

# ANALISIS PENGATURAN TEGANGAN GENERATOR SINKRON BERDASARKAN PERUBAHAN BEBAN DAYA MENGGUNAKAN *STATIC EXCITATION SYSTEM* BERBASIS MATLAB *SIMULINK* R2015A

Juni Hardiansyah, Salahuddin, Taufiq

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh Lhokseumawe, Muara Satu, Aceh Utara, Aceh, Indonesia  
E-mail: [juni.170150025@mhs.unimal.ac.id](mailto:juni.170150025@mhs.unimal.ac.id)

**Abstrak** - Penelitian ini membahas tentang analisis pengaturan tegangan generator sinkron berdasarkan perubahan beban daya aktif dan reaktif menggunakan sistem eksitasi statis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan beban daya aktif dan reaktif pada sisi beban terhadap besar arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan pada rotor generator untuk dapat menciptakan tegangan yang stabil. Metode penelitian yang dilakukan ialah menggunakan *software* matlab *simulink* R2015a untuk mensimulasikan sistem eksitasi statis. Dalam simulasi tersebut parameter yang diubah ialah data beban daya aktif dan reaktif pada sisi beban, sedangkan parameter yang diamati adalah data tegangan keluaran generator, arus eksitasi, dan tegangan eksitasi. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis tersebut, terdapat pengaruh perubahan beban daya aktif dan reaktif terhadap besar arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan pada rotor generator. Semakin besar beban daya aktif dan reaktif yang ditanggung oleh generator maka semakin besar pula arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan pada rotor generator. Untuk %Vr yang diperoleh pada pengaturan tegangan ini sebesar +0% sampai +0,0508%, dengan %Vr rata-rata sebesar +0,0272%.

**Kata Kunci:** Eksitasi Statis, Generator, Matlab Simulink, Pengaturan Tegangan

## I. PENDAHULUAN

Saat ini di Indonesia kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat, hal ini dapat dilihat dari keputusan Menteri ESDM 143/K/20/MEM/2019 tentang “Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional Tahun 2019-2038”. Dalam keputusan tersebut, Menteri ESDM memproyeksikan rata-rata pertumbuhan konsumsi energi listrik nasional meningkat sekitar 6,9% pertahunnya [1].

Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat dari tahun ke tahun, maka keandalan suatu sistem pembangkit listrik memiliki peranan yang sangat penting. Salah satu komponen yang sangat penting dalam sistem pembangkit listrik untuk dapat menghasilkan energi listrik adalah generator. Pada generator, perubahan energi mekanis menjadi energi listrik dapat terjadi karena terdapat sistem eksitasi [2].

Berdasarkan sumber tegangan eksitasi, sistem eksitasi diklasifikasikan menjadi 2 jenis, yaitu sistem eksitasi statis (*static excitation system*) dan sistem eksitasi dinamis (*dynamic excitation system*). Sistem eksitasi statis

merupakan suatu sistem yang dirancang untuk dapat memenuhi semua kebutuhan beban dengan daya yang besar (100 MW-400 MW) [3].

Salah satu pembangkit listrik di Indonesia yang menggunakan sistem eksitasi statis adalah PLTU Pangkalan Susu OMU. Pembangkit listrik ini memiliki kapasitas daya sebesar 2 x 220 MW yang terdiri dari 2 unit generator. Kondisi saat ini, pembangkit listrik tersebut telah beroperasi selama lebih kurang 7 tahun dan telah mengalami berbagai permasalahan yang tentunya dapat menurunkan performa generator tersebut [4].

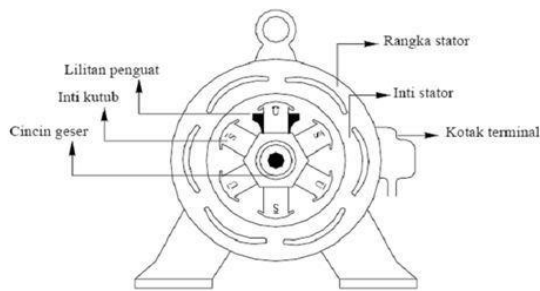
Dengan menghasilkan daya berkapasitas besar, maka perubahan beban daya yang terjadi pada pembangkit listrik tersebut dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan keluaran generator tersebut. Sehingga akan mempengaruhi besarnya tegangan pada sistem tenaga listrik secara keseluruhan[2]. Di dalam penelitian ini, penulis akan memodelkan dan menyimulasikan sistem eksitasi statis pada unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU dengan menggunakan *software* MATLAB *simulink* R2015a.

Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui besarnya arus eksitasi yang dibutuhkan untuk tetap menstabilkan tegangan *output* generator terhadap perubahan beban, serta mengetahui persentase nilai rata-rata pengaturan tegangan berdasarkan hasil simulasi sistem eksitasi statis dengan menggunakan *software* MATLAB *simulink* R2015a.

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Generator Sinkron

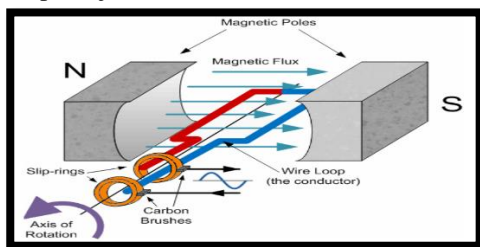
Generator sinkron adalah salah satu jenis mesin listrik yang berfungsi sebagai pengkonversi atau pengubah energi mekanis dalam bentuk putaran yang diperoleh dari putaran rotor dikopel bersama penggerak mula (*prime mover*) menjadi energi listrik yang kemudian dapat menghasilkan tegangan dengan arus bolak balik (AC). Dikatakan sinkron karena jumlah putaran pada rotor generator tersebut sama dengan jumlah putaran medan magnet pada statornya. Energi listrik yang dihasilkan generator diperoleh dengan cara proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya. Pengkonversian atau perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet pada rotor dengan kumparan jangkar pada stator [5].



Gambar 1. Konstruksi Generator Sinkron [7]

Pada hakikatnya konstruksi generator sinkron terdiri atas stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian generator yang tidak bergerak berisi kumparan-kumparan sebagai tempat untuk menerima induksi magnet yang berasal dari rotor. Induksi magnet ini akan menghasilkan Arus AC (bolak-balik) yang disalurkan menuju ke beban melalui kumparan stator tersebut. Komponen stator ini berbentuk sebuah rangka silinder atau tabung dengan lilitan (kumparan) kawat. Rotor merupakan bagian generator yang bergerak terdapat kumparan-kumparan yang berfungsi untuk membangkitkan medan magnet berasal dari arus DC dengan disearahkan melalui komutator. Sumber listrik yang dihasilkan komutator tersebut dihasilkan melalui sikat (*brush*) [7]. Celah udara adalah ruang kosong antara rotor dan stator yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluks atau induksi energi listrik yang ke stator dan memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet [6].

## 2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron



Gambar 2. Konsep Dasar Generator [3]

Pada dasarnya prinsip kerja generator sinkron menggunakan hukum *Faraday* yang menyatakan bahwa jika sebuah penghantar yang berada pada medan magnet kemudian penghantar tersebut berubah-ubah memotong sumbu medan magnet, maka pada kumparan generator tersebut akan terbentuk GGL [3]. Berikut merupakan proses sebuah generator sinkron dapat menghasilkan tegangan listrik adalah sebagai berikut, yaitu [5]:

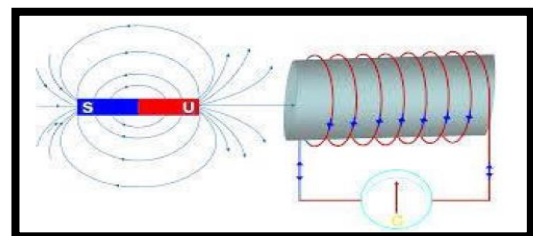
1. Kumparan pada rotor disuplai dengan arus searah (DC) yang kemudian menghasilkan fluks magnet.
2. Kemudian rotor diputar bersama turbin (*prime mover*) dengan kecepatan konstan sebesar  $n$  (sesuai spesifikasi yang dimiliki).
3. Sehingga garis gaya magnet bergerak menginduksi kumparan pada stator.
4. Putaran rotor dengan dikopel bersama turbin (*prime mover*) akan memutar medan magnet yang dihasilkan kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada

putaran rotor akan menginduksi kumparan jangkar, sehingga pada kumparan jangkar tersebut terjadi perubahan fluks magnetik. Perubahan fluks magnetik yang terjadi pada ujung-ujung kumparan jangkar tersebut akan menimbulkan GGL induksi.

## 2.3 Medan Elektromagnetik

Medan elektromagnetik merupakan prinsip untuk membangkitkan medan magnet pada kumparan dengan menggunakan arus listrik searah (DC). Jika sebuah kumparan dialiri arus searah (DC), maka kumparan tersebut akan menimbulkan medan magnet. Medan magnet merupakan ruang di sekitar magnet yang memiliki gaya magnetik. Gaya magnet yang timbul berasal dari 2 kutub yaitu kutub utara (U) dan kutub selatan (S). Suatu muatan yang bergerak (arus listrik) dapat menimbulkan medan magnet di ruang sekitarnya. Apabila 2 kutub magnet yang berbeda (S-U dan U-S) didekatkan maka akan saling tarik-menarik, sedangkan jika 2 kutub magnet sejenis (S-S dan U-U) didekatkan maka akan saling tolak-menolak [10].

Berdasarkan hasil percobaan **Michael Faraday (1831)**, apabila suatu medan magnet digerak-gerakkan di dalam kumparan, maka kumparan tersebut akan menimbulkan tegangan listrik. Tegangan listrik yang timbul akibat hasil gerakan magnet disebut dengan tegang dengan arus induksi (arus bolak-balik). Bila jumlah garis gaya magnet yang masuk dalam kumparan tersebut berubah, maka pada ujung-ujung kumparan akan timbul Gaya Gerak Listrik (GGL) [10]. Berikut merupakan gambaran dari percobaan **Michael Faraday (1831)** adalah sebagai berikut.



Gambar 3. Percobaan *Michael Faraday* (1831) [10]

## 2.4 Pengaturan Tegangan *Output* Generator

Tegangan keluaran generator AC sering mengalami fluktuasi (tidak stabil) dengan berubahnya beban pada generator itu sendiri. Oleh karena itu, untuk semua sistem operasi peralatan listrik membutuhkan sumber tegangan yang digunakan tetap stabil, agar peralatan listrik tersebut tidak cepat rusak. Pengaturan *output* tegangan generator dilakukan dengan cara mengatur besar kecilnya arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan pada rotor generator baik secara manual maupun secara otomatis [7].

Tegangan keluaran generator sinkron dikatakan stabil apabila nilai tegangan tersebut masih dalam batasan standar SPLN 1 : 1995. Berikut merupakan standar nilai tegangan berdasarkan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN), yaitu sebagai berikut:

Tabel 1. Standar Tegangan Berdasarkan SPLN [12]

Tegangan Nominal (kV)	Kondisi Normal	
	Batas Minimal	Batas Maksimal
500	-5%	+5%
150	-10%	+5%
70	-10%	+5%
20	-10%	+5%

Untuk mengetahui persentase nilai pengaturan tegangan masih dalam batasan standar berdasarkan SPLN dapat dihitung melalui persamaan berikut:

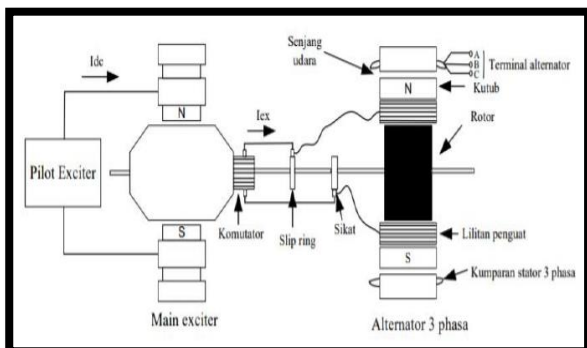
$$\%V_r = \frac{(V_{out} - V_n)}{V_n} \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan : %Vr = Tegangan Pengaturan (%)  
Vout = Tegangan Generator (V)  
Vn = Tegangan Nominal (V)

**2.5 Sistem Eksitasi**

Sistem eksitasi adalah suatu sistem yang digunakan untuk penguatan medan yang terdapat pada generator dengan cara memberikan arus penguat pada kumparan medan generator yang muncul karena adanya medan magnet yang disebabkan oleh bantuan arus searah (DC). Arus eksitasi sendiri merupakan suatu arus yang diberikan pada kutub magnetik dengan cara mengatur besar dan kecilnya nilai arus eksitasi tersebut, sehingga diperoleh nilai tegangan *output* generator yang diinginkan beserta daya reaktifnya [13].

**2.5.1 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat**



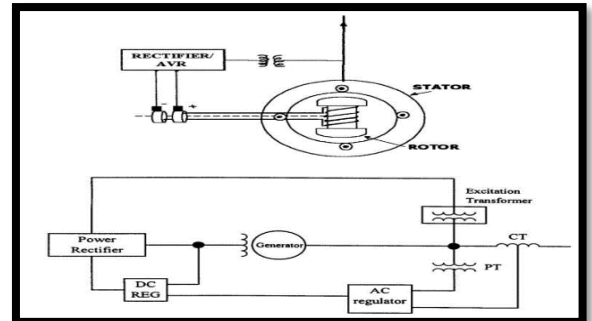
Gambar 4. Sistem Eksitasi Menggunakan *Brush* [13]

Sistem eksitasi menggunakan sikat (*brush excitation*), sumber tenaga listrik berasal dari sumber listrik yang berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak-balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*. Pada generator dengan kapasitas kecil yaitu dibawah 400 MW untuk sistem eksitasinya menggunakan sikat, karena sistem eksitasi menggunakan sikat untuk kapasitas generator yang kecil lebih efisien. Untuk jenis sumber tegangan eksitasi dibagi menjadi 2 yaitu sebagai berikut [3]:

**a. Sistem eksitasi statis**

Sistem eksitasi statis sumber tegangannya berasal dari keluran 3 *phase* generator itu sendiri (*self excitation*). Sehingga pada sistem eksitasi statis ini tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber tegangan. Sumber keluaran 3 *phase* generator tersebut diturunkan tegangannya

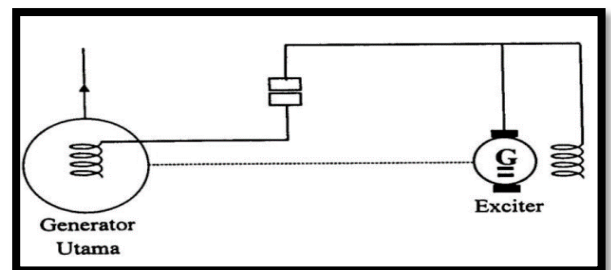
menggunakan trafo yang biasanya disebut dengan trafo eksitasi (*Excitation Transformer*). Kemudian setelah tegangan diturunkan, tegangan tersebut disearahkan menggunakan *rectifier* (*thyristor*) karena sumber tegangan yang dibutuhkan untuk sistem eksitasi adalah tegangan DC.



Gambar 5. Sistem Eksitasi Statis [3]

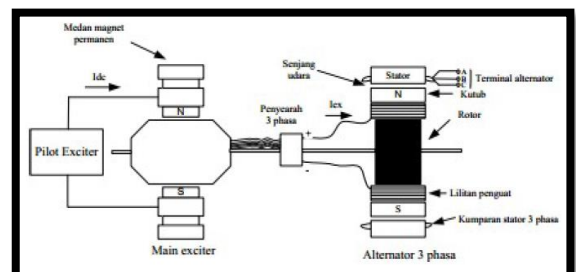
**b. Sistem eksitasi dinamis**

Sistem eksitasi dinamis merupakan sistem eksitasi yang sumber eksitasinya diperoleh dari mesin yang bergerak, seperti generator kecil. Sehingga pada sistem eksitasi dinamis seakan-akan terdapat 2 buah generator seperti eksitasi tanpa sikat, dalam satu poros yang diputar menggunakan turbin yang sama. Generator utama adalah generator yang keluarannya dipakai untuk konsumen, sedangkan generator kedua keluarannya hanya digunakan untuk sistem eksitasi saja. Generator kedua yang berukuran kecil biasanya sering disebut *exciter*.



Gambar 6. Sistem Eksitasi Dinamis [3]

**2.5.2 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)**



Gambar 7. Sistem Eksitasi Tanpa *Brush* [13]

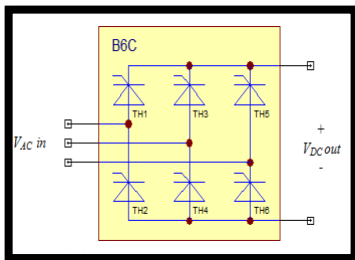
Pada sistem eksitasi tanpa sikat dalam penggunaannya terdapat pada generator dengan kapasitas besar yaitu diatas 400 MW. Penggunaan sistem eksitasi dengan sikat untuk kapasitas generator yang besar akan menimbulkan percikan api pada *exciter*, sehingga dapat menimbulkan kerusakan

pada generator. Sistem eksitasi tanpa sikat tidak memerlukan sumber listrik eksternal, karena sumber tegangan disuplai langsung dari *pilot exciter* ke rotor generator utama. *Pilot exciter* terdiri dari sebuah generator arus bolak-balik (AC) dengan magnet permanen yang terpasang pada satu poros rotor bersamaan dengan penyearah.

**2.6 Thyristor**

*Thyristor* adalah semikonduktor yang bekerja seperti dioda. Perbedaan utama antara *thyristor* dan dioda adalah kemampuannya untuk mengontrol arus dan daya. Hal ini dilakukan dengan cara *thyristor* membiarkan arus yang masuk pada terminal *gate* dialirkan arus pulsa positif. Proses pengaliran arus listrik pada terminal *gate* ini disebut penyulutan/pemicu/*triggering*, sedangkan proses pemutusan (*off*) dari kondisi (*on*) ini disebut komutasi [14].

Secara umum, *thyristor* akan menghantarkan arus masuk selama terkena beban arus positif yang terjadi ketika  $\alpha \leq 90^0$ . Tetapi ketika  $90^0 \leq \alpha \leq 180^0$ , *thyristor* bertindak sebagai inverter bukan penyearah [14]. Berikut merupakan rangkaian penyearah 3 *phase* gelombang penuh dengan *six-pulse thyristor* yang ditunjukkan pada gambar 8. sebagai berikut.



Gambar 8. Rangkaian Penyearah 3 Phase Gelombang Penuh

**2.7 Daya Listrik**

Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha seperti panas, cahaya, mekanis/gerak, dan suara. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau *Horsepower* (HP) [15]. Dalam teori kelistrikan mengenai daya listrik, terdapat 3 jenis daya listrik yaitu:

**2.7.1 Daya nyata (Watt)**

Daya nyata atau daya listrik dalam satuan Watt yang merupakan daya nyata digunakan dalam kerja atau tenaga. Seperti putaran motor, penerangan, pemanas. Daya nyata dapat dirumuskan sebagai berikut [15] :

$$P = V \times I \times \cos \phi \text{ (1 phase) } \dots\dots\dots(2.2)$$

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \phi \text{ (3 phase) } \dots\dots\dots(2.3)$$

- Keterangan: P = Daya Nyata (Watt)  
 V = Tegangan (V)  
 I = Arus (A)  
 Cos  $\phi$  = Faktor Daya  
 V<sub>L</sub> = Tegangan Jaringan (V)  
 I<sub>L</sub> = Arus Jaringan (A)

**2.7.2 Daya reaktif (VAR)**

Daya reaktif adalah daya listrik dalam satuan VAR yang terdiri dari sifat induktif yang digunakan untuk membangkitkan medan magnet dan sifat kapasitif yang

digunakan untuk membangkitkan medan listrik. Daya ini merupakan daya yang tidak berguna sehingga tidak dapat diubah menjadi tenaga atau usaha. Namun daya ini dibutuhkan untuk proses transmisi pada beban. Daya reaktif dapat dirumuskan sebagai berikut [15]:

$$Q = V \times I \times \sin \phi \text{ (1 phase) } \dots\dots\dots(2.4)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \phi \text{ (3 phase) } \dots\dots\dots(2.5)$$

- Keterangan: Q = Daya Reaktif (VAR)  
 V = Tegangan (V)  
 I = Arus (A)  
 V<sub>L</sub> = Tegangan Jaringan (V)  
 I<sub>L</sub> = Arus Jaringan (A)

**2.7.3 Daya semu (VA)**

Daya semu adalah daya listrik dalam satuan VA yang merupakan daya kompleks gabungan dari daya aktif dan reaktif. Daya kompleks ini merupakan daya listrik yang dijual oleh PLN kepada pelanggannya. Daya semu dapat dinyatakan sebagai berikut [15]:

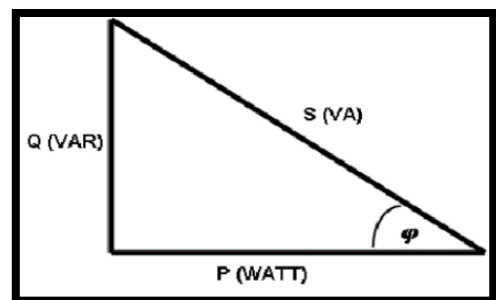
$$S = V \times I \text{ (1 phase) } \dots\dots\dots(2.6)$$

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \text{ (3 phase) } \dots\dots\dots(2.7)$$

- Keterangan: S = Daya Semu (VA)  
 V = Tegangan (V)  
 I = Arus (A)  
 V<sub>L</sub> = Tegangan Jaringan (V)  
 I<sub>L</sub> = Arus Jaringan (A)

**2.8 Segitiga Daya (Power Triangle)**

Segitiga daya (*power triangle*) merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan antara ketiga daya yakni daya aktif, daya semu, dan daya reaktif dapat digambarkan seperti gambar di bawah ini [15].



Gambar 9. Segitiga Daya (Power Triangle) [15]

Pada gambar 2.16 terlihat bahwa Daya aktif (P) digambarkan dengan garis horizontal yang lurus. Daya reaktif (Q) berbeda sudut sebesar 90<sup>0</sup> dari daya aktif. Sedangkan daya semu (S) adalah hasil penjumlahan secara vektor antara daya aktif dengan daya reaktif. Untuk mengetahui dua dari ketiga daya maka dapat menghitung salah satu daya yang belum diketahui dengan menggunakan persamaan berikut:



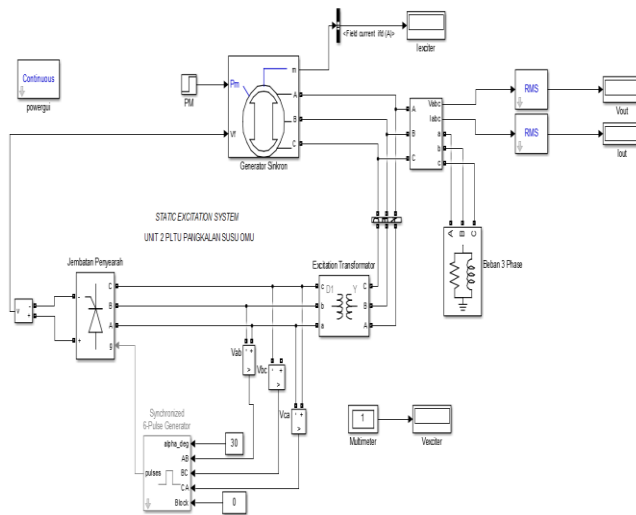
Tabel 2. Hubungan Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Daya Semu [15]

Daya Aktif (P)	Daya Reaktif (Q)	Daya Semu (S)
$P^2 = S^2 - Q^2$	$Q^2 = S^2 - P^2$	$S^2 = P^2 + Q^2$
$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Deskripsi Model Simulasi Penelitian

Gambar di bawah ini merupakan sistem eksitasi statis (*static excitation system*) pada unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU yang telah dimodelkan menggunakan *software* MATLAB *simulink* R2015a. Pada sistem ini terdiri dari generator sinkron 3 *phase* yang memiliki daya, tegangan, dan frekuensi keluaran berkapasitas berturut-turut sebesar 220 MW; 15,75 kV; dan 50 Hz yang dihubungkan ke beban 3 *phase* paralel dengan asumsi sebagai beban seimbang.



Gambar 10. Pemodelan Simulasi Sistem Eksitasi Statis

Sumber tegangan dan arus sistem eksitasi yang digunakan berasal dari sumber 3 *phase* keluaran generator sinkron yang kemudian sumber 3 *phase* tersebut dihubungkan ke transformator eksitasi. yang digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran generator sinkron berkapasitas 15,75 kV menjadi 850 V. Transformator yang digunakan pada penelitian ini bermode bintang (Y) pada sisi primer dan bermode delta ( $\Delta$ ) pada sisi sekunder.

#### 3.2 Hasil Simulasi

Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini merupakan simulasi sistem eksitasi statis (*static excitation system*) yang digunakan untuk mengatur besar dan kecilnya arus eksitasi yang nantinya akan berpengaruh terhadap kestabilan tegangan keluaran generator sinkron yang terhubung ke beban yang selalu berubah-ubah tiap saat (fluktuasi).

##### 3.2.1 Hasil Simulasi Berdasarkan Variasi Sudut $\alpha$

Besar nilai tegangan nominal pada keluaran generator sinkron dalam penelitian ini (generator sinkron unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU) ialah 15,75 kV atau 15750 V. Pada simulasi sistem eksitasi statis berdasarkan variasi sudut  $\alpha$  (sudut penyalakan *thyristor*) dijalankan dengan keadaan daya beban konstan, yakni pada daya beban rata-rata generator

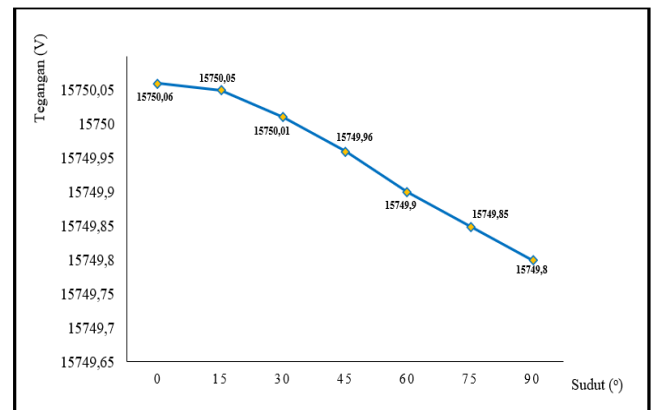
sinkron tersebut berdasarkan data operasional pada generator tersebut sebesar 178,30 MW dan 34,70 MVAR. Parameter yang diubah pada simulasi ini ialah nilai penyalakan sudut *thyristor* (Sudut  $\alpha$ ) untuk memperoleh perbedaan arus eksitasi yang nantinya akan berpengaruh terhadap besar dan kecilnya tegangan keluaran generator sinkron yang dihasilkan. Berikut merupakan hasil simulasi sistem eksitasi statis berdasarkan variasi sudut  $\alpha$  ialah sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Simulasi Berdasarkan Sudut  $\alpha$

Sudut $\alpha$	Pengukuran Tegangan Output Antar Phase (V)			Tegangan Rata-Rata 3 Phase (V)
	AB	BC	AC	
0°	15741,33	15750,81	15758,05	15750,06
15°	15741,32	15750,80	15758,04	15750,05
30°	15741,28	15750,76	15758,01	15750,01
45°	15741,23	15750,71	15757,96	15749,96
60°	15741,16	15750,64	15757,90	15749,90
75°	15741,11	15750,59	15757,84	15749,85
90°	15741,06	15750,55	15757,80	15749,80

sumber: Hasil Simulasi MATLAB *Simulink*

Berikut merupakan grafik simulasi sistem eksitasi statis sebagai pengaturan tegangan generator sinkron. Dalam grafik ini akan terlihat pengaruh dari variasi besar sudut  $\alpha$  sebagai sudut penembakan/penyalakan *thyristor* terhadap besar tegangan keluaran generator sinkron yang terhubung pada beban berkapasitas 178,30 MW dan 34,70 MVAR. Besar beban tersebut merupakan besar beban harian rata-rata pada data operasional generator unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU.



Gambar 10. Pengaruh Variasi Sudut  $\alpha$  Terhadap Tegangan

Berdasarkan hasil simulasi secara keseluruhan yaitu pada penembakan sudut  $\alpha$  sebesar 0° - 90°, terlihat bahwa semakin besar sudut  $\alpha$  yang diberikan maka akan semakin kecil tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron tersebut. Hal ini dikarenakan semakin besar sudut yang ditembakkan pada *thyristor* akan menyebabkan penundaan atau penghambatan arus eksitasi yang mengalir sehingga akan memperkecil tegangan keluaran pada generator sinkron. Pada simulasi pada daya beban 178,30 MW dan 34,70 MVAR pengaturan penyalakan sudut *thyristor* yang paling tepat dalam menstabilkan tegangan keluaran generator sinkron pada nominalnya (15750 V) yaitu pada sudut 30°, karena pada sudut tersebut nilai tegangan rata-rata antar 3 *phase* yang dihasilkan paling mendekati dengan nilai

tegangan nominal sebesar 15750,01 V. Dalam hal ini, untuk dapat mempertahankan atau menstabilkan tegangan keluaran generator sinkron terhadap beban perlu dilakukan pengurangan atau penambahan arus eksitasi yang akan disuplai ke kumparan medan rotor generator sinkron tersebut, dengan cara memperkecil atau memperbesar sudut penyalaaan *thyristor*. Apabila tegangan keluaran generator sinkron turun, maka arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan rotor generator harus diperbesar dengan cara memperkecil sudut penyalaaan *thyristor*. Sedangkan apabila tegangan keluaran generator sinkron tersebut naik, maka arus eksitasi yang disuplai pada kumparan medan rotor generator tersebut diperkecil dengan cara memperbesar sudut penyalaaan *thyristor* tersebut.

### 3.2.2 Hasil Simulasi Pengaturan Tegangan Berdasarkan Perubahan Beban Daya

Pada tabel 4. merupakan data hasil simulasi pengaturan tegangan generator sinkron berdasarkan perubahan daya beban menggunakan sistem eksitasi statis (*static excitation system*) dengan nilai sudut penyalaaan *thyristor* sebesar 30°. Data daya beban yang digunakan merupakan data daya beban harian selama 24 jam pada generator sinkron unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU.

Tabel 4. Data Hasil Simulasi Pengaturan Tegangan

Pukul (WIB)	Daya Beban		Tegangan Output (kV)			Arus Output (A)			V <sub>Exc</sub> (V)	i <sub>Exc</sub> (A)
	MW	MVAR	AB	BC	AC	A	B	C		
08.00	162,72	33,10	15,747	15,756	15,762	6088,84	6279,41	6285,50	261,78	1438,67
09.00	172,46	35,02	15,747	15,756	15,763	6453,11	6655,35	6662,25	262,69	1451,29
10.00	178,42	36,23	15,746	15,756	15,764	6676,11	6885,96	6893,4	263,24	1459,23
11.00	177,70	36,02	15,746	15,756	15,763	6648,59	6856,77	6864,13	263,15	1457,94
12.00	186,87	37,95	15,747	15,757	15,765	6992,69	7213,48	7221,71	264,04	1470,85
13.00	189,80	26,99	15,744	15,752	15,758	7028,03	7131,39	7143,90	262,10	1424,85
14.00	194,93	39,41	15,743	15,753	15,762	7291,41	7520,55	7529,55	264,58	1480,58
15.00	192,58	38,93	15,743	15,753	15,762	7203,55	7429,6	7438,37	264,38	1477,33
16.00	192,29	38,95	15,743	15,753	15,762	7193,42	7420,03	7428,78	264,38	1477,33
17.00	195,81	39,69	15,745	15,756	15,765	7326,30	7557,82	7566,93	264,80	1482,74
18.00	195,71	27,87	15,742	15,751	15,757	7246,26	7359,57	7366,56	262,50	1431,22
19.00	195,91	27,92	15,742	15,751	15,757	7253,79	7367,41	7374,41	262,52	1431,54
20.00	197,43	39,89	15,742	15,753	15,761	7384,42	7616,50	7625,75	264,77	1483,82
21.00	198,45	40,22	15,742	15,752	15,761	7423,45	7658,30	7667,68	264,89	1485,77
22.00	198,18	40,17	15,742	15,753	15,761	7413,41	7647,97	7657,32	264,86	1485,43
23.00	161,78	32,85	15,744	15,753	15,760	6052,28	6240,96	6246,96	261,57	1436,75
00.00	165,77	33,68	15,747	15,756	15,762	6207,78	6396,74	6403,08	262,07	1442,52
01.00	178,98	36,30	15,746	15,756	15,764	6696,83	6906,89	6914,37	263,29	1459,83
02.00	160,89	36,67	15,749	15,758	15,766	6052,04	6288,06	6294,63	262,42	1453,64
03.00	156,76	31,91	15,750	15,759	15,765	5967,08	6050,44	6056,06	261,35	1431,64
04.00	145,34	29,62	15,751	15,759	15,764	5439,97	5609,45	5614,22	260,28	1417,42
05.00	157,55	33,01	15,750	15,759	15,766	5903,87	6099,13	6104,95	261,61	1436,75
06.00	159,90	32,49	15,749	15,758	15,764	5983,85	6170,47	6176,32	261,60	1435,26
07.00	162,88	33,01	15,747	15,756	15,763	6094,14	6283,51	6289,60	261,79	1438,46

Sumber: Hasil Simulasi MATLAB *Simulink*

### 3.2.3 Analisis Hasil Simulasi Pengaturan Tegangan

Untuk mempermudah penulis dalam menganalisis hasil simulasi pengaturan tegangan generator sinkron berdasarkan

perubahan daya beban pada unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU dengan menggunakan grafik hasil simulasi sistem tersebut, maka penulis melakukan perhitungan nilai rata-rata pengukuran tegangan 3 *phase* dan arus 3 *phase* keluaran generator sinkron. Pada tabel 5. merupakan data hasil simulasi yang telah dilakukan perhitungan nilai rata-rata pengukuran tegangan 3 *phase* dan arus 3 *phase* keluaran generator sinkron.

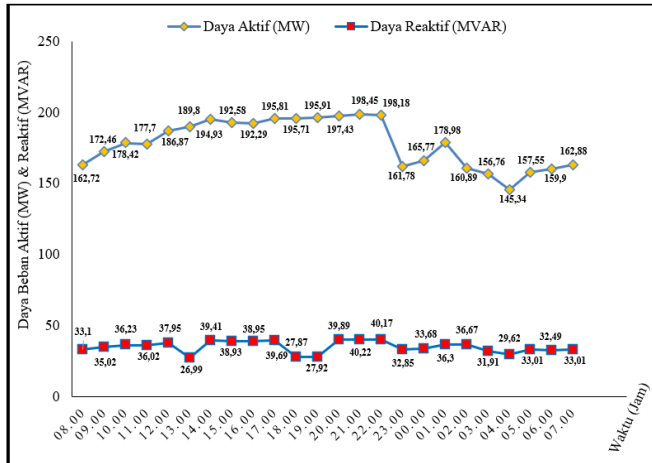
Tabel 5. Perhitungan Tegangan dan Arus Rata-Rata 3 *Phase*

Pukul (WIB)	Tegangan Output (kV)			Rata-Rata Tegangan Output (kV)	Arus Output (A)			Rata-Rata Arus Output (A)
	AB	BC	AC		A	B	C	
08.00	15,747	15,756	15,762	15,755	6088,84	6279,41	6285,50	6217,92
09.00	15,747	15,756	15,763	15,755	6453,11	6655,35	6662,25	6590,24
10.00	15,746	15,756	15,764	15,755	6676,11	6885,96	6893,4	6818,49
11.00	15,746	15,756	15,763	15,755	6648,59	6856,77	6864,13	6789,83
12.00	15,747	15,757	15,765	15,756	6992,69	7213,48	7221,71	7142,63
13.00	15,744	15,752	15,758	15,751	7028,03	7131,39	7143,90	7101,11
14.00	15,743	15,753	15,762	15,753	7291,41	7520,55	7529,55	7447,17
15.00	15,743	15,753	15,762	15,753	7203,55	7429,6	7438,37	7357,17
16.00	15,743	15,753	15,762	15,753	7193,42	7420,03	7428,78	7347,41
17.00	15,745	15,756	15,765	15,755	7326,30	7557,82	7566,93	7483,68
18.00	15,742	15,751	15,757	15,750	7246,26	7359,57	7366,56	7324,13
19.00	15,742	15,751	15,757	15,750	7253,79	7367,41	7374,41	7331,87
20.00	15,742	15,753	15,761	15,752	7384,42	7616,50	7625,75	7542,22
21.00	15,742	15,752	15,761	15,752	7423,45	7658,30	7667,68	7583,14
22.00	15,742	15,753	15,761	15,752	7413,41	7647,97	7657,32	7572,90
23.00	15,744	15,753	15,760	15,752	6052,28	6240,96	6246,96	6180,07
00.00	15,747	15,756	15,762	15,755	6207,78	6396,74	6403,08	6335,87
01.00	15,746	15,756	15,764	15,755	6696,83	6906,89	6914,37	6839,36
02.00	15,749	15,758	15,766	15,758	6052,04	6288,06	6294,63	6211,58
03.00	15,750	15,759	15,765	15,758	5967,08	6050,44	6056,06	6024,53
04.00	15,751	15,759	15,764	15,758	5439,97	5609,45	5614,22	5554,55
05.00	15,750	15,759	15,766	15,758	5903,87	6099,13	6104,95	6035,98
06.00	15,749	15,758	15,764	15,757	5983,85	6170,47	6176,32	6110,21
07.00	15,747	15,756	15,763	15,755	6094,14	6283,51	6289,60	6222,42

Sumber: Hasil Perhitungan Penulis

### a. Perubahan Beban Daya Terhadap Waktu

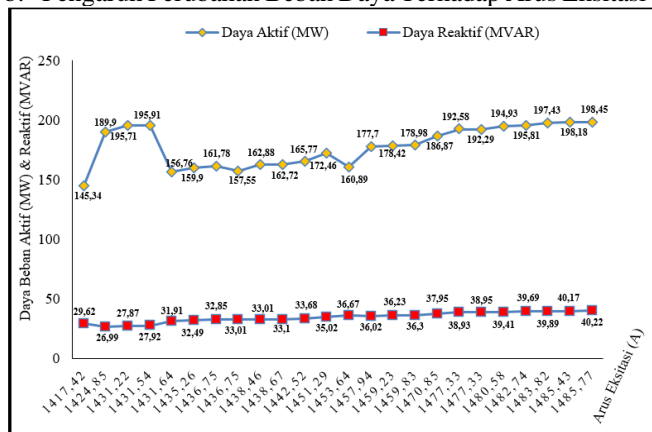
Berikut merupakan grafik perubahan daya beban aktif dan reaktif terhadap waktu (jam) pada tanggal 23-24 Juli 2020 di unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU. Waktu yang dijadikan sampel data pada simulasi dalam penelitian ini ialah selama 24 jam, yakni mulai dari jam 08.00 WIB (23 Juli 2020) sampai dengan pukul 07.00 WIB (24 Juli 2020).



Gambar 11. Perubahan Beban Daya Terhadap Waktu

Berdasarkan grafik yang terdapat pada gambar 4.2 beban daya aktif (MW) dan reaktif (MVAR) pada unit 2 PLTU Pangkalan Susu tidak statis pada daya beban maksimum seperti yang terdapat di *nameplate* generator tersebut (220 MW), melainkan terjadinya perubahan-perubahan atau ketidakstabilan (fluktuasi) terhadap waktu. Untuk beban daya aktif (MW) terendah terjadi pada pukul 04.00 WIB, yaitu sebesar 145,34 MW. Hal ini dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu-waktu istirahat (tidur) para konsumen rumah tangga, sehingga tidak banyak konsumen yang mengkonsumsi daya listrik. Sedangkan daya aktif (MW) tertinggi terjadi pada pukul 21.00 WIB, yaitu sebesar 198,45 MW. Hal ini dikarenakan pada waktu tersebut merupakan beban puncak pada generator tersebut. Untuk beban daya reaktif (MVAR) terendah terjadi pada pukul 13.00 WIB sebesar 26,99 MVAR sedangkan beban daya reaktif tertinggi terjadi pada pukul 21.00 WIB sebesar 40,22 MVAR.

b. Pengaruh Perubahan Beban Daya Terhadap Arus Eksitasi



Gambar 12. Pengaruh Perubahan Beban Daya Terhadap I<sub>eks</sub>

Semakin besar nilai beban daya (beban daya aktif dan reaktif) pada suatu sistem, maka akan semakin besar pula arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan pada rotor generator tersebut guna untuk menghasilkan tegangan yang stabil terhadap beban. Namun besar beban daya reaktif lebih berpengaruh terhadap besar arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan pada rotor generator. Hal ini dikarenakan besarnya beban daya reaktif dapat menurunkan tegangan

yang dihasilkan oleh generator tersebut, sehingga diperlukan arus eksitasi yang besar untuk dapat menaikkan kembali tegangan keluaran tersebut.

3.2.4 Analisis Persentase Rata-Rata Pengaturan Tegangan

Kualitas besarnya tegangan yang dihasilkan oleh suatu generator sinkron juga menjadi salah satu tolak ukur dalam menentukan tingkatan dari performa suatu generator. Nilai batasan berdasarkan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN 1 : 1995) ialah -10% dan +5% dari besarnya tegangan keluaran generator berdasarkan spesifikasi yang dimilikinya. Berdasarkan *nameplate* generator sinkron unit 2, besar nilai tegangan yang dihasilkan sebesar 15,75 kV. Sehingga, besar tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron berdasarkan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN 1 : 1995) ialah sebesar 14,175 kV sampai 16,5375 kV. Oleh karena itu, berikut merupakan nilai persentase pengaturan tegangan generator sinkron berdasarkan hasil simulasi sistem eksitasi statis menggunakan *software* MATLAB *simulink* R2015a adalah sebagai berikut.

$$\% V_r = \frac{(V_{out} - V_n)}{V_n} \times 100\%$$

$$\% V_r = \frac{(15755 - 15750)}{15750} \times 100\%$$

$$= +0,0317\% \text{ (masih dalam batas SPLN 1:1995)}$$

Dengan melakukan perhitungan yang sama, berikut merupakan hasil perhitungan besar nilai persentase pengaturan tegangan generator sinkron berdasarkan hasil simulasi sistem eksitasi statis yang telah dihitung menggunakan *software* Microsoft *excel*, yaitu sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Perhitungan Persentase Pengaturan Tegangan

Pukul	Vn (kV)	Vout (kV)	Batas Standar Tegangan (SPLN 1 : 1995)	Perhitungan %Vr	Dalam Batasan	
					Ya	Tidak
08.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
09.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
10.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
11.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
12.00	15,750	15,756	-10% s.d. +5%	+0,0381%	✓	
13.00	15,750	15,751	-10% s.d. +5%	+0,0063%	✓	
14.00	15,750	15,753	-10% s.d. +5%	+0,0190%	✓	
15.00	15,750	15,753	-10% s.d. +5%	+0,0190%	✓	
16.00	15,750	15,753	-10% s.d. +5%	+0,0190%	✓	
17.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
18.00	15,750	15,750	-10% s.d. +5%	0%	✓	
19.00	15,750	15,750	-10% s.d. +5%	0%	✓	
20.00	15,750	15,752	-10% s.d. +5%	0,0127%	✓	
21.00	15,750	15,752	-10% s.d. +5%	0,0127%	✓	
22.00	15,750	15,752	-10% s.d. +5%	0,0127%	✓	
23.00	15,750	15,752	-10% s.d. +5%	0,0127%	✓	
00.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
01.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
02.00	15,750	15,758	-10% s.d. +5%	0,0508%	✓	
03.00	15,750	15,758	-10% s.d. +5%	0,0508%	✓	
04.00	15,750	15,758	-10% s.d. +5%	0,0508%	✓	
05.00	15,750	15,758	-10% s.d. +5%	0,0508%	✓	
06.00	15,750	15,757	-10% s.d. +5%	0,0444%	✓	
07.00	15,750	15,755	-10% s.d. +5%	+0,0317%	✓	
<b>%Vr Rata-Rata</b>				<b>+0,0272%</b>		

Sumber: Hasil Perhitungan Penulis

#### IV. KESIMPULAN

1. Semakin besar daya beban (daya beban aktif dan daya beban reaktif) yang dipikul oleh generator sinkron, maka arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan pada rotor generator juga diperbesar sehingga kuat medan magnet pada sisi rotor semakin kuat agar tegangan yang dihasilkan oleh generator tetap stabil terhadap perubahan daya beban. Arus eksitasi diperbesar dengan cara memperbesar tegangan eksitasi yang disuplai ke kumparan medan tersebut. Untuk memperbesar tegangan eksitasi pada sistem tersebut dilakukan dengan cara memperbesar sudut penyalaaan *thyristor*.
2. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini, besar nilai persentase pengaturan tegangan (%Vr) berdasarkan hasil simulasi sistem eksitasi statis terhadap perubahan beban daya aktif dan reaktif yang terdapat pada generator unit 2 PLTU Pangkalan Susu OMU menggunakan *software* MATLAB *simulink* R2015a, diperoleh sebesar 0% sampai +0,0508%, dengan persentase pegaturan tegangan rata-rata sebesar +0,0272%. Persentase-persentase pengaturan tegangan tersebut dalam masih dalam batasan standar SPLN 1 : 1995. Sehingga besar nilai tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron dapat dikatakan aman apabila dihubungkan ke sistem tenaga listrik.

#### V. REFERENSI

- [1] Ignasius Jonan, "Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2019-2038." Menteri ESDM, Jakarta, pp. 1–407, 2019.
- [2] H. Azis, P. Pawenary, and M. T. B. Sitorus, "Simulasi Pemodelan Sistem Eksitasi Statis pada Generator Sinkron terhadap Perubahan Beban," *Energi & Kelistrikan*, vol. 11, no. 2, pp. 46–54, 2019.
- [3] S. Kurnianto, "Analisis Performa Generator QF-110-2 PLTU Sebalang," Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2018.
- [4] G. P. E. C. (GPEC), *Generator Operation Manual*. Beijing: PLTU UJP Pangkalan Susu, 2014.
- [5] M. Noer, "Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Di Pltg Borang Dengan Menggunakan Software Matlab," *J. Ampere*, vol. 2, no. 2, pp. 103–114, 2017.
- [6] Y. Efri, *Pengoperasian PLTU*, 1st ed. Jakarta, 2013.
- [7] A. Nurdin, A. Azis, and R. A. Rozal, "Peranan Automatic Voltage Regulator Sebagai Pengendali Tegangan Generator Sinkron," *J. Ampere*, vol. 3, no. 1, pp. 163–173, 2018.
- [8] Yudistira Heri Istanto, "Analisis Pengaruh Arus Eksitasi pada Generator Sinkron Terhadap Pembebanan di PLTA Wlingi PT PJB UP Brantas," *J. Qua Tek.*, vol. 9, no. 1, pp. 43–55, 2019.
- [9] J. Desember, F. A. Noor, H. Ananta, and S. Sunardiyo, "Pengaruh Penambahan Kapasitor Terhadap Tegangan, Arus, Faktor Daya, dan Daya Aktif pada Beban Listrik di Minimarket," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 66–73, 2017, doi: 10.15294/jte.v9i2.11358.
- [10] M. Fahreza, Hamdani, and Z. Tharo, "Sistem Tenaga Listrik Pada Simulator Pembangkit Listrik Tenaga Uap," 2019, pp. 233–236.
- [11] R. G. Terimananda, N. Hariyanto, and Syahrial, "Studi Pengaturan Arus Eksitasi untuk Mengatur Tegangan Keluaran Generator di PT Indonesia Power UBP Kamojang Unit 2," *Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2016.
- [12] PT. PLN, "Standar-Standar Tegangan," *Standar Perusahaan Listrik Negara*. PT Perusahaan Lsitrik Negara (Persero), Jakarta, p. 5, 1995.
- [13] R. Rimbawati, P. Harahap, and K. U. Putra, "Analisis Pengaruh Perubahan Arus Eksitasi Terhadap Karakteristik Generator (Aplikasi Laboratorium Mesin-Mesin Listrik Fakultas Teknik-Umsu)," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 37–44, 2019.
- [14] P. Butros, *Simulations of Rotating Brushless AC Excitation System with Controlled Thyristor Bridge Rectifier for Hydropower Generators*, no. December. Sweden, 2011.
- [15] A. K. Al Bahar, "Analisa Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Faktor Daya Gedung TI BRI Ragunan," *Ilm. Elektrokrisna*, vol. 6, no. 1, pp. 33–41, 2017.
- [16] M. S. Amir Tjolleng, *Pengantar Pemrograman MATLAB*. Jakarta, 2017.