

## BAB 2 PEMODELAN PUTARAN TURBIN GENERATOR PLTN

Kebutuhan akan penambahan pembangkit listrik saat ini sangat diperlukan mengingat Indonesia diprediksi dalam keadaan krisis energi listrik dimasa mendatang. Saat ini pemerintah Indonesia merencanakan pembangunan PLTN untuk mengurangi krisis energi listrik tersebut. Oleh karena itu, pembelajaran mengenai PLTN harus dilakukan oleh bangsa Indonesia. Metode simulasi merupakan salah satu metode pembelajaran yang efektif dan efisien. Dari pembelajaran simulasi dapat diwujudkan pembuatan simulator PLTN. Indonesia kemungkinan akan menggunakan PLTN jenis *PWR (Pressurized Water Reactor)*. Pembuatan laboratorium simulator PLTN jenis PWR ini diharapkan dapat menjadi pembelajaran dalam memahami sebuah tingkah laku sistem PLTN yang akan diwujudkan di Indonesia dan dapat membantu memecahkan permasalahan-permasalahan yang akan timbul pada sebuah PLTN sebenarnya. Gangguan sistem tenaga listrik mungkin bisa terjadi dan menjadi permasalahan serta kendala penyampaian daya listrik ke beban. Contoh gangguannya adalah terjadinya fluktuasi frekuensi sistem tenaga listrik yang disebabkan perubahan beban. Fluktuasi frekuensi seharusnya berada pada batas toleransi yang sudah ditetapkan, dan kembali kepada frekuensi normalnya dengan segera. Fluktuasi frekuensi yang berada diatas batas toleransi merupakan sebuah permasalahan yang kerap terjadi. Selain itu, waktu kembali fluktuasi frekuensi yang tidak segera ke kondisi normal akan mengakibatkan kerusakan pada sistem seperti patahnya poros turbin generator dan kemungkinan terjadi pelepasan beban. Fluktuasi frekuensi ini erat kaitannya dengan perubahan kecepatan putar pada turbin dan generator dikarenakan perubahan permintaan daya beban. Putaran lebih yang melewati batas toleransi tertentu dapat mengakibatkan kerusakan pada poros turbin dan generator serta kerusakan pada bagian-bagian lainnya. Pemodelan putaran turbin dan generator disusun dalam bentuk pemodelan fungsi alih dituangkan dalam perangkat lunak MATLAB. Pemodelan diperoleh dari beberapa teori literatur dan disesuaikan dengan kondisi PLTN sebenarnya serta konstanta dari PLTN jenis PWR jenis AP 1000 produksi Westinghouse. Proses pembentukan uap tidak dilakukan pemodelan dan dianggap konstan. Pemodelan generator pada PLTN tidak jauh berbeda dengan generator pada Pembangkit Listrik Konvensional (PLK) lainnya. Pemodelan generator disini hanya membahas pada persamaan torsi yang erat kaitannya dengan perubahan kecepatan dan

frekuensi. Pemodelan turbin menggunakan model turbin yang umum dipakai pada sebuah pembangkit listrik tenaga nuklir yaitu, memiliki satu turbin *High Pressure* (HP) dan tiga buah turbin *Low Pressure* (LP). Pemodelan katup uap terdiri dari *control valve* dan *intercept valve*. Konstanta dan nilai masing-masing komponen disesuaikan dengan data teknis PLTN AP1000 dan asumsi melalui perhitungan yang umum digunakan. Perubahan kecepatan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai perubahan beban, sebagai masukan dari pemodelan ini, sehingga akan terlihat perubahan nilai frekuensi. Pengendalian dilakukan dengan mengubah-ubah nilai PID.

Pengendalian frekuensi sistem tenaga listrik ini bertujuan untuk menjaga perubahan frekuensi agar tetap dalam batas toleransi yang diinginkan terhadap perubahan daya beban. Selain itu, mengembalikan nilai frekuensi ke pada nilai frekuensi normalnya dengan segera. Dengan terwujudnya pemodelan pengendalian frekuensi ini dalam simulator PLTN, diharapkan dapat menjadi pembelajaran lebih lanjut mengenai karakteristik dan permasalahan-permasalahan yang mungkin akan timbul dalam sebuah PLTN..

## 2.1 Prinsip Kerja PLTN jenis PWR

PLTN beroperasi dengan prinsip yang sama seperti PLK (Pembangkit Listrik Konvensional), hanya panas yang digunakan untuk menghasilkan uap tidak dihasilkan dari pembakaran bahan fosil, tetapi dihasilkan dari reaksi pembelahan inti bahan fisil (uranium) dalam suatu reaktor nuklir. tenaga panas tersebut digunakan untuk membangkitkan uap di dalam *steam generator* (sistem pembangkit uap) dan selanjutnya sama seperti pada PLK, uap digunakan untuk menggerakkan turbin generator sebagai pembangkit tenaga listrik. Sebagai pemindah panas biasa digunakan air yang disirkulasikan secara terus menerus selama PLTN beroperasi

Dalam reaktor nuklir PLTN, reaksi fisi berantai dipertahankan kontinuitasnya dalam bahan bakar sehingga bahan bakar menjadi panas. Panas ini kemudian ditransfer ke pendingin reaktor yang kemudian secara langsung atau tak langsung digunakan untuk membangkitkan uap. Pembangkitan uap langsung dilakukan dengan membuat pendingin reaktor (biasanya air biasa, H<sub>2</sub>O) mendidih dan menghasilkan uap. Pada pembangkitan uap tak langsung, pendingin reaktor (disebut pendingin primer) yang menerima panas dari bahan bakar disalurkan melalui pipa ke perangkat pembangkit uap. Pendingin primer ini kemudian memberikan panas (menembus media dinding pipa) ke pendingin sekunder (air biasa) yang berada di luar pipa perangkat pembangkit

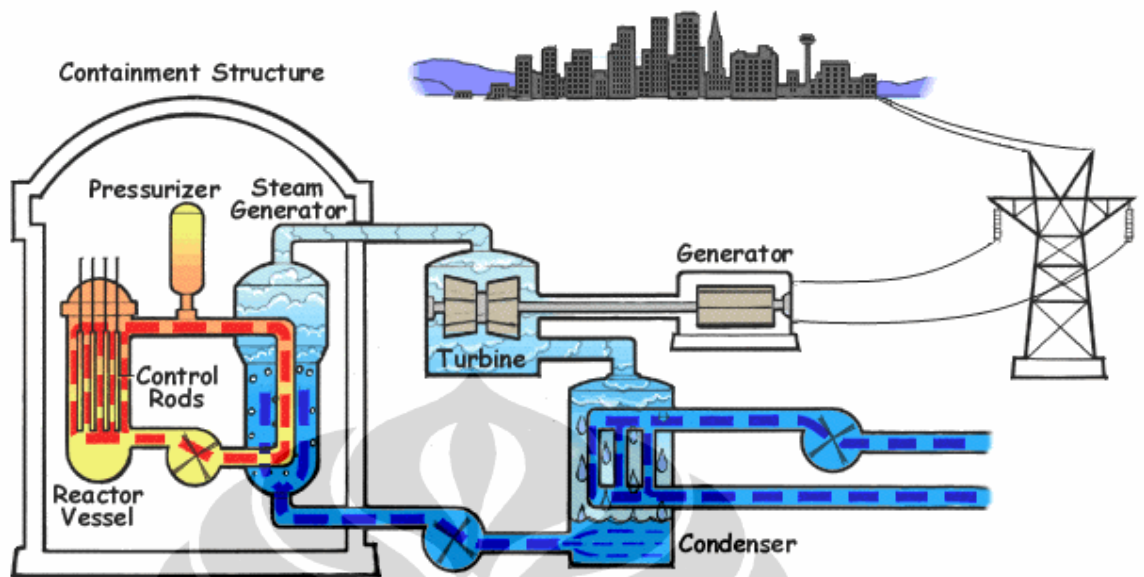
uap untuk kemudian panas tersebut mendidihkan pendingin sekunder dan membangkitkan uap. PLTN jenis PWR (*Pressurizer Water Reactor*) merupakan salah satu jenis PLTN dengan pembangkit uap tidak langsung

PWR bekerja berdasarkan prinsip dua daur, dimana pendingin pada masing-masing daur terpisah satu sama lainnya. Daur primer berisi air yang bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi, mengambil panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi didalam teras reaktor. Panas digunakan untuk memanaskan air pada pendingin primer (lingkar pendingin primer ditunjukkan dalam skema dengan garis putus-putus merah.). Air ini melalui pipa berbentuk U terbalik tetapi tidak tercampur dengan air umpan (*feedwater*) pada daur sekunder. Aliran panas ini dipindahkan ke daur sekunder, dimana air umpan dididihkan dan uap dihasilkan di dalam sistem pembangkit uap (sistem pembangkit uap → turbin → kondensor). Transfer panas ini dicapai tanpa mencampurkan dua cairan, air dari daur primer dapat menjadi radioaktif. Air dari daur primer dipompa kembali kedalam bejana reaktor oleh pompa primer.

Pada reaktor jenis PWR, aliran pendingin primer yang berada di teras reaktor bersuhu mencapai  $325^{\circ}\text{C}$  sehingga perlu diberi tekanan tertentu (sekitar 155 atm) oleh perangkat *pressurizer* sehingga air tidak dapat mendidih.

Uap yang dihasilkan oleh sistem pembangkit uap dialirkan ke turbin dan memutar turbin tersebut kemudian memutar generator. Hasil putaran generator ini menghasilkan listrik yang merupakan produk akhir PLTN. Uap selanjutnya berkondensasi dalam kondenser, sedang air kondensat tersebut diumpan kembali ke sistem pembangkit uap.

Listrik sebagai produk akhir dari sebuah pembangkit melayani beban melalui saluran transmisi. Jika beban bertambah maka putaran turbin-generator akan mengalami penurunan, untuk menaikkannya kembali produksi uap ditambah. Jika terjadi putus jaringan saluran transmisi, maka akan terjadi pelepasan beban secara tiba-tiba. Hal ini akan menyebabkan putaran turbin-generator menjadi berlebih karena pasokan uap yang memutar turbin-generator masih terus berjalan. Oleh karena itu dalam kondisi kehilangan beban seperti ini, Katup-katup uap akan menutup dengan cepat sehingga pasokan uap akan terhenti dan putaran turbin generator akan melambat dan akhirnya berhenti. Kondisi kehilangan beban merupakan kejadian yang harus dihindarkan.



Gambar 2.1 Prinsip kerja PLTN jenis PWR

## 2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik<sup>[2]</sup>

Stabilitas sistem tenaga telah menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Perhatian itu muncul dari fakta bahwa pada kondisi keadaan mantap (*steady state*), kecepatan rata-rata untuk semua generator adalah sama. Kondisi tersebut diharapkan pada operasi sinkron dari sebuah sistem interkoneksi. Gangguan kecil atau besar pada sistem tenaga berdampak pada operasi sinkron. Sebagai contoh kenaikan dan penurunan beban atau akibat dari rugi-rugi pembangkit menjadi salah satu jenis gangguan yang berpengaruh sangat signifikan terhadap sistem.

Gangguan dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil merupakan satu dari elemen sistem dinamik yang dapat dianalisis menggunakan persamaan linear ( analisis sinyal kecil ). Gangguan kecil yang terjadi berupa perubahan beban pada sisi beban atau pembangkit secara acak, pelan, dan bertingkat.

Meskipun kestabilan sebuah sistem dapat dilihat secara menyeluruh dan meluas, tetapi untuk tujuan analisis sebuah sistem, Professor Padiyar<sup>[3]</sup> membagi kestabilan menjadi dua kategori<sup>[2]</sup>:

### 2.2.1 Kestabilan *Steady State*

Kestabilan *steady state* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi

sebelum terjadi gangguan setelah mengalami gangguan kecil. Analisa kestabilan *steady state* menggunakan pendekatan model linear. Kestabilan *steady state* pada sistem tenaga disebut juga kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*). Pada referensi lain kestabilan *steady state* juga dinamakan kestabilan dinamik

### 2.2.2 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mencapai kondisi operasi baru yang dapat diterima setelah sistem mengalami gangguan yang besar.

Analisis kestabilan transien menggunakan pendekatan model non linear

## 2.3 Generator

Generator merupakan instrumen pembangkit tenaga listrik yang mengubah energi mekanis sebagai masukan menjadi energi listrik sebagai keluaran dimana kecepatan putar dari rotornya sama dengan kecepatan putar dari statornya. Generator terdiri dari bagian yang berputar yang disebut rotor dan bagian yang diam yang disebut stator. Kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup dari suatu penghantar, bila diberi tegangan arus searah akan menimbulkan fluks magnet. Rotor tersebut diputar dengan suatu penggerak mula atau *prime mover* sehingga fluks tersebut memotong konduktor-konduktor yang ada di stator yang selanjutnya pada kumparan stator akan terimbas tegangan.<sup>[4]</sup>

Sebuah generator digerakkan oleh penggerak mula ( turbin uap, turbin air dan lain sebagainya) menggambarkan perputaran dengan 2 torsi berputar yang berbeda.  $T_m$ , torsi mekanik, berperan untuk menambah kecepatan ketika  $T_e$  torsi elektrik, melakukan perlambatan. Ketika  $T_m$  dan  $T_e$  mempunyai nilai yang sama, kecepatan putaran  $\omega$ , akan konstan. Pergerakan  $T_m$  disebabkan oleh penggerak mula, sedangkan  $T_e$  disebabkan oleh perubahan beban. Ketika beban listrik bertambah maka  $T_e > T_m$  seluruh sistem yang berputar akan melambat. Jika dibiarkan melambat terlalu lama maka akan menimbulkan beberapa kerusakan oleh karena itu, diperlukan suatu usaha untuk meningkatkan  $T_m$  sehingga tercapai kembali titik keseimbangan antara  $T_e$  dan  $T_m$ . Hal ini akan mengembalikan putaran ke nilai yang dapat diterima.<sup>[5]</sup> Untuk analisa kestabilan pada studi ini, hanya akan digunakan sebuah generator atau yang lebih dikenal mesin tunggal.

Mesin tunggal adalah sebuah mesin dalam hal ini generator, yang mensuplai daya kesuatu beban tanpa dibantu oleh mesin lain. Pemodelan generator terdiri dari dua bagian, persamaan medan dan persamaan gerak atau persamaan torsi. Pemodelan pada penelitian ini hanya pemodelan yang berkaitan dengan persamaan torsi, dalam hal ini

persamaan ayun. Model generator yang akan digunakan adalah sebatas pada persamaan gerak yang mengatur gerakan rotor pada generator tersebut. Prinsip dasar dalam pergerakannya menyatakan bahwa torsi percepatan (*acclerating torque*) merupakan hasil kali dari momen kelembaban (*momen of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Untuk mesin serempak dalam hal ini generator serempak, persamaan dapat dituliskan dalam bentuk <sup>[6]</sup>:

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Dengan :

$J$  = Momen Kelembaban total dari massa rotor ( $\text{kg.m}^2$ )

$\theta_m$  = Sudut pergeseran (*angular displacement*) dari rotor dalam satu radian

$T_a$  = Momen putar kecepatan (*newton.meter*)

$T_m$  = Momen putar mekanis (*newton.meter*)

$T_e$  = Momen putar elektrik (*newton.meter*)

Jika generator serempak membangkitkan torsi elektrik dalam keadaan berputar pada kecepatan serempak ( $\omega_{sm}$ ) maka:

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

Jika terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan ( $T_m > T_e$ ) atau perlambatan ( $T_m < T_e$ ) dengan:

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

Pada persamaan (2.1), sudut pergeseran  $\theta_m$  diukur pada sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.4)$$

dengan  $\delta_m$  adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan serempak. Penurunan persamaaan (2.4) terhadap waktu memberikan kecepatan putar seperti persamaan berikut:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega_{sm} \cdot t}{dt} + \frac{d\delta_m}{dt} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dan percepatan rotornya adalah :

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (2.7)$$

Substitusi persamaan (2.1) ke dalam (2.6) menghasilkan:

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.8)$$

Kalikan persamaan (2.7) dengan kecepatan putaran rotor  $\omega_m$  akan menghasilkan:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.9)$$

Pada studi pemodelan pengendalian frekuensi tenaga listrik hubungan antara mekanik dan elektrik lebih baik dalam daya daripada dalam bentuk torsi oleh karena itu, kecepatan putar  $\omega_m$  dikali torsi T adalah sama dengan daya, maka persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk persamaan daya sehingga hubungan antara daya ( P ) dan torsi ( T ) adalah sebagai berikut :

$$P = \omega_m \cdot T \quad (2.10)$$

Kemudian di substitusikan dengan persamaan (2.8) menjadi:

$$J \cdot \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.11)$$

momentum sudut ( *angular momentum* ) rotor yang dinyatakan dalam M dengan satuan  $\text{kg.m}^2$  radian/detik. Hubungan energi kinetik dengan masa berputar adalah sebagai berikut:

$$W_k = \frac{1}{2} J \cdot \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \cdot \omega_m \quad (2.12)$$

Atau

$$M = \frac{2 \cdot W_k}{\omega_m} \quad (2.13)$$

Bila kecepatan putaran rotor  $\omega_m$  tidak berubah sebelum stabilitas hilang, maka momentum sudut M dievaluasi pada kecepatan serempak  $\omega_{sm}$  , sehingga dapat dikatakan putaran rotor  $\omega_m$  = putaran serempak rotor  $\omega_{sm}$  sebagai berikut :

$$M = \frac{2.W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.14)$$

Persamaan ayun dalam hubungannya momentum sudut  $M$  adalah:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.15)$$

Persamaan (2.13) lebih sesuai untuk menuliskan persamaan ayunan dengan parameter sudut daya listrik  $\delta$ . Jika  $p$  adalah jumlah kutub generator serempak maka sudut daya listrik  $\delta$  dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik  $\delta_m$  adalah :

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (2.16)$$

Juga kecepatan putar listrik  $\omega$  adalah:

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.17)$$

Persamaan (2.13) persamaan ayunan dalam bentuk persamaan daya, dibentuk kedalam sudut daya listrik. Dengan menggunakan persamaan (2.14) maka didapat persamaan ayun dengan sudut daya listrik dalam bentuk persamaan daya adalah :

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.18)$$

Jika harga momentum sudut  $M$  dari persamaan (2.12) disubstitusikan ke persamaan (2.16) dan dibagi dengan daya dasar  $S_B$ , menghasilkan

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.19)$$

Sekarang mendefinisikan suatu besaran yang dikenal dengan konstanta  $H$  seperti persamaan berikut : rating mesin

$$H = \frac{\text{energi kinetik pada kecepatan serempak}}{\text{rating mesin}} = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.20)$$

$W_K$  dengan satuan dalam MJ , sedangkan  $S_B$  dalam MVA

Substitusi persamaan (2.18) ke persamaan (2.17). didapatkan:

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.21)$$



Dengan  $P_{m(pu)}$  dan  $P_{e(pu)}$  adalah berturut-turut daya mekanik dan daya listrik dalam satuan per unit. Putaran serempak rotor  $\omega_m =$  putaran serempak  $\omega_{sm}$  dan kecepatan putar listrik  $\omega$  berhubungan dengan kecepatan putar mekanik  $\omega_m$  seperti terlihat pada persamaan, sehingga persamaan (2.19) menjadi :

$$\frac{2H}{\omega} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.22)$$

Kecepatan putar listrik  $\omega$  diatas sering diekspresikan dalam bentuk  $2 \cdot \pi \cdot f_0$  dan subskrip per unit dihilangkan sehingga daya dinyatakan dalam satuan per unit dari persamaan (2.20) adalah:

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.23)$$

dengan  $\delta$  dalam radian listrik. Dan  $f_0$  adalah 50 Hz. Jika  $\delta$  dinyatakan dalam derajat listrik, akhirnya persamaan ayunan menjadi :

$$\frac{H}{180 f_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.24)$$

Satuan pada konstanta poros berputar masih dalam *british unit*. Untuk lebih memudahkan di konversikan kedalam Satuan Internasional ( SI ).

Untuk Momen Inersia :

$$J(kg.m^2) = WR^2 \times \frac{1.356}{32.2} \quad (2.25)$$

Untuk mencari Konstanta Inersia ( H )

$$H(MWs / MVA) = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \left( \frac{2\pi \cdot rpm}{50} \right)^2 \cdot \frac{1}{VA_{rating}} \quad (2.26)$$

### 2.3.1. Pengaruh perubahan beban terhadap generator<sup>[2]</sup>

Ketika terjadi sebuah perubahan beban, maka akan terjadi perubahan torsi elektrik  $T_e$  pada generator. Hal ini menyebabkan adanya perbedaan nilai antara torsi mekanik ( $T_m$ ) dan torsi elektrik ( $T_e$ ) sehingga terjadi perubahan kecepatan seperti yang disebutkan dalam persamaan gerak. Dari persamaan (2.1) dan juga berlaku persamaan (2.5) maka kombinasi momen inersia  $J$  menjadi:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (2.27)$$

dengan:

$J$  = Kombinasi momen inersia dari generator dan turbin ( kg. m<sup>2</sup>)

$\omega_m$  = Kecepatan putar ( rad/s)

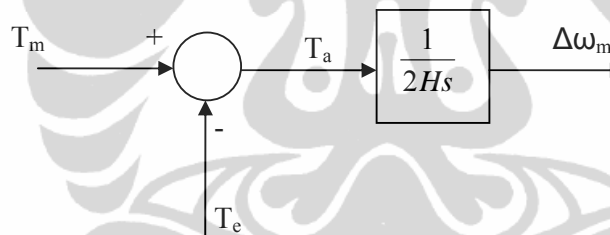
$t$  = Waktu ( s )

jika konstanta inersia energi kinetik  $J$  di konversikan kedalam satuan Watt.detik maka:

$$J = \frac{2 H}{\omega_m^2} VA_{base} \quad (2.28)$$

Sehingga persamaan yang menggambarkan hubungan antara kecepatan rotor sebagai fungsi dari torsi elektrik (  $T_e$  ) dan torsi mekanik (  $T_m$  ).

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega_m = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (2.29)$$



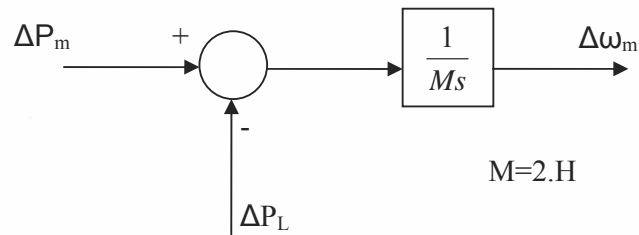
Gambar 2.2 Fungsi alih antara kecepatan dan torsi<sup>[1]</sup>

Pada gambar 2.2 ini sesungguhnya merupakan persamaan ayun dari sebuah generator sinkron. Komponen  $d/dt$  digantikan oleh fungsi  $s$  dalam transformasi laplace

Pada studi pemodelan putaran turbin-generator, hubungan antara mekanik dan elektrik lebih baik dalam daya daripada dalam bentuk torsi oleh karena itu, hubungan antara daya (  $P$  ) dan torsi (  $T$  )

$$P = \omega_m \cdot T \quad (2.30)$$

Fungsi alih juga dapat digambarkan sebagai berikut

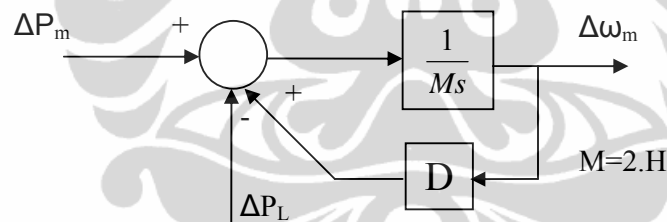


Gambar. 2.3 Fungsi alih antara kecepatan dan daya<sup>[1]</sup>

$$\Delta\omega_m = \omega_m - \omega_{ref} \quad (2.31)$$

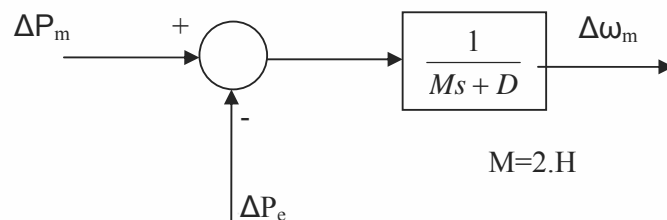
### 2.3.2. Pengaruh Peredaman terhadap perubahan frekuensi<sup>[2]</sup>

Konstanta Peredaman menggambarkan persentase perubahan beban dalam 1 satu persen perubahan frekuensi. Biasanya nilai D antara 1 sampai 2. Nilai D = 1 berarti 1 % perubahan frekuensi dapat menyebabkan 1 % perubahan beban. Karena adanya pengaruh konstanta peredaman D maka gambar 2.3 menjadi gambar 2.4



Gambar 2.4 Diagram blok antara kecepatan dan pengaruh konstanta peredaman<sup>[1]</sup>

Diagram blok disederhanakan menjadi:



Gambar 2.5 Fungsi alih antara kecepatan dan perubahan daya beban<sup>[1]</sup>

Delta  $P_m$  merupakan daya mekanis yang dihasilkan oleh perputaran turbin. Delta  $P_e$  adalah daya elektris yaitu perubahan beban, dalam hal ini adalah perubahan beban yang tidak mempengaruhi frekuensi. Sedangkan  $D$  adalah perubahan beban yang mempengaruhi frekuensi.  $M$  adalah momentum sudut. Nilainya diperoleh dari perhitungan dua kali kombinasi penjumlahan konstanta inersia turbin dan generator ( $M = 2H$ ). Nilai konstanta inersia  $H$  dan penjumlahannya dapat dilihat pada sub bab 2.6.

#### 2.4 Penggerak Mula

Sumber utama energi listrik disuplai oleh energi kinetik air atau uap yang merupakan hasil pembakaran bahan bakar fosil atau nuklir<sup>[2,5]</sup>. Penggerak mula mengkonversikan sumber energi ini menjadi energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator sinkron. Penggerak mula dalam hal ini adalah turbin.

Turbin adalah mesin atau motor yang roda penggerakannya berporos dengan sudu (baling-baling) yang digerakkan oleh aliran air, uap, atau udara. Turbin uap adalah turbin yang mengubah energi kinetis menjadi energi mekanis. Turbin memiliki masukan berupa tenaga mekanik dari dorongan fluida dan memiliki output tenaga (torka) mekanik yang digunakan untuk memutar generator. Turbin juga memiliki peralatan pendamping sebagai pengatur putaran yang disebut *governor*.

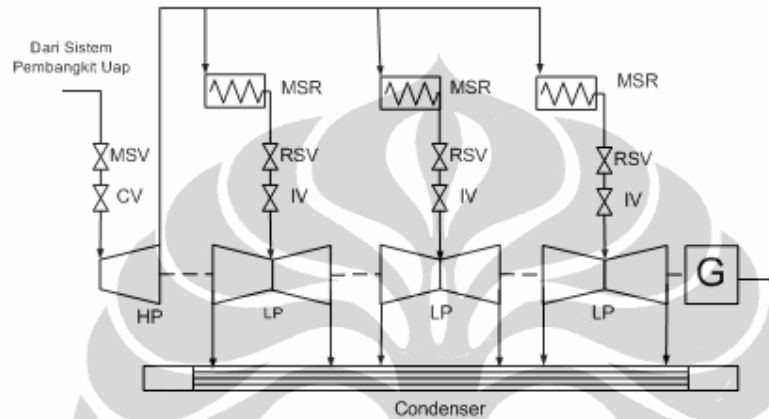
Sebuah turbin uap mengubah energi uap yang bertekanan dan bertemperatur tinggi ke energi putar, lalu selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator. Sumber panas untuk boiler memproduksi uap bisa saja dari pembakaran bahan bakar fosil (batubara, minyak gas) atau dari reaktor nuklir.

Bentuk turbin bermacam-macam tergantung pada ukuran dan kondisinya. Turbin biasanya terdiri dari dua atau lebih bagian turbin yang dihubungkan terkopel secara seri (*High Pressure* (HP) turbin, *Intermediate Pressure* (IP), *Low Pressure* (LP) turbin). Pada Inlet turbin terdapat pipa dan *nozzle* yang membuat kecepatan laju uap meningkat tinggi. Energi kinetik dari uap kecepatan tinggi ini, dikonversikan pada poros menjadi torsi.

Sebuah turbin dengan beberapa bagian biasanya mempunyai jenis *tandem-compound* atau *cross compound*. Turbin *cross compound* terdiri dua poros yang masing-masingnya terhubung ke generator dan digerakkan oleh satu atau lebih bagian

turbin Pada turbin *tandem-compound*, semua bagian di satukan pada satu poros dan terhubung pada sebuah generator.<sup>[1]</sup>

Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir biasanya menggunakan jenis *tandem-compound* dan mempunyai kecepatan 1500 r/min. Konfigurasi turbin dapat dilihat dari gambar 2.6<sup>[1]</sup>

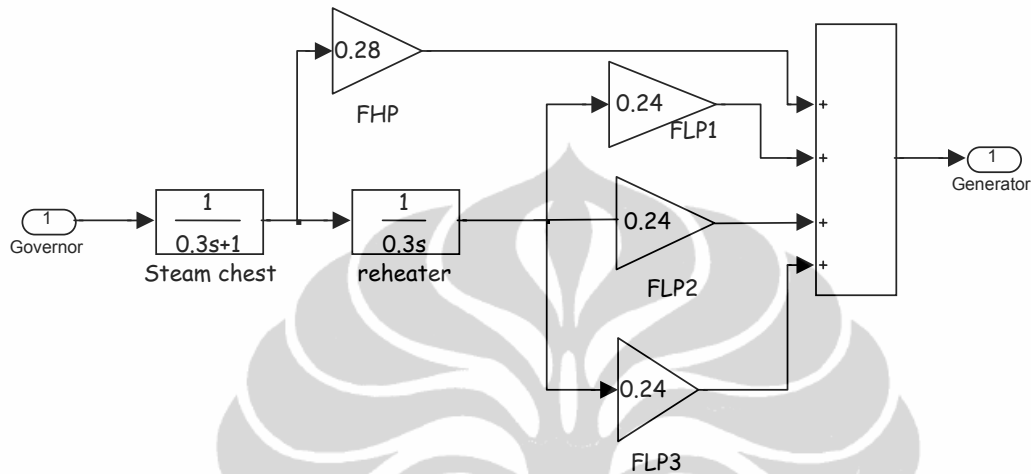


gambar 2.6 Konfigurasi turbin untuk PLTN<sup>[1]</sup>

Pada gambar 2.6 terlihat, turbin terdiri dari satu bagian HP dan tiga bagian LP. Uap keluaran dari HP menuju *Moisture Separator Reheater (MSR)* sebelum masuk ke bagian LP. MSR berfungsi untuk mengurangi kelembaban uap pada saat memasuki LP sehingga akan mengurangi rugi-rugi akibat kelembaban dan erosi. Pada turbin untuk pembangkit listrik tenaga nuklir tidak ada turbin IP. Ini dikarenakan pada konfigurasi pada turbin IP, setelah uap keluar melalui turbin HP, masuk ke *reheater* lalu uap tersebut masuk menuju turbin IP. Pada kondisi ini, uap yang dihasilkan adalah jenis uap *superheated*, sedangkan karakteristik pada turbin PLTN adalah jenis uap *saturated* yang mana tekanan dan panas uap tersebut telah dikondisikan pada suhu dan tekanan tertentu sesuai dengan batasan material dari turbin PLTN.

Turbin untuk PLTN, dilengkapi dengan 4 set katup. *Main inlet Stop Valve (MSV)*, dan *Control Valve (CV)*, *Reheater Stop Valve (RSV)* dan *Intercept Valve (IV)*. Katup-katup ini bekerja secara paralel dan ataupun seri. MSV berfungsi sebagai *stop valve* darurat dan tidak mengatur putaran dan beban. Pada kondisi normal pengendalian katup utama diatur oleh *governor*. Sedangkan CV dan IV berfungsi sebagai katup pengendali terhadap putaran lebih yang mengakibatkan kehilangan

beban.<sup>[1]</sup> Dari gambar 2.6 dibuat sebuah blok diagram pemodelannya yang dituangkan pada pemrograman MATLAB. Pada gambar 2.7 adalah gambar diagram blok turbin PLTN.



Gambar 2.7. Diagram blok turbin PLTN

## 2.5 Governor<sup>[6]</sup>

Sistem tenaga listrik harus mampu menyediakan tenaga listrik bagi para pelanggan dengan frekuensi yang praktis dan konstan. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan frekuensi sistem tenaga listrik., sedangkan beban sistem yang berupa daya aktif dan daya reaktif selalu berubah-ubah sepanjang waktu.

Oleh karena itu, untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, pembangkitan daya aktif dalam sistem harus disesuaikan dengan kebutuhan pelanggan atas daya aktif, harus selalu disesuaikan dengan beban daya aktif. Perubahan beban mengakibatkan terjadi perubahan kecepatan putar turbin-generator perubahan kecepatan ini berhubungan dengan perubahan frekuensi. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator. Penambahan kopel pemutar generator memerlukan penambahan bahan bakar pada pembangkit termis dalam hal ini, adalah produksi uap. Pengaturan pemberian pasokan uap ini di atur oleh sistem *governor*. Pada saat beban listrik bertambah, permintaan daya listrik ( $P_e$ ) bertambah.  $P_e$  meminta daya mekanis ( $P_m$ ) untuk menambah putarannya. Penambahan putaran daya mekanis adalah dengan mengatur katup masukan uap ke

turbin untuk menyesuaikan putaran permintaan beban serta mengembalikan frekuensi pada nilai nominal.

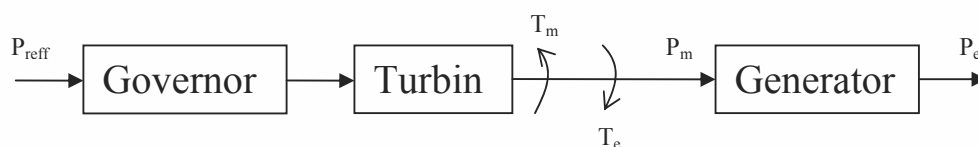
Sistem *governor* memiliki tiga dasar prinsip kerja, yaitu pengendalian kecepatan/beban, pengendalian kecepatan lebih, dan pembukaan darurat karena kecepatan putar lebih.<sup>[2]</sup>

Pengendalian kecepatan/beban pada dasarnya merupakan pengendalian katup CV, seperti terlihat pada gambar 2.8 pengendalian kecepatan pada *governor disetting* pada 4 - 5 % *speed droop*. Tujuannya adalah untuk mengatur posisi CV untuk memberikan pembukaan katup uap yang sesuai.

Pengendalian kecepatan lebih, kinerja sebuah turbin bergantung pada kemampuan turbin dalam membatasi kecepatan putar yang akan mengakibatkan pelepasan beban dan mengembalikan kecepatan turbin pada keadaan tunak. Tujuan utama dari pengendalian kecepatan lebih adalah untuk menghindari pemutusan darurat yang disebabkan oleh putaran lebih yang akan mengakibatkan pelepasan beban. Biasanya pembukaan darurat *disetting* pada 110%-115% dari kecepatan normal, maka pengendalian kecepatan lebih harus *disetting* sebesar 0.5%-1% dibawah kecepatan pembukaan darurat. Pada turbin uap terdapat dua sistem katup terpisah yang dapat mengendalikan *pasokan* uap, yaitu sistem katup CV dan sistem katup IV. Dikarenakan uap juga terdapat pada pemanas ulang maka peran katup IV pada kondisi ini sangat penting untuk mengendalikan uap ke turbin LP. Bersama dengan CV membangkitkan sekitar 60%-80% total daya mekanis turbin.

Pembukaan darurat adalah proteksi terakhir yang dilakukan dikarenakan kesalahan kegagalan pada kecepatan normal dan putaran lebih. Pembukaan darurat ini di rancang terpisah dari pengendalian putaran lebih. Pembukaan darurat dilakukan oleh katup pembuka secara cepat oleh *Main and reheat Stop Valve (MSV)*, tujuannya adalah menghentikan uap dari sistem pembangkit uap.<sup>[2]</sup>

Peran *governor* pada sebuah pembangkit listrik tenaga termal dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.8. Peran *governor* pada pembangkit

$T_m$  = Torsi Mekanik                       $T_e$  = Torsi Elektrik  
 $P_m$  = Daya Mekanik                       $P_e$  = Daya elektrik                       $P_L$  = Daya beban

Integritas suatu turbin uap tergantung kepada kemampuan turbin dalam mengendalikan kecepatan rotor. Kecepatan rotor berhubungan erat dengan pasokan uap. Ada 2 sistem katup yang berbeda untuk mengendalikan pasokan energi uap. Sistem katup *Control Valve* ( CV) dan Sistem katup *Intercept Valve* (IV)

### 2.5.1. Sistem Katup CV<sup>[12]</sup>

Aliran uap dari sistem pembangkit uap masuk ke dalam turbin HP melalui *Control Valve* dan *Main Stop Valve*. Konstruksi dari *Control Valve* sering disebut sebagai *Steam Chest*. Uap ini masuk kedalam *Steam Chest* dan jalur pemipaan menuju turbin HP Semua katup yang bersifat *Stop valve* dianggap konstan/linier, sehingga tidak perlu dimodelkan. *Control Valve* (CV) berperan sebagai *governor*.

Seperti sudah diketahui sebelumnya bahwa *control valve* menggabungkan aliran uap yang menuju turbin dan perubahan frekuensi/beban selama operasi normal. Respon dari aliran uap terhadap sebuah perubahan pada *control valve* ditandai dengan konstanta waktu yaitu konstanta waktu dari *steam chest* dan pemipaan yang menuju ke turbin HP. Besarnya konstanta waktu *control valve* atau *governor* adalah  $T_{gov} = 0.03$  s

### 2.5.2. Sistem katup IV

Keluaran dari turbin HP melewati *Moisture Separator Reheater* (MSR) untuk pemanasan ulang sebelum masuk ke turbin LP. Sebelum masuk ke turbin LP uap melewati katup IV *Intercept Valve* biasanya digunakan untuk pengendalian daya mekanik turbin sehubungan dengan kejadian kecepatan putaran berlebih.

Pada tesis ini pemodelan katup IV dianggap konstan dan tidak dimodelkan

## 2.6. Data Teknis Pembangkit

Dari penelusuran referensi yang didapat dari Pusat Pengembangan Energi Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PPEN-BATAN), diambil contoh data teknis pembangkit dari sebuah PLTN jenis PWR jenis AP 1000 produksi *Westinghouse*. Data tersebut adalah sebagai berikut:



Tabel 2.1. Konstanta pada poros berputar <sup>[13]</sup>

No Massa	Rotor	Momen Inersia ( $WR^2$ ) ( <i>lb.ft<sup>2</sup></i> )	Letak poros	Kelenturan (K) ( <i>lb.ft/rad</i> )
1	Generator	1.114.382	Gen-LP3	279.823.373
2	LP 3	1.831.389	LP3-LP2	235.204.647
3	LP 2	1.830.972	LP2-LP1	207.786.864
4	LP 1	1.830.417	LP1-HP	133.530.219
5	HP	225.240		

Tabel.2.2 Data turbin dan generator PLTN jenis AP1000 <sup>[11]</sup>

Parameter	Ukuran	Satuan
Kapasitas	1375	MVA
Kecepatan putar	1500	Rpm
Tegangan	24	kV
Jumlah kutub	4	
Jenis Turbin		
Turbin HP	1	Unit
Turbin LP	3	Unit
Konstanta Fraksi HP ( FHP )	0.28	Pu
Konstanta Fraksi LP ( FLP )	0.24	Pu
Konstanta waktu <i>governor</i> ( Tgovernor)	0.03	S
Konstanta Waktu Pemanasan Ulang ( Trh)	0.3	S

Dibawah ini tabel nilai konstanta hubungan antar torsi pada masing-masing bagian putar turbin dan generator.

## 2.7. Perhitungan Konstanta

Besarnya nilai konstanta diambil dari data-data referensi. Baik dari literatur maupun dari hasil penelitian. Selain itu nilai-nilai konstanta ini juga diambil berdasarkan asumsi-asumsi dengan pertimbangan data-data teknis yang sebenarnya.

### 2.7.1. Konstanta Inersia

Contoh perhitungan dilakukan hanya pada satu nomor massa saja, sedangkan nomor massa yang lain dihitung terpisah dan tidak dijabarkan. Contoh perhitungan mengambil data nomor massa 5 pada tabel 2.1. yaitu,

$WR^2 = 225.240 \text{ lb.ft}^2$ , dengan menggunakan persamaan (2.31) didapat momen inersia  $J_5$ :

$$J_5 = (225.240) \times \frac{1,356}{32,2} \quad (2.32)$$

$$= 9485,3 \text{ kg.m}^2$$

Dengan menggunakan persamaan (2.24) dihitung besarnya konstanta Inersia (H)

$$H_5 = \frac{1}{2} \times 9485,3 \times \left( \frac{2\pi \times 1500}{60} \right)^2 \frac{1}{1375 \times 10^6} \quad (2.33)$$

$$H_5 = 0,085019 \text{ MWs/MVA}$$

Dengan cara yang sama maka didapat

$$H_4 = 0,690908 \text{ MWs/MVA}$$

$$H_3 = 0,691118 \text{ MWs/MVA}$$

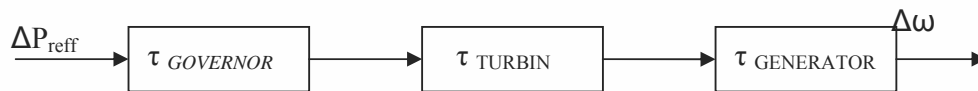
$$H_2 = 0,691275 \text{ MWs/MVA}$$

$$H_1 = 0,420634 \text{ MWs/MVA}$$

Kemudian dijumlahkan menjadi  $H = 2.57899 \text{ MWs/MVA}$

### 2.8. Hubungan Antar Komponen Pembangkit

Dari uraian diatas, blok-blok diagram saling dihubungkan sehingga membuat sebuah diagram blok pembangkit listrik tenaga nuklir. Seperi terlihat pada diagram blok pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Diagram blok pembangkit listrik tenaga nuklir

Dari diagram blok diatas dibentuk sebuah penyederhanaan blok dengan persamaan matematis.

A. Mencari  $\tau_{\text{governor}}$ .

$$\tau_{\text{GOVERNOR}} = \frac{1}{1 + T_{\text{governor}}} \quad (2.34)$$

dari subbab 2.5.1 diperoleh  $T_{\text{governor}} = 0.03$  s. Sehingga:

$$\tau_{\text{GOVERNOR}} = \frac{1}{1 + 0.03 \cdot s} \quad (2.35)$$

B. Mencari  $\tau_{\text{TURBIN}}$

Dari gambar 2.6 dibuat penjabaran persamaan sebagai berikut:

$$T_{\text{turbin}}(s) = \left[ \left( \frac{1}{0.3s + 1} \right) \cdot 0.28 + \left( \frac{1}{0.3s} \cdot 0.24 \cdot 3 \right) \right] \quad (2.36)$$

$$T_{\text{turbin}}(s) = \left[ \frac{0.28}{0.3s + 1} \right] + \left[ \frac{0.72}{0.3s} \right] \quad (2.37)$$

$$T_{\text{turbin}}(s) = \left[ \frac{(0.28) \cdot (0.3s) + (0.72) \cdot (0.3s + 1)}{(0.3s + 1)(0.3s)} \right] \quad (2.38)$$

$$T_{\text{turbin}}(s) = \left[ \frac{s + 2.4}{0.3s^2 + s} \right] \quad (2.39)$$

C.  $\tau_{\text{Generator}}$

Pada gambar 2.5 telah dibentuk sebuah persamaan  $\tau_{\text{GENERATOR}}$ , dimana  $M = 2.H$ . Nilai H merupakan penjumlahan dari perhitungan pada subbab 2.7.1.

Dengan  $H = 2.57899$  MWs/MVA dan D diasumsikan mempunyai nilai 1. Maka bentuk  $\tau_{\text{GENERATOR}}$  adalah :

$$\tau_{\text{GENERATOR}} = \frac{1}{M \cdot s + D}$$

$$\tau_{\text{GENERATOR}} = \frac{1}{2.57899 \cdot s + 1} \quad (2.40)$$

Dari persamaan-persamaan diatas digabungkan untuk membentuk sebuah persamaan lingkaran terbuka dari sebuah pembangkit. Dengan berpedoman pada gambar 2.9 maka persamaan lingkaran terbuka menjadi

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P_{re\text{ff}}} = [(\tau_{gov}) \cdot (\tau_{turbin}) \cdot (\tau_{generator})] \quad (2.41)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P_{re\text{ff}}} = \left[ \left( \frac{1}{1 + 0.03 \cdot s} \right) \cdot \left( \frac{s + 2.4}{0.3s^2 + s} \right) \cdot \left( \frac{1}{2.57899 \cdot s + 1} \right) \right]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P_{re\text{ff}}} = \left[ \frac{s + 2.4}{0.0232 \cdot s^3 + 0.875 \cdot s^2 + 8.26 \cdot s + 12} \right] \quad (2.42)$$

Dari persamaan lingkaran tertutup akan dicari umpan balik *speed droop*

#### D. Mencari konstanta *speed droop*

. Persamaan lingkaran tertutup dibentuk dari gambar 2.9 dan persamaan (2.42) diberikan umpan balik konstanta *speed droop*. Terlebih dahulu dicari nilai konstanta *speed droop*.

Dari persamaan (2.42) dibentuk dalam persamaan :

$$KG_{(s)} \cdot H_{(s)} = \frac{K}{(1 + \tau_{gov} \cdot s) \cdot (1 + \tau_{turbin} \cdot s) \cdot (Ms + D)} \quad (2.43)$$

$$KG_{(s)} \cdot H_{(s)} = \left[ \left( \frac{K}{0.0232 \cdot s^3 + 0.875 \cdot s^2 + 8.26 \cdot s + 12} \right) \right] \quad (2.44)$$

Dengan  $K = \frac{1}{R}$

$$1 + KG_{(s)} \cdot H_{(s)} = 1 + \left[ \left( \frac{K}{0.0232 \cdot s^3 + 0.875 \cdot s^2 + 8.26 \cdot s + 12} \right) \right] \quad (2.45)$$

Dengan menggunakan metode *Routh Hurwitz* dari persamaan (2.45)

$$0.0232 \cdot s^3 + 0.875 \cdot s^2 + 8.26 \cdot s + 12 + K \quad (2.46)$$

Berikut adalah tabel kriteria *Routh Hurwitz*

$s^3$	0.0232	8.26
$s^2$	0.875	$12 + K$
$s^1$	$\frac{253.76 - K}{35.207}$	0
$s^0$	$12 + K$	0

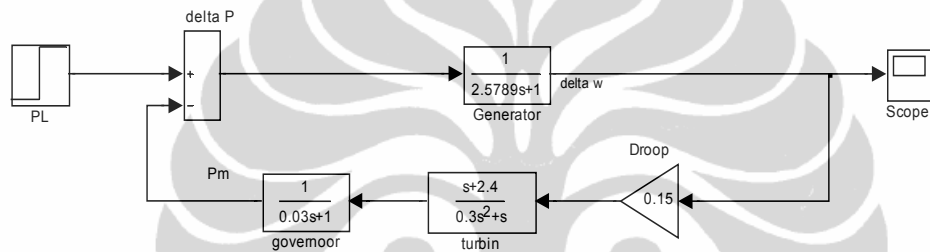
Dari baris  $s^1$  nilai K harus  $K < 253.76$  dan  $K > -1$

Selama  $K = \frac{1}{R}$  maka konstanta *droop* adalah

$$R > \frac{1}{253.76} \text{ atau } R > 0.00394$$

Dengan demikian besarnya droop harus lebih besar dari 0.00394

Dari uraian diatas dibuat diagram blok pembangkit dengan masukan gangguan perubahan daya beban dan keluaran perubahan frekuensi. Pada gambar 2.10 dipilih nilai *speed droop* sebesar 0.15



Gambar 2.10 Diagram blok pembangkit beserta masukan gangguan  $P_L$