

## 2. TINJAUAN LITERATUR

### 2.1. Pemodelan Sistem

Model merupakan representasi suatu sistem dan dipergunakan sebagai alat peramalan dan pengendalian. Fungsi utama suatu model adalah kemampuannya untuk menjelaskan dan bukan hanya deskriptif. Model dimaksudkan agar dapat mempermudah untuk menentukan perubahan suatu aspek dari model yang memang merupakan suatu sistem, mempengaruhi aspek lainnya, dan bahkan seluruh aspek di dalam model<sup>1</sup>.

Langkah-langkah dalam membuat suatu model<sup>2</sup> adalah :

- a. Identifikasi masalah, hal-hal yang perlu diperhatikan yaitu :
  - Menentukan tema masalah: Apa yang menjadi masalah? Kenapa hal tersebut menjadi masalah?
  - Variabel kunci: Variabel-variabel dan konsep apa saja yang harus dipertimbangkan?
  - Rentang waktu: Sejauh mana rentang waktu ke depan yang harus diperhatikan? Sejauh mana kita harus melihat ke belakang agar kita bisa menentukan akar dari masalah?
  - Identifikasi karakter dinamis masalah: Apa perilaku historis dari variabel-variabel kunci dan konsep? Apa kemungkinan perilakunya di masa depan?
- b. Formulasi hipotesis
  - Membangun insial hipotesis: Teori-teori apa saja yang bisa menjelaskan perilaku masalah?
  - Fokus kepada faktor endogen: Menformulasi hipotesis dinamis yang dapat menjelaskan karakter dinamis faktor-faktor endogen yang dapat memberikan *feedback* ke sistem.
  - Pemetaan: Mengembangkan peta struktur kausal berdasarkan

---

<sup>1</sup> J. Supranto, *Riset Operasi untuk Pengambilan Keputusan*, Penerbit Universitas Indonesia (UI Press), Jakarta, 1998, hal.7

<sup>2</sup> John D. Sterman, *Business Dynamics: System Thinking and Modelling for Complex World*, McGraw-Hill, New York, 2000, hal.86

inisial hipotesis, variabel kunci, referensi, dan data-data lain.

c. Formulasi model simulasi

- Spesifikasi dari struktur, aturan-aturan pengambilan keputusan.
- Estimasi parameter, hubungan perilaku, dan kondisi awal.
- Pengetesan konsistensi dengan menggunakan batasan dan tujuan model.

d. Menguji model

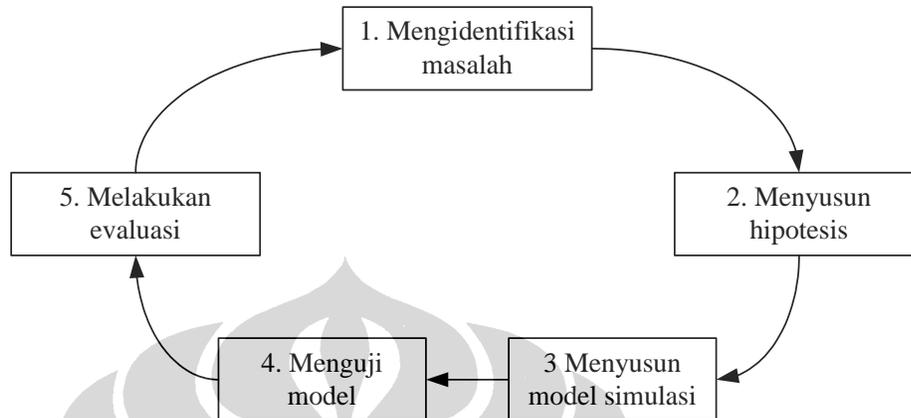
- Melakukan perbandingan terhadap referensi: Apakah model terus menghasilkan perilaku bermasalah dalam mencapai tujuannya?
- Melihat reaksi model pada kondisi ekstrim: Apakah perilaku model berperilaku realistis ketika diberikan stress pada kondisi ekstrim?
- Sensitivitas: Bagaimana model berperilaku pada kondisi ketidakpastian parameter, kondisi awal, dan batasan model?

e. Melakukan evaluasi dan mendesain kebijakan

- Spesifikasi skenario: Kondisi lingkungan apa yang mungkin muncul?
- Desain kebijakan: Apakah aturan pengambilan keputusan baru, strategi, dan struktur yang mungkin diaplikasikan di dunia nyata?
- Analisa *What if..*: Apakah efek dari kebijakan yang baru?
- Analisis sensitivitas: Bagaimana reaksi kebijakan yang direkomendasikan pada skenario yang berbeda dan kondisi ketidakpastian?
- Interaksi dari kebijakan-kebijakan: Apakah antara kebijakan ada interaksi?

Kelima tahapan ini akan mengalami iterasi dan membentuk siklus seperti terlihat pada gambar berikut :

**Gambar 2.1 Siklus iterasi dalam pembuatan model**

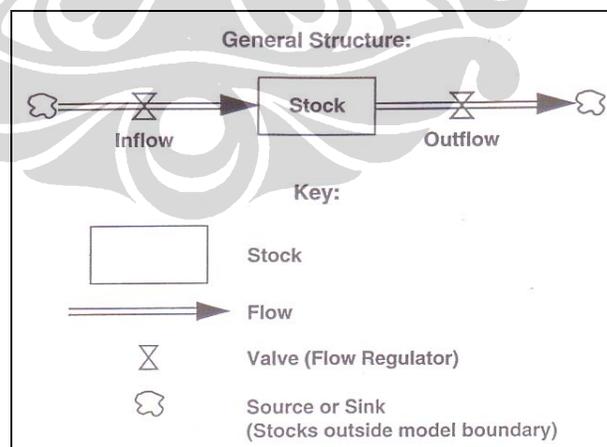


Sumber : *Business Dynamics: System Thinking & Modelling for Complex World*

## 2.2. Stock and Flows

Salah satu *tools* yang dapat digunakan untuk memodelkan sistem adalah dengan menggunakan model *stock and flows* yang dikembangkan oleh Jay Forrester berdasarkan logika aliran masuk dan keluar air dari penampungan<sup>3</sup>. Bentuk modelnya dapat dilihat pada gambar berikut :

**Gambar 2.2 Bentuk model *stock and flows***



Sumber : *Business Dynamics: System Thinking & Modelling for Complex World*

<sup>3</sup> *Ibid.*, hal. 193.

Seperti pada gambar di atas, *stock* direpresentasikan dengan gambar persegi panjang, yang menandakan akumulasi perubahan. *Stock* dipengaruhi oleh *flows*. Sebagai contoh, perbedaan antara *stock* dan *flows* pada beberapa terminologi konsep dapat dilihat pada tabel berikut :

**Tabel 2.1 Perbedaan antara *stock* dan *flows* pada beberapa terminologi konsep**

Field	Stocks	Flows
Mathematics, physics and engineering	Integrals, states, state variables, stocks	Derivatives, rates of change, flows
Chemistry	Reactants and reaction products	Reaction rates
Manufacturing	Buffers, inventories	Throughput
Economics	Levels	Rates
Accounting	Stocks, balance sheet items	Flows, cash flow or income statement items
Biology, physiology	Compartments	Diffusion rates, flows
Medicine, epidemiology	Prevalence, reservoirs	Incidence, infection, morbidity and mortality rates

Sumber : *Business Dynamics: System Thinking & Modelling for Complex World*

### 2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM) memiliki kelebihan dibandingkan dengan jenis pembangkit lain yaitu :

- a. Bebas ketergantungan terhadap bahan bakar.
- b. Memiliki rentang waktu (*lifetime*) pembangkitan energi yang lama.
- c. Biaya operasional yang relatif lebih rendah.
- d. Ramah lingkungan karena memiliki tingkat emisi yang sangat rendah.

Faktor-faktor yang harus diperhatikan dalam pembangunan PLTM adalah :

- a. Perencanaan

Proses ini meliputi perencanaan aspek-aspek yang mendukung pembuatan *business plan* seperti pembelian peralatan, menyewa pegawai, *time*

*scheduling*, ketersediaan dana, dsb.

b. Pemilihan area

Aspek ini meliputi penentuan area yang potensial untuk dibangun PLTM untuk selanjutnya dilakukan studi kelayakan.

c. Studi kelayakan

Pada proses ini, studi kelayakan penting untuk menentukan besarnya instalasi, panjang pipa pesat, panjang saluran transmisi, kondisi situs, dan aksesibilitas. Estimasi biaya yang *reasonable* akan meliputi biaya pengembangan, pembangunan, dan biaya operasi untuk menentukan fisibilitas dari proyek.

d. Proses perizinan

Aspek ini meliputi izin penggunaan air dan area secara hukum baik terhadap masyarakat sekitar atau kepada pemerintah daerah.

e. Interkoneksi grid dan penjualan energi

Aspek ini menjelaskan rencana interkoneksi PLTM dengan jaringan transmisi. Setiap pembangkit yang akan interkoneksi ke dalam jaringan memerlukan *interconnection agreement*. Selain persyaratan teknis yang harus dipenuhi oleh pembangkit, juga pembahasan PPA (*Power Purchase Agreement*) yang menjelaskan kesepakatan tentang jual beli energi.

f. Konstruksi

Aspek ini mempertimbangkan waktu pembangunan, suplai material, manajemen lingkungan dan kontrak konstruksi. Sebelum masuk ke dalam implementasi di lapangan, semua aspek yang disebutkan sebelumnya harus difinalisasi dan jelas bagaimana proyek akan diselesaikan dan siapa yang bertanggung jawab.

g. Pengoperasian dan pemeliharaan

Menjelaskan aspek-aspek yang terkait dengan operasi, dan pemeliharaan dari PLTM.

## 2.4. Biaya dan Pembiayaan

Total biaya yang dibutuhkan dalam sebuah proyek harus diestimasi dari awal agar

bisa memberikan gambaran tentang berapa investasi yang dihubungkan. Merencanakan pengeluaran proyek artinya mengidentifikasi berapa banyak dana yang dibutuhkan dalam setiap tahapan proyek. Informasi ini penting bagi calon investor.

Biaya untuk pengembangan proyek mikrohidro terdiri atas tiga kelompok besar; biaya awal untuk pengembangan proyek, biaya konstruksi termasuk desain detail, pembelian material dan peralatan, serta biaya operasional konstruksi. Biaya tahunan meliputi pengoperasian dan pemeliharaan termasuk di dalamnya pembayaran pajak rental. Detail dari setiap komponen dijelaskan sbb:

a. Biaya awal

▪ Studi kelayakan

Setelah situs mikrohidro terpilih, studi kelayakan secara detil harus dilakukan. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengidentifikasi kondisi situs secara detail apakah proyek ini bisa diteruskan atau tidak. Studi kelayakan lengkap meliputi penilaian kondisi hidrologis, lingkungan, desain awal dan estimasi biaya pembangunan.

▪ Pengembangan

Aktivitas pengembangan untuk proyek mikrohidro meliputi biaya untuk aplikasi dan mendapatkan izin dan approval hak guna lahan, air sungai dan pembangunan konstruksi, jasa hukun akunting, studi interkoneksi grid, *power purchase agreement*, manajemen proyek, dan aplikasi pinjaman dana.

▪ Biaya konstruksi

i. *Engineering*

Meliputi pembayaran jasa konsultan, perhitungan rekayasa, pengetesan kualitas, dsb. Biaya *engineering* dihitung berdasarkan lama yang dibutuhkan hingga pengerjaan proyek selesai.

ii. Mesin & peralatan

Proyek mikrohidro membutuhkan banyak peralatan elektromekanikal termasuk di dalamnya turbin-generator, proteksi elektrikal, pompa, *valve*, dsb. Biaya dari peralatan bergantung pada ukuran dan tinggi jatuh dari PLTM. Umumnya peralatan pembangkit dengan tinggi jatuh yang tinggi dan debit yang rendah lebih mahal ketimbang tinggi jatuh rendah dengan debit yang tinggi. Sebagai tambahan, juga perlu ditambahkan biaya transportasi dan instalasi di lapangan.

iii. Biaya *balance of plant*

Biaya ini termasuk di dalamnya biaya pembuatan jalan akses, konstruksi bending, saluran pembawa, pipa pesat, dsb. Biaya ini bervariasi tergantung pada material yang digunakan dan kompleksitas konstruksi.

iv. Biaya tak terduga

Biaya ini perlu dimasukkan sebagai *safety* sebagai antisipasi munculnya biaya instalasi di lapangan. Apalagi proyek didesain dengan baik, maka besaran 10% dari total biaya pada umumnya sudah cukup meng-cover ini.

b. Biaya tahunan

▪ Biaya karyawan

Biaya ini untuk menggaji karyawan yang mengoperasikan dan merawat PLTM sehari-hari. Terdiri atas kepala PLTM, administrasi, teknisi dan keamanan.

▪ Biaya *repair & maintenance*

Mencakup di dalamnya biaya pelumasan, penggantian peralatan, dan biaya perawatan berkala.

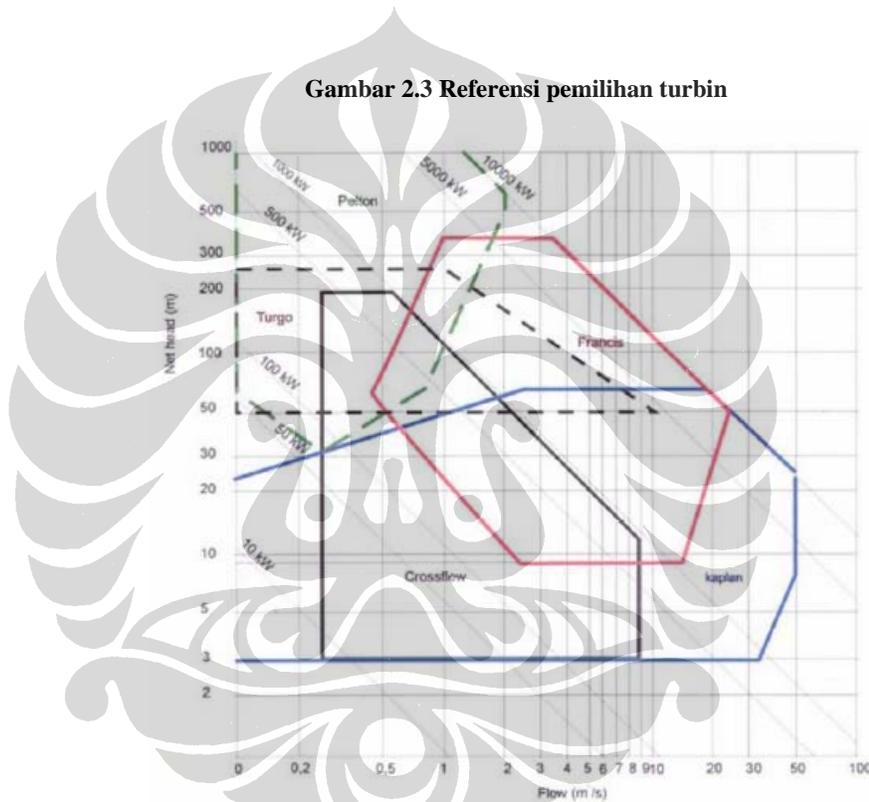
▪ Biaya lain-lain.

Termasuk di dalam biaya ini adalah biaya ATK, computer dan alat tulis, kompensasi, dsb.

## 2.5. Tipe Turbin

Turbin mikrohidro dapat dibedakan secara garis besar dalam dua kategori; turbin impuls dan turbin reaktif. Turbin impuls merubah energi kinetik dari semburan air yang menembak sudu turbin menjadi putaran. Sedangkan sudu turbin reaktif berada langsung di dalam aliran air, yang segera mentransfer kecepatan dan momentum angular atau linier air menjadi daya pada poros batang (*shaft power*). Secara umum pemilihan turbin untuk PLTM dapat dijelaskan pada gambar di bawah :

Gambar 2.3 Referensi pemilihan turbin



Sumber : A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association

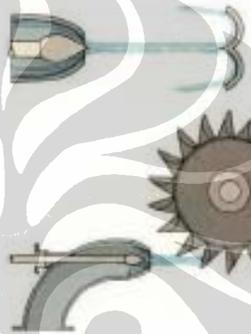
Area yang dibatasi oleh garis biru direpresentasikan oleh turbin Kaplan atau Bulb. Area yang dibatasi oleh garis merah diwakili oleh turbin Francis, garis hijau diwakili oleh turbin Pelton, garis gelap putus-putus oleh turbin Turgo, dan garis hitam diwakili oleh turbin Crossflow.

### 2.5.1. Turbin Impuls

#### a. Turbin Pelton

Turbin Pelton termasuk jenis turbin impuls yang merubah seluruh energi air menjadi energi kecepatan sebelum memasuki roda jalan (*runner*) turbin. Perubahan energi ini dilakukan didalam pipa sembur (*nozzle*) dimana air yang semula mempunyai energi potensial yang tinggi diubah menjadi energi kinetis.

Gambar 2.4 Turbin Pelton

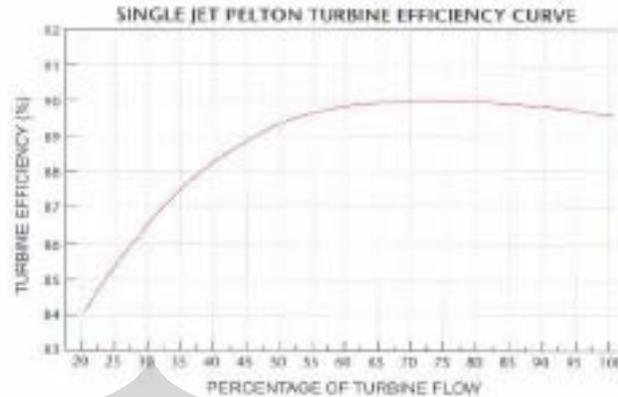


Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

Pancaran air yang keluar dari pipa sembur akan menumbuk *bucket* yang dipasang tetap sekeliling roda jalan dan garis pusat pancaran air menyinggung lingkaran dari pusat *bucket*. Kecepatan keliling dari *bucket* akibat tumbukan yang terjadi tergantung dari jumlah dan ukuran pancaran serta kecepatannya. Kecepatan pancaran tergantung dari tinggi air di atas pipa semburnya serta effisiensinya.

Berikut adalah grafik efisiensi turbin dengan tinggi jatuh  $> 20$  meter. Terlihat bahwa efisiensi turbin maksimum terjadi pada probabilitas hingga 90% dari debit maksimum.

**Gambar 2.5 Kurva efisiensi turbin Pelton**



Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

b. Turbin Turgo

Turbin Turgo memiliki prinsip yang sama dengan turbin Pelton, akan tetapi didesain untuk berputar pada rotasi tinggi. Pada kasus ini, semburan air menembak sisi *runner* pada satu sisi dan keluar pada sisi yang lainnya sehingga aliran air yang masuk tidak akan terganggu oleh *discharged* dari semburan sebelumnya.

**Gambar 2.6 Turbin Turgo**



Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

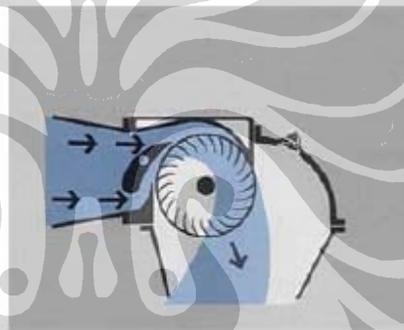
c. Turbin Crossflow

Turbin ini mempunyai runner yang berbentuk seperti drum yang

mempunyai 2 atau lebih piringan paralel yang masing-masingnya dihubungkan oleh susunan sudu yang berbentuk lengkung.

Dalam pengoperasian turbin cross-flow ini sebuah *nozzle* empat persegi mengarahkan pancaran air (jet) ke sepanjang *runner*. Pancaran air tersebut mendorong sudu dan memindahkan sebagian besar energi kinetiknya ke turbin. Pancaran air tersebut lalu melewati runner dan kembali mendorong bagian sudu yang lain sebelum keluar dari runner, memindahkan sebagian kecil energi kinetiknya yang masih tersisa. Ilustrasi dari turbin ini dapat dilihat sebagai berikut :

**Gambar 2.7 Turbin Crossflow**



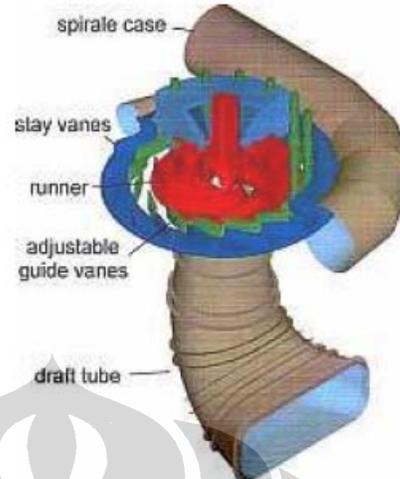
Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

### 2.5.2. Turbin Reaktif

#### a. Turbin Francis

Turbin ini dapat dibagi menjadi dua grup, horizontal dan vertikal *shaft*. Dalam prakteknya, jenis turbin ini dengan dimensi yang kecil memiliki *shaft* horizontal. Rumah keong berfungsi untuk mendistribusikan air secara merata sebelum memutar sudu.

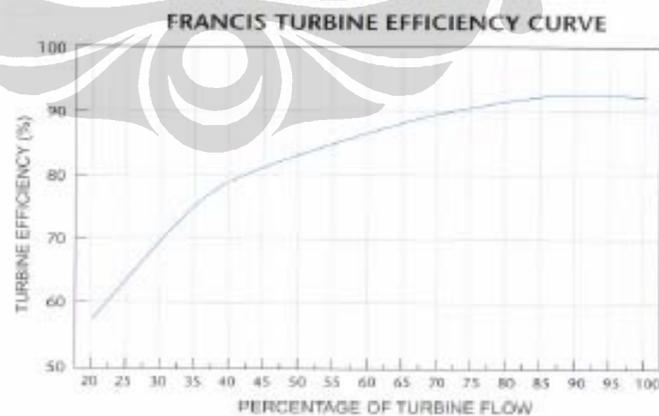
Gambar 2.8 Turbin Francis



Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

Turbin ini memiliki rentang aplikasi yang paling luas dari jenis turbin lain. Dengan karakteristik yang sangat fleksibel, turbin ini dapat beroperasi pada rentang tinggi jatuh 20 hingga 500 meter. Ketika debit aliran turbin berkurang hingga di bawah 85% dari debit maksimum, efisiensi turbin ini akan turun jauh. Grafik efisiensi dari pengoperasian turbin Francis dapat dilihat pada grafik di bawah :

Gambar 2.9 Kurva efisiensi turbin Francis

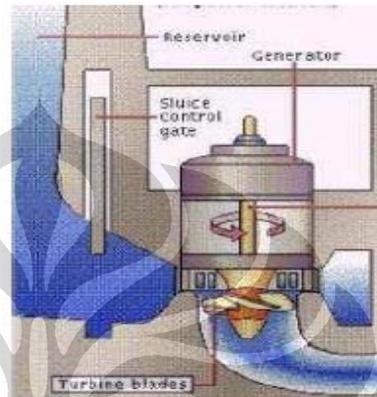


Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

b. Turbin Kaplan

Turbin ini digunakan pada pembangkit air dengan skala besar. Turbin jenis ini hanya bisa diinstal pada posisi vertikal. Dengan bentuk turbin seperti propeller pesawat, turbin ini efektif untuk tinggi jatuh yang tinggi dan debit rendah.

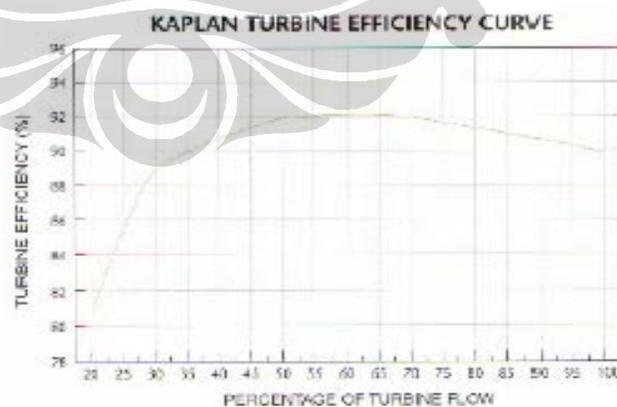
**Gambar 2.10 Turbin Kaplan**



Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

Efisiensi turbin akan mencapai 90% efisiensi ketika debit aliran air minimal 35% dari debit maksimum, seperti terlihat pada gambar di bawah :

**Gambar 2.11 Kurva efisiensi turbin Kaplan**



Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

## 2.6. Governor

Governor turbin dilengkapi dengan kontrol dan penyesuaian untuk mengatur daya output yang dihasilkan tergantung kebutuhan. Sistem governor bisa berbentuk mekanik hidrolik, elektro hidroik, atau digital hidrolik. Sistem ini terdiri atas :

- a. Kontroller, yaitu unit untuk mengatur pergerakan servo, dilengkapi peralatan elektronik PLC dan sensor.
- b. Sistem servo, yaitu penggerak sesuai dengan input kontroler untuk mengatur bukaan *valve* debit air ke turbin.

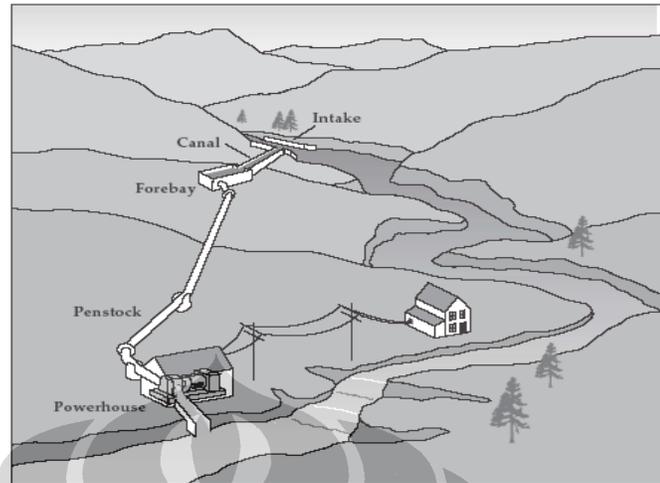
Governor berfungsi untuk menjaga kecepatan rotasional turbin-generator stabil pada nilai tertentu meskipun terjadi perubahan beban. Pada saat debit kurang dari jumlah minimum, governor akan menutup *valve* dan mematikan sistem PLTM secara keseluruhan.

## 2.7. Konstruksi Sipil PLTM

Konstruksi sipil PLTM secara garis besar terdiri atas :

- a. Bendung, berfungsi sebagai saluran masuknya aliran sungai pertama kali ke dalam sistem.
- b. Saluran pembawa, berfungsi untuk mentransfer air dari bendung menuju bak penenang.
- c. Bak penenang, berfungsi untuk menampung air sementara agar air yang masuk ke pipa pesat memiliki debit yang cukup untuk memutar turbin.
- d. Pipa pesat, yaitu perantara untuk mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik dan menyalurkannya untuk memutar turbin.
- e. Gedung sentral, yaitu tempat turbin dan generator berada dan berfungsi sebagai tempat pembangkitan listrik.

Gambar 2.12 Konstruksi sipil PLTM



Sumber : *A Feasibility Study for a Micro-hydro Installation for the Strangford Lough Wildfowlers & Conservation Association*

