

## Optimalisasi Penempatan PMU untuk Mendukung Implementasi *Smart Grid* Sumatera

Diah Fitri Fida Kusuma<sup>1\*</sup>; Zico Alaia Akbar<sup>2</sup>; Satrio Yudho<sup>1</sup>

1. Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lkr. Luar Barat, RT.1/RW.1, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta 11750, Indonesia
2. Universitas Indonesia, Jl. Lingkar, Pondok Cina, Beji, Depok, Jawa Barat 16424, Indonesia

<sup>\*</sup>Email: [diah2010023@itpln.ac.id](mailto:diah2010023@itpln.ac.id)

Received: 06 Juni 2023 | Accepted: 11 Oktober 2023 | Published: 17 November 2023

### ABSTRACT

The 275 kV Sumatra interconnection system is the second largest interconnection system in Indonesia after the 500 kV Java-Bali system. The projected load growth in the Sumatra system will reach 7.1% in 2022 along with the addition of generating capacity up to 2030 of 9.3 GigaWatt of which 5.2 GigaWatt or 53.7% are EBT generators. A smart grid system is needed to guarantee the continuity of the electric power system. Phasor Measurement Unit (PMU) is able to measure phasor voltage on the bus as well as the current flow along the lines coming to the bus in real-time. The design of PMU placement aims to find the minimum number and optimal location of PMU so that the system can be observed as a whole. In this paper, the writer will discuss how to optimally place the PMU using the Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) optimization method, deep first, and simulated annealing. In addition, calculations of the System Observability Redundancy Index (SORI) and Optimal Redundancy Criterion (ORC) are also written to provide an assessment of the observability of PMU placement. The results obtained are expected to help provide solutions for investment efficiency in implementing smart grid systems in Sumatra.

**Keywords:** PMU optimization, BPSO, depth first, simulated annealing

### ABSTRAK

Sistem interkoneksi Sumatera 275 kV adalah sistem interkoneksi terbesar kedua di Indonesia setelah sistem Jawa Bali 500 kV. Proyeksi pertumbuhan beban di sistem Sumatera mencapai 7,1% di tahun 2022 bersamaan dengan penambahan kapasitas pembangkit sampai dengan tahun 2030 sebesar 9,3 GW yang mana 5,2 GW atau 53,7% adalah pembangkit EBT. Diperlukan sistem jaringan cerdas (smart grid) untuk menjamin kontinuitas sistem tenaga listrik. Phasor Measurement Unit (PMU) mampu mengukur fasor tegangan pada bus serta aliran arus sepanjang saluran yang datang ke bus secara realtime. Perancangan penempatan PMU bertujuan untuk menemukan jumlah minimum dan lokasi PMU yang optimal agar sistem dapat diamati secara keseluruhan. Dalam tulisan ini akan dibahas bagaimana menempatkan PMU secara optimal menggunakan metode optimasi Binary Particle Swarm Optimization (BPSO), depth first dan simulated annealing. Selain itu perhitungan System Observability Redundancy Index (SORI) dan Optimal Redundancy Criterion (ORC) juga dituliskan guna memberikan penilaian tentang observabilitas penempatan PMU. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat membantu memberikan solusi untuk efisiensi investasi penerapan sistem smart grid di Sumatera.

**Kata kunci:** optimasi PMU, BPSO, depth first, simulated annealing

## 1. PENDAHULUAN

Pengendalian sistem interkoneksi 275 kV Sumatera saat ini dilakukan oleh operator sistem (*dispatcher*) menggunakan sistem *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) [1], namun hal ini tidaklah mencukupi karena sistem SCADA konvensional memberikan keadaan yang tidak akurat selama sistem mengalami kondisi yang tidak dinamis, ketika hal itu terjadi pengukuran fasor tegangan dan arus sangat dibutuhkan untuk mendeteksi adanya osilasi, oleh karena itu digunakan aplikasi *Wide Area Monitoring System* (WAMS) yang dapat memonitor keseluruhan kondisi sistem melalui suatu alat yang disebut *Phasor Measurement Unit* (PMU) [2]. Meskipun PMU lebih unggul dari SCADA, namun harganya yang mahal menjadikannya tidak dapat dipasang di semua bus sistem tenaga. Dalam pengaplikasiannya pun tidak terbatas pada pengadaan PMU saja namun pembangunan infrastruktur komunikasi, pengadaan konsentrator data fasor (*Phasor Data Concentrator/PDC*) untuk agregasi data dan adanya jam yang tersinkronisasi dengan GPS juga harus disiapkan. Sebagai referensi biaya pengadaan, pemasangan PMU dan kelengkapannya membutuhkan biaya sekitar 30.000 USD dimana belum termasuk biaya infrastruktur, operasional dan tenaga kerja [3].

Perhitungan optimasi PMU bertujuan untuk menemukan jumlah minimum PMU dan lokasi PMU yang optimal agar sistem dapat diamati secara keseluruhan. Manfaat dari segi biaya yaitu efisiensi pada biaya operasional dan pemeliharaan untuk jangka pendek maupun biaya investasi untuk jangka panjang. Sedangkan manfaat bagi sistem yaitu meningkatkan kehandalan sistem saat terjadi gangguan, meningkatkan fungsi kontrol untuk mendeteksi adanya potensi ketidakstabilan sistem, meningkatkan akurasi dalam melakukan analisis, memastikan tindakan yang dilakukan sesuai dengan kebutuhan sistem dan dieksekusi dengan cepat [4].

Beberapa penelitian tentang optimalisasi PMU yang sudah dilakukan antara lain studi literatur dengan judul “Penempatan Optimal *Phasor Measurement Unit* (PMU) dengan Integer Programming” oleh Yunan Helmy Amrulloh, Rony Seto Wibowo dan Sjamsjul Anam yang dilakukan pada sistem tenaga listrik 500 kV di Jawa Bali memberikan kesimpulan bahwa penempatan optimal PMU berdasarkan topologi jaringan memberikan penempatan dengan jumlah paling optimal dan lokasi yang tepat pada sistem tenaga listrik [5]. Selain itu penelitian dengan judul “Optimalisasi Penempatan PMU di Sistem Jawa Bali” yang disusun oleh Fandy Hakim Nasution dan Hendrik Maryono yang dilakukan di sistem Jawa Bali 500 kV menggunakan metode *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) menunjukkan hasil bahwa metode optimasi yang diusulkan yaitu BPSO memiliki hasil optimasi yang sama dengan metode optimasi lain, bahkan di beberapa kasus lebih baik dari metode lain [6]. Pada studi kasus yang berjudul “Penempatan *Phasor Measurement Unit* untuk Menentukan Prediksi Margin Kestabilan Tegangan” yang ditulis oleh Levin Halim, Nanang Hariyanto dan Muhammad Nurdin dimana perhitungan optimasi jumlah PMU dilakukan menggunakan metode *Integer Linear Programming* (ILP) menghasilkan kesimpulan penentuan prediksi Voltage Stability Margin (VSM) dari data hasil penempatan PMU optimal menggunakan metode ILP mendapatkan kesalahan (*error*) yang cukup kecil tidak lebih dari 1% [7]. “*Optimal PMU Placement in Bali 150 kV Network*” adalah judul dari penelitian yang dilakukan oleh IGP Ari Suyasa, Rukmi Sari Hartati, dan Dewa Made Wiharta pada sistem kelistrikan 150 kV Bali. Penempatan PMU optimal dihitung menggunakan metode heuristik (BPSO, *deep first*, *simulated annealing*) memberikan kesimpulan metode BPSO memberikan hasil jumlah PMU yang sama dengan metode lain dengan lokasi penempatan PMU yang lebih bervariasi [8].

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, belum ada penilaian tentang observabilitas sistem dari lokasi penempatan PMU. Penilaian tentang observabilitas ini penting karena banyaknya solusi optimal yang tersedia setelah menerapkan algoritma optimasi yang selanjutnya akan diimplementasikan untuk menunjukkan kinerja dari kualitas optimasi tersebut. Beberapa parameter

yang digunakan untuk penilaian observabilitas sistem pada penelitian ini diantaranya: *Bus Observability Index* (BOI) dan *System Observability Redundancy Index* (SORI), tentunya dengan mengacu pada aturan observabilitas jaringan yaitu:

- Pada bus yang memiliki PMU yang terpasang akan dapat memonitor semua sudut fasa tegangan dan arus yang ada.
- Dengan menerapkan hukum ohm, sudut fasa tegangan pada salah satu ujung penghantar dapat dihitung jika sudut fasa tegangan pada ujung lain diketahui.
- Jika tegangan pada kedua ujung penghantar diketahui, maka arus pada penghantar tersebut dapat dihitung [9].

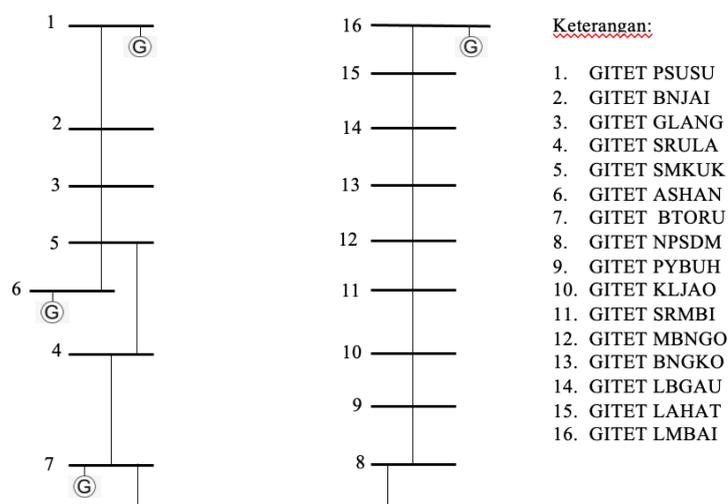
Meskipun masalah optimasi PMU menghasilkan solusi untuk observasi penuh, ada kemungkinan ketidakpastian selama situasi kontingensi yang dapat mengakibatkan observabilitas yang tidak terpenuhi. Maka diusulkan indeks baru yang disebut *Optimal Redundancy Criterion* (ORC) yang didasarkan pada jumlah koneksi ke setiap bus. ORC didefinisikan sebagai rasio jumlah koneksi antar bus dengan jumlah total bus dalam sistem.

## 2. METODE PENELITIAN

Perhitungan optimasi dilakukan dengan melakukan pengujian untuk menentukan penempatan PMU yang optimal pada sistem interkoneksi Sumatera 275 kV menggunakan metode optimasi *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO), metode *Depth First* (DF) dan metode *Simulated Annealing* (SA) menggunakan program Matlab dan toolbox PSAT sebagai alat bantu. Ketiga metode ini dipilih karena mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan metode *Integer Linear Programming* (ILP), selain itu metode ini memiliki pemrosesan yang lebih tinggi dan kecepatan komputasi yang lebih cepat [10].

### 2.1. Sistem interkoneksi 275 kV Sumatera

Berdasarkan data RUPTL PT PLN (Persero) Tahun 2021-2030 ada 16 Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) yang terhubung dengan bus bertegangan 275 kV secara interkoneksi di sistem Sumatera [11], konfigurasi *single line diagram* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Single Line Sistem Interkoneksi 275 kV Sumatera

Peralatan PMU yang terpasang di sistem 275 kV Sumatera ada 8 buah dengan lokasi tertera pada Tabel 1. Penentuan jumlah PMU eksisting yang terpasang belum menggunakan perhitungan optimasi serta observabilitas dan indeks redundansi sistem.

**Tabel 1.** Daftar PMU Terpasang

No	Nama GITET	Lokasi
1.	GITET BNGKO	Prov. Jambi
2.	GITET KLJAO	Prov. Sumatera Barat
3.	GITET GLANG	Prov. Sumatera Utara
4.	GITET LAHAT	Prov. Sumatera Selatan
5.	GITET LBG AU	Prov. Sumatera Selatan
6.	GITET MBNGO	Prov. Sumatera Barat
7.	GITET SRULA	Prov. Sumatera Utara
8.	GITET NPSDM	Prov. Sumatera Utara

## 2.2. Metode Optimasi

Teknik untuk memecahkan masalah optimasi diklasifikasikan ke dalam tiga kategori besar, yang pertama metode konvensional, yang kedua teknik heuristik, dan yang ketiga pendekatan metaheuristik [12]. Metode konvensional yang biasa digunakan untuk optimasi adalah pemrograman linier, metode ini dapat menyelesaikan masalah optimasi tetapi memiliki kelemahan dalam mencari jumlah minimal dan jika optimasi dilakukan dalam skala yang besar. Untuk mengatasi hal ini, metode heuristik dan meta heuristik seperti teknik koloni semut, algoritma genetika, dan partikel *swarm* digunakan.

- 1) *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO): konsep BPSO mendefinisikan, setiap individu/partikel bergerak menuju nilai *fitness* terbaik dalam ruang pencarian dengan kecepatan dan posisi yang diperbarui. Selama perubahan posisi, partikel-partikel ini tidak hanya menyimpan posisi dan kecepatannya sendiri tetapi juga menyimpan data dan informasi tetangganya di setiap iterasi. Variasi posisi dan kecepatan sifat partikel ini menggambarkan nilai *fitness* terbaik yang ditingkatkan dan disimpan setelah setiap iterasi. Aturan yang diterapkan berdasarkan prosedur grafik jaringan melalui perhitungan analisis topologi [13].
- 2) *Depth First (DF)*: adalah metode optimasi berbasis observabilitas topologi. Karena kesamaan dalam struktur jaringan tenaga listrik, beberapa pendekatan teori graf telah diperkenalkan pada masalah optimasi untuk menentukan solusi optimasi. PMU pertama ditempatkan pada bus dengan jumlah percabangan terbanyak dan jika ada lebih dari satu bus dengan karakteristik ini, maka akan dipilih secara acak. PMU berikutnya ditempatkan berdasarkan kriteria yang sama, sampai visibilitas semua jaringan diperoleh [14].
- 3) *Simulated Annealing (SA)*: Algoritma *simulated annealing* adalah salah satu pendekatan heuristik terbaik untuk menyelesaikan masalah optimasi. Diilhami dari teknik anil fungsi logam dengan mendefinisikan pengaturan optimal partikel logam di mana minimalisasi energi potensial terjadi dan pendinginan logam terus menerus setelah mengalami panas tinggi. Ini adalah proses gerakan berulang sesuai dengan parameter suhu yang dapat disesuaikan yang mereplikasi proses anil logam [15].

### 2.3. Observability Index dan Optimal Redundancy

Dalam penempatan PMU yang optimal, indeks redundansi merupakan faktor penting untuk mewakili stabilitas jaringan listrik. Karena banyaknya solusi optimal yang tersedia setelah menerapkan algoritma optimasi, *Bus Observability Index* (BOI) dan *System Observability Redundancy Index* (SORI) akan diimplementasikan untuk menunjukkan kinerja pada kualitas optimasi [16]. Dalam BOI, bus  $[i]$  dalam  $[\beta_i]$  akan didefinisikan sebagai jumlah PMU yang dapat mengamati bus tertentu. Akibatnya, indeks observabilitas bus maksimum terbatas pada konektivitas maksimum  $[\eta_i]$  dari bus ditambah satu.

$$\beta_i \leq \eta_i + 1 \quad (1)$$

Untuk memilih hasil yang paling menguntungkan di antara sejumlah solusi optimal yang diperoleh dengan menggunakan metode optimasi yang berbeda digunakan SORI, pada prinsipnya SORI adalah pengukuran jumlah cakupan bus untuk semua bus yang diimplementasikan ( $i = 1$  ke  $n$ ) dalam sistem. Nilai SORI yang lebih tinggi menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis PMU lebih andal. Oleh karena itu, metode optimasi terbaik akan dipilih berdasarkan SORI. SORI dapat dihitung menggunakan Persamaan 2 [17]. Nilai SORI dilambangkan dengan  $[\gamma]$ , yang merupakan jumlah dari total nilai bus yang diamati (BOI) dalam sistem dimana PMU ditempatkan,  $[\beta_i]$  mewakili BOI.

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (2)$$

*Optimal Redundancy Criterion* (ORC) adalah rasio jumlah total koneksi antar bus dengan jumlah total bus dalam sistem. Untuk memenuhi kriteria ORC setiap bus minimal harus diobservasi oleh 2 PMU. ORC dapat diterapkan pada bus kritis atau bus yang mempunyai banyak percabangan. Fungsinya jika salah satu pengukuran PMU hilang karena gangguan, maka bus kritis tersebut harus diamati oleh PMU lain dalam sistem. Dalam persamaan di bawah,  $[j]$  mewakili bus,  $[B_{i,j}]$  mewakili koneksi antara  $[i]$  dan  $[j]$ , dan  $[n]$  adalah jumlah total bus dalam sistem [18].

$$ORC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n B_{i,j}}{n} \quad (3)$$

Kondisi ORC diberlakukan sebagai berikut [3]:

- Perhitungan ORC mengacu pada rumus (3)
- Berdasarkan ORC, kendala bus kritis dipilih
- Peningkatan persyaratan minimum pada bus-bus terpilih

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

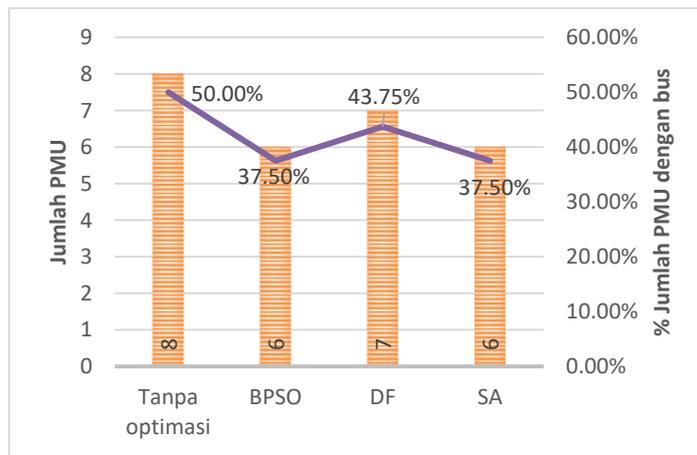
### 3.1. Optimasi PMU

Dari pengujian yang dilakukan menggunakan metode BPSO, *depth first* dan *simulated annealing* didapatkan hasil jumlah optimasi PMU dan lokasi penempatan diberikan pada Tabel 2. Jika dilihat dari hasil optimasi, metode BPSO dan *simulated annealing* mendapatkan jumlah PMU yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode optimasi *depth first*.

**Tabel 2.** Hasil Optimasi PMU

No.	Metode	Pola penempatan	Jumlah PMU	Lokasi penempatan PMU
1.	BPSO	'1010001001001001'	6	1, 3, 7, 10, 13, 16
2.	DF	'010010101010101'	7	2, 5, 7, 9, 11, 13, 15
3.	SA	'010010010010101'	6	2, 5, 8, 11, 13, 15

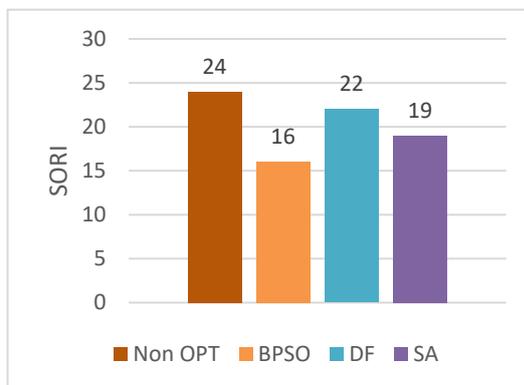
Presentase jumlah PMU dengan jumlah bus untuk sistem tanpa optimasi dan dengan optimasi ditunjukkan pada Gambar 2. Terlihat bahwa metode BPSO dan SA memberikan presentase jumlah PMU yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode DF.



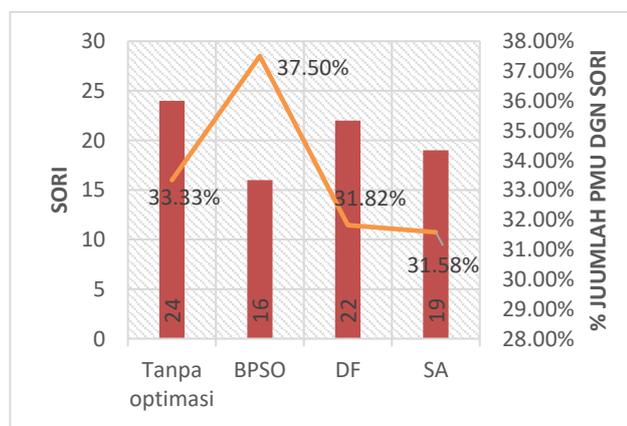
**Gambar 2.** Presentase jumlah PMU dengan jumlah bus

### 3.2. BOI dan SORI

Dari hasil analisa BOI ada 2 bus yang tidak terobservasi pada penempatan PMU eksisting atau tanpa menggunakan optimasi. Terlihat pada Tabel 3, bus tersebut yaitu bus nomor 1 dan 6. Selanjutnya analisa BOI pada metode optimasi BPSO ada 1 bus yang tidak terobservasi yaitu bus 6, pada metode DF dan SA semua bus dapat terobservasi seluruhnya. SORI adalah penjumlahan dari semua BOI, semakin banyak atau besar nilai SORI, maka observabilitas sistem akan semakin baik.



**Gambar 3.** Grafik Perbandingan SORI



**Gambar 4.** Presentase jumlah PMU dengan nilai SORI

Pada Gambar 3 terlihat bahwa dari nilai SORI berbeda-beda tergantung jumlah dan lokasi penempatan PMU. Sedangkan presentase jumlah PMU dengan nilai SORI diberikan pada Gambar 4. Dari grafik terlihat bahwa dengan metode *simulated annealing* jumlah PMU yang lebih sedikit dapat mengobservasi sistem lebih baik dari pada 2 metode lain.

### 3.3. Optimum Redundancy Criterion (ORC)

Jumlah konektivitas semua bus di konfigurasi 16 bus adalah sebagai berikut:

$$B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_{16} = 46$$

Dengan jumlah bus 16 pada sistem 275 kV, maka ORC untuk sistem 16 bus menjadi:

$$ORC = \frac{46}{16} = 2,88 \approx 3$$

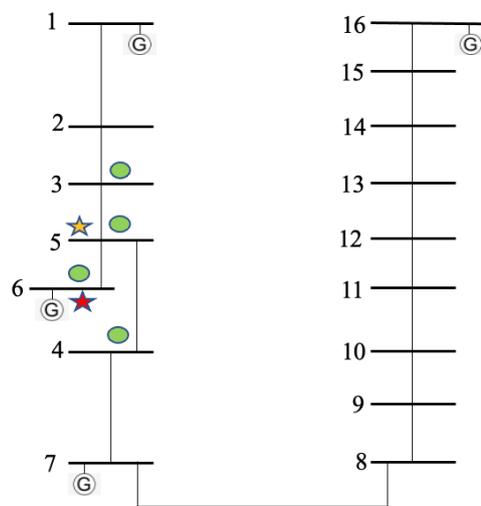
Pada masing-masing metode dilakukan analisa penambahan untuk lokasi PMU dengan mempertimbangkan kondisi sistem salah satunya pada beberapa studi literatur menganggap semua bus pembangkit sebagai bus kritis [19] [20] maka dasar ini pada bus 6 akan ditambahkan PMU. Bus 5 juga merupakan bus kritis karena nilai BOI pada bus 5 lebih besar dari nilai ORC. Pada metode BPSO, DF dan SA bus 5 baru terobservasi 1 kali maka perlu dilakukan penambahan PMU 1 buah yaitu pada bus 6. Selanjutnya dilakukan analisa BOI setelah penambahan PMU pada bus-bus kritis dilakukan, hasilnya ada pada Tabel 3.

Tabel 3. BOI sebelum dan sesudah ORC

No.	Nomor bus	BOI Non Opt	BOI BPSO		BOI DF		BOI SA	
			Sebelum ORC	Setelah ORC	Sebelum ORC	Setelah ORC	Sebelum ORC	Setelah ORC
1.	Bus 1	0	1	1	1	1	1	1
2.	Bus 2	1	2	2	1	1	1	1
3.	Bus 3	1	1	1	2	2	2	2
4.	Bus 4	1	1	1	2	2	1	1
5.	Bus 5	2	1	2	1	2	1	2
6.	Bus 6	0	0	1	1	2	1	2
7.	Bus 7	2	1	1	1	1	1	1
8.	Bus 8	1	1	1	2	2	1	1
9.	Bus 9	2	1	1	1	1	1	1
10.	Bus 10	1	1	1	2	2	1	1
11.	Bus 11	2	1	1	1	1	1	1
12.	Bus 12	2	1	1	2	2	2	2
13.	Bus 13	3	1	1	1	1	1	1
14.	Bus 14	3	1	1	2	2	2	2
15.	Bus 15	2	1	1	1	1	1	1
16.	Bus 16	1	1	1	1	1	1	1
SORI		24	16	18	22	24	19	21

Justifikasi dari indeks ORC sebagai berikut: pada metode optimasi BPSO didapatkan jumlah PMU sebanyak 6 buah dimana nilai SORI 16. Disisi lain ketika ORC diberlakukan maka diperlukan 7 PMU untuk observabilitas penuh dan nilai SORI menjadi 18. Hal ini menyatakan bahwa penambahan 1 buah PMU menghasilkan penambahan nilai SORI sebanyak 2 yang berarti lebih banyak bus yang terobservasi secara redundan dan pengamatan penuh untuk bus kritis.

Contoh kasus : Dalam kondisi normal, sebuah PMU di bus 5 akan mengamati bus 2, 4, 5 dan 6. Selama skenario kontingensi misal terjadi gangguan sistem atau gangguan link komunikasi pada bus 5, maka PMU di bus 5 akan gagal mengamati sistem, sehingga operator sistem (*dispatcher*) akan kehilangan beberapa informasi kritis, karena PMU di bus 5 memiliki 4 bus yang harus diamati. Namun, ketika indeks ORC diberlakukan, bus 5 yang dianggap kritis akan diamati lebih dari satu PMU yang berada di bus 3, bus 4, bus 5, maupun bus 6, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Contoh kasus kontingensi

Dari 3 metode optimasi dilakukan analisa pada kasus kontingensi hasilnya terlihat pada Tabel 4. Jika bus 5 mengalami gangguan maka pada metode DF dan SA PMU pada bus 5 tidak dapat dimonitor dan persentase bus yang tidak termonitor sebanyak 12,50% untuk metode DF dan 18,75% untuk metode SA. Ketika ORC sudah diterapkan yaitu ditambahkan PMU pada bus 6 maka persentase bus yang tidak terobservasi akan menurun sebesar 0% pada metode DF (artinya semua bus menjadi terobservasi) dan 6,25% pada metode SA.

**Tabel 4.** Hasil analisa kontingensi

No	Metode	Gangguan di bus 5	Bus tidak terobservasi tanpa ORC (%)	Bus tidak terobservasi dengan ORC (%)
1.	BPSO	-	Bus 6 (6,25 %)	Tidak ada (0 %)
2.	DF	PMU di bus 5 gangguan	Bus 5 dan 6 (12,50 %)	Tidak ada (0 %)
3.	SA	PMU di bus 5 gangguan	Bus 4,5,6 (18,75 %)	Bus 4 (6,25 %)

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Optimalisasi perhitungan jumlah PMU pada sistem 16 bus menggunakan metode BPSO, *depth first* dan *simulated annealing* memberikan hasil jumlah PMU yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan penempatan PMU tanpa optimasi. Pada kondisi tanpa optimasi ada beberapa bus yang tidak terobservasi, namun jika menerapkan ORC pada semua metode (BPSO, DF dan SA) semua bus dapat terobservasi penuh dan terobservasi redundan pada bus kritis. Selain itu, indeks ORC diimplementasikan untuk menjaga agar sistem dapat diamati sepenuhnya dan untuk keandalan yang tinggi. Hasilnya terbukti efektif untuk kasus yang diuji. Tabel perbandingan ketiga metode optimasi diberikan pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Hasil perbandingan metode optimasi

No	Kriteria	BPSO	DF	SA
1.	Jumlah PMU optimal	Tinggi	Sedang	Tinggi
2.	BOI	Rendah	Tinggi	Tinggi
3.	SORI	Rendah	Sedang	Tinggi
4.	ORC	Tinggi	Tinggi	Rendah

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera yang telah memberi izin pengambilan data untuk pelaksanaan penelitian dan penulisan artikel.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. S. Shahriar, I. O. Habiballah, and H. Hussein, "Optimization of phasor measurement unit (PMU) placement in supervisory control and data acquisition (SCADA)-based power system for better state-estimation performance," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 3, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11030570.
- [2] S. A. Shetti and S. G. Ankaliki, "Phasor measurement unit modeling for wide area monitoring and smart-grid control using distributed energy sources," 2019. [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [3] R. Vallakati, "Visualization and mining of phasor data from optimally placed synchrophasors in a smart-grid," 2015. [Online]. Available: <https://commons.und.edu/theses>
- [4] "Wampac Beta Series 2.0." [Online]. Available: [www.pln.co.id](http://www.pln.co.id)
- [5] Yunan Helmy Amrulloh, Rony Seto Wibowo, and Sjamsjul Anam, "Penempatan optimal phasor measurement unit (PMU) dengan integer programming," *JURNAL TEKNIK POMITS* Vol. 2, No. 2, (2013) ISSN: 2337-3539, vol. 2, 2013.
- [6] Fandy Hakim Nasution and Hendrik Maryono, "Optimalisasi penempatan PMU di system Jawa Bali," *Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan*, vol. 1, pp. 35–44, Oct. 2017.
- [7] L. Halim, N. Hariyanto, and M. Nurdin, "Penempatan phasor measurement unit untuk menentukan prediksi margin kestabilan tegangan," 2019.
- [8] I. G. P. A. Suyasa, R. S. Hartati, and D. M. Wiharta, "Optimal PMU placement In Bali 150Kv network," in *2018 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, IEEE, Oct. 2018, pp. 157–161. doi: 10.1109/ICSGTEIS.2018.8709093.

- [9] K. A. L. Bentarzi, H. D. Mohammedi R, and M. Laouamer, "Optimal placement of phasor measurement unit in power system using Meta-heuristic algorithms," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/334941427>
- [10] M. Baba, N. B. M. Nor, T. B. Ibrahim, and M. A. Sheikh, "A comprehensive review for optimal placement of phasor measurement unit for network observability," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 1. Institute of Advanced Engineering and Science, pp. 301–308, 2020. doi: 10.11591/ijeecs.v19.i1.pp301-308.
- [11] PT PLN (Persero), "RUPTL PT PLN (persero) tahun 2021-2030," 2020.
- [12] M. Sefid and M. Rihan, "Optimal PMU placement in a smart grid: An updated review," *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 59–69, Jan. 2019, doi: 10.12720/sgce.8.1.59-69.
- [13] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and A. R. Shirani, "Optimal placement of phasor measurement units: Particle swarm optimization approach," *Kaohsiung, Taiwan: The 14th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2007*, Nov. 2007.
- [14] J. Zhong, "Phasor measurement unit (PMU) placement optimisation in power transmission network based on hybrid approach," 2012.
- [15] T. Subbaiyan and Y. Venkatachalam, "PSO based optimal phasor measurement unit placement considering measurement redundancy," in *3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies, ICEPE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2021. doi: 10.1109/ICEPE50861.2021.9404456.
- [16] X. Chen et al., "Full coverage of optimal phasor measurement unit placement solutions in distribution systems using integer linear programming," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081552.
- [17] M. Spitzer, C. Eerdmans, A. S. Nair, and P. Ranganathan, "Evaluation of PMU placements with SORI and ORC indices for IEEE test feeders," in *2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, IEEE, May 2018, pp. 0687–0690. doi: 10.1109/EIT.2018.8500263.
- [18] R. Vallakati, A. Mukherjee, and P. Ranganathan, "Preserving observability in synchrophasors using optimal redundancy criteria (ORC)," in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, IEEE, Jun. 2015, pp. 69–74. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152012.
- [19] S. M. Mazhari, H. Monsef, H. Lesani, and A. Fereidunian, "A multi-objective PMU placement method considering measurement redundancy and observability value under contingencies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2136–2146, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2234147.
- [20] M. Esmaili, K. Gharani, and H. A. Shayanfar, "Redundant observability PMU placement in the presence of flow measurements considering contingencies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3765–3773, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2257883.