

OPTIMAL POWER FLOW JARINGAN SUMATERA BAGIAN UTARA 150 kV

Ribet Michael Simorangkir, Yulianta Siregar

Konsentrasi Teknik Konversi Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)

Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA

e-mail: s_michael8893@yahoo.com, michael99@students.usu.ac.id

Abstrak

Sistem interkoneksi tenaga listrik memerlukan pola operasi pengaturan pembangkitan daya pada unit-unit generator dan penyaluran daya menuju titik-titik beban. Pengoperasian unit-unit pembangkit tersebut diusahakan agar bekerja dengan biaya operasi yang murah tanpa mengabaikan aspek keamanan dan kualitas pada sistem tersebut. Biaya Pembangkitan yang murah dapat diperoleh dengan melakukan *economic dispatch* pada unit-unit pembangkit tersebut. Aspek keamanan dan kualitas sistem ketenaga listrikan dipenuhi dengan menggunakan metode *Optimal Power Flow*. Aspek keamanan tersebut meliputi batasan besar daya yang dapat dibangkitkan masing-masing pembangkit dan kapasitas pembebanan pada saluran. Sedangkan aspek kualitas meliputi batasan tegangan pada tiap-tiap bus. Pada tulisan ini metode *Optimal Power Flow* diaplikasikan pada sistem kelistrikan PT. PLN (Persero) Sumatera Bagian Utara 150 kV. Studi OPF dilakukan melalui simulasi dengan menggunakan *Power Sistem Analisis Toolbox* (PSAT) yang menggunakan *primal dual interior point method* (PDIPM). Hasil pengoptimalan aliran daya yang dilakukan pada sistem kelistrikan PT. PLN (Persero) Sumatera Bagian Utara adalah turunnya biaya pembangkitan sistem sebesar Rp. 342.152.567,37 per jam atau 15,42% dari biaya pembangkitan pada pola pengoperasian PT. PLN Sumatera Bagian Utara dan pola pengoperasian yang tidak keluar dari batasan-batasan yang diizinkan.

Kata kunci : *optimal power flow, economic dispatch, Power Sistem Analisis Toolbox*

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat vital di masa modern sekarang ini. Dalam menjalankan aktivitas sehari-hari manusia jaman sekarang sangat bergantung terhadap pasokan energi listrik. Kebutuhan akan energi listrik ini dari waktu ke waktu semakin bertambah sesuai dengan perkembangan pralatan teknologi yang umumnya membutuhkan asupan energi listrik. Seiring dengan pertambahan daya listrik dari waktu ke waktu ini, mengakibatkan suplai pembangkit akan semakin bertambah besar [1][2].

Sistem pembangkitan energi listrik memiliki batasan yang tetap harus diperhatikan. Batasan tersebut antara lain batasan pada kapasitas pembangkit, batasan pengiriman daya (transmisi daya), dan biaya pembangkitan energi listrik tersebut. Batasan-batasan tersebut mengharuskan untuk merancang suatu system kelistrikan yang efektif dan efisien guna memenuhi ketersediaan energi listrik.

Salah satu cara untuk mendapatkan potensi penghematan tersebut adalah melalui *economic dispatch* (ED). Dengan ED, biaya pembangkitan sistem secara keseluruhan akan terminimalisir yakni melalui penentuan besar

daya yang dikeluarkan oleh masing-masing pembangkit pada sistem tersebut. Peminimalan biaya pembangkitan harus memenuhi aspek-aspek batasan yakni aspek keamanan dan aspek kualitas sistem, dengan mempertimbangkan aspek-aspek tersebut, maka diperoleh pola operasi yang disebut dengan *optimal power flow* (OPF).

2. Studi Pustaka

Sistem ketenagalistrikan merupakan sekumpulan pusat pembangkit dan pusat beban dimana antara satu sama lain dihubungkan oleh jaringan transmisi (interkoneksi). Oleh karena itu, sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari tiga komponen utama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. yaitu pusat pembangkit, transmisi, dan distribusi beban [3].



Gambar 1. Pembagian sistem tenaga listrik secara umum

Pengoperasian sistem tenaga listrik harus memperhatikan tiga aspek penting sebagai berikut:

1. Ekonomi (Economy)
2. Keamanan (Security)
3. Kualitas (Quality)

Urutan prioritas pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik dari ketiga aspek yang harus diperhatikan seperti yang telah di jelaskan diatas bisa berubah-ubah tergantung pada kondisi real time. Saat terjadi gangguan, maka keamanan adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi bukanlah hal yang utama. Demikian juga pada saat keamanan dan mutu sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus diprioritaskan.

Efisiensi pada proses produksi tenaga listrik ini dapat diukur dari tingkat biaya yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik tersebut. Dalam pencapaian proses produksi yang efisien ini digunakan *metode aliran daya newton raphson* dan *economic dispatch* dalam pendekatan fungsi biaya yang optimal.

2.1 Economic Dispatch

Economic dispatch (ED) bertujuan untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar pada generator atau biaya operasional seluruh sistem dengan menentukan output daya pada tiap unit pembangkit dibawah batasan kondisi permintaan beban pada sistem. Dasar dari permasalahan economic dispatch adalah pada pengaturan karakteristik input dan output unit pembangkit daya [4].

$$\text{Min } F_T = \sum_{i=1}^n F(P_i) = \sum_{i=1}^n (aP_i^2 + b_iP_i + c) \quad (1)$$

Suatu sistem memiliki N unit pembangkit termal yang melayani beban P_{load} dan memiliki fungsi biaya yang merupakan masukan masing-masing unit pembangkit dan direpresentasikan sebagai fungsi F_i . Keluaran dari tiap unit pembangkit adalah P_i yakni besar daya yang dibangkitkan. Batasan mendasar dalam permasalahan operasi ini adalah jumlah daya yang dibangkitkan harus sama dengan daya beban, dengan catatan rugi-rugi daya pada saluran diabaikan, maka permasalahan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N = \sum_{i=1}^N F(P_i) \quad (2)$$

$$\phi = 0 = P_{load} - \sum_{i=1}^N P_i \quad (3)$$

2.2 Optimal Power Flow (OPF)

OPF adalah suatu cara pengoptimalan yang dilakukan untuk mendapatkan pola operasi yang murah dengan mengoptimalkan fungsi

obyektif tertentu dengan mempertimbangkan batasan-batasan yang berlaku [5-6].

Fungsi obyektif yang dioptimalkan dalam penelitian ini adalah fungsi biaya. Batasan-batasan yang dicakup antara lain batasan pembangkitan daya aktif serta daya reaktif unit pembangkit, batasan tegangan yang diizinkan pada masing-masing bus dan batasan pembebanan saluran.

Primal-Dual Interior Point Method (PDIPM) merupakan metode pada Optimal Power Flow yang memiliki fungsi obyektif untuk meminimalkan fungsi biaya sebagai berikut :

$$\text{Min } F_T = \sum_{i=1}^{NG} F_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{NG} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (4)$$

Metode ini juga memiliki *equality constraints*, yaitu persamaan aliran daya aktif dan reaktif serta persamaan keseimbangan pembangkitan dan beban. Diformulasikan dalam persamaan berikut :

$$P_i(V, \delta) - P_{Gi} + P_{Di} = 0 \quad (5)$$

$$Q_i(V, \delta) - Q_{Gi} + Q_{Di} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} (P_{Gi}) - \sum_{i=1}^{ND} (P_{Di}) - P_L = 0 \quad (7)$$

dengan,

$$P_i(V, \delta) = V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i - \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$Q_i(V, \delta) = V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i - \theta_{ij}) \quad (9)$$

Persamaan diatas dapat dilinearkan dengan ekspansi Taylor seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P(V, \delta) \\ \Delta Q(V, \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (10)$$

dengan

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \text{ adalah matriks Jacobian}$$

Rugi-rugi transmisi (P_L) yang diberikan pada persamaan (7) dapat dihitung langsung dengan metode *power flow*.

Selain itu, pada metode PDIPM terdapat *inequality constraints*, yang terdiri dari batasan aliran daya pada masing-masing saluran, batasan daya aktif dan reaktif pada pembangkit, serta batasan magnitudo tegangan dan sudut tegangan pada masing-masing bus.

$$|S_f(\theta, V)| - S_{\max} \leq 0 \quad (11)$$

$$|S_t(\theta, V)| - S_{\max} \leq 0 \quad (12)$$

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} \tag{13}$$

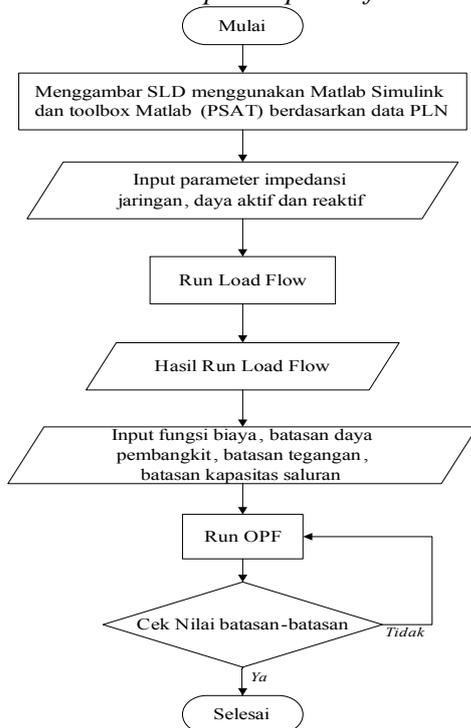
$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \tag{14}$$

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \tag{15}$$

$$\theta_{i,min} \leq \theta_i \leq \theta_{i,max} \tag{16}$$

3. Metode Penelitian

Secara garis besar, penelitian dilakukan seperti pada diagram alir pada Gambar 2. Penelitian diawali dengan melakukan simulasi *power flow* berdasarkan data operasi, parameter-parameter sistem dan batasan-batasan yang ber-laku. Selanjutnya dapat dilakukan simulasi *optimal power flow*.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Melalui simulasi *power flow* dan OPF tersebut maka dapat diperoleh perbandingan antara pola operasi yang dilakukan oleh PLN dengan pola operasi yang lebih optimal.

3.1 Objek Penelitian

Sistem kelistrikan 150 kV Sumatera Bagian Utara terdiri dari 3 area, yakni 1-NAD, 2-Sumut dan 3-Inalum. Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat persebaran masing-masing area di Sumatera Bagian Utara.



Gambar 3. Pembagian area dan zona sistem Sumbagut

Area Sumut terbagi lagi dalam 2 zona yakni zona 1-Medan dan zona 2-Pematang Siantar. Zona Medan merupakan zona dengan pusat beban tertinggi dan penyuplai daya terbesar.

Area Sumut terbagi lagi dalam 2 zona yakni zona 1-Medan dan zona 2-Pematang Siantar. Zona Medan merupakan zona dengan pusat beban tertinggi dan penyuplai daya terbesar Area Inalum dimodelkan menjadi sebuah bus pembangkit. Area ini adalah area khusus yang menerima dan menyuplai daya dari dan ke sistem area Sumut pada jam-jam tertentu saja. Daya yang dibangkitkan pada area ini menggunakan tenaga air dengan jumlah yang cukup besar. Sebagai perusahaan yang mempunyai beban sendiri, tidak semua daya yang dibangkitkan dapat ditransfer ke area Sumut. Besarnya transfer daya yang dilakukan adalah berdasarkan kesepakatan antara PLN dan pihak Inalum.

4. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan simulasi aliran daya dan Optimal Power Flow pada sistem kelistrikan Sumatera Bagian Utara, maka didapatkan perbandingan antara kondisi pengoperasian PLN dengan simulasi.

4.1 Kondisi Pembebanan

Pola operasi yang diteliti adalah operasi kelistrikan yang dilakukan oleh PLN Sumbagut pada waktu beban puncak yakni pukul 19.30 WIB, tanggal 28 Maret 2013. Kondisi pembebanannya tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Pembebanan Sistem

Bus	Nama GI	Beban	
		MW	Mvar
1	Banda Aceh	76,00	24,95
2	Naganraya	13,50	-1,80
3	Sigli	25,47	-10,70
4	Bireuen	33,23	10,80
5	Lhoksemauwe	36,35	6,98
6	Idie	11,60	3,87
7	Langsa	20,65	5,20
8	Tualang Cut	20,60	0,90
9	P. Brandan	20,60	9,00
10	Binjai	57,90	19,67
11	BLWCC	0,00	0,00
12	BLWTU	5,76	0,00
13	Labuhan	17,89	6,40
14	Lamhotma	3,90	0,80
15	Paya Pasir	60,21	16,80
16	Mabar	55,26	-2,20
17	Paya Geli	67,72	16,00
18	Glugur	62,18	28,13
19	Namorambe	36,60	12,00
20	Titi Kuning	78,47	28,50
21	GIS Listrik	68,60	27,70
22	Berastagi	26,59	7,45
23	Renun	0,00	0,00
24	Sidikalang	17,80	5,10
25	Tele	4,20	2,70
26	Tarutung	14,60	2,88
27	Porsea	8,50	1,80
28	P. Siantar	60,80	24,83
29	Gunung Para	10,20	3,10
30	Tebing Tinggi	47,45	17,05
31	Perbaungan	26,80	7,90
32	Sei Rotan	43,35	13,90
33	T.Morawa	47,30	14,70
34	Kualanamu	7,10	3,00
35	Medan Denai	54,70	18,70
36	KIM	80,38	22,20
37	Inalum	0,00	0,00
38	Kuala Tanjung	45,60	17,30
39	Kisaran	47,33	25,60
40	Aek Kanopan	13,70	6,70
41	Rantau Prapat	45,10	16,30
42	Gunung Tua	15,80	3,70
43	P. Sidempuan	35,30	10,60
44	Sibolga	19,30	5,80
45	Sipan1	0,00	0,00
46	Sipan2	0,00	0,00
47	Labuhan Angin	7,14	0,00
Total		1451,53	434,31

4.2 Hasil Simulasi

Berdasarkan tahapan simulasi diperoleh perbandingan hasil operasi PLN dan operasi *optimal power flow*. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Simulasi Power Flow Dan OPF

Pusat Pembangkit	Biaya [Rp]	
	PLN	OPF
Banda Aceh	207.196.232,0	201.796.089,47
Sigli	42.717.770,0	17.589.670,00
Bireuen	71.919.104,6	20.308.960,00
Lhoksemauwe	103.425.595,0	37.847.440,00
Idie	12.939.550,0	10.351.640,00
Langsa	22.206.960,0	9.869.760,00
Tualang Cut	13.770.859,0	5.859.940,00
Total Area NAD	474.176.070,60	303.623.499,48
BLWCC	778.733.839,0	901.792.205,77
BLWTU	378.413.964,7	320.215.253,58
Paya Pasir	267.879.057,0	86.254.360,00
Glugur	30.918.900,0	13.443.000,00
Titi Kuning	15.235.844,0	15.235.844,00
KIM	89.489.927,8	20.703.283,38
Total UPT Medan	1.560.671.533,7	1.357.643.946,73
Berastagi	1.585.836,30	7.664.196,00
Renun	387.500,00	410.000,00
Tarutung	51.500,00	79.200,00
Porsea	66.139.560,00	72.592.200,00
P. Siantar	4.768.500,60	4.768.500,60
Sipan 1	161.500,00	165.000,00
Sipan 2	84.500,00	85.000,00
Lab. Angin	86.646.750,00	115.529.000,00
Total UPT P. Siantar	159.825.646,90	201.293.096,60
Total Area Medan	1.720.497.180,70	1.548.566.616,46
Inalum	24.077.863,00	24.438.429,99
TOTAL SUMBAGUT	2.218.751.113,30	1.876.628.545,93
Rata-rata (Rp/kWh)	1.467,19	1.248,31
Total Losses :	60,71 MW	Total Losses : 51,80 MW

Berdasarkan Simulasi OPF, terjadi penurunan biaya pembangkitan sebesar Rp. 342.152.567,37 per jam atau 15,42% dari pola operasi PLN. Dengan operasi OPF, sebagian besar daya yang dibangkitkan pada pembangkit-pembangkit berbahan bakar mahal yakni di area NAD dan zona Medan mengalami penurunan. Sebaliknya, daya yang dibangkitkan pada zona P. Siantar mengalami kenaikan. Selain itu, pada operasi OPF terjadi penurunan *losses* saluran yakni sebesar 8,91 MW.

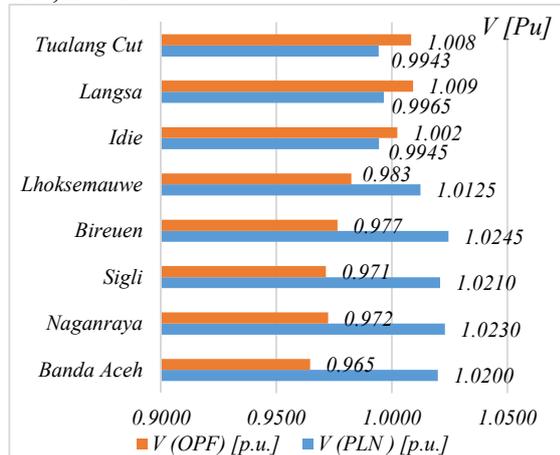
Batasan tegangan bus yang diizinkan pada operasi kelistrikan Sumbagut adalah $\pm 10\%$ dari tegangan nominal. Artinya tegangan yang diizinkan dalam operasi tersebut adalah antara 135-165kV. Namun pada penelitian ini, ditentukan batasan tegangan adalah +5% dan -10%.

2. Area NAD

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa pada pengoperasian OPF terjadi kenaikan tegangan

pada GI Langsa. Hal tersebut diakibatkan penyaluran daya dari zona Medan ke area NAD mengalami kenaikan. Dari gambar juga terlihat bahwa terjadi penurunan tegangan secara bertahap setelah melewati masing-masing GI.

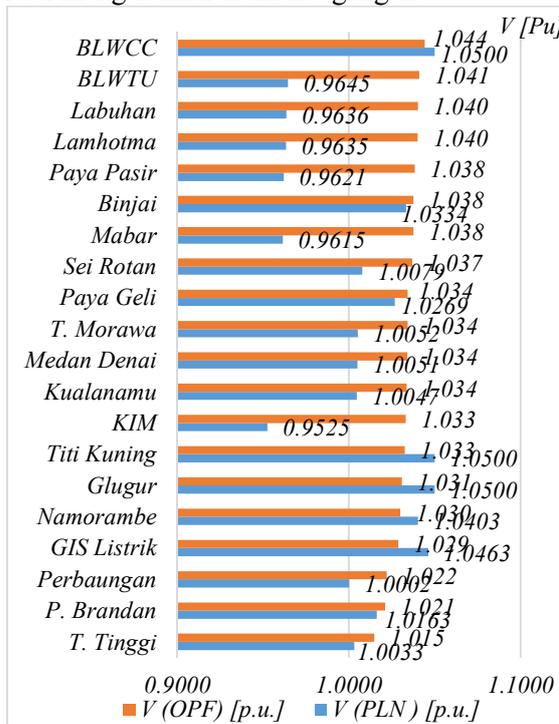
Berdasarkan pola pengoperasian OPF terlihat bahwa rentang tegangan berada pada batas yang diijinkan yakni antara 144,75kV-151,35kV.



Gambar 4. Tegangan operasi PLN vs OPF area NAD

3. Zona Medan

Berdasarkan pola pengoperasian PLN, diketahui bahwa tegangan semua bus pada zona ini berada pada rentang 142,87kV-157,5kV. Gambar 5 menunjukkan bahwa terjadi perubahan setelah melakukan OPF. Sebagian besar GI mengalami kenaikan tegangan.



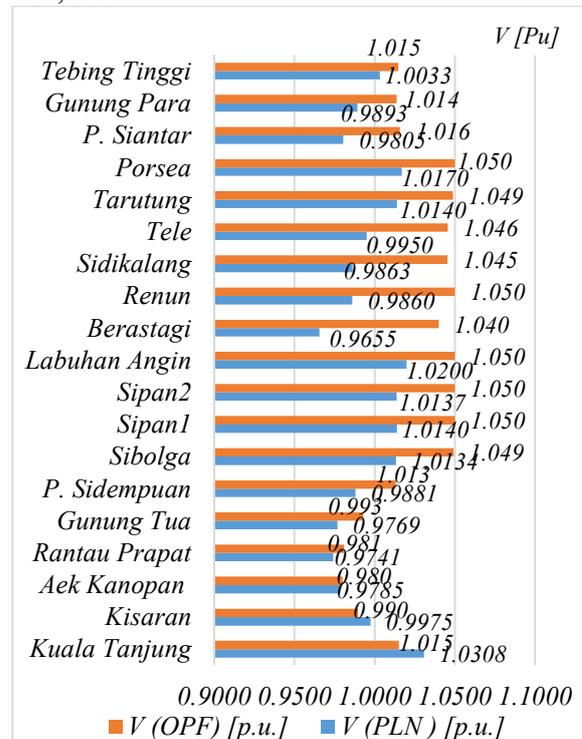
Gambar 5 Tegangan operasi PLN vs OPF zona Medan

Nilai tegangan pada bus BLWCC, Titikuning, Glugur dan Gis Listrik mengalami penurunan jika dibandingkan dengan pola pengoperasian rill PLN. Hal tersebut diakibatkan penurunan nilai pembangkitan pada zona Medan. Sehingga zona Medan menerima tambahan transfer daya yang lebih besar lagi dari zona Pematang Siantar.

Kenaikan nilai tegangan tertinggi terjadi di bus Kawasan Industri Medan yaitu mengalami kenaikan sebesar 12,10 kV. Sehingga nilai tegangan di bus ini menjadi 154,97 kV. Kenaikan tersebut diakibatkan adanya peningkatan suplay daya pada bus Kawasan Industri Medan.

4. Zona Pematang Siantar

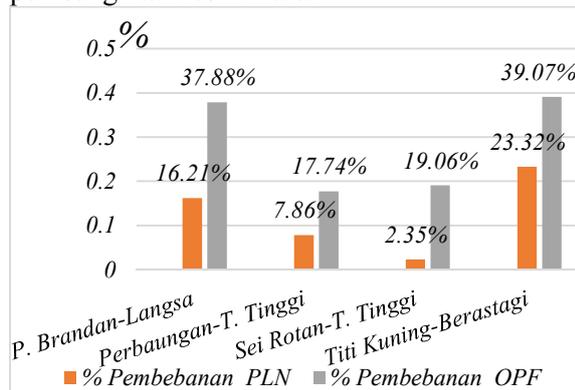
Gambar 6 menunjukkan bahwa melalui operasi berdasarkan konsep OPF, tegangan pada zona UPT Pematang Siantar cenderung mengalami kenaikan jika dibandingkan dengan pola pengoperasian PLN. Gambar 6 juga menunjukkan bahwa penurunan tegangan terjadi di bus Kisaran dan Kuala Tanjung. Tegangan tertinggi terdapat di bus Porsea, Renun, Labuhan Angin, Sipan 1 dan Sipan 2 yaitu sebesar 157,5 kV. Tegangan terendah terdapat pada bus-bus yang jauh dari mpembangkit diantaranya gardu induk Aek Kanopan yang memiliki tegangan 146,9 kV dan gardu induk Rantau Prapat dengan tegangan 147,11 kV.



Gambar 6. Tegangan operasi PLN vs OPF zona P. Siantar

Pembebanan saluran tidak boleh melebihi kapasitasnya, pembebanan di atas kapasitas saluran dapat menyebabkan putusnya jaringan dari sistem dan secara bertingkat dapat menyebabkan *blackout*.

Gambar 7 menunjukkan bahwa dengan operasi OPF, terjadi kenaikan pembebanan pada saluran yang menghubungkan antara area Sumut dan area NAD yakni saluran P. Brandan – Langsa yang dialirkan melalui saluran Binjai–P. Brandan. Kenaikan pembebanan pada saluran Binjai–P. Brandan disebabkan meningkatnya aliran daya dari area Sumut yang memiliki biaya pembangkitan lebih murah



Gambar 7. Pembebanan saluran operasi OPF vs PLN

Saluran yang menghubungkan zona Medan dengan P. Siantar juga mengalami kenaikan pembebanan. Kenaikan pembebanan pada saluran tersebut diakibatkan peningkatan daya pembangkitan pada zona Pematang Siantar.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Operasi sistem tenaga PLN P3BS UPB Sumbagut optimal jika memaksimalkan pembangkitan daya yang murah di area Sumut UPT P. Siantar dan meminimalkan pembangkitan daya yang mahal di area NAD.
2. Biaya pembangkitan yang paling mahal terdapat di area NAD, dan biaya pembangkitan yang paling murah terdapat di Area Sumut Zona Pematang Siantar.
3. Setelah melakukan *Optimal Power Flow*, maka didapatkan penghematan biaya pembangkitan. Dimana biaya rill pengoperasian PLN adalah Rp. 2.218.751.113,30 per jam dan pada kondisi *OPF* biaya pembangkitannya menjadi Rp. 1.876.628.545,93 per jam. Sehingga, total

Penghematan di Sumbagut yang diperoleh melalui simulasi *OPF* adalah 15,42% atau sebesar Rp. 342.152.567,37 per jam.

4. Berdasarkan Pola operasi OPF dapat diketahui bahwa dampak implementasi OPF adalah pada perubahan nilai tegangan pada tiap-tiap bus. Namun, perubahan nilai tegangan tersebut masih memenuhi batasan yang diijinkan.

6. Daftar Pustaka

- [1] Gama, Nova, “*Aliran Daya Optimal Pada Sistem Minahasa*”, Jurusan Teknik Elektro-FT, UNSRAT, 2011.
- [2] Arozaq, Badru T. Rony S. Wibowo, dan Ontoseno Penangsang, “*Analisis Pembebanan Ekonomis pada Jaringan 500 kV Jawa Bali Menggunakan Software PowerWorld*”, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), 2012.
- [3] Wikarsa, Mohamad Tresna, “*Analisis Program Percepatan 10.000 MW Tahap I Pada Operasi Sistem Tenaga Listrik*”, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, 2010.
- [4] Zhu, Jizhong Ph.D, “*Optimization of Power Sytem Operation*”, John Wiley and Sons, Inc, New Jersey, 2009.
- [5] Wood, Allen J., “*Power Generation, Operation, And Control Second Edition*”, Unicersity of Minnesota, 1996.
- [6] Momoh James A. “*Electric Power System Applications of Optimization*”, Howard University, Washington, D. C., 2001.