 0,98

Electrical energy is the multiplication of net power (P_{net}) with CF, and time, as indicate by equation (6).

$$E_{\text{Electricity}} = P_{\text{net}} \times CF \times t \quad (\text{Wh}) \quad (6)$$

If the Hydro Power Plants operates 350 days a year (15 days for maintenance) and 24 hours a day, then the electrical energy required per year as seen in equation (7)

$$E_{\text{Electricity}} = P_{\text{net}} \times 350 \text{ hari} \times 24 \text{ jam} \quad (\text{Wh}) \quad (7)$$

C. Flow Duration Curve (FDC) and Capacity Factor (CF)

Flow Duration Curve (FDC) is a curve that represents the annual river flow discharge probability. FDC is obtained from the hydrological data by grouping the same flow and determining the percentage of occurrence, as shown in Figure 2. The FDC curve is indispensable in determining the RORMPP installed power capacity. Figure 3 show that high flow discharge percentage in a year is very small. The selection of high flow discharge will result in large install capacity (4), as well as high investment cost, while the energy produced annually is not necessarily higher than the lower installed capacity

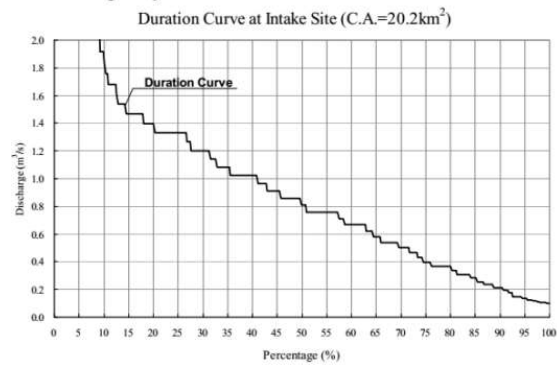


Figure.2. Flow Duration Curve (FDC) [5]

Therefore it is necessary to determine the capacity factor (CF), which is a comparison between the amount of the actual energy generated in a year with the energy based on discharge design. Figure 4 illustrates the determination of CF

The maximum energy generated by RORMPP within a year (ABCD Area);

$$E_{\text{max}} = P_{\text{max}} \times 360 \text{ hari} \times 24 \text{ jam} \quad (\text{Wh}) \quad (9)$$

Whereas the actual energy generated by RORMPP is calculated based on the sum of energy on the actual duration of power generated within one year intervals (Area AbcCD).

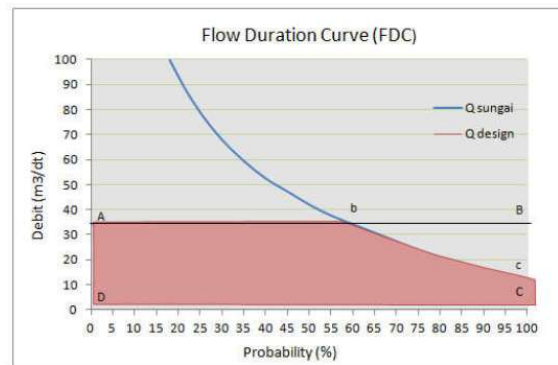


Figure .3. Illustration in determining CF

The calculation of AbcD area can use the boundary integrals, where a curved line equations that describe probability annual discharge is determined by the Newton interpolation method.

$$CF = \frac{\text{Area of } AbcD}{\text{Area of } ABCD} \quad (8)$$

D. Newton's interpolation

Newton's interpolation can be used to construct functions of a given set of points [5], [6].

The bc line in Figure 4 is a set of points whose function will be determined. The purpose is to determine the AbcD area using the integral boundary. The basis of Newton's interpolation is the Lagrange interpolation. For example, two points are given $(x_0, f(x_0))$ and $(x_1, f(x_1))$ with $x_0 \neq x_1$. Then by using the equation of line $(P_1(x))$ based on Lagrange Interpolation with 2 dots, obtained;

$$P_1(x) = \left[\frac{x-x_1}{x_0-x_1} \right]_{y_0} + \left[\frac{x-x_0}{x_1-x_0} \right]_{y_1} \quad (9)$$

$$P_1(x) = a_0 + a_1(x - x_0)$$

Where:

$$a_1 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad \text{or} \quad a_1 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

This is a form of divided differences, it can also be written as $a_1 = f[x_1, x_0]$. Newton's interpolation for 3 points can be written as;

$(x_0, f(x_1))$ and $(x_1, f(x_1))$ with $x_0 \neq x_1 \neq x_2$ or using polynomial 2 degree, and the next polynomial can be obtained;

$$\begin{aligned} P_2(x) &= a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1) \\ P_3(x) &= a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1) + a_3(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) \\ &\dots \\ P_n(x) &= a_0 + a_1(x - x_0) \dots + a_n(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1})(x - x_n) \end{aligned} \quad (10)$$

By the difference of each:

$$\begin{aligned} a_0 &= f[x_0] = f(x_0) \\ a_1 &= f[x_0, x_1] = \frac{f[x_1] - f[x_0]}{x_1 - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \\ a_2 &= f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0} \\ a_3 &= f[x_0, x_1, x_2, x_3] = \frac{f[x_1, x_2, x_3] - f[x_0, x_1, x_2]}{x_3 - x_0} \\ &\dots \\ a_n &= f[x_0, \dots, x_n] = \frac{f[x_1, \dots, x_n] - f[x_0, \dots, x_{n-1}]}{x_n - x_0} \end{aligned} \quad (11)$$

With the value obtained from $a_0, a_1, a_2 \dots \dots a_n$ the FDC line equation can be determined.

E. RORMPP Cost

RORMPP cost consists of fix cost and variable cost. The fix costs include investment costs, while variable costs covers operational and maintenance costs. Investment costs include civil, mechanical and electrical building costs that are

comparable to the installed power capacity and land contours of the RORMPP development site. Accuracy in determining the civil buildings dimensions will affect the investment cost. Therefore, investment cost is also an important factor in optimizing the installed power capacity of RORMPP.

The NPV method is used to determine the feasibility of investing with equations;

$$NPV = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (12)$$

Where;

NPV = Net Present Value
F = The value in the n^{th} year
I = Interest rate (%)
N = Year 1,2,3, ... etc

III. RESEARCH METHODS

Planning is required prior to RORMPP construction. Proper planning will result in optimal production and minimal cost of the electrical energy. The application of Newton's interpolation method in determining the optimal installed power capacity of RORMPP Lubuk Gadang utilizing the flow of Batang Sangir river in South Solok. The initial step of RORMPP planning is to find potential and determine the appropriate location for RORMPP construction. This early stage required data of positions, altitude, water discharge, and so forth. The required equipment include; maps and GPS, which serves as a guide to the research location. Google Earth is used to determine the point of research location.

Research data is divided into two, namely primary data and secondary data. Primary data obtained directly in the field, while secondary data obtained from existing references, such as company records or documentation, government reports, magazines, and so forth.

Hydrological data, catchment area is a secondary data obtained from meteorology and geophysics agency (BMKG) and AWLR poos. The height and points of RORMPP component placement are the primary data obtained from the measurement results. Flow Chart as the stages of research shown in Figure 4.

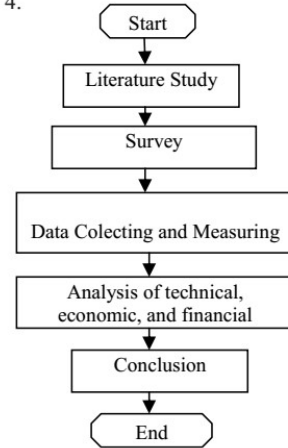


Figure. 4. The Research Flow Chart

IV. CALCULATION AND ANALYSIS

Data hydrograph show the variation of river flow and time throughout the year. By categorizing the same debit and determining the occurrence percentage, then the statistics of discharge average from Batang Sangir river on the watershed of 1,421.00 km² obtained as in Table 1 [7] [8] Table 1. The Average Flow Rate of Batang Sangir River

TABLE I. PORBABILITY AND DISCHARGE AVERAGE

No.	Probability of occurrence	Discharge station
		Discharge Average
		Watershed Coverage Area (km ²)
		1421.00
1	10%	122.32
2	20%	75.91
3	30%	55.34
4	40%	42.73
5	50%	34.23
6	60%	27.89
7	70%	22.33
8	80%	17.28
9	90%	13.36
10	100%	9.44

Flow Duration Curve (FDC) is obtained from the annual discharge probability graph as shown in Figure 5. The FDC curve is indispensable in determining the install capacity of generator and annual energy output. The optimal software of installed power capacity RORMPP is shown in Figure 6.

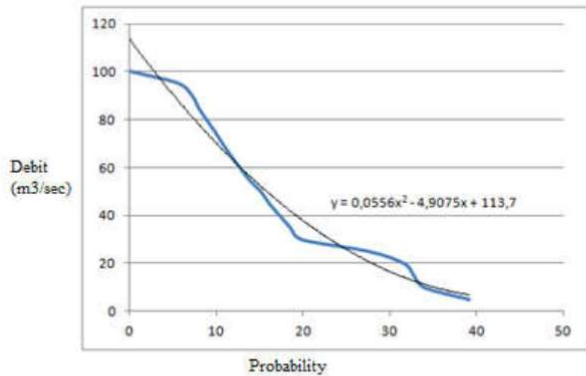


Figure . 5. Flow Duration Curve (FDC) of Batang Sangir Watersheds

Newton's interpolation method derives a function that represents the probability of annual discharge called FDC, as equation (9).

$$y = 0,0556x^2 - 4,9075x + 113,7 \quad (9)$$

The capacity factor (CF) of RORMPP can be calculated using equation (8). Energy is calculated using the boundary integrals. With a net head of 39.56 meters, a 350-day RORMPP operation in a year, a total efficiency of 0.85 is obtained by CF, power generation (4), annual energy (5) as shown in Table 2. BEP, NPV, IRR, BCR and Price/KWh is also obtained and be a consideration in optimizing installed power capacity ..

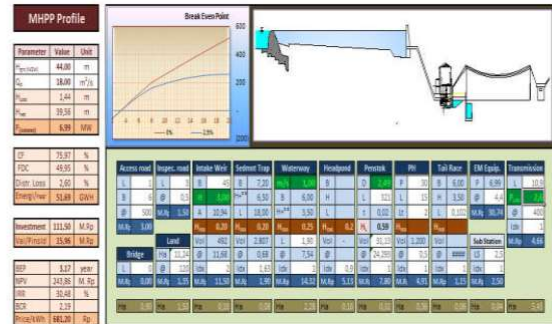


Figure .6. Optimum Installed Power Capacity Software

The optimum installed power capacity RORMPP Lubuak Gadang of 6.99 MW was obtained from the calculation. Capacity Factor of 75.95% and FDC of 49.95%. The Energy generated in a year as 45,754 GWh. The investment cost is 111.56 Billion Rupiah. Financial analysis show BEP 3.17 year, NPV 243,65 Billion Rupiah, IRR 30,48%, BCR 2,19 and price /KWH are 681,20 Rupiah. The obtained parameters show that RORMPP development is feasible to continue and have a high economic value, because the electricity production cost is still far below The National Power Company selling price to the consumer.

V. CONCLUSION

Determination of intalled power capacity with newton's interpolation method that has been designed using software, facilitates RORMPP planning. This software has considered the technical, economical and financial aspects. By using the flow duration curve (FDC) of watershed and head areas, technical and financial data of RORMPP can be obtained.

REFERENCES

- [1] PERMEN ESDM NO 19, year 2015, Electrict price HPP per kWh, PLN 2015.
- [2] PERMEN ESDM NO 3 year 2015, Electrict price HPP per kWh, PLN 2015.
- [3] Hand Book, EU Laymans Guide Book on How to Develop a Small Hydro Site , 1998
- [4] JICA, Manuals and Gudelines for Micro-hydropower Development in Rural Electrification, 2009
- [5] Hildebrand, F. B, Introduction to Numerical Analysis. New York: McGraw-Hill, pp. 43-44 and 62-63, 1956
- [6] Whittaker, E.T. and Robinson, G. "Newton's Formula for Unequal Intervals." §13 in The Calculus of Observations: A Treatise on Numerical Mathematics, 4th ed. New York: Dover, pp. 24-26, 1967.

- [7] PLTAH 2012/09-10, Meteorologi of data meteorology and end of fisika AWLR, Solok Selatan
- [8] Dempo Hydro Power, Feasibility study PLTA Lubuak Gadang, 2015

Lampiran II.a. Sertifikat presentasi pada seminar internasional





