

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian ini dilaksanakan di PLTP Darajat, Garut. Objek penelitian ini adalah UEL di generator unit 3 PLTP Darajat. Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari sampai dengan Juni 2018.

3.2 Data dan Peralatan Penelitian

Dalam melakukan analisis, data yang diperlukan adalah sebagai berikut:

1. data sistem keluaran generator,
2. data sistem eksitasi generator,
3. data UEL dan AVR di PLTP Darajat,
4. konstanta-konstanta di PLTP Darajat.

Adapun peralatan yang menunjang penelitian ini yaitu perangkat lunak Matlab dan Simulink untuk melakukan analisis dan simulasi sistem kontrol *Under Excitation Limiter* (UEL).

3.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini diperlukan beberapa variable yang menjadi objek penelitian, antara lain.

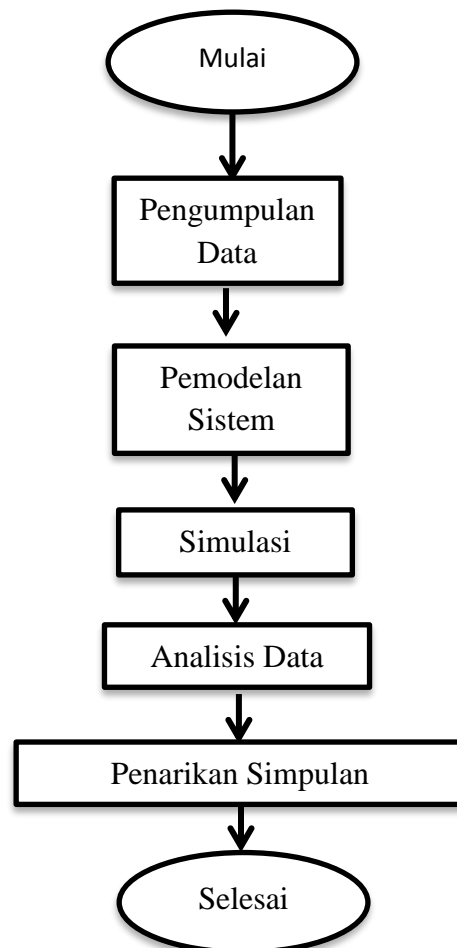
1. P : daya aktif generator, merupakan variabel yang akan menunjukkan generator dalam kondisi normal atau *under excited*.
2. V_t : tegangan terminal generator, merupakan variabel yang akan menunjukkan generator dalam kondisi normal atau *under excited* pula.

3.4 Prosedur Penelitian

Analisis sistem kontrol UEL di generator unit 3 PLTP Darajat melewati berbagai tahap penelitian. Tahap penelitian tersebut antara lain:

1. Pengumpulan data yang meliputi data *recording* output generator pada saat kondisi *under excited* dan konstanta sistem di PLTP Darajat.
2. Melakukan pemodelan sistem di PLTP Darajat, yang meliputi model generator sinkron, sistem eksitasi, dan UEL.
3. Selanjutnya melakukan simulasi model yang telah dibuat menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink versi R2013b. Simulasi ini meliputi dua SMIB (*Single Machine to Infinite Bus*) yang menggunakan UEL dan tanpa UEL.
4. Setelah grafik dua SMIB dihasilkan, langkah selanjutnya adalah analisis bagaimana perbedaan grafik yang dihasilkan untuk model yang menggunakan UEL dan tanpa UEL.
5. Tahap terakhir yaitu penarikan simpulan dari hasil analisis data yang dilakukan.

Adapun tahapan penelitian yang dilakukan, ditunjukkan oleh **Gambar 3.1**.



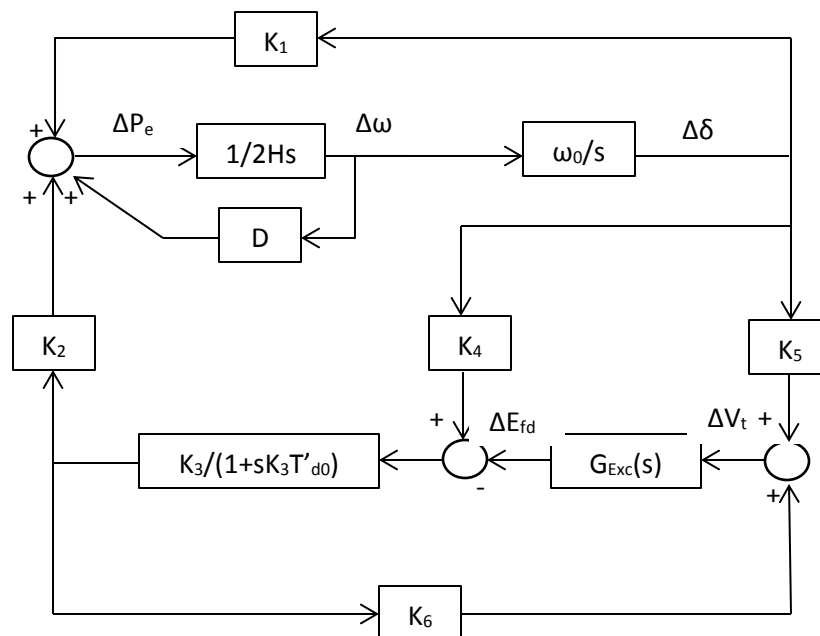
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.5 Pemodelan

Setelah melakukan pengumpulan data yang dibutuhkan, tahap selanjutnya adalah pemodelan sistem di PLTP Darajat. Pemodelan ini dilakukan dengan membuat diagram blok proses kerja generator, sistem eksitasi, PSS, dan UEL.

3.5.1. Pemodelan Generator Sinkron

Pemodelan merupakan pembuatan diagram dan persamaan karakteristik untuk menentukan proses kerja suatu sistem. Pemodelan sistem dalam penelitian ini disederhanakan menjadi model *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB) dengan metode model Heffron dan Phillips (Heffron & Phillips, 1952). SMIB adalah model generator sinkron yang terhubung dengan sistem tenaga listrik yang luas. Adapun dalam penelitian ini model Heffron dan Phillips dibuat menjadi dua jenis model, yaitu SMIB dengan sistem eksitasi saja, dan SMIB dengan sistem eksitasi dan *Under Excitation Limiter* (UEL). Adapun pemodelan SMIB menambahkan K_7 , K_8 , model eksitasi dan model UEL sebagai model Heffron Phillips yang telah ditambahkan (Jianshun, et al., 2015).



Gambar 3.2 Model SMIB Heffron Phillips dengan Sistem Eksitasi

Model SMIB dengan sistem eksitasi terdiri dari model generator sinkron dan sistem eksitasi pada unit 3 PLTP Darajat. **Gambar 3.3** menunjukkan model sistem SMIB dengan sistem eksitasinya. Model ini merepresentasikan proses kerja generator sinkron yang outputnya terhubung ke sistem tenaga listrik. Masukan dari generator sinkron ini berupa torsi mekanik dari penggerak mula (ΔT_m) dan tegangan medan (ΔE_{fd}) dari sistem eksitasi. Adapun keluaran generator pada model ini adalah daya elektrik (ΔP_e), kecepatan sudut ($\Delta \omega$), tegangan terminal (ΔV_t), dan sudut rotor generator ($\Delta \delta$). K_1 - K_6 merupakan konstanta Hefrron-Phillips yang saling berhubungan satu sama lain agar menghasilkan keluaran generator yang diinginkan. Selain itu, terdapat H sebagai koefisien inersia dari penggerak mula generator, D sebagai konstanta peredaman, kecepatan sinkron generator (ω_0), dan T'_{d0} adalah konstanta waktu axis d pada generator. K_1 - K_6 memiliki persamaan yang dapat dihitung dengan memasukan berbagai elemen-elemen yang berasal dari parameter terpasang pada generator unit 3 PLTP Darajat. H , D , ω_0 , T'_{d0} merupakan parameter yang terpasang di generator unit 3 PLTP Darajat pula. Persamaan untuk mencari nilai K_1 - K_6 sebagai berikut.

$$i_{qo} = \frac{P_o \times Q_o}{\sqrt{(P_o \times x_q)^2 + (V_{to}^2 + Q_o \times x_q)}} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$v_{do} = i_{qo} x_q \dots\dots\dots(3.2)$$

$$v_{qo} = \sqrt{v_{to}^2 - v_{do}^2} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$i_{do} = \frac{Q_o + x_q i_{qo}^2}{v_{qo}} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$E_{qo} = v_{qo} + x_q i_{do} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$E_o = \sqrt{(v_{do} + x_e i_{qo})^2 - (v_{qo} - x_q i_{do})^2} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$\delta_o = \tan^{-1} \frac{(v_{do} + x_e i_{qo})}{(v_{qo} - x_q i_{do})} \dots\dots\dots(3.6)$$

Adapun parameter utama yang dibutuhkan untuk mencari nilai dari persamaan 3.1 sampai dengan 3.6, dan K_1 sampai dengan K_6 dari generator unit 3 PLTP Darajat ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

. Tabel 3.1 Parameter Generator Unit 3 PLTP Darajat

No	Parameter	Keterangan	Nilai	Satuan
1	P_o	Daya aktif generator	0,294	pu (per unit)
2	Q_o	Daya reaktif generator	-0,093	pu (per unit)
3	V_{to}	Tegangan terminal generator	0,961	pu (per unit)
4	x_q	Reaktansi q-axis	1,9	pu (per unit)
5	x_e	Reaktansi eksternal	0,5	pu (per unit)
6	x_d	Reaktansi d-axis	2,12	pu (per unit)
7	x'_d	Reaktansi d-axis transien	0,229	pu (per unit)
8	E_b	Tegangan base sistem	1,05	pu (per unit)
9	H	Koefisien inersia	4,46	pu (per unit)
10	D	Konstanta peredaman	0,0	pu (per unit)
11	f	Frekuensi sinkron generator	50	Hz
12	T'_{d0}	Konstanta waktu d-axis transien beban nol	7,9	s (sekon)

Persamaan yang menunjang untuk memperoleh nilai K_1 - K_6 sebagai berikut.

$$K_1 = \frac{E_b E_{q0} \cos \delta_o}{x_e + x_q} + \frac{x_q - x'_d}{x_e + x'_d} \times E_b i_{q0} \sin \delta_o \dots \dots \dots (3.7)$$

$$K_2 = \frac{i_{q0} (x_e + x_q)}{x_e + x'_d} \dots \dots \dots (3.8)$$

$$K_3 = \frac{(x_e + x'_d)}{x_e + x_d} \dots \dots \dots (3.9)$$

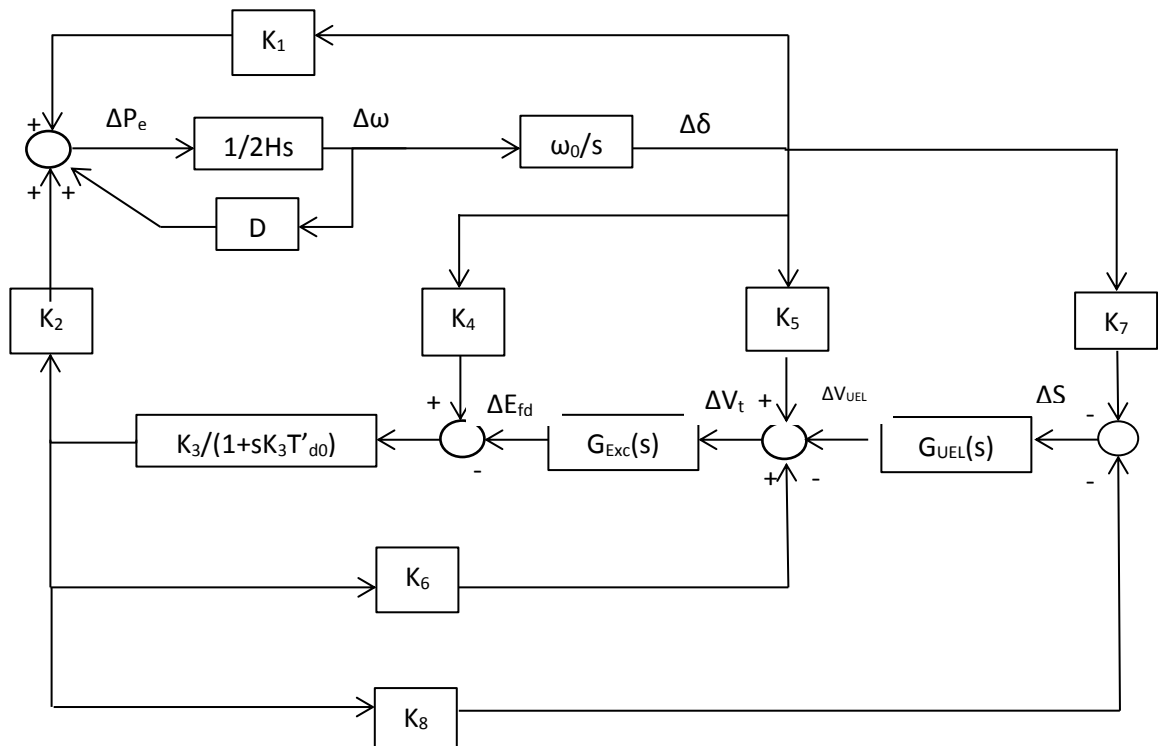
$$K_4 = \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d + x_e} E_b \sin \delta_o \dots \dots \dots (3.10)$$

$$K_5 = \frac{-x_q v_{d0} E_b \cos \delta_0}{(x_e + x_q) V_{t0}} - \frac{x'_d v_{q0} E_b \sin \delta_0}{(x_e + x'_d) V_{t0}} \dots \dots \dots (3.11)$$

$$K_6 = \frac{x_e}{x_e + x'_d} \cdot \frac{v_{q0}}{V_{t0}} \dots \dots \dots (3.12)$$

Proses perhitungan persamaan K₁ sampai dengan K₆ menghasilkan harga yang akan menjadi parameter model SMIB Heffron Phillips. Terdapat parameter data rekam harian generator berupa daya aktif, daya reaktif, dan tegangan terminal generator di dalam persamaan konstanta Heffron-Phillips. Data harian tersebut merupakan keluaran generator pada kondisi eksitasi rendah.

Model kedua yang dibuat adalah model SMIB Heffron-Phillips dengan sistem eksitasi dan UEL. Model Heffron-Phillips ini merupakan model yang telah dimodifikasi, karena terhubung dengan UEL sebagai limiter dari sistem eksitasi. Terdapat penambahan konstanta K₇ dan K₈ sebagai input dari UEL yang direpresentasikan sebagai sinyal kesalahan dari generator.



Gambar 3.3 Model SMIB Heffron Phillips dengan Sistem Eksitasi dan *Under Excitation Limiter* (UEL)

Penambahan K_7 dan K_8 merupakan modifikasi dari model Heffron-Phillips (Jianshun et al., 2015) Harga K_7 dan K_8 dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

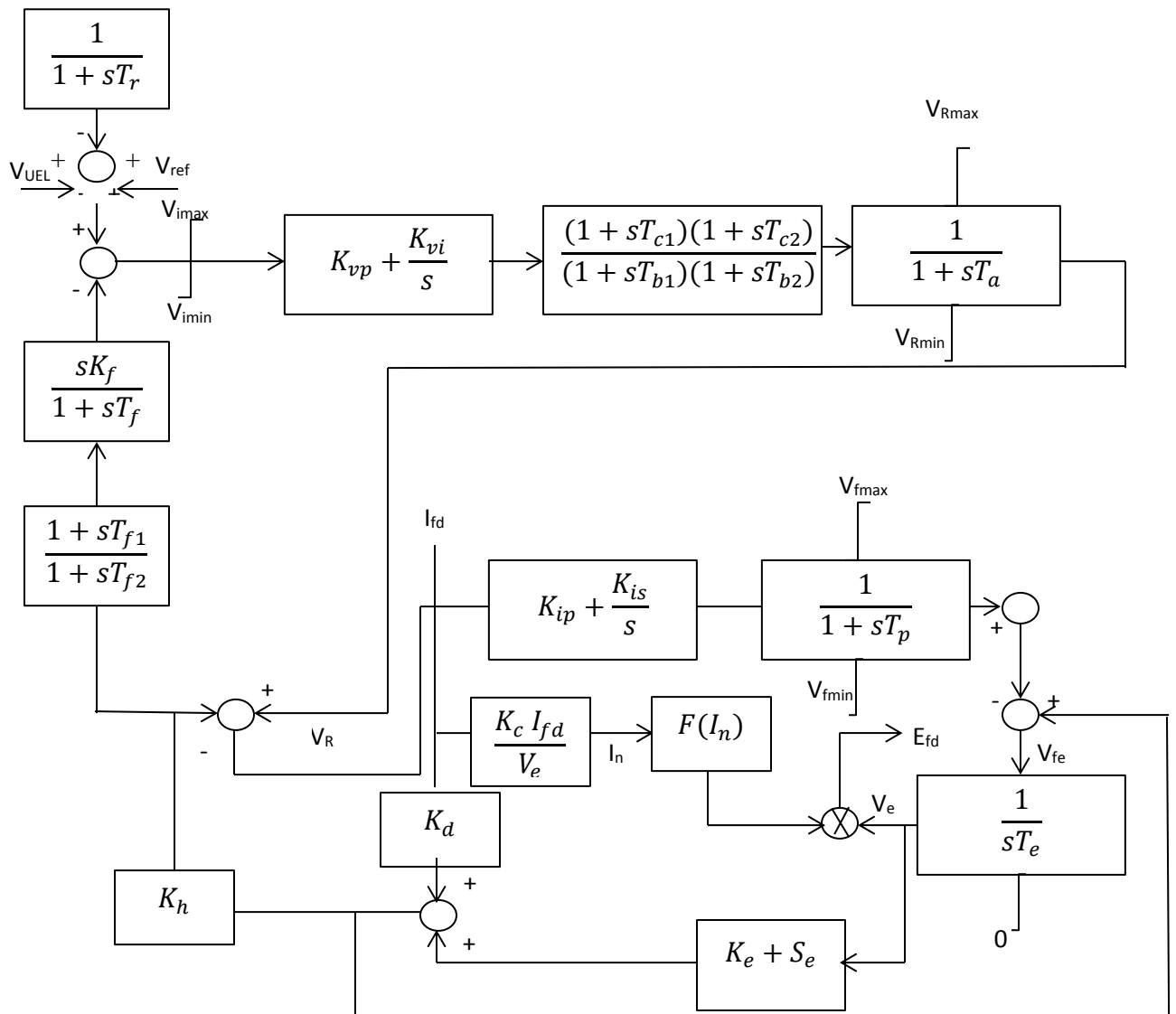
$$\begin{aligned}
 K_7 = & \frac{K_u(V_{do}^2 + V_{do}I_{qo}(x_e - x'_d) - I_{qo}^2x'_dx_e}{x'_d + x_e} \\
 & + \frac{K_u(V_{qo}^2 + V_{qo}I_{do}(x_q - x_e) - I_{do}^2x_qx_e}{x_q + x_e} \\
 & + \frac{(V_{do}V_{qo} + I_{do}I_{qo}x_e^2)(x'_d - x_q)}{(x'_d + x_e)(x_q + x_e)} + \frac{(V_{do}I_{do} + V_{qo}I_{qo})(x'_dx_q - x_e^2)}{(x'_d + x_e)(x_q + x_e)} \\
 & + \frac{2CV_{do}x_q(V_{qo} - I_{do}x_e)}{x_q + x_e} - \frac{2CV_{qo}x'_d(V_{do} - I_{qo}x_e)}{x'_d + x_e} \dots\dots\dots(3.13)
 \end{aligned}$$

$$K_8 = \frac{K_u(V_{do} + I_{qo}x_e) + 2CV_{qo}x_e}{x'_d + x_e} - \frac{V_{qo} + I_{do}x_e}{x'_d + x_e} \dots\dots\dots (3.14)$$

Terdapat parameter baru yang menjadi bagian dari persamaan K_7 dan K_8 , yaitu K_u dan C . K_u adalah konstanta slope UEL dan C adalah batas UEL yang menjadi acuan *eksitasi rendah* pada generator. Adapun dari harga kedua parameter K_u dan C tersebut adalah masing-masing 0.2 pu dan 0.14 pu.

3.5.2. Pemodelan Sistem Eksitasi

PLTP Darajat merupakan pembangkit listrik yang menggunakan sistem eksitasi tipe dinamis. Adapun jenis sistem eksitasi yang digunakan berupa sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*), di mana tegangan medan disearahkan terlebih dahulu menggunakan rectifier yang terhubung langsung ke rotor generator. Oleh karena itu, model sistem eksitasi yang digunakan merujuk ke standar IEEE dengan tipe sistem eksitasi PSS/E REXSYS.



Gambar 3.4 Model Sistem Eksitasi Unit 3 PLTP Darajat Tipe PSS/E REXSYS

Model sistem eksitasi unit 3 PLTP Darajat terdiri dari model *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dan sistem eksitasi itu sendiri. Model AVR terdiri dari konstanta pengatur dan konstanta waktu pengatur tegangan pada generator. Sistem eksitasi berupa eksitasi putar yang terdiri dari konstanta tegangan eksitasi dan konstanta waktunya. Masukan dari AVR berupa sinyal *Under Excitation Limiter* (UEL) dan/atau sinyal penstabil lainnya, tegangan referensi generator (V_s), dan

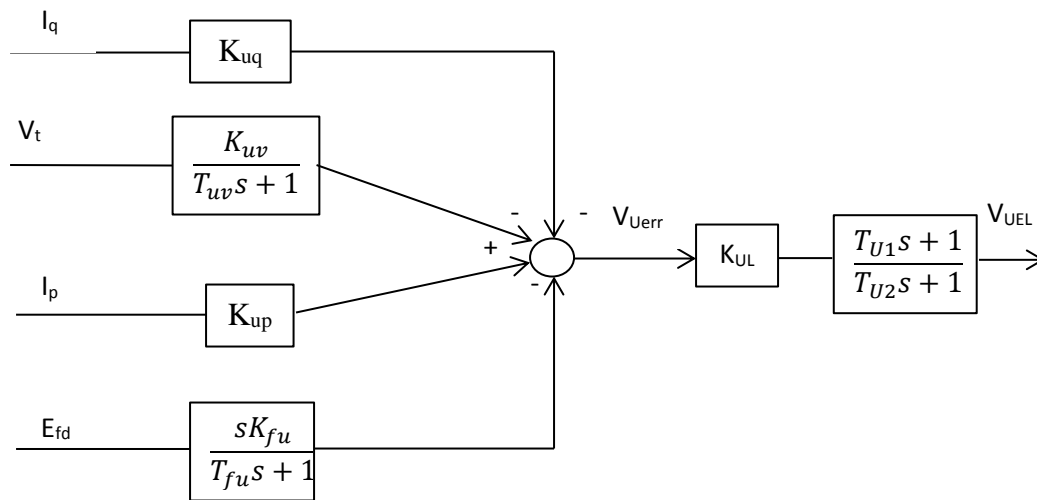
tegangan kompensator. Keluaran sistem eksitasi sendiri merupakan masukan generator sinkron yang berupa tegangan medan eksitasi (E_{fd}). Adapun harga-harga konstanta dalam model sistem eksitasi tersebut ditunjukkan oleh **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Parameter Sistem Eksitasi Unit 3 PLTP Darajat

No	Parameter	Nilai	Satuan	Parameter	Nilai	Satuan
1	T_r	0,02	s	K_{ip}	7	pu
2	K_{vp}	73,5	Pu	K_{ii}	10,5	pu
3	K_{vi}	50	pu	T_p	0	s
4	V_{imax}	1.2	pu	V_{fmax}	22	pu
5	T_a	0	s	V_{fmin}	-22	pu
6	T_{b1}	0	s	K_h	1	pu
7	T_{b2}	0	s	K_e	1	pu
8	T_{c1}	0	s	T_e	0,8	s
9	T_{c2}	0	s	K_c	0,1	pu
10	V_{rmax}	20	pu	K_d	0,6	pu
11	V_{rmin}	-20	pu	E_1	6	pu
12	K_f	0	pu	$SE_{(E1)}$	0,1	pu
13	T_f	1	s	E_2	8	pu
14	T_{f1}	0	s	$SE_{(E2)}$	0,3	pu
15	T_{f2}	0	s			

3.5.3. Pemodelan *Under Excitation Limiter* (UEL)

Tipe UEL di PLTP Darajat meliputi UEL untuk kurva kapabilitas dengan tipe *single or multiple straight line segment*. Oleh karena itu model UEL yang digunakan merujuk ke standar IEEE dengan tipe UEL2 (tipe *single or multiple straight line segment*) (Saavedra-Montes & Ramirez, 2008).



Gambar 3.5 Model *Under Excitation Limiter* (UEL)

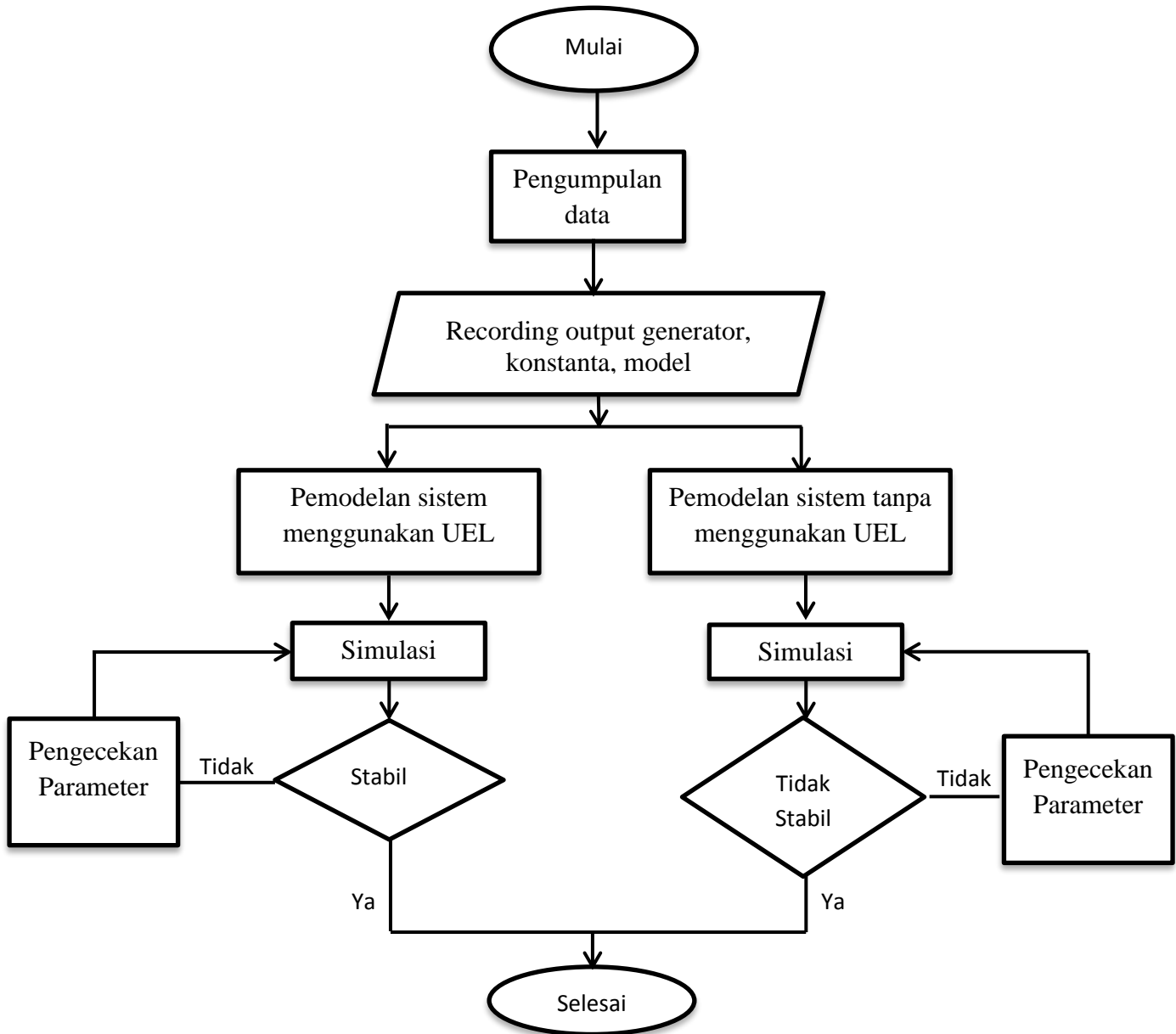
UEL merupakan alat pembatas kekurangan eksitasi pada generator. Model UEL ini mengacu pada standar IEEE. Model dan parameter ini didapat dari salah satu jurnal IEEE (Saavedra-Montes & Ramirez, 2008). Pada penelitian ini model UEL yang digunakan adalah model UEL tipe *Straight or Multiple Line Segment*. Masukan model UEL ini berupa arus reaktif, arus aktif, tegangan terminal generator, dan tegangan medan sistem eksitasi. Keluaran UEL adalah sinyal tegangan UEL yang memberikan pemberitahuan bahwa generator dalam kondisi *eksitasi rendah*. Pada kondisi normal UEL sendiri tidak berpengaruh terhadap operasi generator. UEL hanya sensitive pada kondisi generator *under excited*. Parameter-parameter pada model UEL disesuaikan dengan kapasitas generator. Adapun parameter model UEL generator unit 3 di PLTP Darajat ditunjukkan oleh **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Parameter *Under Excitation Limiter* (UEL)

No	Parameter	Keterangan	Nilai	Harga
1	K_{uq}	Konstanta Daya Reaktif UEL	1	pu
2	K_{uv}	Konstanta Tegangan Terminal UEL	0,264	pu
3	T_{uv}	Konstanta Waktu Tegangan Terminal UEL	0,044	s
4	K_{up}	Konstanta Daya Aktif UEL	0,14	pu
5	K_{fu}	Gain Penstabil Sistem Eksitasi UEL	0,5	pu
6	T_{fu}	Konstanta Waktu Penstabil Sistem Eksitasi	1,28	s
7	K_{UL}	Gain Proporsional UEL	0,05	pu
8	T_{U1}	Konstanta waktu UEL 1	0	s
9	T_{U2}	Konstanta waktu UEL 2	1	s

3.6 Simulasi Menggunakan Perangkat Lunak Matlab Simulink

Tahap selanjutnya melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink versi R2013b agar dapat mengetahui perbedaan kondisi generator baik tegangan dan daya saat mengalami gangguan eksitasi rendah. Dengan melakukan simulasi ini akan terlihat perbedaan kondisi generator saat diterapkan UEL dan tanpa UEL. Hasil simulasi ini juga akan menunjukkan seberapa besar pengaruh UEL terhadap performa generator. Parameter yang dianalisis daya aktif (P_e) dan tegangan terminal (V_t) generator. Selain itu dilakukan juga simulasi pembuatan diagram bode untuk mengetahui respon frekuensi sistem saat dipasang UEL.



Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi

Gambar 3.6 menunjukkan alur proses simulasi. Tahap pertama melakukan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk proses pemodelan baik data rekam

keluaran generator pada saat eksitasi rendah, model generator, sistem eksitasi dan UEL, dan parameter-parameter modelnya. Tahap selanjutnya melakukan pemodelan generator, sistem eksitasi, dan UEL di dalam perangkat lunak Matlab Simulink. Setelah itu, hal yang dilakukan adalah simulasi dan menganalisis hasil simulasi baik kestabilannya dan harganya. Apabila hasil simulasi belum sesuai dengan ketentuan, maka perlu adanya pengecekan parameter dan simulasi dilakukan kembali. Setelah hasil simulasi sesuai dengan ketentuan maka simulasi telah dianggap selesai.

3.7 Analisis Hasil Simulasi

Untuk dapat memperoleh jawaban dari masalah yang diangkat, tahap yang selanjutnya dilakukan adalah analisis data. Pemodelan sistem kontrol yang telah dibuat, kemudian dianalisis perbedaan antara grafik simulasi menggunakan UEL dan tanpa UEL. Selain itu, dilakukan perhitungan untuk mencari nilai fungsi transfer dari diagram blok sistem. Tujuannya adalah untuk membuat diagram bode, sehingga dapat diketahui respon frekuensi generator apabila dipasang UEL.