

Analisis Pengoperasian Kerja Paralel 3 Generator 3 Fase Kapasitas 3×1000 kVA Pada PT. Cahaya Fajar Kaltim

Andhika Gunawan¹, Onglan Nainggolan², Toyib³
^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda
onainggolan029@gmail.com

Abstrak- Pasokan listrik yang stabil dan berkelanjutan sangat dibutuhkan dalam berbagai industri, terutama di sektor pembangkitan listrik seperti di PT. Cahaya Fajar Kaltim. Untuk melakukan *start-up* generator utama diperlukan 3 unit generator berkapasitas 1000 kVA yang bekerja secara paralel. Penelitian ini menganalisis bagaimana ketiga generator tersebut dalam melayani beban untuk melakukan *start-up* dengan total daya aktif sebesar 1.796 MW. Simulasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB *Simulink* untuk memantau parameter penting seperti tegangan dan frekuensi. Didapatkan bahwasanya 3 generator 3 fase kapasitas 1000 kVA harus melayani beban unit 1 atau 2 yang sebesar 1.796 MW hal ini merupakan total daya aktif yang diperlukan untuk melakukan *start-up* generator utama. Hasil penelitian ini menunjukkan beberapa parameter yang menjadi acuan bahwa ketiga generator telah sinkron yaitu dengan tegangan Generator 1 L-L adalah 365.9 V, Generator 2 L-L adalah 365.9 V, dan Generator 3 L-L adalah 365.9 V dan frekuensi Generator 1 adalah 50 Hz, Generator 2 adalah 50 Hz dan Generator 3 adalah 50 Hz yang mengartikan bahwa ketiga generator berhasil sinkron untuk melayani beban.

Kata kunci: generator, simulink, sinkron

I. PENDAHULUAN

PT. Cahaya Fajar Kaltim merupakan industri yang bergerak pada sektor pembangkitan listrik dimana harus menggunakan sumber listrik yang baik dan juga stabil secara terus menerus untuk memberikan suplai daya listrik kepada peralatan-peralatan listrik, oleh karena itu Sumber daya listrik yang baik dan stabil secara terus menerus adalah suatu hal yang sangat dibutuhkan pada industri ini.

Penggunaan generator set cadangan dapat memastikan kontinuitas suplai listrik ketika generator utama *shutdown* atau sedang *overhaul*. Generator cadangan beroperasi lebih dulu untuk mengaktifkan peralatan yang dibutuhkan dalam *start-up* generator utama. Namun, kebutuhan daya yang besar memerlukan operasi paralel beberapa generator untuk meningkatkan kapasitas total dan membagi beban secara merata.

Salah satu referensi yang relevan dalam penelitian ini terkait penggunaan generator yang bekerja secara paralel adalah penelitian dari Fiqih Maulana Akbar Hasibuan, Radhiah, dan Subhan ditahun 2021, yang berjudul “Kerja Paralel Dua Generator 0.8 kW pada Lab. Proteksi Politeknik Negeri Lhokseumawe”. Penelitian tersebut membahas prinsip kerja paralel dua unit generator dengan kapasitas masing-masing 0.8

kW, khususnya dalam menghadapi beban resistif. Generator dijelaskan sebagai alat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui induksi elektromagnetik dan dalam kondisi kerja paralel dituntut untuk menghasilkan tegangan serta frekuensi yang stabil. Ketidakstabilan pada salah satu unit dapat memengaruhi keseluruhan sistem dan beban yang terpasang. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pembagian dan penjumlahan daya antara kedua generator selama pengoperasian paralel. Penelitian ini membuktikan bahwa kerja paralel dua generator pada beban resistif dapat dilakukan secara efektif dengan hasil keluaran daya yang terdistribusi dengan baik [1].

Berdasar pada penelitian terdahulu, penelitian ini membahas pada sisi kerja paralel 3 generator 3 fase kapasitas 3×1000 kVA di PT. Cahaya Fajar Kaltim. *Software* MATLAB *Simulink* digunakan untuk melakukan simulasi sistem tenaga listrik dengan hasil simulasi berupa karakteristik sinkronisasi, distribusi daya serta kestabilan tegangan dan frekuensi saat pengoperasian kerja paralel dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Generator sinkron



Gambar 1. Foto Generator Sinkron Pada PT. Cahaya Fajar Kaltim

Generator sinkron atau alternator adalah mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan prinsip induksi magnet. Proses ini terjadi karena adanya gerak relatif antara medan magnet dan kumparan jangkar di mana perubahan medan magnet menghasilkan tegangan listrik. Generator ini menghasilkan arus bolak-balik melalui interaksi antara medan magnet yang seragam dan

belitan jangkar sehingga umum digunakan sebagai sumber tenaga listrik dan disebut sinkron karena kecepatan medan magnet selalu sebanding dengan kecepatan rotor [2]. Gambar generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 1. Foto Generator Sinkron Pada PT. Cahaya Fajar Kaltim.

Generator sinkron terdiri atas magnet dan kumparan jika gerakan relatif antara kedua komponen ini, maka garis-garis gaya magnet memotong belitan-belitan kumparan dan suatu gaya gerak listrik (GGL) akan dibangkitkan. Sebuah generator listrik atau alternator modern terdiri atas suatu sistem elektromagnet dan suatu armatur yang terdiri atas sejumlah kumparan dari konduktor berisolasi yang diletakkan dalam alur (slot) inti besi berlaminasi. Berdasarkan hukum induksi Faraday besar gaya gerak listrik yang diinduksi dapat ditunjukkan pada Persamaan (1) sebagai berikut [3].

$$GGL = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot ds \quad (1)$$

Keterangan :

- GGL = Gaya Gerak Listrik (V)
- dt = Elemen Waktu (s)
- B = Induksi Magnet (Wb/m²)
- S = Permukaan (m²)
- = Besaran Vektor

Gaya gerak listrik (GGL) pada rotor ini menjadi dasar pembangkitan medan elektromagnetik yang memungkinkan rotor untuk bergerak dan menghasilkan putaran seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2) [4].

$$E_a = C \cdot N_r \cdot \phi \text{ (Volt/Fase)} \quad (2)$$

Keterangan :

- Kc = Faktor kisar
- Kd = Faktor distribusi
- F = Frekuensi (Hz)
- θ = Fluks atau kutub (Weber/Wb)
- Z = Banyak sisi kumparan
- Nr = Kecepatan putaran rotor (rpm)

Medan magnet pada rotor akan menghasilkan medan magnet berputar dengan kecepatan dan arah yang sama seperti putaran rotor. Oleh karena itu, frekuensi listrik yang dihasilkan pada stator ditentukan oleh hubungan langsung antara kecepatan putaran rotor dan medan magnet. Hubungan ini dapat dijelaskan melalui persamaan (3) [4]:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (3)$$

Keterangan :

- f = Frekuensi (Hz)
- p = Jumlah Kutub
- n_s = Kecepatan putar rotor (rpm)

Jika beban pada saat generator mengalami perubahan hal ini dapat mempengaruhi kecepatan rotor oleh karena itu perubahan

kecepatan rotor tersebut secara langsung akan mempengaruhi juga frekuensi listrik yang dihasilkan oleh generator [4].

B. Kerja Paralel Generator

Operasi paralel pusat-pusat tenaga listrik merupakan salah satu metode untuk mendapat pasokan daya listrik yang lebih besar dikarenakan generator bekerja secara paralel satu generator dengan generator lainnya. Proses menghubungkan paralel satu ke generator lain dinamakan sinkronisasi, agar kerja paralel generator dapat bekerja harus memenuhi beberapa syarat tertentu agar dapat dilakukan [5].

Mempunyai nilai Tegangan yang sama, selama sinkronisasi, nilai tegangan apitan dari mesin masuk harus sama dengan tegangan rel. Untuk menyeimbangkan nilai tegangan pada saat sinkronisasi, perlu dilakukan pengaturan nilai arus eksitasi [5]. Standar *International Electrical Standards Commission (IEC) 60038* untuk toleransi tegangan pada daya generator adalah ± 10% dari tegangan.

Nilai Frekuensi yang sama, frekuensi mesin masuk sama dengan frekuensi rel pada saat sinkronisasi harus sama persis. Umumnya frekuensi yang digunakan pada generator adalah 50 Hz [5]. Menurut *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) C37. 106-1987*, frekuensi yang diperbolehkan adalah ±1% dari frekuensi referensi, yaitu 50 Hz untuk Indonesia.

Urutan Fase antara generator, seperti persyaratan pengaturan waktu lainnya, urutan fase antara pemancar dalam sistem yang sama adalah penting. Selama proses ini, urutan fase merupakan arah putaran ketiga fase yang dapat dilihat melalui sinkronisasi yang terpasang pada papan pengatur waktu [5].

Memiliki sudut fase tegangan yang sama pada proses kerja paralel generator, sudut fase tegangan yang sama dalam artian bahwa kedua generator yang diparalelkan harus memiliki sudut fase yang sama [5].

C. Efisiensi Generator

Efisiensi pada generator sinkron adalah perbandingan antara daya *output* yang dihasilkan dan daya *input* pada generator di kali seratus persen [5]. Efisiensi pada generator dinyatakan dalam Persamaan (4) adalah sebagai berikut :

$$Efisiensi = \frac{(P_{out})}{(P_{in})} \times 100 \% \quad (4)$$

Keterangan :

- P_{out} = Daya Output
- P_{in} = Daya Input

D. Pengoperasian Generator

Generator diesel banyak digunakan sebagai cadangan karena proses *start*-nya yang sederhana, mirip dengan kendaraan bermesin diesel. Dalam kondisi darurat, generator ini memastikan pasokan listrik tetap terjaga saat generator utama gagal atau *black-out*. Proses pemanasan mesin diperlukan agar suhu operasi optimal tercapai demi efisiensi dan keandalan. Pemeliharaan rutin sangat penting untuk memastikan sistem pemanasan, pelumasan, dan pendinginan berjalan baik, sehingga proses pemanasan lebih cepat, aman, dan memperpanjang umur pakai generator [5].

E. Load Sharing

Load Sharing adalah pembagian beban selama pengoperasian paralel, generator akan membagi beban listrik. Namun setiap generator memiliki karakteristiknya masing-masing, seperti resistansi internal dan reaktansi, yang dapat mempengaruhi distribusi beban sebenarnya. Distribusi beban yang tidak merata dapat menyebabkan ketidakseimbangan arus dan tegangan antar generator [6]. Oleh sebab itu diperlukan sebuah perhitungan yang peruntukkan agar pembagian beban pada setiap generator seimbang.

F. Load Shedding

Pelepasan beban atau load shedding adalah suatu cara yang digunakan untuk mengurangi beban pada sistem pembangkitan dengan cara memutus sementara aliran listrik atau melakukan pemadaman listrik terencana di wilayah tertentu. Langkah ini dilakukan secara sengaja untuk mencegah terjadinya gangguan yang lebih luas pada jaringan produksi dan distribusi listrik [3].

G. MATLAB Simulink

MATLAB adalah software pemrograman yang dikembangkan oleh MathWorks dan dikhususkan untuk komputasi numerik, visualisasi, simulasi dan pemrograman dalam model matematika. Simulasi rangkaian listrik juga dapat dilakukan dengan menggunakan Extension Simulink pada MATLAB yang merupakan salah satu fitur untuk mensimulasi suatu desain atau model rangkaian listrik atau sistem tenaga listrik dimana simulasi ditujukan untuk mengukur kinerja dari suatu desain atau model rangkaian listrik atau sistem tenaga listrik yang telah dirancang yang sesuai hasil yang di inginkan. Dalam simulink sistem digambarkan sebagai sebuah blok diagram yang didalamnya terdapat pula komponen-komponen listrik yang dapat memodelkan suatu sistem pembangkit listrik cadangan dan menganalisis parameter-parameternya secara real time [6].

H. Modul Deep Sea Electronics 8610

Modul Deep Sea Electronics 8610 adalah modul yang digunakan dalam mengoperasikan generator yang berkerja secara paralel dan juga berfungsi untuk mengatur, memonitor, mengontrol dan sinkronisasi serta berfungsi sebagai alat pembagian beban atau load sharing [7]. Modul Deep Sea Electronics 8610 dari dapat dilihat pada Gambar 2. Foto Modul Deep Sea Electronics 8610 Pada PT. Cahaya Fajar Kaltim.



Gambar 2. Foto Modul Deep Sea Electronics 8610 Pada PT. Cahaya Fajar Kaltim.

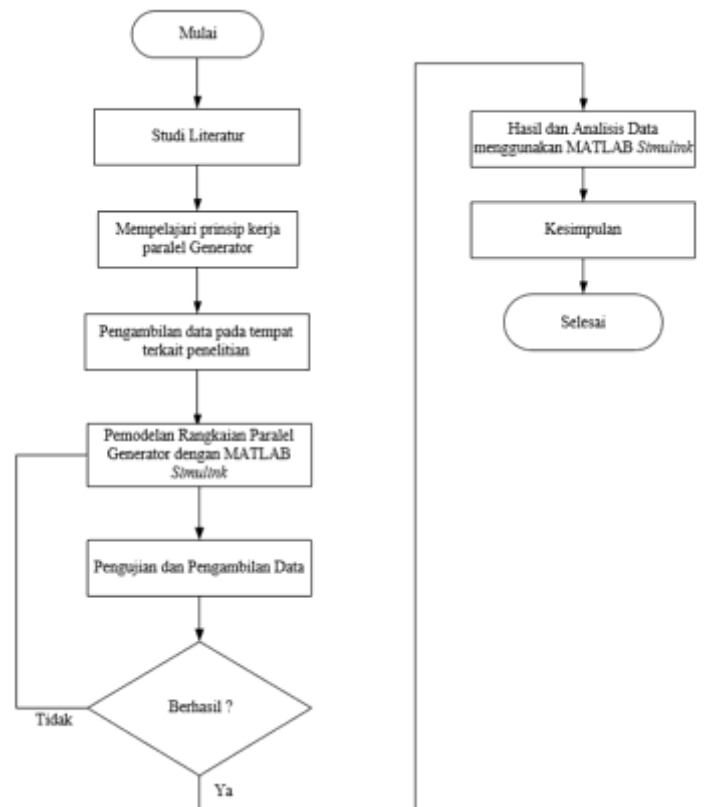
III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan dokumen logsheet, observasi, literatur dan wawancara pada bulan Januari sampai Juni 2025 di PT. Cahaya Fajar Kaltim Tanjung Batu, Kalimantan Timur.

B. Gambaran Umum

Berikut ini alur proses pengerjaan, dimulai dengan melakukan tinjauan literatur, menggali dasar-dasar generator, mengambil data lapangan, pemodelan simulai pada software, mengambil dan menganalisis hasil simulasi, alurnya dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart tahapan pelaksanaan

Dapat dilihat dari Gambar 3, penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk menunjang pemahaman tentang prinsip kerja paralel generator. Setelah prinsip kerja tersebut dipahami, tahap selanjutnya adalah pengambilan data di lokasi penelitian. Jika data telah mencukupi, maka dilakukan pemodelan rangkaian paralel generator menggunakan software MATLAB Simulink. Hasil dari pemodelan kemudian dianalisis, dibahas, dan dijadikan dasar dalam menyusun kesimpulan dari percobaan yang telah dilakukan [7].

C. Data

PT. Cahaya Fajar Kaltim memiliki 3 unit generator cadangan serta mesin diesel generator yang digunakan dengan spesifikasi seperti pada Tabel 1. dan Tabel 2. sebagai berikut.

TABEL 1
SPESIFIKASI GENERATOR CADANGAN 3 × 1000 KVA

Keterangan	Spesifikasi
Model	PL1000P
Serial No	PG 121101113
Month/Year of Manufacture	11/2012
Rated Apparent Power	1000 kVA
Rated Active Power	800 kW
Cos Ø	0.8
Rated Voltage	380 V
Rated Frequency	50 Hz
Rated Current	1519.4 A
Rated R.P.M	1500 R/min
Excitation Voltage	65 V
Excitation Current	2.2 A
Phase	3

TABEL 2
SPESIFIKASI MESIN DIESEL GENERATOR CADANGAN 3 × 1000 KVA

Keterangan	Spesifikasi
Engine Model & Manufacture	4008TAG2
Number of Cylinder	8 Vertical In-Line
Bore and Stroke	160,0 × 190,0 mm
Displacement	30.561 Liters
Aspiration	Turbocharged and Air to Air Charged
Cycle	Cooled 4 Stroke
Combustion System	Direct Injection
Compression Ratio	13.6 : 1
Rotation	Anti Clockwise, Viewed on Flywheel
Total Lubricating Capacity	153 Liters
Cooling System	Water Cooled
Total Coolant Capacity	143 Liters
Fuel Consumption (L/H)	162,0 (75% Load)/215,0 (100%)

TABEL 3
DATA BEBAN UNIT 1

No	Nama Mesin	Daya Aktif (kW)
1	Boiled Feed Water Pump A Unit 1	24
2	Condensate Pump 1 A	44
3	Oil Pump AC Lube Unit 1	8,8
4	Oil Pump HP Lube Unit 1	36
5	Turning Gear T1 Unit 1	9,2
6	Favor Oil Tank Blower Unit 1	0,8
7	Water Jet Pump A Unit 1	36
8	Water Jet Pump B Unit 1	36
9	Forced Draft Fan Unit 1	320
10	Induced Draft Fan Unit 1 A	320
11	Fan Mill Unit 1 A	288
12	Cooling Air Fan Unit 1 A	9,2
13	Coal Feeder Unit 1 A	3,2
14	CGF (Flue Gas Fan) Unit 1	30
15	Screw Compressor A	60
16	Cooling Tower Compressor A	4,4
17	Circulating Water Pump Intake Unit 1 A	360
18	Cooling Tower Industrial Water Pump 1 A	4,4
19	Industrial Unit 1	36
20	Make Up Demin Water Pump Unit 1 A	4,4
21	Sperator Oil Turbine	0,8
22	Dozing Chemical Boiler (Phospate)	1,2
23	Dozing Chemical Boiler (Amoniak)	0,44
24	Solar Pump A	30
Total Beban Mesin Pada Saat Start Generator Utama		1666
Total Beban Utility Pada Saat Genset Menyala		130
Total Keseluruhan Beban		1796

Pada PT. Cahaya Fajar Kaltim, terdapat dua unit pembangkit utama yang berperan sebagai sumber tenaga listrik utama dalam operasional perusahaan. Sebelum kedua unit

pembangkit utama ini dapat dioperasikan secara penuh, diperlukan proses *start-up* yang memerlukan suplai daya awal untuk mengaktifkan berbagai sistem pendukung dan peralatan vital. Oleh karena itu, keberadaan sumber daya awal, baik melalui generator cadangan maupun sistem *black-start*, menjadi sangat penting untuk memastikan unit pembangkit utama dapat segera beroperasi dan memasok listrik ke seluruh sistem sesuai kebutuhan seperti pada Tabel 3 dan Tabel 4

TABEL 4
DATA BEBAN UNIT 2

No	Nama Mesin	Daya Aktif (kW)
1	Boiled Feed Water Pump A Unit 2	24
2	Condensate Pump 2 A	44
3	Oil Pump AC Lube Unit 2	8,8
4	Oil Pump HP Lube Unit 2	36
5	Turning Gear T1 Unit 2	9,2
6	Favor Oil Tank Blower Unit 2	0,8
7	Water Jet Pump A Unit 2	36
8	Water Jet Pump B Unit 2	36
9	Forced Draft Fan Unit 2	320
10	Induced Draft Fan Unit 2 A	320
11	Fan Mill Unit 2 A	288
12	Cooling Air Fan Unit 2 A	9,2
13	Coal Feeder Unit 2 A	3,2
14	CGF (Flue Gas Fan) Unit 2	30
15	Screw Compressor B	60
16	Cooling Tower Compressor B	4,4
17	Circulating Water Pump Intake Unit 2 A	360
18	Cooling Tower Industrial Water Pump 2 A	4,4
19	Industrial Unit 2	36
20	Make Up Demin Water Pump Unit 2 A	4,4
21	Sperator Oil Turbine	0,8
22	Dozing Chemical Boiler (Phospate)	1,2
23	Dozing Chemical Boiler (Amoniak)	0,44
24	Solar Pump B	30
Total Beban Mesin Pada Saat Start Generator Utama		1666
Total Beban Utility Pada Saat Genset Menyala		130
Total Keseluruhan Beban		1796

Pada PT. Cahaya Fajar Kaltim juga terdapat data parameter-parameter dari sebuah generator cadangan saat dioperasikan pada kondisi sinkron maupun tidak sinkron, seperti yang dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6

TABEL 5
DATA PARAMETER GENERATOR SAAT TIDAK SINKRON

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Tegangan (V)	399	404	398
Arus (I)	0	0	0
Daya (kW)	0	0	0
Frekuensi (Hz)	50	50	50
Rpm	1500	1500	1500
Faktor Daya	0.8	0.8	0.8

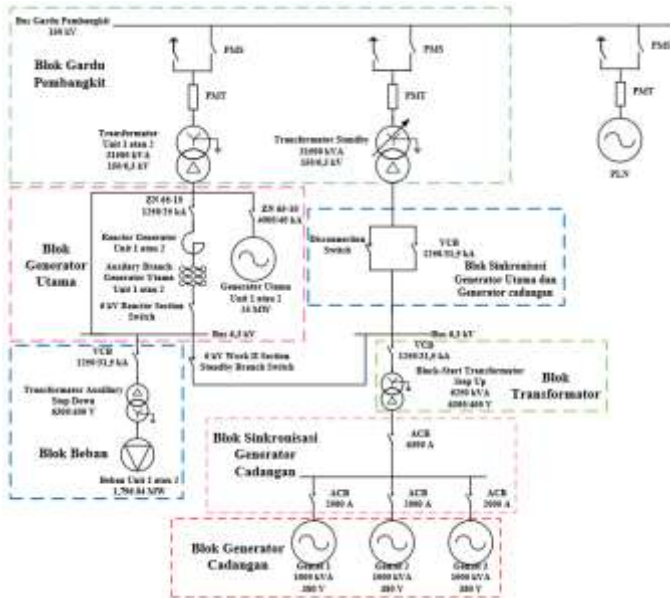
TABEL 6
DATA PARAMETER GENERATOR SAAT SINKRON

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Tegangan (V)	400	404	398
Arus (I)	180	186.6	143.3
Daya (kW)	113.158	118.908	90.927
Frekuensi (Hz)	50	50	49.5
Rpm	1500	1498	1495
Faktor Daya	0.91	0.91	0.91

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengoperasian Generator

Pada saat pengoperasian tiga generator secara paralel harus mengikuti sebuah *Standard Operating Procedure* (SOP) agar pekerjaan dapat dilakukan dengan efektif. Berikut gambar *single line* diagramnya untuk menjelaskan prosedur pengoperasian kerja paralel generator pada Gambar 4.



Gambar 4. *Single line* diagram proses pengoperasian generator.

Dapat dilihat pada Gambar 4 *single line* diagramnya maka dapat dijelaskan prosedur pengoperasian kerja paralel tiga generator yang melayani beban pada unit 1 atau 2 yang diperuntukkan untuk mengoperasikan generator utama secara manual sebagai berikut :

1. Pengecekan Ketiga Generator, pengecekan ini dilakukan pada blok generator cadangan pada Gambar 4 :
 - a) Tegangan baterai pada generator 1, 2 dan 3 dicek untuk dipastikan tegangannya berada pada angka 24 V.
 - b) Oli pada mesin generator 1, 2 dan 3 dicek untuk dipastikan volume oli berada di angka 153 liter.
 - c) Cairan pendingin radiator pada mesin generator 1, 2 dan 3 dicek untuk dipastikan volume cairan pendinginnya 143 liter dan radiaturnya tidak bocor.
 - d) Jalur bahan bakar dicek untuk dipastikan tidak tersumbat dan berada pada posisi “open”.
 - e) Kondisi modul sinkron diposisikan pada mode “ON/standby”.
 - f) Modul Deep Sea Electronics DSE 8610 pada panel generator 1, 2 dan 3 diposisikan pada posisi “manual”.
2. Pengecekan Panel dan Kontrol Generator, pada blok sinkronisasi dan gardu pembangkit pada Gambar 4 :
 - a) *Vacum Circuit Breaker outgoing* transformator 6250 kVA dipanel 7.2 kV/3P *incoming* diposisikan pada keadaan terbuka atau *open*.

- b) *Section Switch* 6 kV pada unit 1 dan unit 2 diposisikan dalam keadaan terbuka atau *open*.
- c) Semua *Air Circuit Breaker* panel *outgoing* generator 1, 2 dan 3 posisikan dalam keadaan terbuka atau *open*.
- d) Pemisah (PMS) dan Pemutus (PMT) pada sisi PLN di Gardu Pembangkit 150 kV diposisikan dalam kondisi terbuka atau terlepas.
- e) Pemisah (PMS) dan Pemutus (PMT) pada sisi PLTU tepatnya pada tranformator unit 1 atau 2 dan transformator *standby* di Gardu Pembangkit 150 kV diposisikan dalam kondisi terbuka atau terlepas.

3. Proses Pengoperasian Generator No. 1, dilakukan pada blok generator cadangan pada Gambar 4 :
 - a) *Selector switch power* pada generator diposisikan ke posisi (*offline/black-out*) pada panel sinkron.
 - b) Untuk melakukan *start* generator, tombol “no!” berwarna merah ditekan, kemudian dilanjutkan dengan menekan tombol “gambar tangan” dan selanjutnya tombol “start” yang berwarna hijau pada modul Deep Sea Electronics DSE 8610 ditekan.
 - c) Setelah mesin generator menyala, parameter generator diperiksa seperti tegangan *output* di angka 380 V dan frekuensi generator di angka 50 Hz.
 - d) Semua parameter dipastikan berada dalam batas aman kemudian generator dijalankan dalam kondisi normal selama 10 menit agar mesin menjadi stabil dan juga memanaskan temperatur mesin generator sampai diangka 60°C.
 - e) Jika generator telah dinyatakan aman dan siap dibebani, maka prosesnya dapat dilanjutkan dengan *air circuit breaker incoming* generator diposisikan dalam kondisi tertutup
 - f) Indikator generator dipastikan dalam kondisi baik kemudian tombol gambar “sinkron” ditekan untuk memastikan indikasi “*circuit breaker menyala*”.
4. Proses Pengoperasian Generator No. 2, dilakukan pada blok generator cadangan pada Gambar 4 :
 - a) *Selector switch power* pada generator diposisikan ke posisi (*offline/black-out*) pada panel *incoming* generator nomor 2
 - b) Untuk melakukan *start* generator, tombol “No!” berwarna merah ditekan, kemudian dilanjutkan dengan menekan tombol “gambar tangan” dan selanjutnya tombol “start” yang berwarna hijau pada modul Deep Sea Electronics DSE 8610 ditekan
 - c) Setelah mesin generator menyala, parameter generator diperiksa seperti tegangan *output* di angka 380 V dan frekuensi generator di angka 50 Hz
 - d) Semua parameter dipastikan berada dalam batas aman kemudian generator dijalankan dalam kondisi normal selama 10 menit agar mesin menjadi stabil dan juga memanaskan temperatur mesin generator sampai diangka 60°C.
5. Proses Pengoperasian Generator No. 3, dilakukan pada blok generator cadangan pada Gambar 4 :

- a) *Selector switch power* pada generator diposisikan ke posisi (*offline/black-out*) pada panel *incoming* generator nomor 3.
 - b) Untuk melakukan *start* generator, tombol “No1” berwarna merah ditekan, kemudian dilanjutkan dengan menekan tombol “Mode Manual” dan selanjutnya tombol “*start*” yang berwarna hijau pada modul *Deep Sea Electronics* DSE 8610 ditekan.
 - c) Setelah mesin generator menyala, parameter generator diperiksa seperti tegangan *output* di angka 380 V dan frekuensi generator di angka 50 Hz.
 - d) Semua parameter dipastikan berada dalam batas aman kemudian generator dijalankan dalam kondisi normal selama 10 menit agar mesin menjadi stabil dan juga memanaskan temperatur mesin generator sampai diangka 60°C.
6. Proses Sinkronisasi, terjadi pada blok sinkronisasi generator cadangan dan blok transformator pada Gambar 4 :
- a) Setelah temperatur mesin generator nomor 2 dan 3 telah berada di angka 60°C, maka sinkronisasi generator nomor 2 dilakukan dengan menekan tombol gambar “sinkron”.
 - b) Generator nomor 3 juga disinkronisasikan dengan menekan tombol gambar “sinkron”.
 - c) Transformator *standby* diesel generator dihubungkan dengan menekan tombol “*circuit breaker ON*” pada panel *outgoing* generator nomor 1, 2 dan 3.
 - d) Parameter generator dicek seperti tegangan yang berada di angka 380 V dan frekuensi di angka 50 Hz pada panel *incoming* transformator *standby* diesel generator.
 - e) *Vacum Circuit Breaker incoming* dan *outgoing* transformator *standby* diesel generator diposisikan dalam keadaan tertutup *substation* atau *distributed control system*.
 - f) Parameter tegangan pada bus *outgoing* transformator *standby* diesel generator 6.3 kV masuk dan terbaca oleh operator pada ruangan *substation* atau *distributed control system*.
 - g) *Section Standby Branch Switch* di bus 6.3 kV diposisikan tertutup maka setelah itu generator cadangan dapat melayani beban unit 1 atau 2 untuk beban 6.3 kV.
 - h) *Vacum Circuit Breaker* pada sisi *incoming* Transformator *Auxiliary* 6.3 kV/400 V unit 1 atau 2 diposisikan dalam kondisi tertutup, maka setelah itu generator cadangan dapat melayani beban unit 1 atau 2 untuk beban 400 V.
 - i) Semua kapasitas generator dipantau selama penyesuaian pada saat melayani beban antara unit 1 dan 2.
 - j) Setelah proses *start-up* generator utama unit 1 atau 2 telah dilakukan maka beban pastikan terbagi secara merata pada masing-masing generator oleh modul *Deep Sea Electronics* 8610.
7. Proses pengoperasian generator utama dengan generator cadangan, terjadi pada blok generator utama dan blok sinkronisasi generator utama dan cadangan seperti pada Gambar 4 :
- a) Setelah generator cadangan telah melayani beban pada unit 1 atau 2 dengan memastikan beban atau mesin di *Auxiliary Branch* pada *reactor* generator utama telah bekerja 2 maka dapat memulai *start-up* generator utama
 - b) *Reactor Section Switch* pada *incoming reactor* generator utama diposisikan dalam kondisi tertutup agar reactor dapat bekerja untuk menjaga kestabilan tegangan pada generator utama
 - c) Ketika beban mesin-mesin pada unit 1 atau 2 telah bekerja maka mesin tersebut berfungsi untuk memutar turbin dengan merebus air dengan bahan bakar batu bara, sehingga rotor yang *dicouple* dengan dengan turbin bergerak sehingga generator utama dapat menghasilkan energi listrik.
 - d) Setelah generator utama telah bekerja, jalankan generator utama sampai kecepatannya 3000 Rpm serta daya aktifnya sebesar 10 % (2.5 MW) dari kapasitasnya yaitu 25 MW.
 - e) Setelah generator utama telah bekerja parameternya seperti pada tegangan pastikan diangka 6.3 kV, frekuensi diangka 50 Hz
 - f) *Vacum Circuit Breaker* pada sisi *outgoing reactor* generator utama diposisikan dalam kondisi tertutup agar reactor dapat bekerja untuk menjaga kestabilan tegangan pada generator utama
 - g) Generator *Circuit Breaker* pada generator utama unit 1 atau 2 diposisikan dalam kondisi tertutup agar dapat menyuplai daya listrik ke transformator 31500 kVA, 6.3 kV/ 150 kV pada unit 1 atau 2
 - h) Pemisah (PMS) dan Pemutus (PMT) pada sisi PLTU untuk transformator unit 1 atau 2 di Gardu Pembangkit 150 kV diposisikan dalam kondisi tertutup atau terhubung
 - i) Tegangan pada bus Gardu Pembangkit dijaga pada 150 kV
 - j) Pemisah (PMS) dan Pemutus (PMT) pada sisi PLTU untuk transformator *standby* di Gardu Pembangkit 150 kV diposisikan dalam kondisi tertutup atau terhubung untuk mengimpor daya listrik masuk ke transformator *standby* yang berfungsi sebagai transformator *step-down* untuk menyuplai daya ke beban.
8. Proses sinkronisasi generator utama dengan generator cadangan, terjadi pada blok sinkronisasi generator utama dan generator cadangan pada Gambar 4 :
- a) Proses sinkronisasi generator utama dengan generator cadangan dilakukan pada sisi 6.3 kV
 - b) Parameter pada sisi sekunder transformator *standby* yang berfungsi sebagai transformator *step-down* diperhatikan untuk tegangannya diangka 6.3 kV, frekuensinya diangka 50 Hz
 - c) Parameter pada sisi sekunder transformator *standby*

yang berfungsi sebagai transformator *black-start* diperhatikan untuk tegangannya diangka 6.3 kV dan frekuensinya diangka 50 Hz

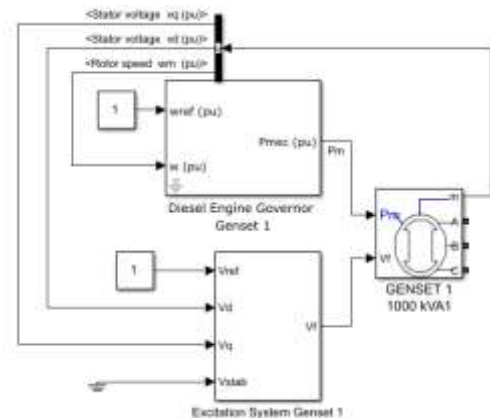
- d) Setelah kedua parameter tegangan dan frekuensi diangka sama maka generator utama dengan generator cadangan dapat dilakukan sinkronisasi dengan memposisikan *Vacum Circuit Breaker* dan *Disconnection Switch* 6.3 kV dalam kondisi tertutup untuk masing-masing alatnya dengan menekan tombol tutup pada ruangan DCS
 - e) Maka generator utama dengan generator cadangan telah sinkron.
9. Kontrol Kerja Generator Cadangan terhadap Generator Utama, terjadi pada blok generator cadangan pada Gambar 4 :
 - a) Setelah generator utama dengan generator cadangan telah sinkron, generator utama akan sebagian besar mengambil alih daya yang dibutuhkan beban secara otomatis
 - b) Generator cadangan akan menyesuaikan sendiri daya *output* untuk melayani beban melalui modul Deep Sea Electronics 8610
 - c) Generator cadangan disesuaikan sampai total daya *output* dari ketiga generator dibawah 500 kW, maka dapat dilakukan pelepasan sinkronisasi generator cadangan dengan generator utama
 10. Proses Pelepasan Sinkron dan Mematikan Generator Cadangan, melibatkan pembukaan pemutus di blok sinkronisasi dan panel *outgoing* generator pada Gambar 4 :
 - a) Apabila generator cadangan telah sinkron dengan generator utama pada salah satu unit (1 dan 2) sehingga generator utama telah beroperasi, maka pelepasan sinkronisasi generator dapat dilakukan dengan koordinasi pada operator *distributed control system* generator utama pada salah satu unit (1 dan 2) yang di lakukan *start-up* .
 - b) *Vacum Circuit Breaker* untuk tegangan menengah *incoming* dan *outgoing* pada transformator *standby* diesel generator diposisikan dalam kondisi terbuka
 - c) *Air Circuit Breaker* pada panel *outgoing* generator nomor 1, 2 dan 3 diposisikan dalam kondisi terbuka
 - d) Sinkronisasi generator 1, 2 dan 3 dilepaskan dengan menekan tombol “asinkron”
 - e) Generator nomor 1, 2 dan 3 dimatikan dengan menekan tombol “OFF”
 - f) *Vacum Circuit Breaker* dan *Disconnection Switch* 6,3 kV dalam kondisi terbuka untuk masing-masing alatnya dengan menekan tombol *open* pada ruangan DCS
 - g) PMT (Pemutus) dan PMS (Pemisah) pada sisi transformator *standby* 150 kV diposisikan terlepas atau terbuka sehingga beban sepenuhnya diambil alih oleh generator utama.
 11. Proses pendinginan generator cadangan, terjadi pada blok generator cadangan pada Gambar 4 :

- a) Semua baut dipastikan masih terpasang kencang, air radiator masih berada di angka 143 liter, jalur bahan bakar dipastikan tidak tersumbat dan baterai dipastikan dalam kondisi baik dengan nilai tegangannya masih berada di angka 24 V.
- b) *Selector switch* circuit breaker *outgoing* diposisikan dalam keadaan terbuka.
- c) *Power control* panel diperiksa dan semua modul *Deep Sea Electronics* DSE 8610 dimatikan.
- d) Semua panel dipastikan dalam kondisi tertutup dan rapat sehingga tidak ada panel yang tertutup.

Pada saat ketiga generator bekerja secara manual juga dibutuhkan mekanisme pembagian beban yang akan membagi bebannya secara merata dan untuk hal ini digunakan lah modul *Deep Sea Electronics* 8610, dengan menggunakan modul ini pembagian beban atau *load sharing* akan otomatis terbagi. Mekanisme pembagian beban atau *load sharing* untuk setiap ketiga generator akan mendapatkan beban sesuai dengan kapasitas yang dimiliki generator yang dimana modul *Deep Sea Electronics* 8610 akan membaca beban yang dibutuhkan pada masing-masing unit pada pembangkit utama pada PT. Cahaya Fajar Kaltim, modul *Deep Sea Electronics* 8610 ini sangat berperan penting pada proses pembagian bebannya secara otomatis.

B. Pemodelan Pengoperasian Generator

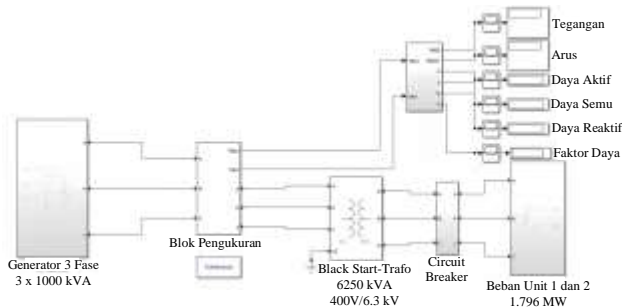
Pemodelan ini merepresentasikan sistem pembangkitan listrik yang menggunakan generator set, yang terdiri dari mesin diesel sebagai penggerak utama dan generator sinkron tiga fase sebagai penghasil energi listrik. Sistem ini dirancang dan dimodelkan dalam perangkat lunak MATLAB *Simulink* untuk menganalisis proses pengoperasian 3 unit generator yang bekerja secara paralel, sehingga dapat diketahui kinerja masing-masing unit serta distribusi daya yang dihasilkan. Pemodelan ini juga memungkinkan simulasi terhadap kondisi operasi yang berbeda, termasuk pembagian beban dan pengaruhnya terhadap parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya. Gambar pemodelan dari generator set yang digunakan dalam analisis ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Model Generator pada MATLAB *Simulink*

Seperti yang terlihat pada Gambar 5 generator cadangan berkapasitas 3×1000 kVA dimodelkan menggunakan

MATLAB *Simulink* sesuai dengan spesifikasi aslinya di PT. Cahaya Fajar Kaltim. Pemodelan ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi nyata saat ketiga generator dioperasikan secara paralel, mengacu pada standar *International Electrical Commission (IEC) 60038-2003* untuk tegangan dan *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) C37-1987* untuk frekuensi. Sistem tenaga listrik secara keseluruhan juga disusun menyerupai sistem aktual, khususnya saat melayani beban unit 1 atau 2 ketika terjadi *black-out* pada generator utama. Melalui simulasi ini, dapat dipastikan bahwa parameter kerja paralel sesuai standar, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 6 sebagai berikut :



Gambar 6. Model tiga generator pada MATLAB *Simulink*

C. Pembagian Beban Generator

Generator yang nilai daya tidak seimbang dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan sinkronisasi antara generator yang dikarenakan salah satu generator bekerja lebih berat daripada generator lainnya, maka dari itu perlu dilakukan pembagian beban pada ketiga generator yang dioperasikan secara paralel dan pada saat simulasi ketiga generator yang bekerja paralel harus dipastikan masing-masing generator bebannya terbagi sama rata, yang bertujuan agar setiap generator tidak bekerja lebih berat ketimbang generator lainnya. Oleh sebab itu setiap generator harus dihitung sesuai dengan kapasitas yang di milikinya dan pada Tabel 7 adalah kapasitas ketiga generator.

TABEL 7
KAPASITAS TIGA GENERATOR

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Daya Aktif (kW)	800	800	800
Daya Semu (kVA)	1000	1000	1000
Daya Reaktif (kVAR)	600	600	600

Dapat dilihat pada Tabel 7 daya *output* setiap generator, sehingga dapat dihitung nilai daya *output* ketiga generator pada saat bekerja secara paralel untuk melayani antara unit 1 dan 2 sebagai dengan Persamaan (5):

$$\text{Daya paralel generator} = \frac{P_{\text{Beban}}}{\text{Jumlah generator}} \quad (5)$$

$$\text{Dimana} = \frac{1.796 \text{ MW}}{3} = 0.5989 \text{ MW}$$

Dengan demikian, pada saat ketiga generator dioperasikan secara paralel untuk melayani beban pada Unit 1 atau Unit 2, maka pembagian daya harus dilakukan secara merata agar

sistem tetap seimbang. Karena ketiga generator memiliki kapasitas yang sama, maka masing-masing generator harus menyuplai daya sebesar 0.5989 MW atau 598.9 kW. Nilai ini diperoleh dari pembagian total beban secara proporsional agar setiap generator bekerja dengan beban yang seimbang dan tidak terjadi kelebihan daya pada salah satu unit.

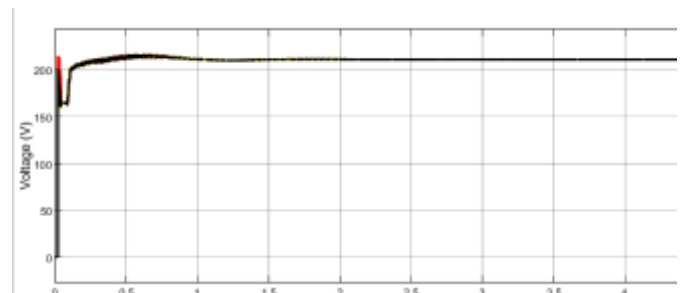
D. Simulasi Pengoperasian Generator Beban Unit 1

Saat simulasi tiga generator dioperasikan paralel untuk menyuplai beban unit 1 sebesar 1.796 MW, terdapat beberapa parameter penting yang harus diperhatikan. Ketiga generator harus dalam kondisi normal, yang dapat dilihat dari parameter-parameternya yang dapat dilihat pada Tabel 8 saat melayani beban unit 1.

TABEL 8
PARAMETER HASIL SIMULASI KETIGA GENERATOR PADA SAAT MELAYANI BEBAN UNIT 1

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Tegangan L-L (V)	365.9	365.9	365.9
Arus (I)	857.1	857.1	857.1
Daya Aktif (kW)	496.787	496.790	496.791
Frekuensi (Hz)	50	50	50
Rpm	1500	1500	1500
Faktor Daya	0.9144	0.9144	0.9144

Berdasarkan Tabel 8 dapat dilihat bahwa tegangan untuk ketiga generator yaitu untuk tegangan (L-L) berada pada angka 365.9 V, hal ini diperoleh pada saat proses sinkronisasi ketiga generator yang dimana salah satu syarat sebuah generator bekerja secara paralel atau pada saat disinkronisasi. Nilai tegangannya harus disamakan terlebih dahulu sesuai dengan standar *International Electrical Standards Commission (IEC) 60038* untuk toleransi tegangan antara generator adalah $\pm 10\%$, karena jika salah satu generator dengan tegangan sedikit lebih tinggi akan cenderung menyuplai beban lebih besar yang membuat pembagian beban tidak seimbang dan beresiko melampaui batas kemampuan salah satu generator serta mengakibatkan terjadinya kegagalan sinkron pada ketiga generator maka dari itu karena nilai tegangan pada ketiga telah disamakan maka proses sinkronisasi generator dapat dilakukan nilai dari tegangan ketiga generator pada saat bekerja secara paralel meyalani beban unit 1, yang nilai dari tegangan ketiga generator pada saat bekerja secara paralel meyalani beban unit 1 dapat dilihat pada Gambar 7 Grafik tegangan.



Gambar 7. Grafik tegangan ketiga generator pada saat melayani beban unit 1

Grafik tegangan tiga fase yang dapat dilihat Gambar 7 menunjukkan respon ketiga yang generator bekerja secara paralel saat dihubungkan ke beban yang besar seperti pada

percobaan disimulasi yaitu beban unit 1 yang daya aktifnya adalah 1.796 MW. Terlihat adanya penurunan tegangan sesaat pada ketiga fase (R, S, dan T) di awal waktu, yang merupakan respons transien akibat lonjakan arus awal (*inrush current*) dan belum seimbang suplai daya oleh genset dengan permintaan beban. Kondisi ini menyebabkan torsi beban melebihi torsi mesin sesaat, sehingga rotor melambat dan tegangan turun. Selanjutnya, sistem pengatur seperti *Automatic Voltage Regulator (AVR)* dan *governor* mulai merespons gangguan tersebut. AVR meningkatkan eksitasi untuk menaikkan tegangan terminal genset dan sementara *governor* mengatur suplai bahan bakar agar kecepatan putaran kembali ke nilai nominal. Dalam kurun waktu kurang dari satu detik, tegangan mulai stabil mendekati nilai nominal sekitar 211.3 V, menandakan bahwa sistem berhasil mencapai kondisi tunak atau *steady state*.

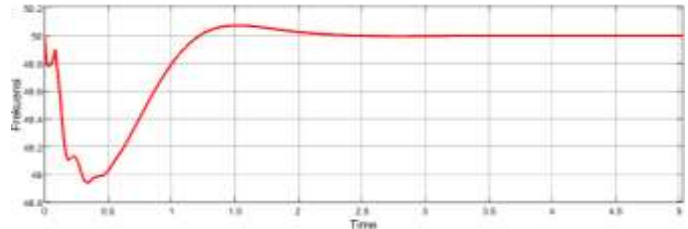
Arus pada ketiga generator yang dapat dilihat pada Tabel 8, yaitu untuk ketiga generator arusnya diangka 857.1 A. Nilai arus antara L1, L2 dan L3 pada setiap generator sama hal ini diperoleh pada saat simulasi berlangsung yang mana setiap arus pada setiap fase terbagi sama rata yang membuktikan bahwa pembagian porsi beban setiap generator pada saat bekerja paralel tidak ada yang lebih berat.

Daya aktifnya pada ketiga generator yang dapat dilihat pada Tabel 8 pada saat bekerja secara paralel, bernilai relatif sama yaitu untuk setiap generator yaitu pada generator 1 adalah 496.787 kW, generator 2 adalah 496.790 kW serta generator 3 adalah 496.791 kW yang berarti pembagian beban antar generator seimbang yang membuat generator bekerja dengan keadaan parameter-parameter yang sama sehingga tidak adanya generator yang bekerja lebih berat ketimbang generator lainnya, yang menyebabkan jika Jika pembagian beban tidak merata, maka salah satu generator akan bekerja melebihi kapasitasnya, yang dapat memicu ketidakseimbangan sistem dan berisiko menyebabkan kegagalan sinkronisasi.

Frekuensi pada ketiga generator yang dapat dilihat pada Tabel 8 juga merupakan salah satu syarat sebuah generator bekerja secara paralel atau pada saat sinkron, yang mana nilai frekuensinya juga harus disamakan dan pada saat ketiga generator dioperasikan pada simulasi bernilai sama yang dapat dilihat pada Tabel 8. yaitu untuk ketiga generator yaitu diangka 50 Hertz, sehingga nilai frekuensi antara generator dapat dikatakan diangka sama dan nilainya juga masih aman menurut standar *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* C37. 106-1987, yang dikatakan perbedaan frekuensi yang diperbolehkan adalah $\pm 1\%$ dari frekuensi referensi yaitu 50 Hz. Ketidaksamaan frekuensi akan menyebabkan tegangan dan arus berubah-ubah, fluktuasi daya dan beban torsi yang tidak sama yang akan mengakibatkan terjadinya kegagalan sinkron pada ketiga generator dan karena frekuensi antara ketiga generator sama maka dapat dilakukan sinkronisasi generator yang grafik nilai dari frekuensi pada setiap generator dapat dilihat pada Gambar 8 Grafik frekuensi ketiga generator.

Frekuensi dari ketiga generator dapat dilihat pada Gambar 8 yang terdapat penurunan frekuensi sesaat pada saat ketiga generator dihubungkan ke beban, hal ini dapat terjadi akibat respons generator terhadap perubahan beban yang tiba-tiba. Ketika generator tersambung dengan beban yang cukup besar

seperti beban unit 1 dimana nilainya adalah 1,796 MW terjadi lonjakan arus yang menyebabkan torsi beban melebihi torsi *output* mesin, sehingga rotor melambat dan frekuensi turun. Besarnya penurunan frekuensi pada saat pengoperasian ketiga generator secara paralel bernilai sampai dengan 1 Hz dari frekuensi awal yaitu 50 Hz, akan tetapi hal ini tak berlangsung lama dan akan stabil kembali dalam beberapa detik setelah sistem pengendali seperti *governor* dan eksitasi bekerja mengatur kembali *output* genset untuk meminimalkan penurunan frekuensi ini.



Gambar 8. Grafik frekuensi ketiga generator pada saat melayani beban unit 1

E. Simulasi Pengoperasian Generator Beban Unit 2

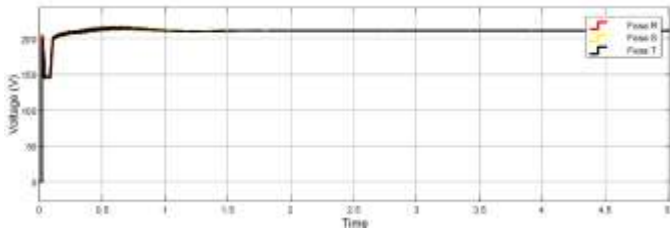
Pada Saat simulasi tiga generator dioperasikan paralel untuk menyuplai beban unit 2 juga sebesar 1,796 MW, terdapat beberapa parameter penting yang harus diperhatikan yang dapat dilihat dari parameternya yang dapat dilihat pada Tabel 9 saat melayani beban unit 2.

TABEL 9
PARAMETER HASIL SIMULASI KETIGA GENERATOR PADA SAAT MELAYANI BEBAN UNIT 2

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Tegangan (V)	365.9	365.9	365.9
Arus (I)	856.9	856.9	856.9
Daya Aktif (kW)	496.598	496.598	496.596
Frekuensi (Hz)	50	50	50
Rpm	1500	1500	1500
Faktor Daya	0.9144	0.9144	0.9144

Berdasarkan Tabel 9 dapat dilihat bahwa tegangan untuk ketiga generator yaitu untuk Tegangan (L-L) berada pada angka yang sama yaitu 365.9 V, hal ini diperoleh pada saat proses sinkronisasi ketiga generator yang dimana salah satu syarat sebuah generator bekerja secara paralel atau pada saat disinkronisasi. Nilai tegangannya harus disamakan terlebih dahulu sesuai dengan standar *International Electrical Standards Commission (IEC)* 60038 untuk toleransi tegangan antara generator adalah $\pm 10\%$, karena jika salah satu generator dengan tegangan sedikit lebih tinggi akan cenderung menyuplai beban lebih besar yang membuat pembagian beban tidak seimbang dan berisiko melampaui batas kemampuan salah satu generator serta mengakibatkan terjadinya kegagalan sinkron pada ketiga generator maka dari itu karena nilai tegangan pada ketiga telah disamakan maka proses sinkronisasi generator dapat dilakukan nilai dari tegangan ketiga generator pada saat bekerja secara paralel meyalani beban unit 2, yang nilai dari tegangan ketiga generator pada saat bekerja secara paralel meyalani beban unit 1 dapat dilihat pada Gambar 9 grafik tegangan.

Grafik tegangan tiga fase yang dapat dilihat Gambar 9 menunjukkan respon ketiga yang generator bekerja secara



Gambar 9. Grafik tegangan ketiga generator pada saat melayani beban unit 2

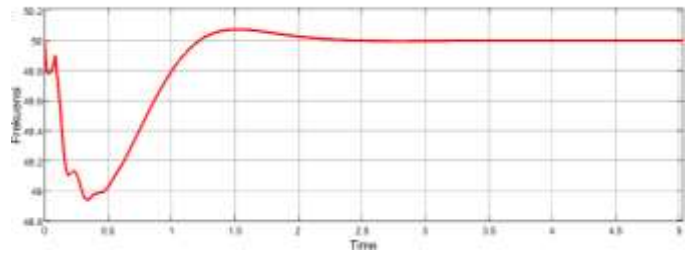
paralel saat dihubungkan ke beban yang besar seperti pada percobaan disimulasi yaitu beban unit 2 yang daya aktifnya adalah 1.796 MW. Terlihat adanya penurunan tegangan sesaat pada ketiga fase (R, S, dan T) di awal waktu, yang merupakan respons transien akibat lonjakan arus awal (inrush current) dan belum seimbangannya suplai daya oleh genset dengan permintaan beban. Kondisi ini menyebabkan torsi beban melebihi torsi mesin sesaat, sehingga rotor melambat dan tegangan turun. Selanjutnya, sistem pengatur seperti *Automatic Voltage Regulator (AVR)* dan *governor* mulai merespons gangguan tersebut. AVR meningkatkan eksitasi untuk menaikkan tegangan terminal genset dan sementara *governor* mengatur suplai bahan bakar agar kecepatan putaran kembali ke nilai nominal. Dalam kurun waktu kurang dari satu detik, tegangan mulai stabil mendekati nilai nominal sekitar 211.3 V, menandakan bahwa sistem berhasil mencapai kondisi tunak atau *steady state*.

Arus pada ketiga generator yang dapat dilihat pada Tabel 9 yaitu untuk ketiga generator arusnya diangka 856.9 A. Nilai arus antara L1, L2 dan L3 pada setiap generator sama hal ini diperoleh pada saat simulasi berlangsung yang mana setiap arus pada setiap fase terbagi sama rata yang membuktikan bahwa pembagian porsi beban setiap generator pada saat bekerja paralel tidak ada yang lebih berat

Daya aktifnya pada ketiga generator yang dapat dilihat pada Tabel 9 pada saat bekerja secara paralel, bernilai relatif sama yaitu untuk setiap generator yaitu pada Generator 1 adalah 496.598 kW, Generator 2 adalah 496.598 kW serta Generator 3 adalah 496.596 kW yang berarti pembagian beban antar generator seimbang yang membuat generator bekerja dengan keadaan parameter-parameter yang sama sehingga tidak adanya generator yang bekerja lebih berat ketimbang generator lainnya, yang menyebabkan jika Jika pembagian beban tidak merata, maka salah satu generator akan bekerja melebihi kapasitasnya, yang dapat memicu ketidakseimbangan sistem dan berisiko menyebabkan kegagalan sinkronisasi.

Frekuensi pada ketiga generator yang dapat dilihat pada Tabel 9 juga merupakan salah satu syarat sebuah generator bekerja secara paralel atau pada saat sinkron, yang mana nilai frekuensinya juga harus disamakan dan pada saat ketiga generator dioperasikan pada simulasi bernilai sama yaitu untuk ketiga generator yaitu diangka 50 Hertz, sehingga nilai frekuensi antara generator dapat dikatakan diangka sama dan nilainya juga masih aman menurut standar *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) C37. 106-1987*, yang dikatakan perbedaan frekuensi yang diperbolehkan adalah $\pm 1\%$ dari frekuensi referensi yaitu 50 Hz. Ketidaksamaan frekuensi akan menyebabkan tegangan dan arus berubah-ubah, fluktuasi daya dan beban torsi yang tidak sama yang akan mengakibatkan

terjadinya kegagalan sinkron pada ketiga generator dan karena frekuensi antara ketiga generator sama maka dapat dilakukan sinkronisasi generator serta grafik nilai dari frekuensi pada setiap generator dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik frekuensi ketiga generator pada saat melayani beban unit 2

Frekuensi dari ketiga generator dapat dilihat pada Gambar 10 yang terdapat penurunan frekuensi sesaat pada saat ketiga generator dihubungkan ke beban, hal ini dapat terjadi akibat respons generator terhadap perubahan beban yang tiba-tiba. Ketika generator tersambung dengan beban yang cukup besar seperti beban unit 2 dimana nilainya adalah 1.796 MW terjadi lonjakan arus yang menyebabkan torsi beban melebihi torsi *output* mesin, sehingga rotor melambat dan frekuensi turun. Besarnya penurunan frekuensi pada saat pengoperasian ketiga generator secara paralel bernilai sampai dengan 1 Hz dari frekuensi awal yaitu 50 Hz, akan tetapi hal ini tak berlangsung lama dan akan stabil kembali dalam beberapa detik setelah sistem pengendali seperti *governor* dan eksitasi bekerja mengatur kembali *output* genset untuk meminimalkan penurunan frekuensi ini.

F. Kontrol Kerja Generator

Pada saat ketiga generator cadangan yang bekerja secara paralel telah membuat generator utama bekerja maka dilakukanlah sinkronisasi antara ketiga generator cadangan dengan generator utama yang bertujuan untuk mengalihkan beban yang ditanggung atau yang dilayani oleh generator cadangan dapat secara bertahap dikembalikan kepada generator utama. Proses ini dilakukan dengan cara yang terkontrol untuk menghindari ketidakseimbangan daya, tegangan, atau frekuensi yang dapat mengganggu stabilitas sistem secara keseluruhan yang parameternya dapat dilihat pada Tabel 10.

TABEL 10
PARAMETER HASIL SIMULASI KETIGA GENERATOR PADA SAAT SINKRONISASI GENERATOR UTAMA

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Tegangan (V)	375.6	375.6	375.6
Arus (I)	272	272	272
Daya Aktif (kW)	161.225	161.226	161.225
Frekuensi (Hz)	50	50	50
Rpm	1500	1500	1500
Faktor Daya	0.9109	0.9109	0.9109

Pada saat ketiga generator dioperasikan secara paralel, tegangan pada Tabel 10 yaitu untuk kesemua generator (L-L) yaitu 375.6 V Hal ini diperoleh pada saat proses sinkronisasi ketiga generator yang dimana salah satu syarat sebuah generator bekerja secara paralel atau pada saat disinkronisasi. Nilai tegangannya harus disamakan terlebih dahulu sesuai dengan

standar *International Electrical Standards Commission (IEC)* 60038 untuk toleransi tegangan antara generator adalah $\pm 10\%$, karena jika salah satu generator dengan tegangan sedikit lebih tinggi akan cenderung menyuplai beban lebih besar yang membuat pembagian beban tidak seimbang dan beresiko melampaui batas kemampuan salah satu generator serta mengakibatkan terjadinya kegagalan sinkron pada ketiga generator maka dari itu karena nilai tegangan pada ketiga telah disamakan maka proses sinkronisasi generator dapat dilakukan.

Arus pada ketiga generator yang dapat dilihat pada Tabel 10 menunjukkan bahwa generator 1 memiliki arus sebesar 272 A, generator 2 sebesar 272 A dan generator 3 sebesar 272 A. Nilai arus yang sama pada ketiga generator ini diperoleh pada saat simulasi di mana setiap arus pada masing-masing fase terbagi secara merata sehingga kesamaan distribusi beban ini juga tercermin dari nilai Daya Aktif yang dihasilkan oleh masing-masing generator, yaitu untuk generator 1 sebesar 161.225 kW, generator 2 sebesar 161.226 kW dan generator 3 sebesar 161.225 kW. Nilai daya yang hampir sama ini menunjukkan bahwa setiap fase pada masing-masing generator menerima beban yang sama besar, yang menegaskan bahwa dalam kondisi kerja paralel, sistem mampu membagi beban secara merata antar generator tanpa terjadi ketidakseimbangan daya atau arus listrik.

Hasil dari pengoperasian kerja paralel 3 generator 3 fase kapasitas 1000 kVA pada saat sinkron dengan generator utama 25 MW pada simulasi dengan menggunakan *MATLAB Simulink*. Perlu dibandingkan antara *output* Daya dari ketiga generator cadangan dan generator utama yang dapat dilihat pada Tabel 11 perbandingan daya *output* generator cadangan dengan generator utama pada saat meyalani beban unit 1 atau 2. Dapat dilihat pada Tabel 11 ketiga generator cadangan yang bekerja secara paralel dimodelkan pada simulasi hanya mengeluarkan daya aktif pada masing generator yaitu untuk generator 1 adalah 161.225 kW, generator 2 adalah 161.226 kW dan generator 1 adalah 161.225 kW dengan total output daya aktif dari ketiga generator tersebut adalah 483.676 kW.

TABEL 11.

PERBANDINGAN DAYA *OUTPUT* GENERATOR CADANGAN DENGAN GENERATOR UTAMA

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3	Generator Utama
Daya Aktif (kW)	161.225	161.226	161.225	1205.724
Daya Semu (kVA)	177.002	177.003	177.006	2059.847
Daya Reaktif (kVAR)	73.048	73.051	73.057	1670.089

Generator utama dengan kapasitas 25 MW memiliki kapasitas yang lebih besar dari ketiga generator cadangan, maka pada saat generator utama telah tersinkron dengan generator cadangan pada saat melayani beban unit 1 atau 2 sebesar 1.796 MW modul *Deep Sea Electronics* 8610 pada panel generator cadangan modul ini diatur sedemikian rupa untuk untuk membatasi total daya aktif dari ketiga generator cadangan hingga maksimal 500 kW untuk total output daya aktif dari ketiga yang sesuai dengan SOP maka generator utama berperan untuk mengambil alih sebagian besar bebannya pada saat kesemua

generator telah disinkronkan. Pada saat ketiga generator cadangan yang bekerja secara paralel nilai output daya aktifnya (P) tidak lebih dari 500 kW dapat dilakukan proses pelepasan sinkronisasi antar ketiga generator cadangan dengan generator utama, yang akan membuat keseluruhan beban dari unit 1 atau 2 dialihkan ke generator utama.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengoperasian kerja paralel 3 generator 3 fase kapasitas 1000 kVA pada PT. Cahaya Fajar Kaltim dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengoperasian paralel 3 generator 3 fase kapasitas 1,000 kVA di PT. Cahaya Fajar Kaltim memiliki tegan yang sama di setiap kondisinya yaitu saat beban unit 1 sebesar 365,9 V (L-L), saat beban unit 2 sebesar 365,9 V (L-L), saat sinkron dengan generator utama sebesar 375,6 V (L-L). Tegangan sama diketiga generator dan memenuhi toleransi $\pm 10\%$ sesuai (*IEC*) 60038.
2. Frekuensi antar generator juga seragam di 50 Hz, sesuai batas $\pm 1\%$ dari standar (*IEEE*) C37.106-1987.
3. Pada unit 1, pembagian daya merata yaitu generator 1 adalah 496.787 kW, generator 2 adalah 496.790 kW, dan generator 3 adalah 496.791 kW, sedangkan pada unit 2 masing-masing sebesar 496.598 kW, menandakan *load sharing* berjalan optimal. Saat disinkronkan dengan generator utama 25 MW, beban sebagian besar dialihkan ke generator utama, sedangkan 3 generator 1000 kVA dikendalikan melalui modul *Deep Sea Electronics* 8610 dengan output masing-masing diangka 161.225 kW, menghasilkan total 483.676 kW.

REFERENSI

- [1] F. M. Akbar Hasibuan, Radhiah and Subhan, "Kerja Paralel Dua Generator 0.8 kW Pada Lab. Proteksi Politeknik Negeri Lhokseumawe", *JURNAL KAJIAN TEKNIK ELEKTRO*, vol. 6, no 1, pp. 1-11, 2021.
- [2] B. F. Safari, Haerul, Irvanwansyah and Sulistianingsih, "Karakteristik Pembebanan Pada Generator Dengan Variasi Beban Resistif," *Journal Of Electrical Engginering (Joule)*, vol. 4, no 2, p. 60, 2023.
- [3] Epiwardia, R. Sutjipto dan T. Umar, "Analisis *Load Sharing* dan *Load Shedding* Operasi Paralel," *Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 10, no 1, pp. 42-47, 2023.
- [4] Jamaludin, Buku Ajar Pengantar Teknik Tenaga Listrik. Sidoarjo: UMSIDA Press, 2022.
- [5] A. Kadir, *Pembangkit Tenaga Listrik*. Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press), 2010.
- [6] P. Bunga, M. Pakiding and S. Silimang, "Perancangan Sistem Pengendalian Beban Dari Jarak Jauh Menggunakan *Smart Relay*," *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 4, no 5, pp. 66-67, 2015.
- [7] DSE, "*Load Sharing & Synchronising Control Modules*," *Deep Sea Electronics*, 2025. [Online]. Available: <https://www.deepseaelectronics.com/genset/load-sharing-synchronising-control-modules/dse8610>. [Accessed 20 7 2025].