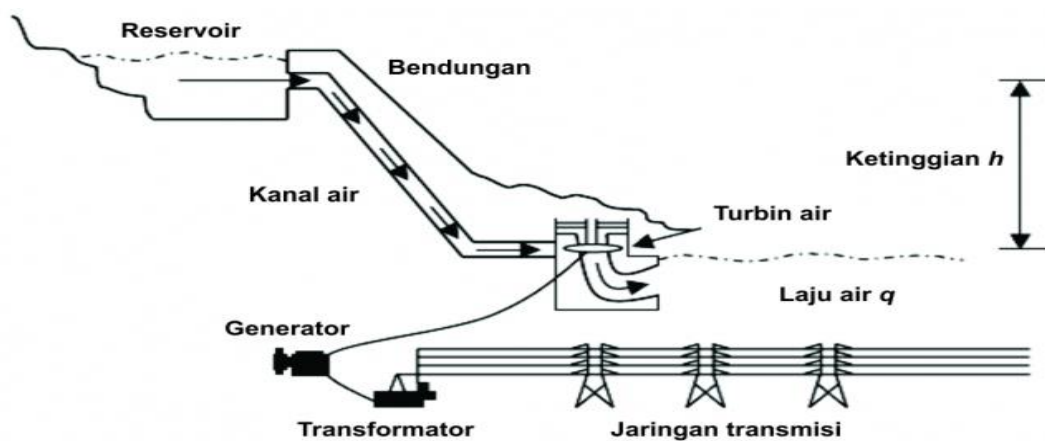


2. TEORI PENUNJANG

Dalam memenuhi kebutuhan listrik di dunia dibangun pembangkit-pembangkit listrik. Pembangkitan listrik bisa menggunakan bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), air, panas bumi, dan nuklir. Pembangkitan listrik pada dasarnya memiliki prinsip yang sama yaitu mengubah energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan generator. Salah satu pembangkit listrik yang ada yaitu dengan menggunakan tenaga air. Pembangkitan listrik tenaga air ini dikenal dengan istilah Pembangkit Listrik Tenaga Air atau *Hydro power plant*.

2.1. Prinsip Pembangkitan Listrik Tenaga Air

Pembangkit listrik tenaga air merupakan sumber listrik yang dihasilkan dari energi potensial dan kinetik air. Mekanisme dari pembangkit ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin yang digerakkan oleh energi kinetik air. Pembangkit listrik tenaga air bekerja dengan cara mengalirkan air ke turbin melalui *penstock*. Ada sebuah katup pengaman yang mengatur aliran air dan menghentikan aliran air tersebut. Energi yang dihasilkan dari energi potensial air tersebut mampu menggerakkan turbin. Energi gerak yang dihasilkan ini dikonversikan menjadi energi listrik melalui bantuan generator (Arismunandar, Kuwahara, 1991).



Gambar 2.1. Skema Pembangkitan Listrik Tenaga Air

Daya yang dihasilkan dari pembangkit ini sangat terpengaruh terhadap ketinggian jatuh air dan debit air. Daya yang dihasilkan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$P = 9,8 \times H \times Q \times \eta_T \times \eta_G \quad (2,1)$$

Dimana,

P (*power*) = tenaga yang dikeluarkan oleh generator secara teoritis (kW)

H (*head*) = tinggi jatuh air efektif (m)

Q (*outflow*) = debit air (m³/s)

η_T = efisiensi turbin

η_G = efisiensi generator

Pembangkitan listrik dibagi menjadi enam golongan berdasarkan daya yang dihasilkan, yaitu sebagai berikut:

- *Pico hydro* = 5 kW
- *Micro hydro* = 5 kW–100 kW
- *Mini hydro* = 100 kW–1 MW
- *Small hydro* = 1 MW–15MW
- *Medium hydro* = 15 MW–100 MW
- *Large hydro* = diatas 100 MW

Kelebihan dari pembangkitan listrik tenaga air adalah sumber daya yang kembali ke alam. Air yang dipakai sebagai penggerak turbin dikeluarkan kembali. Pembangkit listrik tenaga air juga tidak menghasilkan polusi udara, radiasi dan limbah sehingga tidak mencemari lingkungan. Pembangkit ini dapat beroperasi selama 24 jam 7 hari seminggu.

Pembangkit listrik ini memakan biaya yang besar dalam proses pembangunannya. Sehingga pembangkitan ini harus memiliki *life-time* yang panjang agar bisa menguntungkan. Pembangunan bendungan juga dapat merusak habitat makhluk hidup dan menyebabkan banjir. Sehingga untuk membangun pembangkitan listrik tenaga air ini harus dilakukan perencanaan matang dahulu.

2.2. Penentuan Proyek Pusat Listrik Tenaga Air

Dalam menentukan pilihan proyek PLTA perlu memperhatikan beberapa hal. Seperti besarnya kapasitas proyek harus ditentukan sedemikian rupa sehingga memanfaatkan tenaga air secara efektif. Proyek pembangunan pembangkit juga harus disesuaikan dengan kebutuhan listrik. Terdapat beberapa faktor yang harus diperhitungkan sebagai berikut (Arismunandar, Kuwahara, 1991):

- Keadaan aliran air
- Keadaan geografis, geologis
- Hubungan antara penyediaan dan kebutuhan tenaga listrik
- Biaya pembangunan
- Keuntungan dari pembangkitan tenaga
- Hubungannya dengan pengembangan sungai secara menyeluruh
- Pertimbangan dasar penyediaan tenaga, apakah dari tenaga air atau dari tenaga *termis*
- Hubungan antara tenaga yang sudah ada dan rencana kemudian
- Biaya untuk penggantian tanah dan bangunan yang sudah ada
- Jangka waktu penyelesaian proyek
- Jaringan transmisi dan peralatan untuk gardu sehubungan dengan daerah yang membutuhkan tenaga
- Pengangkutan dan pembuatan mesin dan peralatan lainnya

Dalam menentukan kapasitas proyek harus disesuaikan dengan keadaan geografisnya. Seperti penentuan aliran air, debit air, tinggi jatuh air (*head*), dan besarnya waduk. Dari data tersebut dapat ditentukan jumlah dan jenis turbin air serta generator serta tenaga yang dihasilkan setiap tahun. Perlu pula dipertimbangkan dan ditentukan lokasi dari proyek, jenis dan dimensi konstruksi bangunan sipil seperti bendungan, saluran air dan gedung sentral. Penentuan beberapa hal di atas bertujuan agar dapat menghitung biaya konstruksi sehingga dapat menghasilkan biaya pembangkitan yang rendah. Selanjutnya dapat ditentukan besarnya kapasitas pembangkitan sesuai dengan kebutuhan sekarang dan yang akan datang.

2.3. Daya yang dihasilkan oleh PLTA

Terdapat beberapa macam daya yang dapat dihasilkan sesuai dengan kebutuhan listrik yaitu (Arismunandar, Kuwahara, 1991):

- Daya maksimum (*maximum load*): Output daya maksimum yang dapat dihasilkan PLTA
- Daya pasti: Daya yang dihasilkan selama 355 hari dalam setahun untuk PLTA jenis aliran sungai langsung dan 365 hari dalam setahun untuk PLTA jenis waduk.
- Daya puncak: Daya yang dihasilkan pada jam- jam dimana beban tinggi
- Daya puncak khusus: daya yang dihasilkan setiap hari, tanpa pembatasan operasi pada musim hujan dikurangi dengan daya pasti.
- Daya penyediaan: Daya yang dapat dibangkitkan pada musim kemarau, dengan menggunakan simpanan air dalam waduk yang dikumpulkan selama musim hujan, dikurangi dengan daya pasti.
- Daya penyediaan puncak dan daya waduk

Perhitungan daya listrik dapat dilakukan dengan menggunakan parameter tinggi jatuh air maksimum, debit maksimum, efisiensi turbin dan efisiensi generator. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

- Daya teoritis = $9,8.Q.H$ (kW) (2,2)

- Daya turbin = $9,8. \eta_T .Q.H$ (kW) (2,3)

- Daya generator = $9,8.\eta_T \times \eta_G .Q.H$ (kW) (2,4)

2.4. Komponen Penyusun PLTA

Berikut merupakan komponen- komponen penyusunan PLTA:

- Sungai/kolam tandon, untuk tempat penampungan air
- *Intake*, pintu masuk air sungai/tandon
- Katup pengaman, berfungsi sebagai katup pengatur *intake*
- *Headrace tunnel*, pipa antara tandon dan sebelum masuk *penstock*
- *Surge tank*, berfungsi sebagai pengaman tekanan air yang tiba-tiba naik saat katup pengatur ditutup.
- *Penstock* , untuk mengalirkan dan mengarahkan air ke turbin serta untuk

mendapatkan tekanan hidrostatik yang besar.

- *Main stop valve*, berfungsi sebagai katup pengatur turbin
- *Turbine*, mengubah energi potensial air menjadi energi gerak
- Generator, menghasilkan energi listrik dari energi gerak
- *Main transformer*, untuk transfer energi listrik antar dua sirkuit dengan induksi elektromagnetik.
- Saluran transmisi, penyalur energi listrik ke konsumen
- *Tail race*, saluran tempat menyalurkan air setelah melewati turbin, yang selanjutnya kembali mengalir ke sungai semula.

2.5. Waduk

Waduk merupakan wadah yang berfungsi sebagai penampung air selama musim hujan sebagai persediaan dan pemakaian air pada musim kemarau. Dalam pembangkitan, waduk berfungsi sebagai penyimpan air atau tandon. Air yang ditampung tersebut jika telah mencapai elevasi tertentu akan digunakan sebagai penggerak turbin melalui *penstock* (pipa pesat). Waduk dapat dimanfaatkan antara lain sebagai berikut :

1. Irigasi

Pada saat musim penghujan, hujan yang turun di daerah tangkapan air sebagian besar akan mengalir ke sungai. Kelebihan air yang terjadi dapat ditampung waduk sebagai persediaan sehingga pada saat musim kemarau tiba air tersebut dapat digunakan untuk berbagai keperluan antara lain irigasi lahan pertanian.

2. PLTA

Dalam menjalankan fungsinya sebagai PLTA, waduk dikelola untuk mendapatkan kapasitas listrik yang dibutuhkan. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang biasanya terintegrasi dalam bendungan dengan memanfaatkan energi mekanis aliran air untuk memutar turbin yang kemudian akan diubah menjadi tenaga listrik oleh generator.

3. Penyediaan air baku

Air baku adalah air bersih yang dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air minum dan air rumah tangga. Waduk selain sebagai sumber pengairan persawahan juga dimanfaatkan sebagai sumber penyediaan air baku untuk bahan baku air minum dan air rumah tangga. Air yang dipakai harus memenuhi persyaratan sesuai kegunaannya.

4. Perikanan

Untuk mengganti mata pencaharian para penduduk desa yang desanya ditenggelamkan untuk pembuatan waduk yang dulu bermata pencaharian sebagai petani, sekarang beralih ke perikanan. Dengan memanfaatkan waduk ini para penduduk dapat membuat rumah apung yang digunakan untuk perikanan air tawar.

5. Pariwisata

Dengan pemandangan yang indah, waduk juga dapat dimanfaatkan sebagai tempat rekreasi.

2.5.1 Klasifikasi Penggunaan Waduk

Berdasarkan fungsinya, waduk diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu :

1. Waduk eka guna (*single purpose*)

Waduk eka guna adalah waduk yang dioperasikan untuk memenuhi satu kebutuhan saja, misalnya untuk kebutuhan air irigasi, air baku atau PLTA. Pengoperasian waduk eka guna lebih mudah dibandingkan dengan waduk multi guna dikarenakan tidak adanya konflik kepentingan di dalam. Pada waduk eka guna pengoperasian yang dilakukan hanya mempertimbangkan pemenuhan satu kebutuhan.

2. Waduk multi guna (*multi purpose*)

Waduk multi guna adalah waduk yang berfungsi untuk memenuhi berbagai kebutuhan, misalnya waduk untuk memenuhi kebutuhan air, irigasi, air baku dan PLTA. Kombinasi dari berbagai kebutuhan ini dimaksudkan untuk dapat mengoptimalkan fungsi waduk dan meningkatkan kelayakan pembangunan suatu waduk.

2.5.2 Karakteristik Waduk

Karakteristik suatu waduk merupakan bagian pokok dari waduk yaitu volume hidup (*effective storage*), volume mati (*dead storage*), tinggi muka air (TMA) maksimum, TMA minimum, tinggi mercu bangunan pelimpah berdasarkan debit rencana.

Dari karakteristik fisik waduk tersebut didapatkan hubungan antara elevasi dan volume tampungan yang disebut juga liku kapasitas waduk. Liku kapasitas tampungan waduk merupakan data yang menggambarkan volume tampungan air di dalam waduk pada setiap ketinggian muka air.

2.5.3 Pola Operasi Waduk

Pola Operasi waduk adalah patokan operasional bulanan suatu waduk dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk harus sesuai dengan ketentuan agar elevasinya terjaga sesuai dengan rencana. Pola operasi waduk disepakati bersama oleh para pemanfaat air dan pengelola melalui Panitia Tata Pengaturan Air (PTPA). Tujuan dari disusunnya pola operasi waduk adalah untuk memanfaatkan air secara optimal demi tercapainya kemampuan maksimal waduk dengan cara mengalokasikan secara proporsional sehingga tidak terjadi konflik antar kepentingan.

Pengoperasian waduk secara efisien dan optimal merupakan permasalahan yang kompleks karena melibatkan beberapa faktor seperti :

1. *Operational policy*, pola kebijakan pengoperasian waduk.
2. Debit *inflow* yang akan masuk ke waduk yang tergantung dari ketepatan perencanaan debit yang akan masuk ke waduk tersebut.
3. *Demand*, kebutuhan air untuk irigasi dan PLTA.
4. Ketepatan peralatan akan besarnya debit banjir yang akan terjadi.
5. Keandalan peralatan monitoring tinggi muka waduk, debit aliran dan curah hujan.
6. Koordinasi antara instansi yang terkait.
7. Kemampuan operasional.
8. Koordinasi pengoperasian jangka pendek, jangka menengah, dan jangka panjang serta pengoperasian *real time*.

Bila ditinjau dari saat pengisian dan pengosongan waduk, terdapat dua jenis pola operasi waduk, yaitu :

1. Pola tahunan

Pola tahunan terjadi bila periode saat pengisian dan pengosongan waduk terjadi dalam kurun waktu satu tahun. Saat pengisian waduk terjadi antara bulan Desember sampai dengan bulan Mei (musim penghujan), dan saat pengosongan terjadi antara bulan Juni sampai dengan bulan November (musim kemarau).

2. Pola harian

Pada pola harian, periode saat pengisian dan pengosongan terjadi dalam kurun waktu satu hari.

2.6. Bendungan

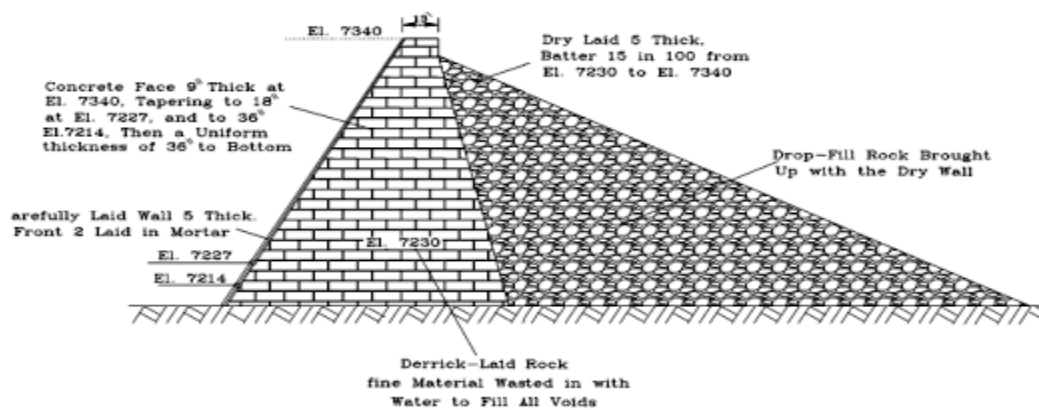
Bendungan berfungsi sebagai penahan atau pembendung aliran sungai agar diperoleh tinggi jatuh air yang diinginkan. Selain itu juga untuk menampung, menyimpan, dan memasukkan air ke dalam turbin sesuai dengan kebutuhan.

Bendungan memiliki beberapa macam yang dapat ditentukan melalui strukturnya, bahan-bahan konstruksinya, tujuan, prinsip perencananya, tinggi dan faktor lainnya. Bendungan menurut bahan konstruksinya adalah bendungan beton dan bendungan urugan. Bendungan berdasarkan tujuan penggunaannya adalah bendungan pemasukan, bendungan penyimpanan, bendungan pengatur dan bendungan penyimpanan di pompa.

Bendungan yang paling sering digunakan adalah bendungan urugan. Hal ini disebabkan karena bendungan tipe urugan/timbunan ini relatif mudah dan murah untuk dikerjakan. Bendungan ini dapat diurug dengan batu, tanah dan campuran batu-tanah. Bendungan ini tidak memerlukan pondasi yang baik seperti bendungan beton. Bahan penyusun bendungan ini merupakan batu, tanah liat, pasir, dan sebagainya. Bahan alamiah tersebut mudah didapat di sekitar tempat pembangunan sehingga lebih menguntungkan. Berikut adalah dua tipe bendungan urugan:

- *Earth Dams*

Bendungan urugan tanah dibangun dari timbunan tanah yang memenuhi persyaratan bendungan yang diambil dari *borrow area* sekitar lokasi bendungan.



Relief dam on Stanislaus River, California.

Gambar 2.3. Bendungan Tipe *Rock fill Dams*

Terdapat beberapa ketentuan material yang harus dipenuhi dalam pembangunan sebuah bendungan, diantaranya yaitu kepadatan inti (*core*) dari bendungan harus $\geq 90\%$ ($\gamma_{dry} \geq 90\%$). Kriteria teknis lainnya yang harus dipenuhi untuk sebuah bendungan tipe urugan adalah *Safety Factor* (SF). Penurunan/*settlement* pun dibatasi sebesar 1-2% dari tinggi bendungan.

Sebuah bendungan urugan (*earth-fill* dan *rock-fill*) mempunyai beberapa kemungkinan kegagalan diantaranya adalah *overtopping*, *slope failure*, *sliding*, erosi internal, dan erosi permukaan.

2.7. Fasilitas yang berhubungan dengan Bendungan

2.7.1. Saluran Limbah (*Spillway*)

Spillway dibangun untuk mengalirkan air yang berlebih seperti pada waktu banjir. Bangunan ini harus dibuat sempurna sehingga debit air yang besar (1,2 kali debit normal) dapat disalurkan dengan baik. Saluran pelimpah juga berfungsi untuk menjaga kestabilan air waduk di bawah ketinggian maksimum yang telah ditetapkan.

Pada bendungan beton saluran banjir biasanya dibawa pada puncak tanggul dan dinding arah (*guide wall*). Saluran dibuat di permukaan bagian bawah bendungan untuk mengalirkan air ke bawah. Pada bendungan urugan, air disalurkan melalui tempat tertentu pada bendungan. Melalui saluran terbuka yang letaknya sama sekali terpisah dari bendungan (Arismunandar, Kuwahara, 1991).



Gambaran 2.4. Saluran Pembuangan (*Spillway*)

2.7.2. Pipa Kuras

Pipa kuras berfungsi pada bendungan yang relatif rendah yang dibangun di sungai yang membawa banyak tanah, pasir, batu dan lain-lain. Pada kondisi tersebut bahan-bahan tersebut akan meluap melalui puncak bendungan pada waktu banjir dan masuk ke dalam *intake*. Pipa kuras dibangun untuk mencegah hal tersebut terjadi (Arismunandar, Kuwahara, 1991).

2.7.3. Pintu dan Katup

Bendungan dilengkapi dengan beberapa pintu seperti balok tahan (*flash board*), pintu air tromol (*drum gate*), pintu air geser tegak (*sluice gate*), pintu air limbah silindrik (*roller gate*), pintu air gerigi (*cartepillar gate*), dan lain sebagainya (Arismunandar, Kuwahara, 1991).

Balok tahan berguna untuk mengatur air pasang atau muka air pada pintu masuk (*intake gate*). Pintu ini juga dibuat untuk membuang kayu-kayu yang mengapung, kotoran, dan lain sebagainya pada bendungan kecil. Pintu air geser tegak digunakan pada kondisi bentangan (*span*), tekanan air dan lain sebagainya relatif kecil.

Pintu air limbah silindrik dipasang untuk membuang air pasang. Pintu ini digunakan pada kondisi sungai yang lebar dan terdapat tekanan air yang besar atau

jika pintu sering digunakan. Pintu *trainter* dipakai untuk membuang air banjir pada bendungan yang sangat tinggi. Pintu ini memiliki kelemahan yaitu kurang kuat terhadap peluapan air dan bentuknya kurang kaku. Pintu air gerigi digunakan untuk tekanan air yang besar dengan daya angkat yang besar. Pintu ini terutama dipakai untuk pintu masuk (*intake gate*) pada air yang dalam.

Katup (*valve*) digunakan sebagai pelengkap sebuah bendungan. Katup biasanya dipasang pada saluran pembuangan pada bendungan. Katup ini berfungsi sebagai pengatur debit salur pembuangan air. Beberapa macam katup yaitu katup jarum (*needle valve*), katup pancaran rongga (*hollow jet*), katup *howell* dan yang lainnya.

2.7.4. Fasilitas tambahan lainnya

Fasilitas tambahan lainnya meliputi laluan balok kayu (*log chute*) untuk menyalurkan balok kayu dan rakit yang terapung, lintasan ikan (*fishway*) untuk memungkinkan ikan lewat dan lainnya. Saat ini pada bendungan yang tinggi, fasilitas tambahan tidak ada sebagai langkah pengamanan (Arismunandar, Kuwahara, 1991).

2.8. Intake Gate

Intake Gate adalah fasilitas yang dipakai untuk mengambil air langsung dari sungai atau waduk ke dalam saluran air. Ada perbedaan antara PLTA aliran sungai langsung dan PLTA jenis waduk (Arismunandar, Kuwahara, 1991).

- Pada PLTA aliran sungai langsung, *Intake gate* harus langsung menerima aliran air sungai dan dibangun dekat bendungan air. Pintu masuk harus dibuat di permukaan ambil air yang terendah.
- Pada PLTA jenis waduk, *intake gate* mendapatkan air dari waduk. *Intake gate* dapat dibangun berdekatan dengan bendungan atau terpisah sama sekali. *Intake gate* harus memiliki konstruksi yang kuat karena tekanan air sangat kuat pada jenis ini.



Gambar 2.5. Pintu Masuk Air (*Intake Gate*)

2.9. Kolam pengendap pasir

Kolam pengendap pasir dibangun untuk mencegah masuknya pasir atau tanah ke dalam saluran air. Kolam pengendap ini disertai pipa kuras dan dipasang penahan (*stop log*) untuk menguras tanah atau pasir yang tertimbun di dalamnya. Kolam ini dibangun pada kondisi bendungan ambil air

2.10. Tangki Pendatar (*Surge Tank*)

Surge tank bertugas mengatur jumlah air untuk menyerap pukulan air (*water hammer*) ketika debit air dalam turbin berubah. Berikut adalah macam bentuk *surge tank* menurut jenisnya (Arismunandar, Kuwahara, 1991):

- *Surge tank* sederhana berbentuk silinder, mempunyai garis tengah yang besar serta mempunyai daya hisap *water hammer* yang baik. Namun bentuk ini jarang dipakai karena kurang ekonomis.
- *Surge tank diferensial* berbentuk silinder dengan luas penampang 70–100% dari penampang saluran yang dinamakan pembangkit (*riser*) dan dipasang dalam tangki air.

- *Surge tank* dengan lubang terbatas memiliki lubang antara dasar *surge tank* sederhana dan salurannya. Bentuknya seperti *surge tank diferensial* namun tanpa pembangkitnya.
- *Surge tank* dengan ruangan berbentuk seperti *surge tank* sederhana ditambah dengan ruangan-ruangan air (*water chambers*) di bagian atas dan bawah. Tangki yang berbentuk silinder, penampangnya relatif kecil dan bertugas sebagai pembangkit.

2.11. Pipa Pesat (*Penstock*)

Penstock merupakan pipa yaang digunakan untuk mengalirkan air dari *intake gate* ke turbin air. Saluran pipa pesat merupakan terowongan yang dipakai untuk menempatkan *penstock*, *anchor block* dan pelana (*saddle*), yang akan menahan pipa pesat tersebut. Dalam perencanaan pembangunan pipa pesat harus diperhitungkan kemungkinan tekanan air yang terbesar.

Tebal pipa harus dihitung dengan tekanan air maksimum pada tempat tersebut. Dalam hal ini harus ditambahkan 1,5 mm pada tebal pipa mengingat adanya korosi dan pengikisan. Minimum tebal pipa adalah 6 mm. *Anchor block* dipasang pada bagian yang melengkung (120-150 m bila tidak ada bagian yang melengkung). Pelana (*saddle*) dipasang di sela-sela *anchor block*. Sehingga keduanya menyangga berat pipa dan air.

Fasilitas pipa pesat lainnya adalah katup pintu masuk (*inlet valve*) dari turbin air yang dipasang pada ujung pipa pesat. Katup udara dan pipa udara untuk menghindarkan keadaan hampa udara di dalam pipa atau untuk mengalirkan udara yang tinggal di bagian yang lengkung. Lubang kerja (*manhole*) untuk melakukan pemeriksaan dan perbaikan pada pipa pesat. Serta katup buangan air (*drain valve*) atau pipa buangan air (*drain pipe*) untuk mengeringkan bocoran air dan lain sebagainya (Arismunandar,1991).



Gambar 2.6. Pipa Pesat (*Penstock*)

2.12. Bangunan Sentral (*Power House*)

Power house adalah nama umum yang diberikan bagi fasilitas yang berisi turbin air, generator dan mesin-mesin listrik lainnya. Terdapat beberapa jenis *power house* menurut bagiannya yang terletak di atas tanah dan menurut bentuk pondasi turbin dan generator. Pembangunan *power house* harus mempertimbangkan beberapa aspek seperti pemilihan lokasi dan bentuk bangunan atas tanahnya. Berbagai kemungkinan seperti letak geografi, keadaan geografi, kedudukan timbal balik antara bendungan dan terusnya, sulit atau tidaknya pembangunan dan pemeliharaan harus sangat diperhatikan.

Terdapat beberapa macam *power house* yang dibagi menurut bagiannya di atas tanah dan jenis penyangga generatornya. Menurut bagiannya di atas tanah dibagi menjadi tiga macam yaitu jenis pasangan dalam bangunan (*indoor*), jenis pasangan luar (*outdoor*), dan jenis bawah tanah (*underground*). Menurut jenis penyangga generatornya sebagai berikut (Arismunandar, Kuwahara, 1991) :

- Jenis dua lantai:

Generator disangga oleh balok-balok dan bangunan dibagi menjadi dua ruangan yaitu ruang turbin dan ruang generator. Penggunaan balok-balok menyebabkan *power house* jenis ini tidak cocok untuk generator berkapasitas besar.

- Jenis satu lantai:

Generator disangga oleh konstruksi yang berbentuk tong yang menampangnya berbentuk bulat atau poligon teratur. *Power house* jenis ini tidak memiliki ruangan khusus untuk generator namun memiliki konstruksi yang cukup stabil.

- Jenis banyak lantai

Saat ini pusat pembangkit listrik yang besar menggunakan *power house* jenis ini namun dengan kondisi dua lantai. Sehingga memanfaatkan jenis dua lantai dan satu lantai. *Power house* ini digunakan apabila kondisi turbin dan generator jenis poros tegak (*vertical shaft*) dan permukaan lantai generator harus lebih tinggi dari muka air banjir. Akan tetapi bangunan ini konstruksinya dinilai kurang ekonomis.

2.13 Turbin

Turbin air dibagi menjadi dua jenis yaitu turbin *impuls* dan turbin reaksi. Turbin *impuls* dibuat sedemikian rupa sehingga rotor (*runner*) bekerja karena aliran air. Turbin *pelton* merupakan turbin jenis ini. Pada turbin reaksi, turbin ini dibuat sedemikian rupa sehingga rotor bekerja karena aliran air dengan tinggi terjun karena tekanan. Turbin *francis*, turbin aliran diagonal (*diagonal flow*) dan turbin baling-baling (*propeller turbine*). Berikut adalah konstruksi dari segala jenis turbin air:

- Turbin *Pelton*

Turbin *pelton* adalah turbin untuk tinggi jatuh air yang tinggi, yaitu di atas 300 meter. Teknik konversi energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses impuls, sehingga turbin *pelton* juga disebut sebagai turbin *impuls*.

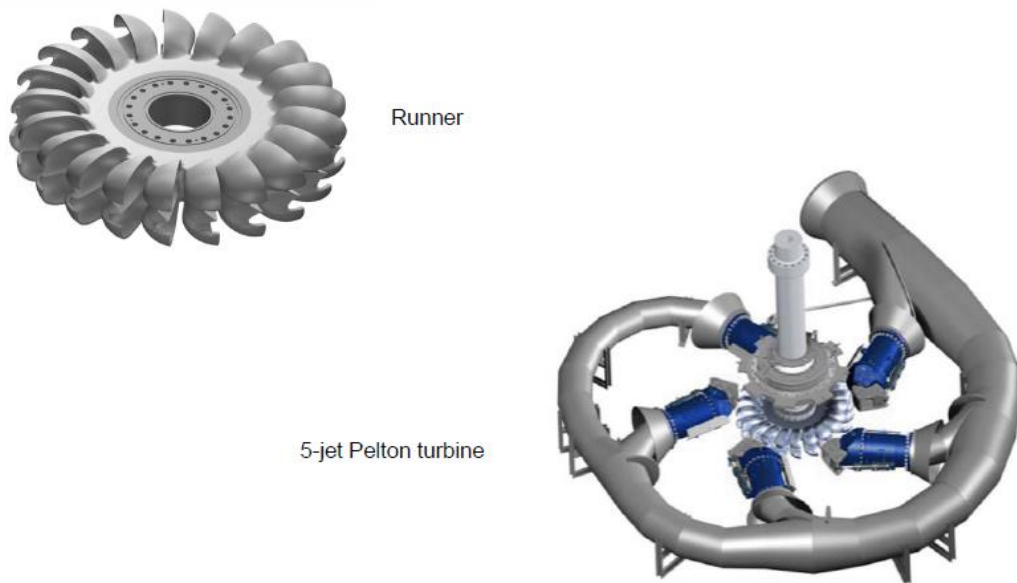
Bagian-bagian utama turbin *pelton* :

1. Pipa *nozzle*, digunakan untuk mengarahkan aliran *jet* (semburan) air.
2. *Runner*, didesain untuk memanfaatkan energi kinetis aliran *jet* (semburan) air.
3. Rumah turbin untuk mengamankan *runner* dan *nozzle*.
4. Alat pengatur kecepatan (*governor*) agar kecepatan tetap sama walaupun

beban bervariasi.

Untuk mendapatkan H (*head*) efektif sebesar mungkin, turbin harus ditempatkan serendah mungkin. Keunggulan turbin *pelton* dibanding turbin lainnya :

1. Pengaturan kecepatan yang lebih baik.
2. Konstruksi yang sederhana.



Gambar 2.7. Turbin *Pelton*
(Sumber: Vorth- Siemens)

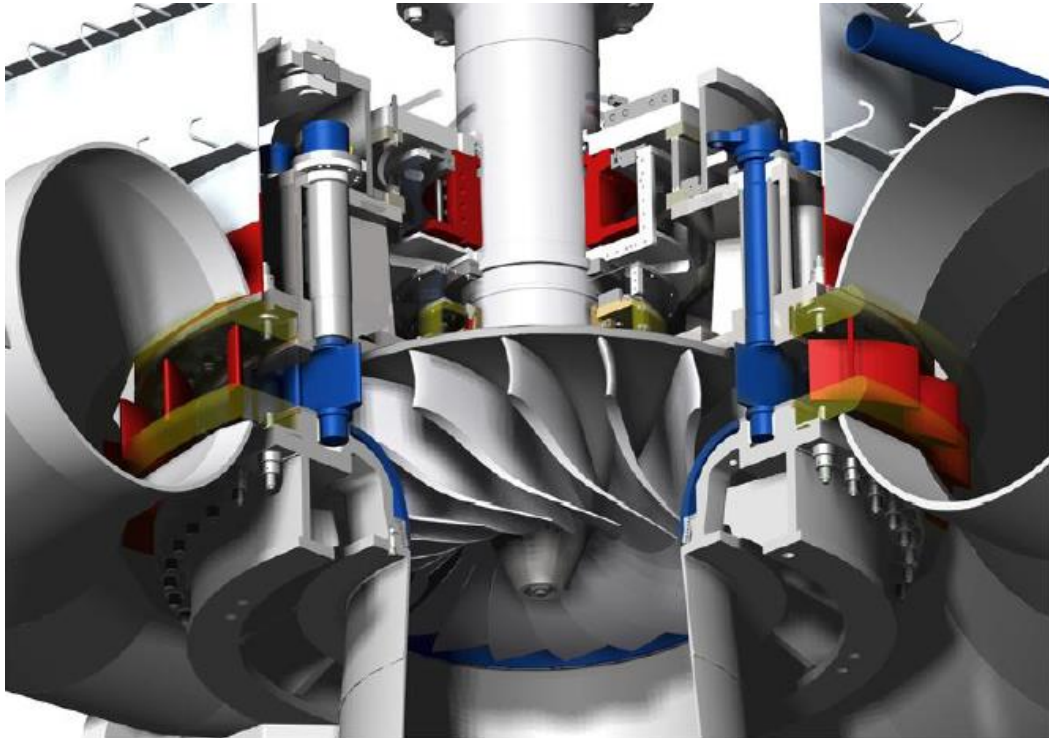
- Turbin *Francis*

Turbin *Francis* paling banyak digunakan di Indonesia. Turbin ini digunakan pada PLTA dengan tinggi jatuh air sedang, yaitu antara 20-400 meter. Teknik konversi energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses reaksi sehingga turbin *francis* juga disebut sebagai turbin reaksi. (Arismunandar, Kuwahara, 1991).

Bagian-bagian utama turbin *Francis* :

- 3 Rumah siput (*spiralcase* atau *scrollcase*) yang menerima air dari pipa pesat (*penstock*) dan mengarahkan aliran air ke turbin. Fungsi rumah siput adalah membagi rata air yang diterima dari pipa pesat ke sekeliling turbin, dan juga untuk menyamaratakan tekanan yang diterima oleh seluruh permukaan *runner*.

- 4 *Runner* (bilah turbin)
- 5 Pipa pelepas air (*drafttube*) yang meneruskan air dari turbin ke saluran pembuangan (*tailrace*).

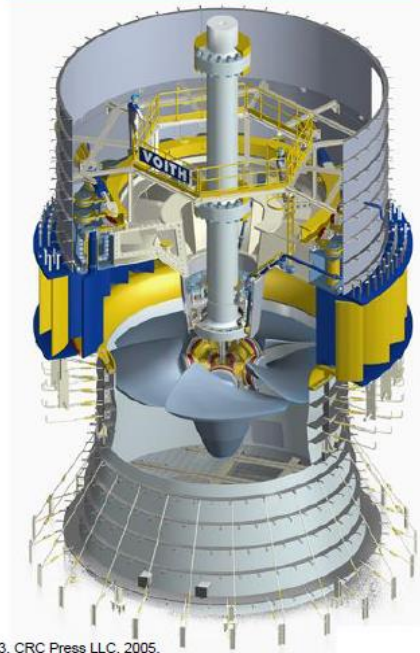
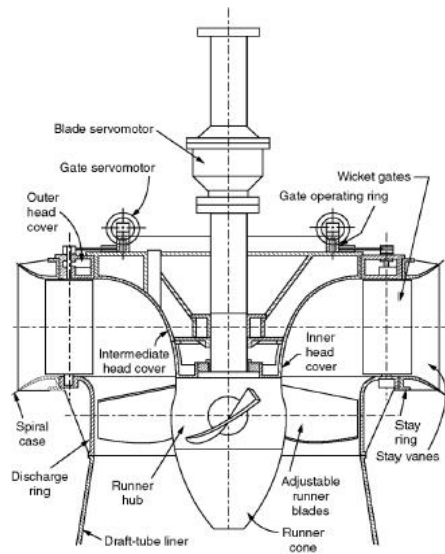


Gambar 2.8. Turbin *Francis*
(Sumber: Vorth- Siemens)

- Turbin *Kaplan*

Turbin ini disebut turbin *propeller* apabila bilah turbinnya tetap, sedangkan turbin *kaplan* memiliki bilah turbin yang dapat diatur. Turbin ini baik digunakan pada PLTA dengan tinggi terjun yang rendah, yaitu di bawah 20 meter. Teknik konversi energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui pemanfaatan kecepatan massa air. Turbin *kaplan* juga termasuk jenis turbin reaksi. Bagian-bagian utama turbin Kaplan :

 1. Rumah siput (*spiral-case* atau *scroll-case*)
 2. *Runner* (bilah turbin)
 3. Pipa pelepas air (*drafttube*)



Source:
 right: [Voith-Siemens](#)
 left: R.E.A. Amdt, *Hydraulic turbines*, in *The Engineering Handbook – Second Edition*, chapter 73, CRC Press LLC, 2005.

Gambar 2.9. Turbin Kaplan
 (Sumber: Vorth- Siemens)

2.13.1 Daya Turbin

Besarnya daya *output* turbin :

$$P = 9,8 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (2,5)$$

Dimana :

P = Daya poros/*output* turbin (MW)

Q = Debit air (m³/detik)

H = Efektif *Head* (m)

η_t = Efisiensi turbin

2.13.2 Kecepatan Turbin

$$N_s = 2283/H^{0,486} \quad (2,6)$$

$$N = N_s \cdot H^{1,25}/P^{0,5} \quad (2,7)$$

Dimana :

N_s = Kecepatan spesifik

N = Kecepatan putaran turbin (rpm)

P = Daya poros/*output* turbin (MW)

H = *Head* efektif (m)

2.13.3 Dimensi Turbin

Pendekatan awal penentuan dimensi turbin dapat menggunakan metode persamaan yang diberikan oleh *F. de Siervo* dan *F. De Leva* sebagai berikut :

$$D = c * Q^{0.5} \quad (2,8)$$

Dimana :

D = Dimensi minimum *runner* turbin (m)

c = koefisien *runner*

Q = Debit air (m³/detik)

2.13.4. Pemilihan Jenis Turbin

Pada tahap awal, pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan parameter-parameter khusus yang mempengaruhi sistem operasi turbin yaitu :

1. Tinggi jatuh air efektif (*net head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin.
2. Daya (*power*) yang diinginkan berkaitan dengan *head* dan debit yang tersedia.
3. Kecepatan putaran turbin.

Ketiga faktor di atas dinyatakan sebagai kecepatan spesifik turbin (N_s), dari kecepatan spesifik dapat diketahui jenis turbin (*Patty, 1995*) :

1. $N_s = 9$ s/d 25 untuk turbin *pelton* dengan satu pancaran.
2. $N_s = 25$ s/d 60 untuk turbin *pelton* dengan lebih dari satu pancaran.
3. $N_s = 40$ s/d 400 untuk turbin *francis*.
4. $N_s = 260$ s/d 860 untuk turbin *Kaplan*.
5. $N_s = 340$ s/d 860 untuk turbin *propeller*. (*Patty, 1995*)

2.14 Generator

Generator merupakan mesin yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Untuk pembangkitan listrik tenaga AC atau bolak-balik biasanya digunakan generator sinkron. Generator sinkron dibagi menjadi dua

yaitu generator sinkron AC tiga fasa dan generator sinkron AC satu fasa. Generator sinkron memiliki prinsip pembangkitan yang dinyatakan oleh Faraday.

Generator turbin air dibagi dalam golongan poros datar (horizontal) dan golongan poros tegak (vertikal). Golongan poros datar cocok digunakan untuk mesin-mesin berdaya kecil atau memiliki putaran tinggi. Sementara golongan poros tegak cocok digunakan untuk mesin-mesin berdaya besar atau yang memiliki putaran rendah. Generator poros tegak sangat cocok digunakan sebagai generator turbin air karena luas ruangan yang dibutuhkan lebih kecil dibandingkan generator poros datar. Generator poros tegak dibagi menjadi empat bentuk berdasarkan letak bantalannya (*bearing*), berikut penjelasannya (Arismunandar, Kuwahara, 1991):

- Bentuk biasa (*conventional*), dilengkapi dengan bantalan poros dorong (*thrust bearing*) di atas rotor
- Bentuk payung (*umbrella*), dilengkapi dengan bantalan poros dorong (*thrust bearing*) di bawah rotor
- Bentuk setengah payung (*semi umbrella*), dilengkapi dengan bantalan poros dorong (*thrust bearing*) dan bantalan antar (*guide bearing*) bawah di bawah rotor, dan bantalan antar (*guide bearing*) atas di atas rotor
- Bentuk penunjang bawah (*support type*) yang dilengkapi dengan bantalan poros dorong (*thrust bearing*) di atas tudung turbin air.

Generator juga memiliki dua sistem pendinginan yaitu saluran terbuka dan saluran tertutup. Sistem pendinginan saluran terbuka yaitu udara dihisap langsung dari bangunan ke dalam tudung generator lalu dibuang ke luar bangunan melalui saluran tersebut. Sementara dalam sistem pendinginan udara tertutup, udara yang dihisap dari bangunan dan dikeluarkan lagi melalui saluran-saluran tersendiri. Generator berdaya besar biasanya dilengkapi dengan tudung dengan sistem peredaran udara tertutup, dimana udara di dalam mesin diedarkan melalui suatu pendinginan udara. Terdapat juga sistem pendinginan dengan zat air (*hydrogen*) namun sistem pendinginan ini tidak digunakan pada generator turbin air karena kurang ekonomis.

Bagian utama dari generator adalah *stator* dan *rotor*. *Stator* merupakan bagian yang berfungsi sebagai tempat untuk menghasilkan arus AC tiga fasa (saat berfungsi sebagai generator) ataupun menghasilkan medan magnet 3 fasa (saat

sebagai motor). *Rotor* Merupakan bagian yang berfungsi sebagai tempat untuk dibangkitkannya medan magnet (saat berfungsi sebagai generator) ataupun dibangkitkannya gaya mekanik yang akan digunakan untuk memutar beban mekanis mesin (saat sebagai motor).

2.15 Sistem eksitasi

Sistem eksitasi atau sistem penguatan pada generator adalah untuk membangkitkan tegangan *output* pada generator. Prinsip utama pembangkitan listrik dengan generator adalah tegangan akan terinduksi pada belitan stator. Hal tersebut terjadi apabila tersedia medan magnet pada *rotor* yang berputar yang selanjutnya akan terpotong oleh belitan *stator* yang diam. Medan magnet tersebut timbul akibat adanya arus penguatan yang mengalir pada belitan medan *rotor*. Maka diperlukan adanya sistem penguatan untuk menjaga kelangsungan pembangkit tenaga listrik dari generator (Arismunandar, Kuwahara, 1991).

Sistem eksitasi (sistem penguatan) adalah sistem pasokan listrik searah (DC) sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet. Sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasinya.

Pada sistem eksitasi untuk arus bolak-balik, arusnya disearahkan untuk penguatan. Cara ini bisa diterapkan dengan menggunakan *rectifier* (penyearah) semi konduktor. Terdapat dua jenis penguatan dengan arus bolak-balik, sebagai berikut:

- Eksitasi menggunakan generator arus bolak-balik dengan eksitasi sendiri:

Pada sistem eksitasi ini, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*. Jika menggunakan sumber listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan *Permanent Magnet Generator (PMG)* yang medan magnetnya adalah magnet permanent, maka di dalam lemari penyearah tegangan listrik arus bolak balik diubah atau disearahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan eksiter utama (*main exciter*).

Untuk mengalirkan arus eksitasi dari *main exciter* ke *rotor* generator menggunakan *slip ring* dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari *pilot exciter* ke *main exciter*.

- *Eksitasi* menggunakan generator arus bolak-balik tanpa *brush* (sikat):

Penggunaan sikat atau *slip ring* untuk menyalurkan arus eksitasi ke *rotor* generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).

2.16 Transformator

Transformator merupakan suatu alat yang digunakan untuk memindahkan daya listrik arus bolak-balik (AC) dari suatu rangkaian ke rangkaian lainnya secara induksi elektromagnetik (lewat mutual induktansi). Transformator bekerja dengan memindahkan daya listrik dari satu sirkit ke sirkit yang lain secara magnetis.

Transformator yang bekerja secara induksi elektromagnetik, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama.

Prinsip kerja transformator yaitu tegangan AC diberikan pada kumparan primer, perubahan medan magnet yang dihasilkannya akan menginduksi tegangan AC yang berfrekuensi sama pada kumparan sekunder. Namun tegangan yang timbul akan berbeda sesuai dengan jumlah lilitan pada setiap kumparan.

2.17. Pemodelan dan Simulasi

Sistem adalah kumpulan obyek yang saling berinteraksi dan bekerja sama untuk mencapai tujuan logis dalam suatu lingkungan yang kompleks. Obyek yang menjadi komponen dari sistem dapat berupa obyek terkecil. Elemen lingkungan memberikan peran sangat penting terhadap perilaku sistem itu. Komponen dari sistem yang berinteraksi merupakan salah satu peran dari elemen lingkungan.

Sistem yang diamati tidak hanya pada komponen-komponennya melainkan juga pada perilaku dan variabel-variabel di dalamnya. Analisa dari sistem harus membuat konsepsi tentang sistem tersebut. Ada beberapa cara untuk merancang,

mengoperasi dan menganalisis sistem. Salah satunya dengan pemodelan, yaitu membuat model dari sistem tersebut.

Pemodelan dapat diartikan sebagai suatu rangkaian aktifitas pembuatan model. Model merupakan suatu perwakilan atau abstraksi dari suatu obyek atau situasi aktual. Model melukiskan hubungan-hubungan langsung dan tidak langsung serta kaitan timbal-balik dalam terminologi sebab akibat. Model memiliki wujud yang lebih sederhana dibanding wujud realitanya.

Model harus mewakili berbagai aspek dari wujud realitanya. Sehingga berguna sebagai alat untuk menganalisis maupun merancang sistem. Model dapat mewujudkan bagaimana suatu operasi bekerja dan mampu merangsang untuk berpikir bagaimana meningkatkan atau memperbaikinya.

Perumusan matematik digunakan dalam pembuatan model. Hal ini digunakan untuk mempermudah pengkajian sistem yang biasanya sangat kompleks. Perumusan matematik memperlancar komunikasi dan transfer metode yang dikembangkan di suatu negara atau bidang ilmu tertentu ke bidang lainnya.

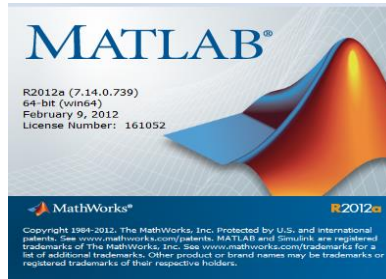
Simulasi merupakan suatu teknik meniru operasi-operasi atau proses-proses yang terjadi dalam suatu sistem dengan bantuan perangkat komputer dan dilandasi oleh beberapa asumsi tertentu sehingga sistem tersebut bisa dipelajari secara ilmiah. Simulasi pada komputer mempelajari sistem secara numerik, yaitu pengumpulan data *real* untuk melakukan estimasi statistik untuk mendapatkan karakteristik asli dari sistem. Hal ini diharapkan menjadi alat yang tepat untuk menganalisa suatu komponen- komponen sistem karena melakukan eksperimen yang *real* memerlukan waktu yang lama dan mahal.

Model yang dibuat harus menunjukkan berbagai komponen dalam sistem saling berinteraksi sehingga menggambarkan perilaku sistem. Hal ini disebut dengan model sistem nyata. Model ini dibuat di dalam komputer dan disimulasikan. Salah satu penerapan simulasi pada komputer yaitu *Matlab Simulink*.

2.18. *Matlab Simulink*

Matlab adalah sebuah bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks. Program ini sering digunakan untuk teknik komputasi numerik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan elemen, matrik,

optimasi, dan aproksimasi. Tugas pengolahan sinyal, aljabar linier, dan kalkulasi matematis lainnya dapat disimulasikan pada *Matlab*. Pada *Matlab* terdapat *toolbox* yang berisi fungsi- fungsi tambahan untuk aplikasi khusus.



Gambar 2.10. Gambar *Starting* pada *Matlab*

Simulink merupakan salah satu bagian dari *Matlab*. Program ini membantu proses analisa dan desain sistem, dengan cara mensimulasi sistem dengan membuat dan menganalisa perilaku dari tiruan sistem. Model yang berupa tiruan sistem dikondisikan agar sangat mirip dengan sistem fisik. Program ini mendukung simulasi sistem linier, sistem kontrol, sistem menggunakan logika kabur, jaringan syaraf tiruan, komunikasi, dan lainnya. Program ini berbentuk blok-blok diagram yang mewakili fungsi.

2.19. Buka Tutup Katup

Pada model yang menggunakan parameter buka tutup katup untuk mencari debit *outflow*, persamaan buka tutup katup didapat dengan rumus fisika. Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

Energi potensial = Energi kinetik

$$m \cdot g \cdot h = (m \cdot v^2) / 2 \quad (2,9)$$

$$2 \cdot g \cdot h = v^2 \quad (2,10)$$

$$g \cdot h = (Q/a)^2 \quad (2,11)$$

$$\sqrt{g \cdot h} = Q/a \quad (2,12)$$

$$Q = a \cdot \sqrt{g \cdot h} \quad (2,13)$$

Q pada rumus merupakan debit *outflow*, a merupakan buka tutup katup, g adalah gaya jatuh air sebesar 9,8 m²/s dan h adalah elevasi waduk.