

**PROFIL SISTEM KELISTRIKAN BALI PASCA GI PEMECUTAN KELOD DAN PLTU 780 MW CELUKAN BAWANG BEROPERASI**

**I Made Mataram**

Staff Pengajar Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana  
 Kampus Bukit Jimbaran, Bali, 80361, Tel. 0361 703315  
 Email: mataram@ee.unud.ac.id

**Abstrak**

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Bali bukan saja akan mengakibatkan penambahan pembangkit listrik tetapi juga berakibat pada penambahan GI baru seperti GI Pemecutan Kelod dan PLTU Celukan Bawang, Pengoperasian pembangkit dan GI ini akan memberikan perubahan pada profil sistem kelistrikan Bali.

Profil sistem kelistrikan 150 kV (tegangan, arus, daya aktif dan reaktif) di Bali setelah beroperasi pembangkit listrik PLTU Celukan Bawang dan GI Pemecutan Kelod akan dibahas pada penelitian ini. Analisis mencakup perhitungan aliran daya untuk sistem yang baru dan dibandingkan dengan sistem yang lama.

Hasil analisis menunjukkan bahwa profil sistem kelistrikan Bali menjadi lebih baik, tegangan masih dalam batas-batas toleransi ± 5%, terjadi penurunan arus dan aliran daya pada seluruh saluran transmisi serta pada tahun 2011 Bali masih mampu mensuplai pertumbuhan beban.

Kata Kunci : Profil sistem kelistrikan, GI Pemecutan Kelod dan PLTU Celukan Bawang.

**1 PENDAHULUAN**

Energi listrik sangat dibutuhkan dalam era sekarang ini dan sudah merupakan kebutuhan primer. Kebutuhan akan energi listrik berkembang seiring dengan kemajuan teknologi yang semakin pesat.

Peningkatan kebutuhan energi listrik pada konsumen perlu diimbangi dengan pemenuhan kebutuhan energi pada produsen yaitu dengan cara penambahan kapasitas pembangkit atau pembangunan pembangkit baru. Selain cara pemenuhan dengan penambahan kapasitas juga dapat dilakukan dengan perluasan atau penambahan GI yang baru.

Kebutuhan listrik pada sistem Bali mengalami peningkatan yang cukup tajam, diperkirakan pertumbuhan sekitar 8-12 % pertahun. Untuk mengantisipasi kenaikan tersebut, maka pengoperasian PLTU Celukan Bawang mutlak dilakukan. Pengoperasian pembangkit baru tidaklah cukup tanpa dibarengi dengan perluasan sistem seperti penambahan GI baru. Pada akhirnya diharapkan mampu mensuplai kenaikan beban listrik yang terjadi di Bali untuk beberapa tahun ke depan.

Penambahan PLTU Celukan Bawang dan GI baru diharapkan akan terjadi perubahan pada profil kelistrikan Bali. Kondisi ini akan membuat perbaikan tegangan pada tiap-tiap gardu induk dan penurunan aliran daya yang mengalir pada saluran transmisi.

**2 STUDI PUSTAKA**

**2.1 Analisa aliran daya**

Tujuan analisis aliran daya adalah:

- a. Untuk mengetahui tegangan pada tiap-tiap bus yang ada pada sistem. Variasi tegangan yang diperbolehkan adalah ± 5 %.
- b. Untuk mengetahui apakah semua peralatan memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
- c. Untuk memperoleh kondisi awal untuk studi-studi seperti studi analisis hubung singkat stabilitas dan pembebanan ekonomis.

**2.2 Kuantitas Per-Unit**

Dalam sebuah perhitungan tenaga listrik yang mana permasalahan yang sangat kompleks, maka diperlukan kuantitas per-unit dalam mempermudah didalam perhitungan. Dimana untuk perhitungan nantinya disini menggunakan dasar (*base*) yaitu KV dasar dan daya (MVA) dasar.

Dasar impedansi ditentukan dengan menggunakan persamaan

$$\frac{(\text{Tegangan dasar, } KV_{LL})^2}{MVA_{3\phi} \text{ dasar}} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan menggunakan dasar di atas maka perhitungan perunit untuk masing-masing impedansi dapat dilakukan dengan persamaan , impedansi perunit yaitu:

$$\frac{\text{Impedansi sebenarnya, } \Omega}{\text{Impedansi dasar, } \Omega} \dots\dots\dots (2)$$

Dengan memasukkan data masing-masing impedansi yang ada pada saluran 150 KV di Bali dalam

besaran ohm ( $\Omega$ ), maka akan didapat impedansi dalam besaran per-unit.

Dengan menggunakan dasar MVA nilai per-unit masing-masing beban dan pembangkitan didapat dengan menggunakan persamaan MVA per-unit yaitu:

$$\frac{\text{MVA sebenarnya}}{\text{MVA dasar}} \dots\dots\dots(3)$$

Arus per-unit ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{\text{KVA}_{3\phi} \text{ dasar}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar, KV}_{LL}} \dots\dots\dots(4)$$

**2.3 Klasifikasi Bus**

Setiap bus terdapat 4 (empat) besaran penting yang digunakan di dalam analisis aliran daya, yaitu:

1. Injeksi netto daya nyata (*net real power injected*), mempunyai simbol “ P “ dengan satuan Megawatt ( MW ).
2. Injeksi netto daya semu (*net reactive power injected*) mempunyai simbol “ Q “ dengan satuan Megavolt Ampere *Reactive* ( MVAR ).
3. Magnitude tegangan, mempunyai simbol “ V “ dengan satuan Kilovolt ( KV ).
4. Sudut fasa tegangan, mempunyai simbol  $\delta$  dengan satuan radian.

Nomor 1 dan 2 adalah daya yang dibangkitkan oleh generator yang mengalir ke bus, bila bus sendiri mempunyai beban, daya ini adalah selisih daya yang dibangkitkan generator dengan daya pada beban. Bila bus tidak punya generator, maka beban pada bus tersebut dianggap sebagai generator yang membangkitkan daya negatif yang mengalir ke bus tersebut.

Dari 4(empat) parameter, untuk memperoleh penyelesaian aliran daya, pada setiap bus perlu diketahui 2 buah parameter, sehingga tergantung pada parameter yang diketahui. Pada bus-bus yang demikian daya kompleks diberikan oleh :

$$S_i = P_i + jQ_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \dots(5)$$

dengan,

- $P_{Gi}$  = Daya aktif yang disuplai oleh generator pada bus *i*
- $Q_{Gi}$  = Daya reaktif yang disuplai oleh generator pada bus *i*
- $P_{Di}$  = Daya aktif beban pada bus *i*
- $Q_{Di}$  = Daya reaktif beban pada bus *i*

Untuk analisis aliran daya, bus-bus yang digunakan dapat diklasifikasikan dalam 3(tiga) kategori :

1. Load Bus atau Bus Beban  
Biasa disebut bus P,Q, parameter-parameter yang diketahui adalah P dan Q, parameter-parameter yang tidak diketahui adalah V dan  $\delta$  .
2. Bus Kontrol ( Generator Bus )  
Pada bus ini, parameter-parameter yang diketahui adalah P dan V, parameter-parameter yang dihitung adalah Q dan  $\delta$  .
3. Bus Referensi ( Slack Bus )  
Pada bus ini parameter yang diketahui adalah V dan  $\delta$  dan ( $\delta$  biasanya = 0 ). Sedangkan besaran P dan Q ditentukan setelah iterasi selesai. Biasanya slack bus yang digunakan dalam analisa ini jumlahnya hanya satu dan dipilih bus pertama atau terakhir, yang terhubung dengan generator yang berkapasitas paling besar. Konsep slack bus ini diperlukan, karena aliran daya ke dalam sistem pada setiap bus tidak dapat ditentukan sampai seluruh iterasi terselesaikan. Karena bus ini berfungsi sebagai bus refrence, maka sudut fasa tegangan adalah sama dengan 0.

Persamaan umum dari arus yang menuju bus adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots(6)$$

atau dalam bentuk polar dapat dituliskan:

$$I_i = \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(7)$$

Daya kompleks pada bus tersebut adalah,

$$P_i - Q_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots(8)$$

Akhirnya diperoleh,

$$P_i - Q_i = V_i \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(9)$$

Dengan memisahkan bagian real dan imajiner didapatkan :

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \dots\dots\dots(10)$$

Dan

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \dots\dots\dots(11)$$

Nilai-nilai *P* dan *Q* dapat ditetapkan untuk semua bus kecuali slack bus dan memperkirakan besar dan sudut tegangan pada setiap bus kecuali slack bus yang mana besar dan sudut tegangan telah ditentukan. Nilai perkiraan ini akan digunakan untuk menghitung nilai *P* dan *Q*, sehingga didapatkan,

$$\Delta P_i = P_i^{spec} - P_i^{calc} \dots\dots\dots(12)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{spec} - Q_i^{calc} \dots\dots\dots(13)$$

dimana superskrip "spec" berarti yang ditetapkan sedangkan "calc" berarti yang dihitung.

Jika jumlah seluruh bus diberi notasi  $n$ , jumlah bus beban diberi notasi  $n_l$ , jumlah generator bus di beri notasi  $n_g$ , dan 1 slack bus diberi notasi  $n_s$ , maka :

$$n = n_l + n_g + n_s \dots\dots\dots(14)$$

Pada slack bus nilai magnitudo tegangan ( $V$ ) dan sudut tegangan ( $\delta$ ) adalah tetap, sehingga tidak dilakukan perhitungan pada setiap iterasi. Sedangkan pada generator bus, daya aktif ( $P$ ) dan magnitudo tegangan ( $V$ ) bernilai tetap. Sehingga hanya daya reaktif yang dihitung. Jumlah persamaan yang diselesaikan pada setiap iterasi adalah:

$$2n_l + n_g$$

Matrik Jacobian terdiri dari turunan parsial  $P$  dan  $Q$  terhadap masing-masing variabel dalam persamaan (10) dan (11). Yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \dots\dots\dots(15)$$

Submatrik  $J_1, J_2, J_3, J_4$  menunjukkan turunan parsial persamaan (10) dan (11) terhadap  $\delta$  dan  $V$  yang bersesuaian, secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

atau,

$$\begin{aligned} \Delta P &= J_1 \Delta \delta = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \\ \Delta P &= J_2 \Delta V = \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \Delta V \dots\dots\dots(16) \\ \Delta Q &= J_3 \Delta \delta = \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \\ \Delta Q &= J_4 \Delta V = \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \Delta V \end{aligned}$$

Setelah seluruh persamaan diselesaikan, maka nilai koreksi magnitudo dan sudut tegangan ditambahkan ke nilai sebelumnya.

$$\begin{aligned} V_i^{(k+1)} &= V_i^k + \Delta V_i^k \\ \delta_i^{(k+1)} &= \delta_i^k + \Delta \delta_i^k \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

Dengan demikian diperoleh nilai magnitudo dan sudut tegangan yang baru untuk digunakan pada

iterasi berikutnya. Proses berulang terus sampai diperoleh nilai konvergen yang telah ditentukan.

Perhitungan besar arus saluran transmisi, dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_{ij} = (V_i - V_j)Y_{ij} + V_i \frac{Y'_{ij}}{2} \dots\dots\dots(18)$$

dengan :

$$Y_{ij} = \text{admitansi kawat } i \text{ ke } j$$

$$V_i \frac{Y'_{ij}}{2} = \text{kontribusi arus} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$Y'_{ij} = \text{admitansi shunt kawat } i \text{ ke } j$$

$$V_i \frac{Y'_{ij}}{2} = \text{kontribusi arus}$$

$$Y'_{ij} = \text{admitansi shunt kawat } i \text{ ke } j \dots\dots\dots(2.11)$$

### 3. METODOLOGI

Gardu Induk Pesanggaran digunakan sebagai bus generator dan Gardu induk Gilimanuk digunakan sebagai slack, sedangkan dasar yang digunakan untuk daya 100 MVA dan tegangan 150 KV.

Analisis data skunder atau data yang telah dikoreksi dengan perhitungan per unit diolah dengan menggunakan program simulasi *EDSA Technical 2000 Service Pack 3.5*.

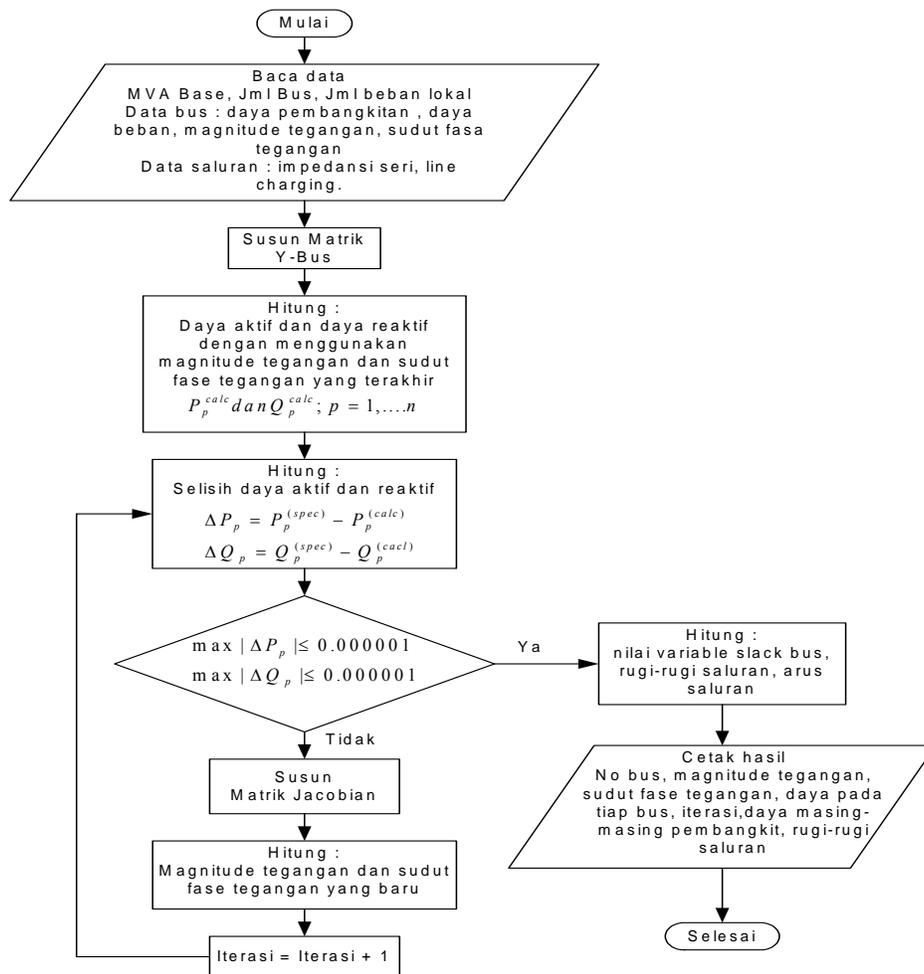
Secara lengkap langkah-langkah perhitungan dapat dilihat pada diagram alir metode Newton-Raphson diberikan dalam gambar 1.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem Bali mempunyai jaringan transmisi yang terbentang sepanjang 574.04 Km yang terdiri dari 17 saluran dan 13 gardu induk. Untuk menanggung beban, sistem Bali mempunyai empat buah sumber yaitu Pembangkit di Pesanggaran yang mempunyai kapasitas sebesar 196,3 MW (daya mampu sebesar 154,3 MW), PLTGU Gilimanuk dengan kapasitas pembangkitan 133,8 MW (daya mampu sebesar 130 MW) dan pembangkitan PLTGU Pemaron dengan kapasitas sebesar 97,6 MW (daya mampu sebesar 84 MW). Sumber berupa interkoneksi kabel laut dari Jawa dengan kapasitas sebesar 220 MW (daya mampu sebesar 200 MW).

Beban puncak masing-masing GI setelah dihitung dengan menggunakan satuan per unit, terlihat pada tabel 1. Hasil analisis tegangan dan arus kondisi eksisting terlihat pada tabel 2. (2.21)

Diagram segaris sistem Bali dapat dilihat pada gambar 2. (2.22)



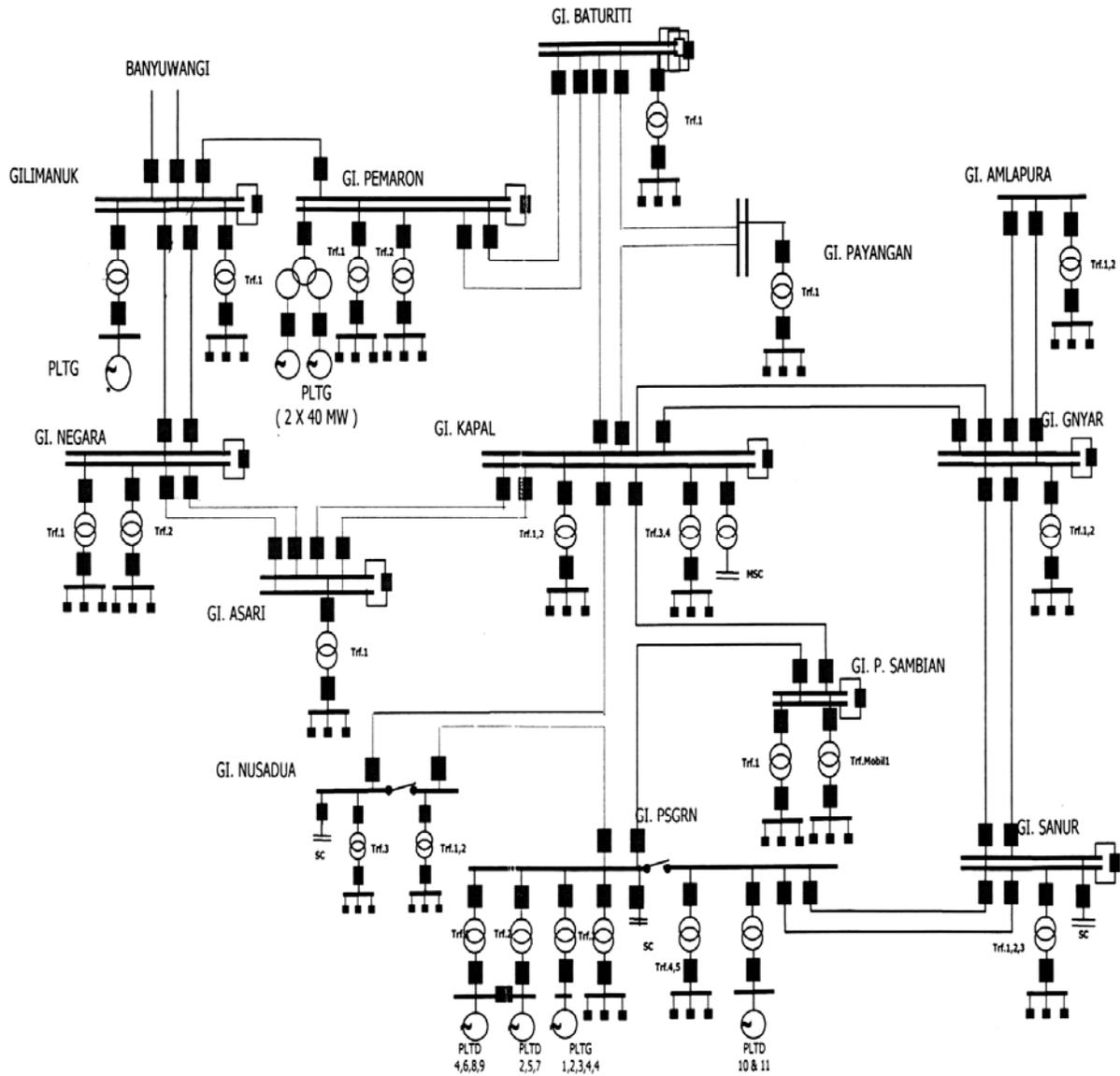
Gambar-1. diagram alir metode Newton-Raphson

Tabel-1. Data per-unit beban puncak (pukul 19.00 Wita) GI pada sistem tenaga listrik Bali

No	Bus Beban	Beban			
		P (MW)	Q (MVAR)	Aktif (p.u)	Reaktif (p.u)
1	Gilimanuk	3,6	1,1	0.036	0.011
2	Pemaron	30,2	8,5	0.302	0.085
3	Baturiti	5,1	1,1	0.051	0.011
4	Payangan	15,2	3,1	0.152	0.031
5	Negara	15,1	5,3	0.151	0.053
6	Antosari	7,0	3,3	0.070	0.033
7	Kapal	67,3	19,6	0.673	0.196
8	Gianyar	39,0	12,8	0.390	0.128
9	Amlapura	15,3	3,2	0.153	0.032
10	Sanur	66,5	18,9	0.665	0.189
11	PadangSambian	42,9	15,6	0.429	0.156
12	Pesanggaran	85,5	32,3	0.855	0.323
13	Nusa Dua	51,4	15,6	0.514	0.156

Tabel-2. Hasil Simulasi Tegangan dan Daya Tiap Bus Pada Kondisi Eksisting Tahun 2007

No.	BUS	V (VOLTS)	ANG (DEG)	P (KW)	Q (KVAR)
1	BANYUWNG	150000	0.0	88810	-50968
2	GILIMANU	150000	-0.9	126400	13745
3	PEMARON	150000	-4.2	53800	23763
4	PESANGGR	144513	-8.9	68800	18465
5	BTURTI	148106	-5.6	-5100	-1100
6	AMLAPURA	143745	-9.3	-15300	-3200
7	ANTOSARI	145481	-6.8	-7000	-3300
8	GIANYAR	144089	-9.0	-39000	-12800
9	KAPAL	144772	-8.3	-67300	17660
10	NEGARA	147330	-4.0	-15100	-5300
11	NUSA DUA	144102	-9.3	-51400	7473
12	PAD.SAMB	144264	-8.8	-42900	-15600
13	PAYANGAN	145883	-7.3	-15200	-3100
14	SANUR	144225	-9.1	-66500	4212



Gambar-2. Diagram segaris sistem Bali

Tabel-3. Total Pembangkitan dan Beban pada Kondisi Eksisting (2007)

Uraian	P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)	PF (%)
Slack Bus	88.810	-50.968	102.396	86.73
Generator	368.300	97.873	381.083	96.65
Total Beban	444.100	56.955	447.737	99.19
Total Rugi-rugi	13.012	-10.046		

Pada tabel 3 terlihat bahwa di tahun 2007 total pembangkitan sebesar 368,3 MW dan *supply* daya pada *slack bus* Banyuwangi sebesar 88,810 MW dan rugi-rugi daya total sebesar 13,012 MW.

Hasil Perhitungan aliran daya pada kondisi eksisting tahun 2007 terlihat pada tabel 4.

Dengan mengetahui besar arus yang mengalir pada saluran transmisi, maka dapat dibandingkan dengan kemampuan hantar arus saluran yang digunakan saat ini. Berdasarkan perhitungan arus pada table 7 dapat diketahui bahwa kemampuan hantar arus (KHA) tiap-tiap saluran masih di atas arus yang mengalir, artinya sistem Bali masih aman jika GI Pamecutan Kelod dan PLTU Celukan bawang beroperasi. Berdasarkan analisis di atas, profil sistem kelistrikan Bali dengan beroperasi GI Pamecutan Kelod dan PLTU Celukan bawang yang diiringi pertumbuhan beban 11 % per tahun akan

menjadi lebih baik dan akan mampu melayani beban yang ada saat itu.

**Tabel-4. Hasil perhitungan aliran daya pada kondisi eksisting 2007**

No	To	From	P (KW)	Q (KVAR)
1	Kapal	Baturiti	-63050	3019
2	Payangan	Baturiti	-56662	514
3	Gianyar	Amplapura	15327	1050
4	Negara	Antosari	120362	-8870
5	Kapal	Gianyar	68746	1978
6	Sanur	Gianyar	-14105	11030
7	Banyuwangi	Gilimanuk	88810	-50968
8	Negara	Gilimanuk	-135462	3570
9	Antosari	Kapal	111334	-15116
10	Nusa Dua	Kapal	-26886	5791
11	Pesanggaran	Nusa dua	24597	-2303
12	Kapal	P Sambian	51360	653
13	Pesanggaran	P.Sambian	-8273	14232
14	Kapal	Payangan	-41089	2798
15	Baturiti	Pemaron	-127242	516
16	Gilimanuk	Pemaron	76513	-28356
17	Ppesanggaran	Sanur	52476	6540

**Tabel-5. Hasil Perhitungan Tegangan dan Daya Tiap Bus pada Tahun 2011 Pasca Beroperasinya PLTU Celukan Bawang.**

No.	BUS	V (VOLTS)	ANG (DEG)	P (KW)	Q (KVAR)
1	Celukan B	150000	0.0	352899	-85625
2	Banyuwangi	150000	-4.9	-200000	6179
3	Gilimanuk	150290	-4.6	127406	-44378
4	Pemaron	150250	-4.3	50605	-29137
5	Pesanggaran	149703	-5.3	94941	38962
6	Baturiti	150031	-4.6	-6215	-3853
7	Amlapura	149450	-5.4	-17808	-11041
8	Antosari	149817	-5.1	-7331	-4545
9	Gianyar	149551	-5.3	-41999	-26039
10	Kapal	149671	-5.2	-66681	38483
11	Negara	150045	-4.9	-17667	-10954
12	Nusa Dua	149641	-5.3	-56645	14760
13	P. Sambian	149556	-5.3	-62975	-39044
14	Payangan	149691	-5.0	-25296	-15684
15	Pemecutan	149602	-5.3	-40293	-24982
16	Sanur	149623	-5.3	-73502	4303

**5. SIMPULAN**

Dari pembahasan pasca GI Pamecutan Kelod dan PLTU Celukan Bawang beroperasi, maka sistem bali yang dibahas dapat disimpulkan antara lain:

1. Pada kondisi eksisting tahun 2007, kondisi tegangan tidak ada yang melebihi batas  $\pm 5\%$

dari batas tegangan nominalnya dan arus di setiap saluran tidak ada yang melebihi KHA penghantar.

2. Pasca beroperasi GI Pemecutan Kelod, kondisi tegangan semakin baik, arus yang mengalir di saluran tidak ada yang melebihi KHA penghantarnya, dan rugi-rugi daya menurun 3,1% dari kondisi sebelum GI Pemecutan Kelod beroperasi.
3. Pasca PLTU Celukan Bawang beroperasi tahun 2011, tegangan di setiap bus masih dalam batas-batas yang diijinkan, yaitu  $\pm 5\%$  dari tegangan nominalnya. Arus yang mengalir di saluran tidak ada yang melebihi KHA penghantarnya, dan total rugi-rugi daya sebesar 9,441 MW. Pada kondisi ini, sistem kelistrikan Bali akan mampu menyuplai beban secara mandiri.

**6. SARAN**

1. Guna mengantisipasi peningkatan beban di Gardu Induk Pemecutan Kelod, perlu dilakukan *up rating* penghantar pada saluran transmisi Kapal-Nusa Dua, sehingga penghantar tidak mengalami beban lebih.
2. Perlu dilakukan analisa aliran daya jika kapasitas saluran transmisi yang menuju PLTU Celukan Bawang dilakukan *up-rating*, sehingga diketahui besar tegangan, daya aktif dan reaktif serta rugi-rugi daya akan dapat ditekan.

**7. DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Grainger, John J. and Stevenson, William D, Jr .1994, *Power System Analysis*, Singapore : McGraw-Hill.inc.
- [2] Glover, J.Duncan, Sarma, Malukutla S., 2002, *Power System Analysis and Design*, Brooks/cole Thomson Learning.
- [3] G. W. Stagg and A.H. El-Abiad, 1986, *Computer Method in Power Systems Analysis*, McGraw Hill Publications,
- [4] Hadi Saadat, 1999, *Power System Analysis*, Milwaukee School of Engineering.
- [5] Hutaaruk, T.S., 1990, *Transmisi Daya Listrik*, Jakarta : PT Erlangga.
- [6] Hutaaruk, T.S., 1983, *Analisa Sistem Tenaga Listrik*, Jurusan Elektroteknik Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Bandung.
- [7] Saadat, Hadi, 1999. *Power System Analysis*. Singapore : McGraw-Hill.inc.
- [8] Stevenson, William D, Jr., 1994, *Analisa Sistem Tenaga*, Jakarta : PT Erlangga.