

## Review : Metode Sistem Kendali Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Dedi Nugroho<sup>1</sup><sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung

### Informasi Artikel

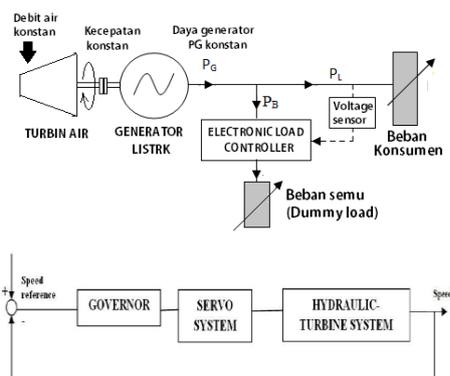
Naskah Diterima : 11 November 2017

Direvisi : 20 Desember 2017

Disetujui : 24 Desember 2017

\*Korespondensi Penulis :  
dedinugroho@gmail.com

### Graphical abstract



### Abstract

Micro hydro power plant (MHP) is a small-scale hydropower (<100 kW) that has many advantages, especially are simple construction, low cost, reliable, can be built without the need for reservoirs, environmentally friendly, and is a renewable energy, so MHP today is mostly built for the needs of power plants in rural area. MHP is generally a isolated power plant, so the main problem is the change of load which will directly cause changes in the generator frequency and voltage, therefore are needed generator and turbine speed control system so that the frequency and output voltage of the generator can be kept constant despite the change of load. The control system at the MHP can be governor controller to regulate the discharge of incoming water turbine and Electronic Load Controller (ELC) to keep the generator load constant by adjusting the power dissipation to the dummy load, when there is a change of load on the consumers. The design and study of MHP control system has been done by a number of researchers with the aim of obtaining a control system design that has a fast response to achieve stability, effective, and efficient. This paper presents the results of the design and studies that have been done by some researchers on the control system at MHP. There are several methods in the control system such as governor control system with PD control, PID, artificial neural network-based PID, ELC control system, combined governor control system and fuzzy logic based ELC

**Keywords:** MHP, micro hydro, control, governor, ELC, dummy load

### Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan pembangkit listrik tenaga air berskala kecil (< 100 kW) yang memiliki banyak keunggulan, terutama konstruksi sederhana, murah, andal, dapat dibangun tanpa menggunakan waduk, ramah lingkungan, dan merupakan energi terbarukan, sehingga PLTMH dewasa ini banyak dibangun untuk keperluan pembangkit listrik di daerah pedesaan. PLTMH umumnya merupakan pembangkit tersendiri (terisolasi), sehingga permasalahan utama yang dihadapi adalah jika ada perubahan beban, maka secara langsung akan menimbulkan perubahan frekuensi dan tegangan generator, oleh karena itu diperlukan sistem pengendalian kecepatan turbin dan generator agar frekuensi dan tegangan keluaran generator dapat terjaga konstan meskipun terjadi perubahan beban. Sistem kendali pada PLTMH dapat berupa pengendalian governor untuk mengatur debit air yang masuk ke turbin dan Electronic Load Controller (ELC) untuk menjaga agar beban generator tetap konstan dengan mengatur disipasi daya ke beban semu (dummy) saat terjadi perubahan beban disisi konsumen. Desain dan kajian terhadap sistem kendali PLTMH ini telah banyak dilakukan oleh sejumlah peneliti dengan tujuan untuk mendapatkan desain sistem kendali yang cepat mencapai kestabilan, efektif dan efisien. Makalah ini menyajikan beberapa hasil desain dan kajian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti mengenai sistem kendali pada PLTMH. Ada beberapa metode dalam sistem kendali tersebut seperti sistem kendali governor dengan kendali PD, PID, PID berbasis jaringan syaraf tiruan, sistem kendali ELC, sistem kendali kombinasi antara governor dan ELC berbasis logika fuzzy.

**Kata kunci:** PLTMH, mikrohidro, kendali, governor, ELC, beban semu

© 2017 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved

## 1. PENDAHULUAN

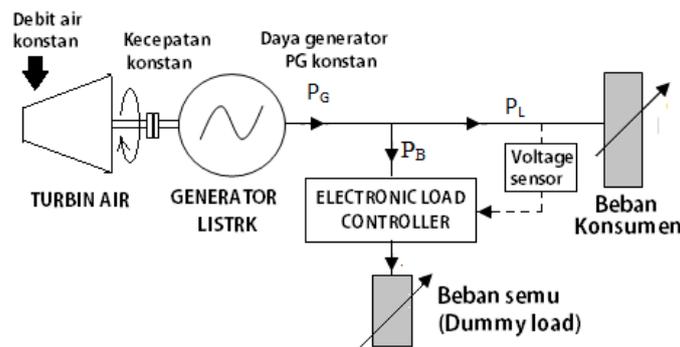
Dewasa ini masyarakat semakin sadar akan keterbatasan energi fosil dan kerusakan lingkungan akibat pembakaran energi fosil, oleh karena itu berbagai usaha dilakukan untuk menggali dan mengkaji berbagai sumber energi baru dan terbarukan yang ramah lingkungan guna dimanfaatkan untuk menunjang aktivitas hidup manusia. Salah satu sumber energi yang saat ini banyak mendapatkan perhatian adalah pemanfaatan potensi energi air untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) karena pembangkit ini memiliki banyak kelebihan diantaranya konstruksi yang sederhana dan murah, andal dan memiliki usia pemakaian yang relatif panjang, sehingga PLTMH banyak dipilih untuk diterapkan di daerah-daerah pedesaan yang memiliki potensi sumber daya air dan belum terjangkau oleh jaringan listrik.

PLTMH biasanya merupakan pembangkit listrik yang terpisah (tidak diintegrasikan dengan pembangkit lain), oleh karena itu permasalahan utama dari PLTMH adalah ketika terjadi perubahan beban, maka secara langsung akan berpengaruh terhadap perubahan frekuensi dan tegangan generator. Agar frekuensi dan tegangan generator tetap stabil saat terjadi perubahan beban, maka diperlukan sistem pengendalian kecepatan pada turbin dan generator

Ada dua jenis sistem pengendalian kecepatan yang digunakan pada PLTMH yaitu sistem pengendalian governor dan *electronic load controller* (ELC). Sistem pengendalian governor merupakan sistem pengendalian aliran air yang masuk kedalam turbin sedemikian rupa sehingga kecepatan putaran turbin terjaga konstan saat terjadi fluktuasi perubahan beban generator, sehingga tegangan dan frekuensi tetap terjaga stabil. Pada sistem pengendalian governor dilakukan dengan cara mengatur posisi *injector* agar jumlah aliran air yang masuk ke turbin dapat diatur sesuai dengan perubahan beban pada generator, sehingga kecepatan turbin dan generator tetap terjaga konstan.

Pengaturan *injector* pada turbin air menggunakan motor servo yang dikendalikan oleh kontroler. Pemakaian sistem pengendalian governor pada PLTMH memerlukan biaya yang relatif tinggi dan memiliki respon yang cenderung lambat terutama saat terjadi perubahan beban secara mendadak. Dewasa ini sistem pengendalian ELC banyak digunakan pada PLTMH karena memiliki beberapa kelebihan [5] yaitu : konstruksi ELC lebih sederhana, ringan, murah, keandalan tinggi, biaya pemeliharaan murah, mudah dioperasikan, tidak menimbulkan *hammer* saat terjadi perubahan beban, dan tidak memerlukan governor sehingga harga turbin menjadi murah. Prinsip pengendalian ELC berbeda dengan prinsip pengendalian governor, jika pengendalian governor ditujukan pada sistem turbin air dengan mengatur jumlah debit air yang masuk ke turbin, maka sistem pengendalian ELC ditujukan pada pengaturan beban pada generator.

Pada prinsipnya sistem kendali ELC adalah mengatur sistem pembebanan generator sedemikian rupa sehingga daya keluaran generator tetap konstan saat terjadi perubahan beban disisi konsumen. Agar daya keluaran generator tetap konstan maka diperlukan beban tambahan yang dikenal sebagai beban semu (*dummy / ballast*).



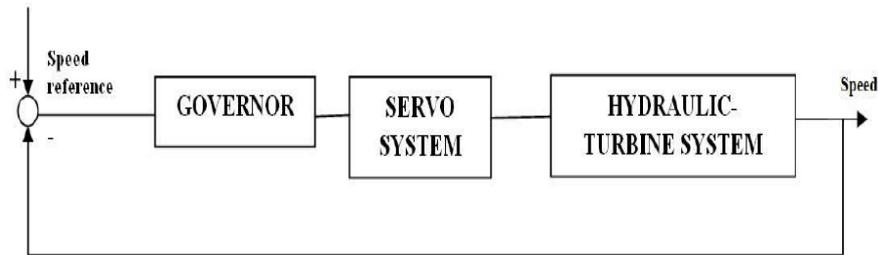
Gambar 1. Sistem pengendalian electronic load controller pada PLTMH

Pada saat terjadi pengurangan beban konsumen maka kelebihan daya generator akan dialihkan (disipasikan) ke beban semu, begitu pula sebaliknya ketika terjadi penambahan beban konsumen maka besarnya daya yang disipasikan ke beban semu akan dikurangi, dengan demikian daya keluaran generator tetap terjaga konstan. Beban semu biasanya berupa elemen – elemen *heater* yang diletakkan didekat panel kontrol dalam *power house* yang mana pembebanannya diatur oleh

ELC sedemikian rupa sehingga daya keluaran generator tetap terjaga konstan. Kekurangan dari sistem pengendalian ini adalah adanya daya yang terbuang pada beban semu (rugi-rugi daya), dan memerlukan jumlah debit air yang masuk ke turbin tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban konsumen, sehingga pemakaian energi air menjadi tidak efisien. Dalam sistem kendali ELC terdapat beberapa metode untuk mengatur besarnya daya yang harus disipasikan ke beban semu yaitu antara lain metode *binary dummy load controller*, *phase angle control* dan *pulse width modulatio* (PWM).

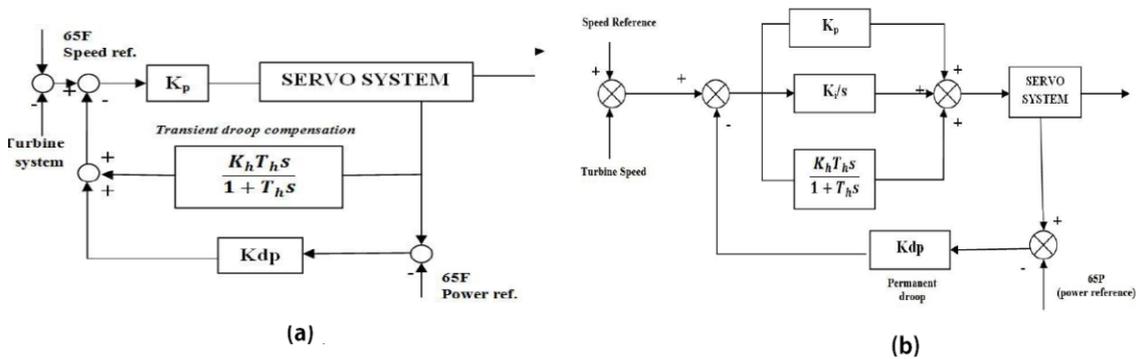
**2. KAJIAN LITERATUR**

Sistem kendali governor pada PLTMH bertujuan untuk mengatur jumlah aliran air yang masuk ke turbin agar putaran turbin dan generator tetap konstan saat terjadi perubahan beban. Secara konvensional terdapat beberapa cara pengendalian governor seperti Kendali *Proportional Integral* (PI), Kendali *Proportional Derivative* (PD) dan Kendali *Proportional Integral Derivative* (PID). Komponen-komponen sistem kendali governor diperlihatkan dalam gambar 2 dibawah ini.



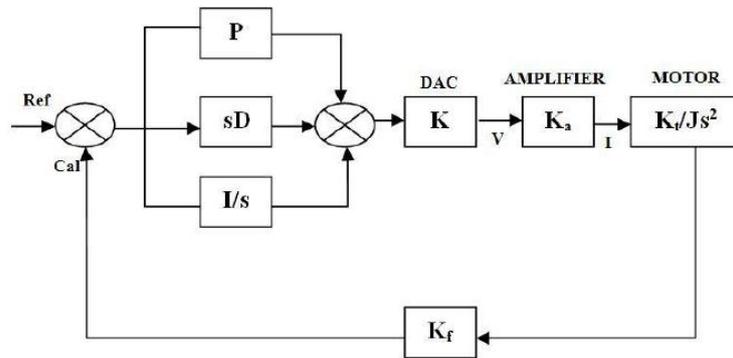
Gambar 2 blok diagram sistem kendali governor

Roshni Bhoi dan Dr. S.M. Ali [1], membandingkan unjuk kerja PD controller dan PID controller untuk pengaturan governor, karena PI controller sendiri dinilai memiliki efek negatif terhadap perubahan kecepatan. Penelitian dilakukan melalui pemodelan sistem kendali PD yang diperlihatkan pada gambar 3(a) dan PID pada gambar 3(b) dibawah ini.



Gambar 3 blok diagram model sistem kendali (a) PD dan (b) PID

Sistem kendali PD menggunakan dua tipe kendali untuk mendeteksi kesalahan yaitu kendali P yang memberikan reaksi cepat terhadap tingkat kesalahan dengan menghitung nilai kesalahan dan menghasilkan aksi kontrol yang sebanding dengan masukan sinyal kesalahan. Sementara Kendali D bereaksi terhadap masukan sinyal kesalahan dan menghasilkan sinyal kendali terhadap laju perubahan dan meningkatkan konstanta proporsionalitas untuk menjaga batas kestabilan. Untuk meningkatkan kecepatan respon dapat dilakukan dengan menggunakan sistem kendali PID dimana penambahan kendali I berguna untuk memperkecil nilai kesalahan. Keluaran dari sistem kendali ini digunakan sebagai masukan bagi motor servo yang akan menggerakkan sistem hidrolik turbin. Sistem servo terdiri atas PID controller, DAC, amplifier, motor servo, dan sensor posisi. Model sistem servo diperlihatkan dalam gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4 blok diagram model sistem servo

Untuk menguji unjuk kerja kedua sistem kendali tersebut diatas dilakukan simulasi dengan data-data digunakan seperti pada tabel 1 s/d 3.

Tabel 1 kapasitas sistem

Governor	MVA	MW
PID	265.0	250
PD	50.0	47.2

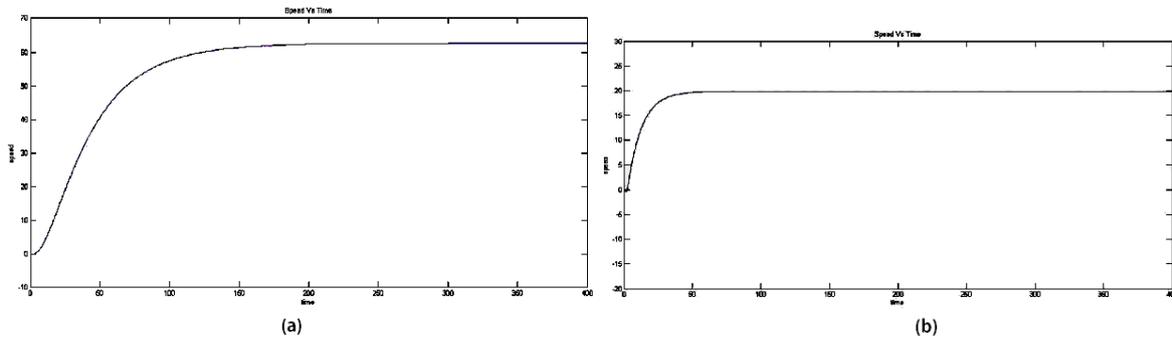
Tabel 2 konstanta kendali PID dan PD

Governor	$K_p$	$K_i$	$K_h$	$T_h$	$K_{dp}$
PID	6.0	10.0	0.01	0.01	0.05
PD	200.0	0.0	0.05	5.0	0.055

Tabel 3 konstanta sistem servo

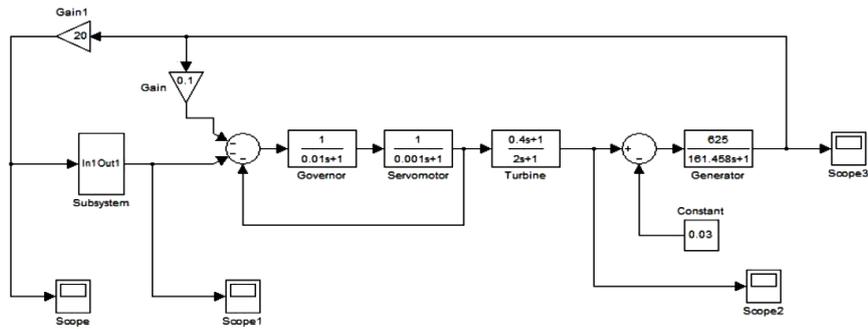
$K_p$	$K_d$	$K_i$	$K$	$K_a$	$K_t$	$J$	$K_f$
25	0.11	1.2	0.0488	0.5	0.1	0.0004	650

Berdasarkan hasil simulasi memperlihatkan bahwa sistem kendali PID memiliki respon yang lebih cepat dalam mencapai kestabilan dibandingkan kendali PD karena adanya penambahan kendali I.

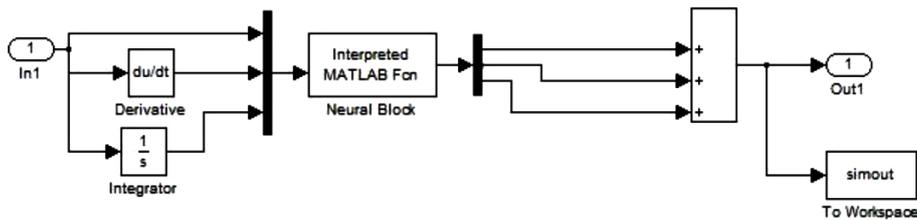


Gambar 5 kurva kecepatan terhadap waktu : (a) kendali PD (b) kendali PID

Thamilmaran A, Vijayapriya P, dan Bakkiya Lakshmi S [2], merancang sistem kendali PID governor pada PLTMH berbasis jaringan syaraf tiruan (*neural network*) karena sistem kendali ini dinilai dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan pada sistem, sehingga lebih efektif dan mampu merespon lebih cepat saat terjadi perubahan beban. Jaringan syaraf tiruan dibangun berdasarkan *Brandt-Lin Algorithm* yang memungkinkan kontroler dapat beradaptasi secara efektif terhadap perubahan sistem. Tujuan dari aplikasi jaringan syaraf tiruan ini adalah untuk mengoptimalkan kendali PID agar meniadakan kesalahan *steady state*. Model sistem kendali ini disimulasikan melalui matlab simulink seperti diperlihatkan dalam gambar 6 dibawah ini.

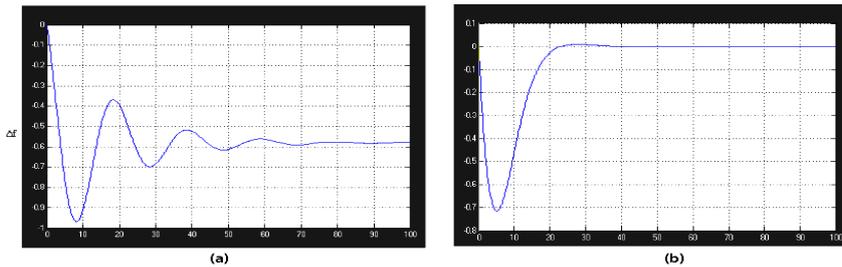


Gambar 6 model simulink pembangkit hidro



Gambar 7 model simulink sub system pembangkit hidro

Berdasarkan hasil simulasi memperlihatkan bahwa sistem kendali ini mampu menjaga kestabilannya secara cepat ketika terjadi perubahan frekuensi pada sistem.



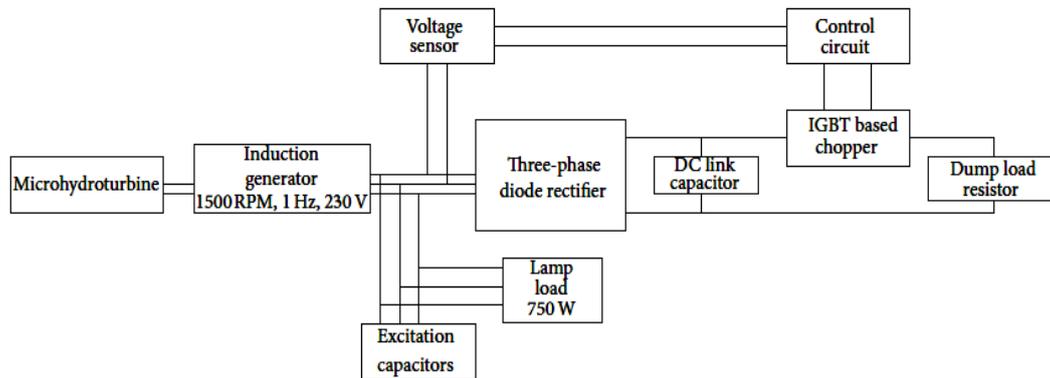
Gambar 8 karakteristik saat perubahan frekuensi : (a) tanpa kendali (b) dengan kendali

Clark Darwin M. Gozon, Reuel C. Pallugna dan Rojien V. Morcilla [3] menganalisis empat metode switching berbeda pada sistem kendali ELC PLTMH untuk mengetahui tingkat harmonik distorsi pada masing – masing metode tersebut. Keempat metode switching tersebut adalah *Binary dummy load controller (BDLC)*, *Phase angle control (PAC)*, dan *Pulse wide modulation (PWM)*. Pada sistem BLDC beban semu terdiri dari sejumlah resistans yang masing – masing dihubungkan secara paralel melalui rangkaian switching yang terpisah satu sama lainnya. Sistem kontrol pada rangkaian switching dilakukan melalui rangkaian penyulutan thyristor (*trigger circuit*) yang bekerja melalui sistem on-off berdasarkan adanya perubahan beban pada sisi konsumen. Sistem kendali ELC dengan PAC dilakukan dengan mengendalikan jumlah daya yang disipasikan ke beban semu melalui pengaturan sudut penyalaan thyristor , sedangkan sistem kendali ELC dengan PWM dilakukan dengan mengendalikan jumlah daya yang disipasikan ke beban semu melalui pengaturan sudut penyalaan thyristor dengan sistem PWM. Berdasarkan hasil simulasi memperlihatkan bahwa sistem kendali ELC dengan metode BDLC memiliki Total Harmonic Distortion (THD) yang paling rendah yaitu 9%, sedangkan melalui metode PAC memiliki THD lebih tinggi yaitu 15% sedangkan melalui teknik PWM memiliki THD yang tertinggi yaitu 33%. Pada sistem BLDC memiliki THD yang rendah karena thyristor hanya digunakan untuk menghubungkan atau melepaskan satu atau beberapa beban semu saja, sesuai dengan besarnya perubahan beban disisi konsumen. Pada sistem PAC dan PWM, thyristor digunakan untuk mengatur besarnya daya yang disipasikan kekonsumen, sehingga menimbulkan harmonik yang tinggi.

Tabel 4. Hasil perbandingan THD pada sistem switching ELC

	BDLC	PAC	PWM
Settling time	~2.5sec	~2.5sec	~2.5sec
Max. THD	9%	15%	33%
Line voltage wave Form	Magnitudes are uniform	Unequal and distorted	Uniform and peaks are flatted
RMS voltage fluctuations	15V	25V	3.5V
Average Frequency	59.43Hz	60.29Hz	59.97 Hz

C. Kathirvel, K.Porkumaran, dan S. Jaganathan [4 ], merancang sistem kendali PLTMH untuk daerah pedesaan, oleh karena itu digunakan generator induksi dan sistem kendali ELC agar biaya investasi menjadi murah. Dalam sistem ini diperlukan kapasitor untuk eksitasi generator induksi dan motor diputar diatas kecepatan sinkronnya. Blok diagram sistem kendali ini diperlihatkan dalam gambar 9 dibawah ini.



Gambar 9 blok diagram sistem kendali ELC pada PLTMH dengan generator induksi

Rangkaian kendali ELC terdiri atas penyearah dioda 3 fasa yang terhubung dengan beban semu (berupa resistor) melalui rangkaian IGBT. Aktivasi IGBT dilakukan dengan memberikan pulsa yang dibangkitkan oleh rangkaian kontrol berdasarkan masukan dari tegangan generator. Apabila terjadi perubahan beban disisi konsumen baik berupa penambahan atau pengurangan beban, maka akan berpengaruh terhadap perubahan tegangan keluaran generator, maka agar daya yang dibangkitkan oleh generator tetap stabil, kelebihan daya akibat pengurangan beban disisi konsumen akan dilimpahkan atau disipasikan ke beban semu, sebaliknya jika terjadi penambahan beban disisi konsumen maka beban semu akan dikurangi. Pengaturan pembebanan pada beban semu ini diatur dengan membangkitkan pulsa pada unit rangkaian kontrol untuk menyulut (*trigger*) IGBT sedemikian rupa sehingga besarnya pembebanan semu selaras dengan perubahan pembebanan disisi konsumen.

$$P_G = P_c + P_D \tag{1}$$

$$P_D = P_G - P_c \tag{2}$$

Dengan :

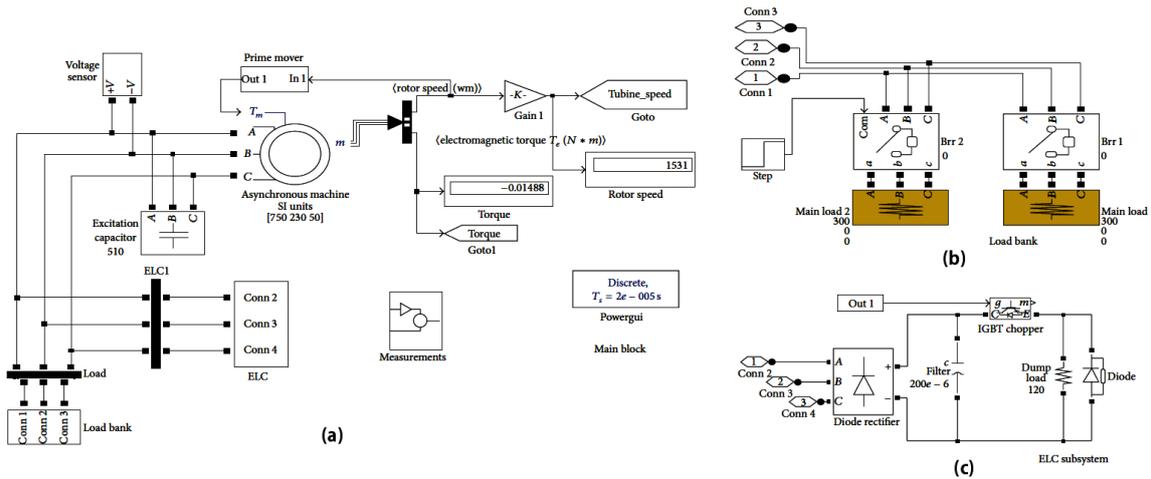
$P_G$  = Daya yang diproduksi oleh generator

$P_C$  = Daya disisi konsumen

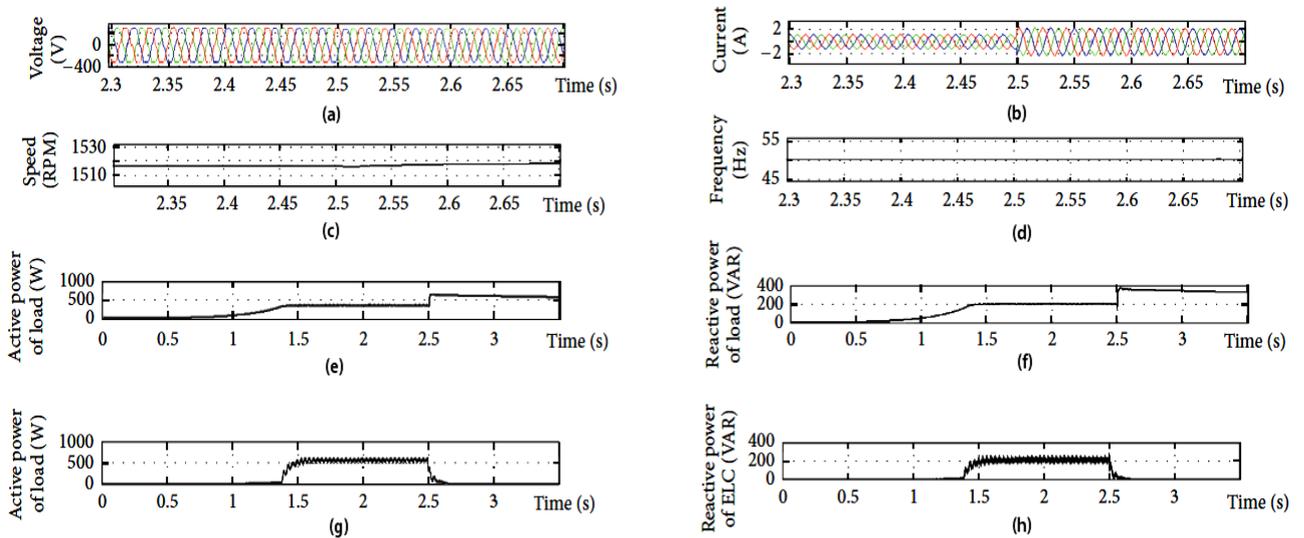
$P_D$  = Daya yang disipasikan pada beban semu

Untuk mengetahui unjuk kerja sistem ELC digunakan model PLTMH dengan matlab simulink seperti ditunjukkan dalam gambar 10, sedangkan hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 11 dibawah ini.

Berdasarkan hasil simulasi menunjukkan bahwa saat terjadinya perubahan beban maka generator induksi mampu mempertahankan kecepatan putarannya sehingga akan mengakibatkan tegangan dan frekuensi tetap terjaga konstan.



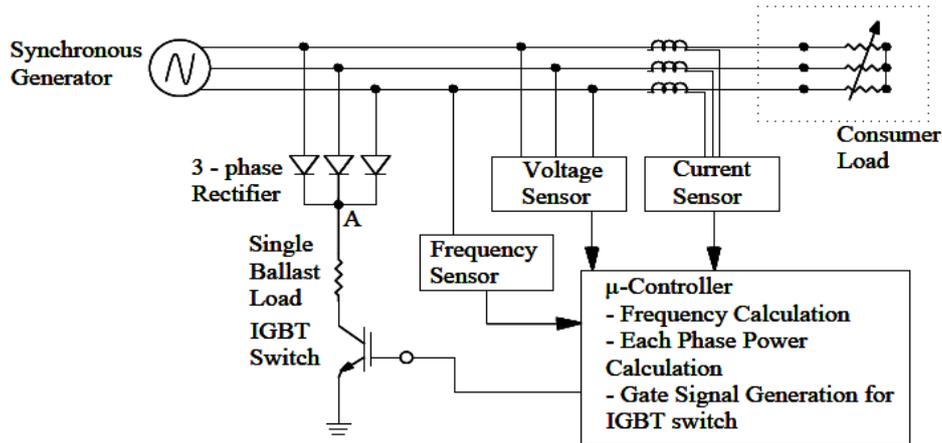
Gambar 10 model simulasi matlab : (a) blok utama sistem , (b) beban *semu*, (c) rangkaian ELC



Gambar 11 Hasil simulasi unjuk kerja berdasarkan perubahan beban konsumen  
 a. Tegangan generator, b. Arus generator, c. Kecepatan generator, d. Frekuensi generator  
 e. Daya aktif konsumen, f. Daya reaktif konsumen, g. Daya aktif beban *semu*, h. Daya reaktif beban *semu*

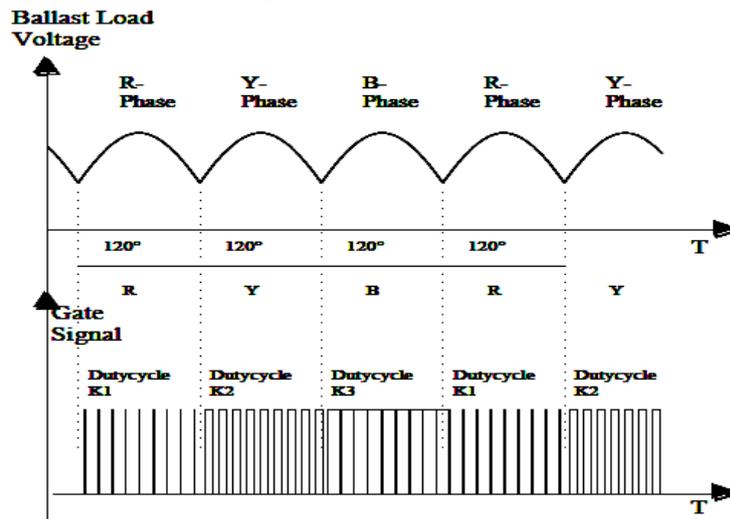
Berdasarkan hasil simulasi terlihat bahwa kenaikan arus beban konsumen rendah maka daya beban juga rendah, akibatnya daya yang disipasikan ke beban *semu* menjadi tinggi, namun sebaliknya ketika beban konsumen mengalami peningkatan, maka daya yang disipasikan ke beban *semu* menjadi turun, meskipun demikian daya keluaran generator tetap konstan , sehingga baik frekuensi maupun tegangan keluar generator tetap terjaga konstan.

Rajendra Adhikari, Rojan Bhattarai dan Prof. Indraman Tamrakar [5] menyajikan desain sistem kendali ELC yang sederhana pada PLTMH dengan generator sinkron dan memakai sistem yang terdiri dari satu beban *semu* dan satu buah perangkat *switching* elektronika daya seperti diperlihatkan dalam gambar 12. Beban *semu* merupakan beban dc yang disuplai dari keluaran generator sinkron 3 fasa melalui penyearah setengah gelombang 3 fasa (*3 phase diode rectifier*). Pensaklaran beban *semu* dan besarnya daya yang didisipasikan ke beban *semu* akibat perubahan beban dikendalikan melalui pengaturan siklus kerja (*duty cycle*) IGBT yang dikendalikan berdasarkan prinsip keseimbangan arus pada terminal generator.



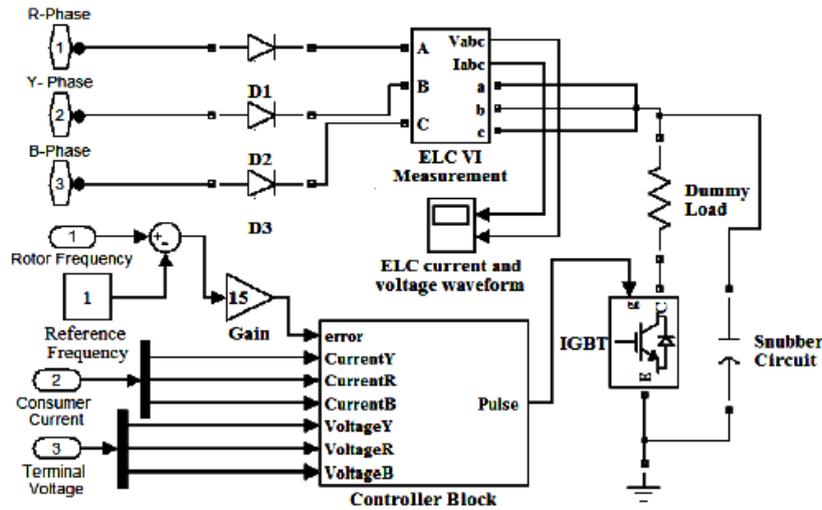
Gambar 12 Skema sistem kendali ELC dengan generator sinkron

Keluaran dari penyearah 3 fasa membentuk gelombang dc dengan perioda konduksi  $120^\circ$  pada masing-masing fasa, dengan demikian untuk mengatur daya yang didisipasikan ke beban *semu* maka diperlukan pengaturan siklus kerja IGBT selama perioda konduksi masing – masing fasa tersebut sedemikian rupa sehingga arus generator pada masing-masing fasa seimbang. Pada gambar dibawah ini memperlihatkan bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah 3 fasa dan siklus kerja gate IGBT yang berbeda-beda untuk setiap fasa.



Gambar 13 bentuk tegangan keluaran penyearah dan siklus kerja gate IGBT untuk mengatur daya pada beban semu (ballast)

Untuk mengetahui kinerja dari desain sistem kendali ini, maka dilakukan simulasi dengan menggunakan simulik matlab dengan rangkaian diperlihatkan dalam gambar 14. Skenario simulasi dilakukan dalam beberapa perubahan kondisi beban konsumen seperti diperlihatkan dalam tabel 5.



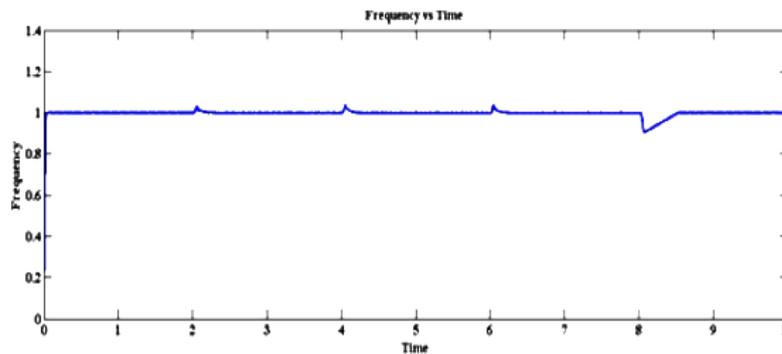
Gambar 14 model sistem kendali dengan simulink matlab

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa sistem kendali ini dapat mengatur arus keluaran generator mendekati keseimbangan (tabel 5) dengan demikian dapat mengatasi masalah *overload* akibat pembebanan yang tidak seimbang.

Tabel 5 Hasil simulasi terhadap beberapa kondisi pembebanan

Current (RMS Value)	Condition I (0-2) & (8-10) seconds			Condition II (2-4) seconds			Condition III (4-6) seconds			Condition IV (6-8) seconds		
	R	Y	B	R	Y	B	R	Y	B	R	Y	B
Consumer Current	19.47	19.47	19.47	19.47	19.47	0	19.47	0	0	0	0	0
Dummy Current	1.10	1.10	1.10	6.176	6.53	24.11	8.9	29.14	23.92	29.95	29.95	29.95
Terminal Current	19.9	19.9	19.9	22.58	22.9	24.11	25.74	29.14	23.92	29.95	29.95	29.95

Respon sistem kendali terhadap frekuensi akibat adanya perubahan beban sesuai dengan skenario diatas menunjukkan sistem dapat merespon secara cepat perubahan frekuensi secara cepat sehingga frekuensi dapat menuju kestabilannya dalam waktu yang cepat seperti diperlihatkan dalam gambar 15 dibawah ini.

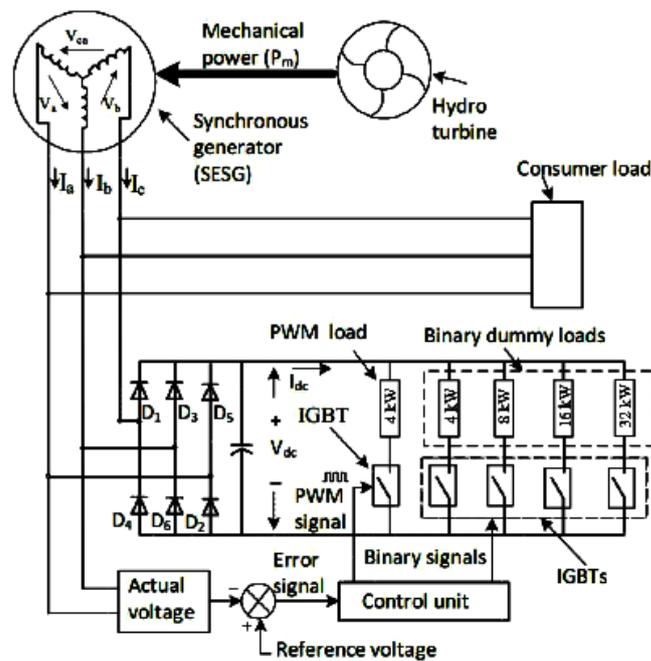


Gambar 15 respon sistem terhadap frekuensi akibat perubahan pembebanan disisi konsumen

Penggunaan ELC berbasis elektronika daya bertujuan untuk meningkatkan respon sistem ketika terjadi perubahan beban, namun disisi lain akan menimbulkan harmonik yang tinggi akibat proses *switching* peralatan elektronika daya, oleh karena itu perlu dirancang sistem kendali ELC yang cepat dan menghasilkan harmonik yang rendah.

Nan Win Aung dan Aung Ze Ya [6] menyajikan sistem kendali ELC pada PLTMH dengan menggunakan kombinasi gabungan dua buah metode sistem pengaturan beban semu yaitu sistem *Pulse Width Modulation (PWM) load* dan *binary dummy load*, dengan tujuan untuk mengurangi harmonik namun memiliki respon sistem yang cepat. Pada sistem kendali ini keluaran generator terdiri atas beban konsumen dan beban semu yang terbagi atas beban semu PWM dan beban semu biner. Dalam sistem kendali ini rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa digunakan untuk mengubah tegangan arus bolak balik generator menjadi tegangan dc gelombang penuh yang dihubungkan dengan beban semu. Beban semu biner terdiri dari sejumlah resistans yang masing – masing berbeda nilai tahanannya, dan diaktifkan masing – masing oleh IGBT yang difungsikan sebagai saklar on – off, sementara beban semu PWM merupakan satu buah resistans yang diaktifasi IGBT oleh sinyal PWM melalui perhitungan siklus kerja (*duty cycle*) berdasarkan jangkauan (*range*) beban PWM dan resistansinya.

Apabila terjadi perubahan frekuensi akibat adanya perubahan beban, maka akan dibangkitkan sinyal *error*, yang mana sinyal ini merupakan masukan bagi unit kendali untuk mengatur pembagian daya yang akan didisipasikan baik untuk beban semu biner maupun beban semu PWM, oleh karena itu diperlukan skenario untuk pendistribusian daya yang tidak terpakai dari generator ke beban semu ini. Pada tabel 6 memperlihatkan contoh pembagian beban *semu* PWM 4 kW, yang dapat dibagi menjadi beberapa bagian dengan masing-masing bagian dihitung siklus kerjanya (*duty cycle*) yang digunakan untuk mengaktifasikan IGBT pada beban semu PWM. Pada tabel 5 memperlihatkan perhitungan siklus kerja IGBT untuk beban semu PWM 4 kW dengan range 400 W, sedangkan tabel 7 memperlihatkan contoh pembagian daya yang disipasikan pada beban semu biner dan PWM



Gambar 16 Desain sistem kendali ELC kombinasi PWM load dan binary semu load

Tabel 6 Perhitungan siklus kerja beban semu PWM 4 kW

$P_L$ (W)	$V_o = \sqrt{P_L R_L}$ (V)	$I_o = V_o / R_L$ (A)	Duty Cycle $D = V_o / V_i$
400	188	2.13	0.31
800	265	3.00	0.45
1200	325	3.68	0.55
1600	375	4.25	0.63
2000	420	4.76	0.71
2400	460	5.22	0.77
2800	497	5.63	0.84
3200	531	6.02	0.89
3600	563	6.38	0.95
4000	594	6.73	1

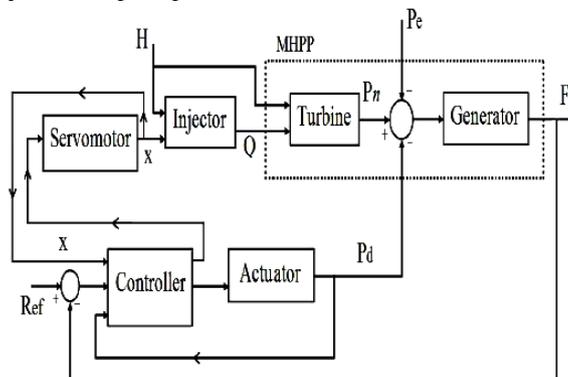
Tabel 7 Pembagian daya yang disipasikan pada beban semu

Beban Konsumen $P_C$ (kW)	Beban Total Dummy $P_D = P_B + P_{PWM}$ (kW)	Beban Dummy Biner $P_B$ (kW)	Status beban Dummy Biner ( 32, 16, 8, 4 )	Beban Dummy PWM $P_{PWM}$ (kW)	Siklus Kerja PWM $D$ (%)
60	0	0	0000	0	0
55	5	4	0001	1	0.50
45	15	12	0011	3	0.87
35.5	24.5	24	0110	0.5	0.35
30	30	28	0111	2	0.71
25.5	34.5	32	1000	2.5	0.79
16.5	43.5	40	1010	3.5	0.94
14.5	45.5	44	1011	1.5	0.61
0	60	60	1111	0	0

Sistem pengendalian PLTMH dengan ELC memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan dengan pengendalian melalui governor, namun sistem pengendalian ELC memerlukan aliran debit air yang konstan kedalam turbin. agar menjamin generator mampu menghasilkan daya listrik yang konstan. Kendala yang dihadapi dalam sistem pengendalian ELC adalah jika debit air berkurang terutama saat musim kering tiba, maka bagi PLTMH dengan sistem *runoff* akan berdampak langsung pada penurunan kecepatan putaran turbin dan generator, sementara bagi PLTMH dengan sistem *reservoir* akan mengakibatkan pemborosan dalam penggunaan air. Sistem pengaturan governor dapat menimbulkan *hammer* terlebih jika terjadi perubahan beban secara mendadak, namun disini lain sistem pengaturan ini dapat mengatur kebutuhan pemasukan debit air pada turbin sesuai dengan perubahan beban, sehingga generator tidak dioperasikan pada beban nominalnya secara terus menerus, dengan demikian tidak diperlukan beban semu untuk mengalihkan daya listrik yang tidak terpakai oleh konsumen, hal ini berarti dapat menghemat dalam penggunaan air. Mengingat jaringan PLTMH umumnya merupakan sistem grid terisolasi, sehingga pemakaian sistem kendali governor pada PLTMH dapat menimbulkan masalah dalam merespon secara cepat saat terjadi perubahan beban besar secara mendadak.

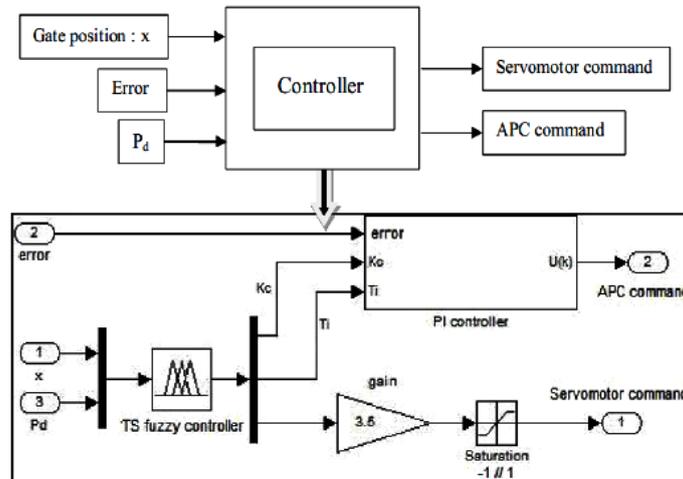
Berdasarkan hal tersebut diatas maka Issam Salhi dan Said Doubabi [7] mempresentasikan kombinasi pengaturan antara ELC dan governor berbasis logika fuzzy (*fuzzy controller*). Pemakaian kendali ELC pada pada sistem ini dimaksud agar sistem dapat merespon secara cepat saat terjadi perubahan beban, sementara itu kendali governor ditujukan agar generator tidak harus dioperasikan pada beban nominalnya secara terus menerus, dengan demikian kebutuhan penggunaan air dapat menjadi lebih hemat.

Penggunaan logika fuzzy dipilih mengingat pada umumnya beban – beban PLTMH bersifat non linier dan berfluktuasi, sehingga diperlukan sistem kendali yang mampu merespon perubahan tersebut dengan cepat. Konsep dasar sistem kendali ini adalah memperbaiki sistem kendali konvensional *PI controller* dengan cara mengkoreksi atau memperbaiki sinyal *gain* P dan I pada *PI controller* setiap terjadi perubahan frekuensi sehingga sistem kendali dapat meresponnya dengan cepat. Sinyal koreksi *gain* ini dihasilkan dari *TS fuzzy controller* berdasarkan masukan posisi *gate* dan daya yang terdisipasi pada beban semu, oleh karena itu logika fuzzy memiliki dua keanggotaan yaitu  $x$  (posisi *gate*) dan  $P_d$  ( daya terdisipasi pada beban semu).



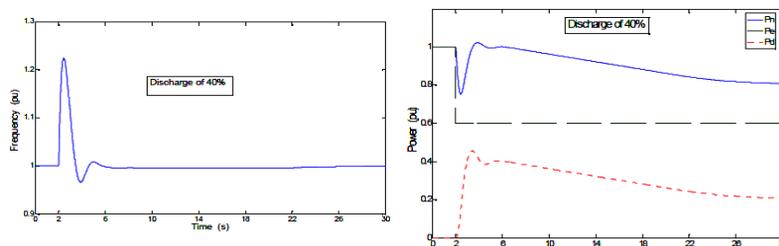
Gambar 17 Strategi sistem pengendalian ELC dan governor berbasis logika fuzzy pada PLTMH

*PI Controller* mendapat masukan sinyal error dari frekuensi generator dan sinyal *gain* yang dikoreksi oleh fuzzy controller. Keluaran *PI controller* berupa sinyal digunakan untuk mengendalikan motor servo *injector* yang berkaitan dengan penggunaan air dan *analog power control* (APC) untuk mengendalikan disipasi daya pada beban-beban semu.



Gambar 18 Skema TS Fuzzy controller yang mengkoreksi gain pada *PI Controller*

Unjuk kerja sistem kendali ini diuji dengan terjadinya pelepasan mendadak 40% beban konsumen, berdasarkan hasil simulasi memperlihatkan bahwa frekuensi dapat segera stabil dalam waktu yang sangat singkat, dimana kelebihan daya generator didisipasikan ke beban semu dan aliran debit air segera diatur oleh motor servo sehingga daya yang dibangkitkan oleh generator dibawah nilai nominalnya.

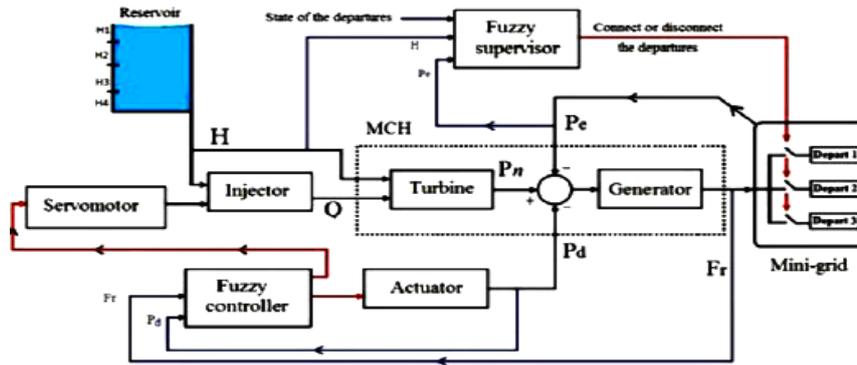


Gambar 19 hasil simulasi unjuk kerja sistem saat terjadi pelepasan beban 40%

Berdasarkan hasil risetnya dapat disimpulkan bahwa ketika terjadi perubahan beban konsumen maka sebagian kelebihan beban generator akan dialihkan ke beban semu sementara itu aliran debit air diatur sedemikian rupa sehingga daya yang dibangkitkan oleh generator dapat dikurangi agar tidak beroperasi pada keadaan nominalnya, dengan demikian akan menghemat pemakaian air.

Suhas V. Kamble dan D.P. Kadam [8] mengembangkan desain sistem pengendalian kombinasi antara governor dan ELC berbasis logika fuzzy dengan menggunakan sistem *fuzzy controller* dan *fuzzy supervisor*.

*Fuzzy controller* pada intinya bertugas untuk memperbaiki gain P dan I pada *PI Controller* agar respon sistem menjadi lebih cepat. *Fuzzy controller* mendapat masukan dari sinyal *error* frekuensi generator (*fr*) dan daya yang terdisipasi pada beban semu (*Pd*) sedangkan keularannya digunakan untuk mengendalikan besarnya daya yang didisipasikan ke beban semu dan mengatur banyaknya debit air yang masuk keturbine melalui pengendalian motor servo injector.



Gambar 20 skema desain sistem kendali PLTMH dengan fuzzy controller dan supervisor

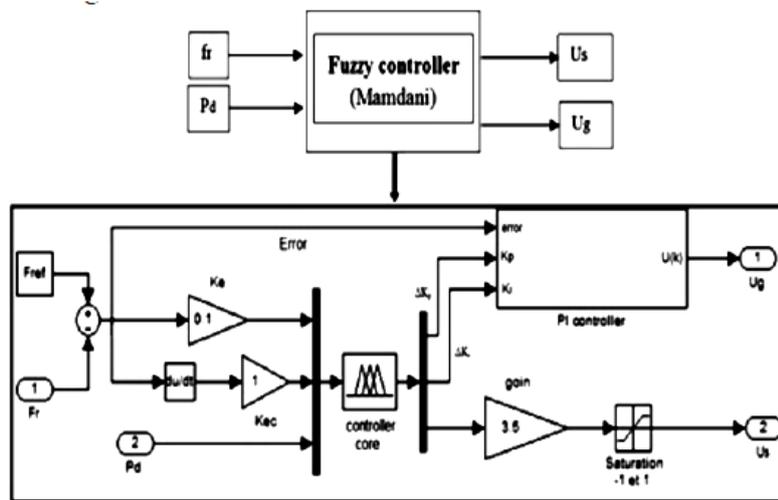
Pada intinya *fuzzy controller* ini berperan mengatur secara langsung konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan konstanta integral ( $K_i$ ) pada *PI controller*. Misalkan  $K_p^*$  dan  $K_i^*$  adalah nilai referensi konstanta proporsional dan integral dari PI Controller, dan  $\Delta_p$  dan  $\Delta_i$  adalah sinyal keluaran dari fuzzy controller, maka konstanta P dan I dikoreksi pada PI controller menjadi :

$$K_p = K_p^* + \Delta_p \tag{3}$$

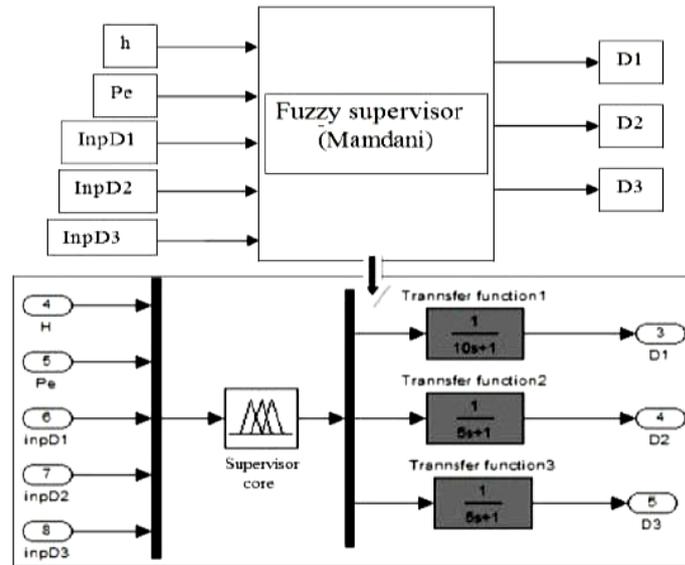
$$K_i = K_i^* + \Delta_i \tag{4}$$

Untuk menjamin agar generator dapat beroperasi dalam semua kondisi terutama berkaitan dengan penurunan debit air pada saat musim kemarau tiba, maka sistem kendali ini dilengkapi oleh *fuzzy supervisor*, yang bertugas untuk mengatur pemakaian beban disisi konsumen dan ketersediaan debit air sedemikian rupa sehingga generator masih mampu beroperasi meskipun debit air mengalami penurunan dari kondisi normalnya. Desain sistem *fuzzy supervisor* ini adalah membagi konsumen listrik menjadi beberapa kelompok berdasarkan tingkat urgensinya. Setiap kelompok dipisahkan salurannya satu dengan yang lain dalam jaringan *minigrid*.

Jika terjadi kondisi dimana debit air berkurang, maka untuk menjaga agar PLTMH masih dapat beroperasi, *fuzzy supervisor* akan memutuskan sambungan pada kelompok konsumen yang dianggap kurang penting dan dihubungkan kembali jika debit air sudah kembali normal. Disamping itu Fuzzy supervisor juga akan mengamati pembebanan generator, jika terjadi pembebanan yang terlalu besar dan melampaui kapasitas generator maka beberapa beban disisi konsumen yang kurang penting akan diputuskan.



Gambar 21 desain rangkaian : Fuzzy controller



Gambar 22 desain rangkaian Fuzzy supervisor

Jadi sistem kendali berbasis fuzzy ini akan memberikan jaminan agar PLTMH dapat beroperasi secara kontinyu untuk berbagai kondisi baik dari sisi pembebanan generator maupun jumlah debit air disisi reservoir.

### 3. KESIMPULAN

Sistem kendali PLTMH bertujuan untuk menjaga agar frekuensi dan tegangan generator terjaga konstan saat terjadi perubahan beban. Pada intinya terdapat dua cara sistem pengendalian PLTMH yaitu pengendalian governor untuk mengatur jumlah debit air yang masuk ke turbin dan *Electroni Load Controller* (ELC) yaitu sistem pengendalian pada generator agar daya keluaran generator tetap konstan meskipun terjadi fluktuasi perubahan beban disisi konsumen, oleh karena itu pada sistem kendali ini memerlukan beban semu (*dummy load*). Pengaturan dengan sistem governor relatif mahal karena memerlukan perangkat mekanis dan memiliki respon lambat namun disisi lain dapat menghemat kosumsi penggunaan air. Sistem pengendalian ELC lebih murah dan andal karena sistem ini bekerja secara elektronik. Keunggulan utama dari sistem ELC adalah respon yang lebih cepat sehingga cocok digunakan pada PLTMH, mengingat jenis pembangkit ini pada umumnya terisolasi sehingga diperlukan respon yang cepat. Terdapat beberapa metode dalam sistem kendali ELC seperti *binary dump load controller*, *angle phase control* dan *pulse width modulation (PWM)*. Untuk meningkatkan respon sistem dapat diterapkan sistem kendali berbasis logika fuzzy ataupun jaringan syaraf tiruan, karena sistem ini mampu beradaptasi secara cepat. Sistem kendali ELC dengan rangkaian elektronika daya (*power electronics*) ini memiliki beberapa kekurangan yaitu : menimbulkan distorsi pada gelombang tegangan generator berupa harmonik yang mana tingkat THDnya bergantung pada metode yang digunakan untuk switching IGBT, dan adanya energi listrik yang terbuang karena daya yang tidak terpakai oleh konsumen dialihkan ke beban semu, sehingga terjadi pemborosan penggunaan energi air. Pada kasus harmonik penggunaan metode *binary dump load controller* memiliki harmonik yang terendah namun memiliki respon yang rendah, sedangkan penggunaan metode PWM dapat mempercepat respon namun menimbulkan harmonik yang tinggi, oleh karena itu untuk mendapatkan respon yang baik dengan tingkat harmonik yang rendah sistem kombinasi antara *binary dump load controller* dan PWM dapat dipertimbangkan. Pada kasus PLTMH dengan *reservoir* penggunaan sistem kendali ELC akan mengakibatkan pemborosan pemakaian air, oleh karena itu untuk menghemat cadangan air dalam *reservoir* dapat diterapkan sistem kendali kombinasi antara sistem kendali governor dan ELC, dan untuk mempercepat respon sistem dapat diterapkan sistem kendali berbasis logika fuzzy ataupun kendali cerdas lainnya.

## REFERENSI

- [1] Roshni Bhoi dan Dr. S.M. Ali, “ Simulation for Speed Control of the Small Hydro Power Plant Using PID Controller “, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering , Vol.3, Issue 4, April 2014. ISSN :2278-8875 (on line), ISSN :2320-3765 (print).
- [2] Thamilmaran A, Vijayapriya P, Bakkiya Lakshmi S., “ Modeling of Micro Hydro Plant and Its Control Based On Neural Network “, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol.02, Issue 5 Aug 2015, e-ISSN : 2395-0056, p-ISSN : 2395-0072.
- [3] Clark Darwin M. Gozon, Reuel C. Pallugna and Rojien V. Morcilla, “ Analisis and Comparison if Switching Techniques of Electronic Load Controller for Micro hydro Power Plant “, Mindano Journal of Science annd Technology, Vol 14 (2016) 120-130
- [4] C. Kathirvel, K.Porkumaran, dan S. Jaganathan, “Design and Implementation of Improved Electronic Load Controller for Self Excited Induction Generator for Rural Electrification “, The Scientific World Journal Volume 2015, Article ID 340619, Hindawi Publishing Corporation.
- [5] Rajendra Adhikari, Rojan Bhattarai dan Prof. Indraman Tamrakar, “ Improved Electronic Load Controller for Three Phase Isolated Micro Hydro Generator “, Fifth International Confrence on Power and Energy System, Kathmandu, Nepal 28 – 30 October 2013.
- [6] Nan Win Aung dan Aung Ze Ya , “ Design of Electronic Load Controller By Using Combination Method for Micro-Hydro Power Plant And Its Control and Monitoring Program Simulation “, Internasional Journal of Electrical Electronics and Data Communication, Vol. 3, Issue 6 June 2015, ISSN 2320-2084.
- [7] Firmansyah. Teguh; Harsojo, Dwi; Fatonah, Feti; Aziz, Abdul. “Rancangan Dual Band Cascode Band Pass Filter Frekuensi 119, 7 MHz dan 123, 2 MHz untuk Perangkat Tower Set Bandara Budiarto”. Jurnal Ilmiah Setru. Vol.4, No. 1, 2015.
- [8] Issam Salhi , Said Doubabi, “ Fuzzy Controller for frequency regulation and water Energy Save on Micro Hydro Power Plabt”, International Renewable Energy Congres-s, November 5-7. 2009.
- [9] Suhas V. Kamble dan D.P. Kadam, “ Design of Fuzzy Controller and Supervisor for Load Frequency Control of Micro Hydro Power Plant”, International Journal of Scientific and Research Publicatiob “ , Vol.4 , Issue 1 January 2014, ISSN 2250-3153.