

# Algoritma Genetika dalam Penentuan Alokasi Biaya Wheeling Menggunakan LRMC dan MW-Mile

Angga Cahya Putra<sup>1</sup>, Sasongko Pramonohadi<sup>2</sup>, Sarjiya<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jl Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta, INDONESIA 55281 (tel: 0274-552305; email: <sup>1</sup>anggaacahyaaid@mail.ugm.ac.id, <sup>2</sup>sasongko@ugm.ac.id, <sup>3</sup>sarjiya@ugm.ac.id)

[Diterima: 27 Juni 2022, Revisi: 17 Mei 2023]

Corresponding Author: Angga Cahya Putra

**INTISARI** — Deregulasi industri listrik telah terjadi di banyak negara. Tujuan utama di balik deregulasi ini adalah memperkenalkan kompetisi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas layanan di industri pasokan listrik. Perubahan yang signifikan akan terjadi pada nilai pembangkitan dan fungsi saluran transmisi. Pelanggan akan berpartisipasi menyambut pasar bebas dan hal ini menyebabkan banyak perusahaan yang ingin membangun pembangkit sendiri dalam skema operasi *wheeling* untuk memenuhi kebutuhan sendiri. *Wheeling* menjadi solusi dari permasalahan tersebut. Metode aliran daya akan digunakan setelah penambahan *wheeling* pada sistem. Tujuan penggunaan metode ini adalah mengetahui kondisi sistem setelah *wheeling* ditambahkan karena peta aliran daya akan berubah saat ada pelaku *wheeling*. Metode studi aliran daya memberikan informasi besarnya daya total yang dibangkitkan oleh *generator*, tetapi tidak memberikan informasi daya yang dialirkan oleh *generator* di setiap jaringan transmisi. Untuk mengetahui alokasi daya yang dialirkan oleh *generator* di setiap jaringan transmisi, metode *power tracing* akan digunakan. Metode ini dapat memberikan informasi alokasi daya yang dialirkan oleh *generator* di setiap jaringan transmisi pada sistem. Penelitian ini akan membahas metode *power tracing* menggunakan metode algoritma genetika (AG). AG adalah satu dari beberapa metode optimisasi dan mengasumsikan alokasi daya yang dialirkan oleh *generator* sebagai masalah yang akan dioptimisasi. Penentuan harga *wheeling* menggunakan metode *Long Run Marginal Cost* (LRMC). Metode ini memproyeksikan biaya masa depan dengan memperhatikan perubahan beban yang terjadi setiap saat dalam kurun waktu yang ditentukan. Pada makalah ini metode LRMC dibandingkan dengan metode penentuan biaya *wheeling* lainnya, yaitu metode *MW-Mile*. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa metode LRMC lebih murah dibandingkan dengan metode *MW-Mile*. Dari perspektif ekonomi, penentuan biaya *wheeling* menggunakan metode LRMC lebih murah 14%-20% daripada metode *MW-Mile*.

**KATA KUNCI** — Deregulasi, *Power Wheeling*, Algoritma Genetika, *Long Run Marginal Cost*, *MW-Mile*.

## I. PENDAHULUAN

Adanya deregulasi industri listrik menyebabkan banyak perusahaan ingin membangun pembangkit sendiri tanpa harus membangun jaringan transmisi. *Wheeling* menjadi solusi bagi permasalahan tersebut. Ada beberapa definisi *power wheeling*.

*Wheeling* dapat didefinisikan sebagai distribusi tenaga listrik dari penjual ke pembeli menggunakan jaringan transmisi yang dimiliki oleh pihak ketiga [1]. Selain itu, *wheeling* dapat diartikan sebagai penggunaan fasilitas jaringan transmisi dan distribusi untuk mendistribusikan listrik milik pihak lain [2]. *Wheeling* juga berarti bahwa tenaga listrik dikirim melalui saluran transmisi ataupun distribusi dari satu utilitas menuju utilitas lainnya [3].

Masalah yang sering muncul pada *power wheeling* adalah penentuan biaya yang adil untuk pemilik saluran transmisi dan beban atau industri yang ingin menggunakan *wheeling*. Penelitian terkait penentuan biaya *wheeling* sudah banyak dilakukan. Keadilan dalam menentukan biaya *wheeling* menjadi topik utama dalam beberapa pembicaraan. Terdapat beberapa metodologi untuk menentukan biaya *wheeling*, yakni biaya *embedded*, *MW-Mile*, *MVA-Mile*, *marginal*, dan *incremental* [4]–[8].

Pada penelitian sebelumnya, penentuan harga *wheeling* dihitung berdasarkan jarak pengiriman daya [5]. Metode ini dinamakan *postage stamp*. Makin besar jarak pengiriman daya dari pembangkit ke beban, makin besar pula harga *wheeling* yang harus dibayar. Untuk metode *contract path*, perhitungan biaya *wheeling* dilakukan berdasarkan asumsi bahwa pengiriman daya terbatas pada aliran di sepanjang jalur kontinu listrik yang ditentukan melalui sistem transmisi yang

digunakan perusahaan *wheeling*. Sebuah penelitian lain menggabungkan beberapa metode penentuan harga *wheeling* [9]. Metode *MW-Mile* dan *postage stamp* yang digabungkan sangat praktis dan dapat diimplementasikan.

Pada penelitian sebelumnya, dilakukan penentuan biaya *wheeling* menggunakan metode *MW-Mile* [10]. Pada penelitian tersebut, dilakukan pengoptimalan dengan menggunakan metode *optimal power flow* (OPF), sehingga hasil yang didapatkan hampir mendekati nilai yang adil dan bersaing. OPF dilakukan agar biaya pembangkitan pada sistem lebih murah dan optimal [11].

Telah dilakukan juga penelitian tentang metode *long run marginal cost* (LRMC) [12]. Hasil penelitian tersebut mempromosikan harga yang ekonomis dan efisiensi karena mencakup biaya ekspansi di masa depan selain biaya operasional. Salah satu kelemahan metode ini adalah sensitif terhadap tingkat pertumbuhan maupun kenaikan beban. *Review* mengenai beberapa metode yang digunakan untuk menghitung biaya *wheeling* dilakukan pada [13]. Beberapa metode untuk menentukan harga *wheeling* adalah *embedded cost*, *short run marginal cost*, dan *long run incremental cost*.

Untuk menentukan biaya *wheeling* itu sendiri, harus diketahui terlebih dahulu daya yang mengalir pada tiap *bus* dalam suatu sistem interkoneksi. Sebuah penelitian menjelaskan penelusuran aliran daya pada suatu sistem dengan menggunakan metode algoritma genetika (*genetic algorithm*, GA) [14]. Dengan metode ini dapat diketahui aliran daya yang mengalir di tiap *bus*. Hasil penelusuran daya dengan menggunakan metode GA lebih efektif dan cepat dibandingkan menggunakan metode lainnya. Referensi [15] memaparkan

metode modern lainnya, yaitu metode penelusuran aliran daya menggunakan algoritma pelacakan ikan salmon secara artifisial.

Pentingnya melakukan penelusuran aliran daya atau *tracing* pada saat menentukan biaya *wheeling* juga telah diteliti [16]. Pada penelitian tersebut, digunakan metode *pollinate flower algorithm* (FPA). Metode ini dapat melacak daya aktif maupun reaktif dengan rumusan masalah yang sederhana. *Power flow tracing* juga telah dilakukan pada [17].

Metode yang populer dalam melacak aliran daya juga telah diteliti dalam [18]. Penelitian yang dilakukan mengasumsikan bahwa aliran masuk *node* dibagi secara proporsional di antara aliran keluar *node*. Metode ini menggunakan pendekatan topologi untuk menentukan kontribusi masing-masing generator atau beban pada setiap aliran saluran berdasarkan perhitungan faktor distribusi topologi. Pelacakan aliran daya menjadi sangat penting dalam penentuan harga *wheeling* dan berbagai metode digunakan untuk menentukannya. Beberapa penelitian telah menggunakan pelacakan aliran daya ini [19]–[21].

Metode populer lainnya juga telah digunakan [22]. Secara umum disepakati bahwa penggunaan sistem transmisi harus dialokasikan di antara pembangkit dan beban berdasarkan kontribusinya terhadap aliran maksimum di setiap titik. Untuk mengidentifikasi kondisi aliran maksimum pada tiap kondisi, diperlukan pertimbangan tingkat keragaman beban dan semua kontingensi dalam kriteria keamanan.

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian ini menggunakan metode OPF guna mendapatkan aliran daya yang optimal dengan biaya yang rendah. OPF memberikan informasi besarnya daya yang dihasilkan oleh generator, tetapi tidak memberi informasi mengenai daya yang mengalir di tiap saluran. Metode GA digunakan untuk melakukan pelacakan aliran daya yang mengalir di tiap titik saluran karena GA lebih efektif dan cepat dibandingkan metode penelusuran aliran daya lainnya. Untuk penentuan biaya *wheeling*, digunakan metode LRMC dengan kondisi beban yang berubah-ubah dan dengan waktu tiga tahun perhitungan. Metode ini digunakan karena ekonomis dan efisien. Hal ini terjadi karena selain biaya operasional, biaya ekspansi di masa depan juga dimasukkan. Penelitian ini dilakukan pada sistem uji IEEE 14-bus yang telah dimodifikasi. Dalam penelitian ini juga dibandingkan hasil biaya *wheeling* menggunakan metode LRMC dengan metode *MW-Mile*.

## II. METODOLOGI

Bagian ini menjelaskan tentang OPF, penelusuran aliran daya menggunakan metode GA, *MW-Mile*, dan LRMC.

### A. ALUR RANCANGAN PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur untuk mengetahui penelitian sebelumnya terkait dengan *power wheeling*, penelusuran aliran daya, GA, dan penentuan biaya *wheeling* menggunakan metode LRMC serta *MW-Mile*. Penelusuran aliran daya dilakukan pada proses selanjutnya. Pada tahap ini, dilakukan penelusuran aliran daya untuk mengetahui daya yang mengalir pada tiap saluran transmisi. Metode yang digunakan dalam penelusuran aliran daya adalah metode GA. Daya tiap *bus* pada sistem yang telah dikenai metode OPF dimasukkan ke dalam fungsi objektif pada GA. Pengodean program dilakukan dalam penelusuran aliran daya menggunakan metode GA dengan dibantu perangkat lunak Visual Code Studio.

Di dalam prosesnya, jika nilai *fitness* di dalam kode program telah bernilai 1, proses penelusuran aliran daya akan

berhenti dan menampilkan hasil. Akan tetapi, jika nilai *fitness* tersebut belum bernilai 1, proses akan berulang dari awal untuk melakukan penelusuran aliran daya kembali.

Setelah dilakukan penelusuran aliran daya, proses selanjutnya adalah menentukan biaya *wheeling*. Penentuan harga *wheeling* dilakukan menggunakan metode LRMC dan *MW-Mile*. Hasil dari kedua metode tersebut dibandingkan dan kemudian dicari metode yang lebih efektif dan adil dalam penentuan harga *wheeling*.

Penulisan laporan dilakukan pada tahap akhir penelitian dengan tujuan mengetahui metode yang lebih efektif dan adil dalam penentuan harga *wheeling*.

### B. OPTIMAL POWER FLOW

Di dalam sistem interkoneksi sistem tenaga, optimasi biaya didapatkan dengan menyesuaikan daya aktif dan daya reaktif setiap generator untuk meminimalkan biaya operasi. Metode untuk meminimalkan biaya operasi tersebut disebut dengan OPF. OPF merupakan aliran daya yang mempertimbangkan biaya tiap generator pada suatu sistem [23], [24]. OPF diformulasikan untuk meminimalkan biaya operasi pembangkit listrik. Formulasi OPF ditunjukkan pada (1) dan (2).

$$\min_u \sum_{i=1}^{Ng} C_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

$$C_i(P_{Gi}) = \alpha_i + \beta P_{Gi} + \gamma_{Gi}^2. \quad (2)$$

Batasan-batasan berikut dipertimbangkan saat menyelesaikan masalah OPF.

Persamaan aliran daya:

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{Ng} P_{Di} - P_{loss} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{Ng} Q_{Gi} - \sum_{i=1}^{Ng} Q_{Di} - Q_{loss} = 0 \quad (4)$$

dengan

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (5)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (6)$$

Batas aktif dan reaktif pembangkitan:

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (7)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (8)$$

$$P_{Gi}^2 + Q_{Gi}^2 \leq S_{Gi}^{max}. \quad (9)$$

Batas tegangan:

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max}. \quad (10)$$

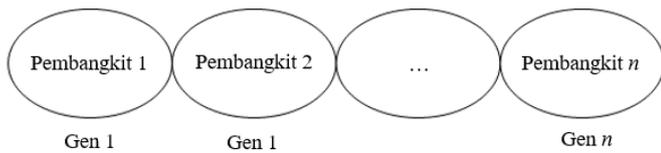
Batas sudut tegangan:

$$\delta_{Gi}^{min} \leq \delta_{Gi} \leq \delta_{Gi}^{max} \quad (11)$$

dengan  $F(P_g)$  mewakili biaya bahan bakar,  $P_{Gi}$  mewakili keluaran daya aktif generator,  $P_{Di}$  mewakili daya aktif beban,  $P_{loss}$  melambangkan *loss* daya aktif,  $Q_{Gi}$  melambangkan keluaran daya reaktif generator,  $Q_{loss}$  melambangkan *loss* daya reaktif,  $V_i$  dan  $V_j$  menunjukkan tegangan di cabang  $i$  dan  $j$ ,  $Y_{ij}$  menunjukkan matriks penerimaan di cabang  $i$  dan  $j$ ,  $\theta_{ij}$  menunjukkan matriks penerimaan sudut, serta  $\delta_j$  dan  $\delta_i$  menunjukkan tegangan sudut di cabang  $i$  dan  $j$ .

### C. PENELUSURAN ALIRAN DAYA

Pada bagian ini, penelusuran aliran daya dilakukan menggunakan metode GA. GA adalah metode stokastik yang



Gambar 1. Representatif kromosom.

mengaplikasikan model dari proses biologis untuk menyelesaikan permasalahan optimasi. GA memungkinkan populasi yang terdiri atas beberapa individu untuk berevolusi di bawah aturan untuk memaksimalkan nilai *fitness* ataupun meminimalkan fungsi biaya [25]. Pada penelitian ini, GA digunakan untuk menelusuri aliran daya pada sistem tenaga.

Sebagai langkah awal adalah GA mengodekan beberapa kandidat nilai di dalam sebuah kromosom. Kromosom merupakan sebuah matriks dengan beberapa nilai yang dibuat secara acak. Kromosom terdiri atas beberapa unsur yang disebut dengan gen. Beberapa kromosom yang terkumpul disebut dengan populasi. Representasi kromosom ditunjukkan pada Gambar 1.

GA menghasilkan nilai objektif berdasarkan kualitas nilai *fitness*-nya dan akan menghentikan prosesnya saat nilai *fitness* mendekati atau bernilai 1. Dari proses tersebut, penentuan aliran daya dalam sistem interkoneksi akan didapatkan. Fungsi objektif dari GA dalam makalah ini diperlihatkan pada (12) sampai (14).

$$\min (H) \sum_{i=1}^n \Delta P_{j-k}^{Gi} \quad (12)$$

$$\Delta P_{j-k}^{Gi} = \sum P_{j-k}^{Gi(tr)} - P_{j-k} \quad (13)$$

$$fitness = \frac{1}{(1+H)} \quad (14)$$

dengan  $P_{j-k}^{Gi}$  mewakili aliran daya yang mengalir dari saluran  $j$  ke  $k$  dan  $P_{j-k}^{Gi(tr)}$  mewakili aliran daya yang mengalir dari saluran  $j$  ke  $k$  dengan menggunakan GA. Jumlah gen pada GA bergantung pada jumlah pembangkit pada sistem. Proses GA sendiri meliputi seleksi, *cross over*, dan mutasi. Proses dari GA akan berhenti saat nilai *fitness* mendekati atau bernilai 1.

Proses seleksi dalam merupakan operasi yang memastikan bahwa representasi dari kromosom yang didapatkan pada generasi berikutnya memperoleh kualitas yang lebih baik atau bergantung pada nilai *fitness*-nya. Pada model seleksi alami, kromosom dengan nilai *fitness* yang lebih baik memiliki peluang untuk bertahan hidup pada generasi selanjutnya. Kromosom yang telah bertahan hidup kemungkinan besar akan dipasangkan atau dikawinkan dengan kromosom lainnya. Metode yang digunakan untuk melakukan proses seleksi tadi adalah metode *roulette wheel*.

Proses selanjutnya adalah proses *cross over*. Pada proses ini, kromosom yang telah dipilih akan disilangkan, sehingga kromosom baru akan terbentuk. *Pc* adalah suatu kemungkinan dari proses pindah silang. Operasi mutasi adalah proses pergantian nilai kromosom. Proses mutasi ini mengganti kromosom yang hilang dari populasi akibat proses seleksi. Nilai yang akan menggantikan kromosom yang hilang tersebut dibangkitkan secara acak.

#### D. METODE MW-MILE

Tarif tahunan untuk setiap fasilitas transmisi dijelaskan pada [23], berdasarkan tingkat penggunaan fasilitas tersebut oleh transaksi ini, yang ditunjukkan pada (15). Metode ini digunakan karena menghitung penggunaan sebenarnya dari

saluran transmisi. Penggunaan tersebut meliputi panjang saluran transmisi, aliran daya yang mengalir pada saluran transmisi, kapasitas saluran transmisi, dan faktor lainnya yang akan dihitung sesuai dengan penggunaannya.

$$TC_t = TC * \frac{\sum_{k \in K} C_k L_k P_{t,k}}{\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} C_k L_k P_{t,k}} \quad (15)$$

dengan  $TC_t$  adalah alokasi harga dari pengguna jaringan  $t$ , biaya transmisi disimbolkan  $TC$ ,  $C_k$  merupakan biaya per MW per unit panjang saluran  $k$ , panjang saluran adalah  $L_k$ ,  $P_{t,k}$  merupakan aliran daya (MVA) di dalam saluran  $k$  ke pengguna  $t$ ,  $T$  adalah pengguna, dan  $K$  adalah saluran transmisi. Metode ini sangat rumit karena tiap perubahan atau penambahan pembangkit maupun beban pada jaringan transmisi akan mengubah perhitungan aliran daya pada saluran transmisi. Metode tersebut digunakan dalam penelitian ini karena penentuan biayanya yang adil dan akan dilakukan dalam kurun waktu yang lebih panjang dibandingkan penelitian lainnya.

#### E. LONG RUN MARGINAL COST

Biaya operasi marginal adalah biaya untuk mengakomodasi peningkatan marginal dalam tiap daya yang ditransaksikan. Biaya operasi marginal per MW dari daya yang ditransaksikan dapat diestimasi sebagai perbedaan dalam biaya daya optimal di semua titik pengiriman dan penerimaan transaksi daya tersebut [12], [26].

$$Marginal Cost = \sum BMC_i \times P_{i,t} \quad (16)$$

dengan  $BMC_i$  merepresentasikan biaya marginal bus  $i$  dan  $P_{i,t}$ . Biaya marginal bus didapatkan dari perhitungan OPF, yang ditunjukkan pada (17).

$$IC_i(P_{Gi}) = \frac{dc_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} = \beta + 2\gamma_{Gi} \quad (17)$$

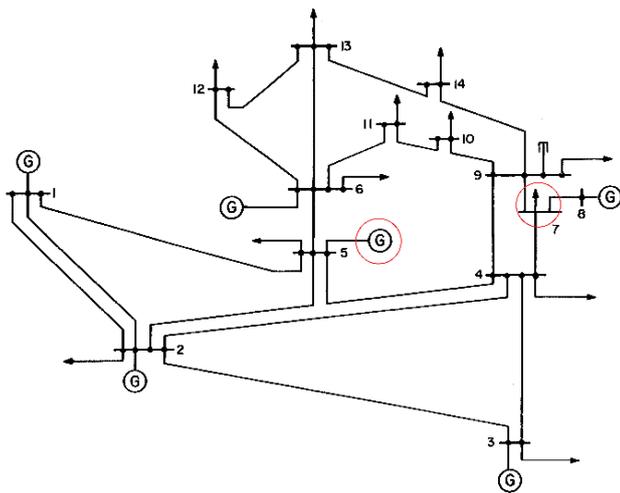
Dalam metodologi penetapan harga LRMC, biaya operasi dan penguatan *marginal* dari sistem tenaga digunakan untuk menentukan harga untuk transaksi transmisi. Selama selang waktu panjang dalam beberapa tahun ini, semua proyek ekspansi transaksi diidentifikasi dan dikenakan biaya. Biaya ini kemudian dibagi atas jumlah besar daya dari semua transaksi baru yang direncanakan untuk menghitung biaya penguatan marginal. Metode ini juga digunakan untuk melihat efektivitasnya dalam segi ekonomi dibandingkan penggunaan metode penentuan biaya *wheeling* lainnya.

### III. STUDI KASUS

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan aliran daya optimal pada MATPOWER dengan sistem uji IEEE 14-bus. Sistem uji modifikasi IEEE 14 untuk simulasi ditunjukkan pada Gambar 2. Generator akan ditempatkan di bus 5 dengan daya 40 MW dan beban 30 MW yang terletak di bus 7. Penempatan para pelaku *wheeling* pada bus 5 dan bus 7 dilakukan untuk menunjukkan bahwa penyedia jasa listrik dan konsumen tidak langsung terhubung dengan bus yang sama. Sistem yang dimodifikasi ini memberikan batas jalur pada bus 5 hingga bus 6 dan bus 9 hingga bus 14. Fungsi biaya pembangkit ditunjukkan pada Gambar 2 [27].

#### A. DATA PEMBANGKIT

Tiap pembangkit memiliki fungsi biaya masing-masing serta pembangkitan daya yang berbeda. Data tersebut disajikan pada Tabel I.



Gambar 2. Single line diagram pada sistem uji IEEE 14-bus modifikasi untuk simulasi.

TABEL I  
DATA PEMBANGKIT

Bus	Fungsi Biaya	Daya Minimal (MW)	Daya Maksimal (MW)
1	$3 + 0,043 P + 20 P^2$	232,4	332,4
2	$3 + 0,250 P + 20 P^2$	40,0	140,0
3	$3 + 0,010 P + 20 P^2$	0,0	100,0
5	$3 + 0,250 P + 20 P^2$	40,0	140,0
6	$3 + 0,010 P + 20 P^2$	0,0	100,0
8	$3 + 0,010 P + 20 P^2$	0,0	100,0

## B. PROFIL BEBAN

Penelitian ini menggunakan profil beban yang berubah-ubah tiap jam, kemudian berlanjut hingga tiga tahun ke depan. Pada tahun pertama saat *weekday*, rata-rata beban tertinggi mencapai 342,8 MW dan beban terendah sebesar 267,4 MW, sedangkan saat *weekend*, beban tertinggi mencapai 339,37 MW dan biaya terendah adalah 264,71 MW. Untuk tahun selanjutnya, permintaan beban naik hingga 5%. Pada saat *weekday*, beban tertinggi mencapai 356,5 MW dan beban terendah mencapai 278,1 MW. Kemudian, saat *weekend* beban tertinggi mencapai 352,9 MW dan beban terendah sebesar 275,3 MW. Untuk tahun terakhir, pada saat *weekday* beban puncak mencapai 370,8 MW dan beban terendah mencapai 289,2 MW. Saat *weekend*, beban puncak bernilai 367,1 MW dan beban terendah sebesar 286,3 MW.

## IV. HASIL DAN DISKUSI

Pada bagian ini dibahas perhitungan *wheeling* dengan menggunakan metode LRMC dan *MW-Mile* pada sistem uji IEEE 14-bus yang telah dimodifikasi.

### A. ALOKASI ALIRAN DAYA

Setelah OPF pada sistem dijalankan, dilakukan penelusuran aliran daya tiap bus. Penelusuran ini dilakukan untuk mengetahui aliran daya yang mengalir pada tiap bus, sehingga diharapkan terjadi *fairness* atau keadilan dalam menentukan harga *wheeling*. Untuk penelusuran daya ini, digunakan metode GA dan didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel II.

Dari Tabel II dapat dilihat bahwa terdapat beberapa saluran yang alirannya bernilai negatif. Dari sisi pembangkit, aliran saluran bernilai negatif menunjukkan bahwa pada saluran tersebut daya tidak dialirkan oleh pembangkit, tetapi pembangkit menerima aliran daya dari beban. Dari sisi beban,

TABEL II  
ALIRAN DAYA SELURUH PEMBANGKIT PADA SISTEM

Saluran	Pembangkit					
	G1 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	G6 (MW)	G8 (MW)	G5 (MW)
1	16,4	26,0	25,7	18,0	29,8	8,0
2	18,7	8,0	7,0	2,8	8,0	7,0
3	7,0	9,0	9,0	0,0	25,0	16,8
4	4,3	14,0	7,3	5,0	1,0	11,0
5	0,0	6,4	3,0	2,2	7,0	4,7
6	-9,0	-1,0	-10,4	-1,9	-4,0	-3,0
7	-16,7	-6,5	-30,2	-11,0	-10,0	-5,5
8	5,0	13,0	2,0	5,0	1,0	4,2
9	2,6	7,0	1,3	1,0	0,0	1,7
10	0,3	1,0	2,0	8,4	3,0	4,1
11	1,0	1,0	11,0	5,5	1,2	0,0
12	2,0	3,5	0,0	1,0	2,0	1,0
13	0,0	1,0	1,0	1,0	1,2	20,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	3,0	4,0	0,0	0,0	4,0	0,0
16	-2,0	0,0	-1,0	-2,0	-0,6	-1,0
17	0,7	0,2	0,1	0,0	0,0	0,6
18	-1,0	-3,6	-2,0	0,0	-4,5	-4,7
19	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,2
20	1,0	1,0	2,0	2,4	7,0	0,0

saluran yang alirannya bernilai negatif menunjukkan bahwa beban tidak menerima aliran daya, tetapi aliran daya mengalir kembali ke sistem. Saat penetapan harga *wheeling*, saluran yang alirannya bernilai negatif ini mendapatkan manfaat, yaitu tidak membayar harga saluran tersebut dan akan dibayar oleh penyedia saluran transmisi.

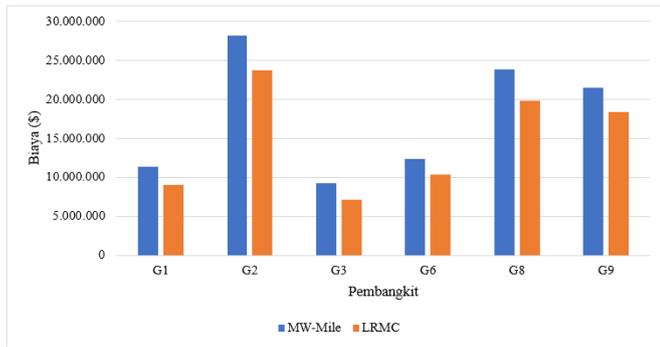
### B. PENETAPAN BIAYA WHEELING DENGAN LRMC

Setelah dilakukan penelusuran aliran daya, biaya *wheeling* dihitung menurut kontribusinya masing-masing. Dari hasil perhitungan, diperoleh biaya *wheeling* paling mahal terdapat pada pembangkit G2, yaitu sebesar \$23,64 juta dalam tiga tahun dan biaya *wheeling* yang paling murah terdapat pada pembangkit G3, yaitu sebesar \$7,13 juta. Untuk beban, biaya *wheeling* paling mahal terdapat pada beban L2, yakni sebesar \$9,95 juta dalam tiga tahun dan biaya *wheeling* paling murah terdapat pada beban L3, yaitu \$3,39 juta. Dari hasil ini, diketahui bahwa banyak faktor yang menyebabkan mahal atau murahnya biaya *wheeling*. Salah satunya adalah masuknya semua pelaku *wheeling*, yang menyebabkan peta aliran daya berubah. Kemudian, terdapat perbedaan fungsi biaya dan spesifikasi pada generator G2 dan G3. Perbedaan yang cukup signifikan pada fungsi biaya generator menyebabkan tingginya biaya pada pembangkit G2.

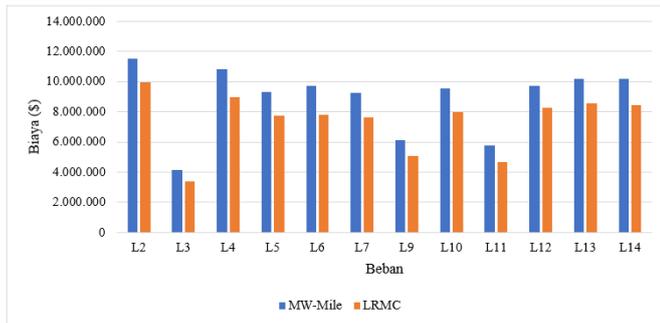
### C. PERBANDINGAN BIAYA WHEELING

Setelah aliran daya pada tiap saluran di sistem ditemukan, harga dari *wheeling* ditetapkan sesuai dengan kontribusinya. Penetapan harga *wheeling* dibandingkan menggunakan metode *MW-Mile* dan metode LRMC. Perbandingan ini setara karena keduanya menggunakan penelusuran aliran daya dengan GA. Hasil tersebut diperlihatkan pada Tabel II.

Hasil perbandingan kedua metode ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Dari hasil percobaan, diketahui bahwa pelaku *wheeling* pembangkit, yaitu pembangkit G5, harus membayar sewa saluran transmisi sebesar \$36,22 juta dalam tiga tahun dengan menggunakan metode LRMC. Apabila menggunakan metode *MW-Mile*, pelaku *wheeling* pembangkit harus membayar sewa saluran transmisi sebesar \$26,31 juta dalam tiga tahun. Sementara itu, pelaku *wheeling*



Gambar 3. Perbandingan biaya *wheeling* pembangkit dalam tiga tahun.



Gambar 4. Perbandingan biaya *wheeling* beban dalam tiga tahun.

beban, yakni beban L7, harus membayar sewa saluran transmisi sebesar \$26,68 juta \$ dalam tiga tahun dengan menggunakan metode LRMC. Dengan menggunakan metode *MW-Mile*, pelaku *wheeling* beban harus membayar sewa saluran transmisi sebesar \$19,69 juta dalam tiga tahun.

Dari perbandingan tersebut, diketahui bahwa LRMC menghasilkan biaya *wheeling* yang lebih rendah. Perbandingan ini setara karena metode pelacakan aliran daya yang digunakan adalah hasil perhitungan GA yang sama. Biaya *wheeling* dengan metode LRMC lebih tinggi 14% hingga 20% karena pada metode LRMC, biaya dihitung dengan lebih detail tergantung pada perubahan beban dan biaya investasi.

## V. KESIMPULAN

Penelitian ini mempresentasikan pelacakan aliran daya menggunakan metode GA. Penentuan biaya *wheeling* dihitung menggunakan metode LRMC dan dibandingkan dengan metode *MW-Mile*. Untuk membandingkan kedua metode tersebut, dilakukan simulasi menggunakan sistem uji IEEE 14-bus yang sudah dimodifikasi. Jangka waktu pada penelitian ini diatur dalam kurun waktu tiga tahun. Hasil simulasi mengklarifikasi bahwa harga *wheeling* menggunakan metode LRMC lebih rendah dibandingkan dengan *MW-Mile*. Hal ini terjadi karena metode LRMC memproyeksikan biaya masa depan dengan memperhatikan perubahan beban yang terjadi setiap saat dalam kurun waktu yang ditentukan. Dari perspektif ekonomi, penentuan biaya *wheeling* menggunakan metode LRMC lebih murah 14% sampai 20% dibandingkan dengan metode *MW-Mile*. Sebagai contoh, dalam tiga tahun, biaya *wheeling* pada pembangkit G6 menggunakan metode *MW-Mile* adalah sebesar \$12,35 juga. Saat menggunakan metode LRMC, biaya *wheeling* turun sebesar 15%, menjadi \$10,34 juta.

Di masa depan, metode ini dapat digunakan untuk penentuan *wheeling* dengan jangka waktu yang lebih panjang. Selain itu, pendekatan metode penentuan harga *wheeling* lain dapat diimplementasikan untuk menentukan harga *wheeling* dan memberikan hasil yang lebih baik.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Tim penulis menyatakan bahwa artikel yang berjudul “Algoritma Genetika dalam Penentuan Alokasi Biaya *Wheeling* Menggunakan *Long Run Marginal Cost* dan *MW-Mile*” ditulis dengan bebas dari konflik kepentingan.

## KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Angga Cahya Putra dan Sasongko Pramonohadi; metodologi, Angga Cahya Putra, Sasongko Pramonohadi, dan Sarjiya; penulisan—penyusunan draf asli, Angga Cahya Putra; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Sasongko Pramonohadi dan Sarjiya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan penelitian ini, kepada dosen pembimbing, Laboratorium Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada, serta Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Universitas Gadjah Mada.

## REFERENSI

- [1] Y.R. Sood, N.P. Padhy, dan H.O. Gupta, “Wheeling of Power Under Deregulated Environment of Power System - A Bibliographical Survey,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 17, No. 3, hal. 870–878, Agu. 2002, doi: 10.1109/TPWRS.2002.800967.
- [2] H.M. Merrill dan B.W. Erickson, “Wheeling Rates Based on Marginal-Cost Theory,” *IEEE Power Eng. Rev.*, Vol. 9, No. 11, hal. 39–40, Nov. 1989, doi: 10.1109/MPER.1989.4310379.
- [3] K.H. Lalitha dan I.K. Kiran, “Comparison of Wheeling Cost Using Power Flow Tracing Methods in Deregulated Electric Power Industry,” *Int. J. Eng. Technol. Manag. Appl. Sci.*, Vol. 5, No. 6, hal. 861–870, 2017.
- [4] H.H. Happ, “Cost of Wheeling Methodologies,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 9, No. 1, hal. 147–156, Feb. 1994, doi: 10.1109/59.317547.
- [5] S. Larbwisuthisaroj dan S. Chaitusaney, “Wheeling Charge Considering Line Flow Differentiation Based on Power Flow Calculation,” *2018 15th Int. Conf. Elect. Eng./Elctron. Comput. Telecommun., Inf. Technol.*, 2018, hal. 293–296, doi: 10.1109/ECTICon.2018.8619951.
- [6] S. Riyaz, R. Upputuri, dan N. Kumar, “Wheeling Charge Evaluation by Using Proposed MW-Mile Method Considering Transmission Losses and Load Power Factor Variation,” *2020 1st IEEE Int. Conf. Meas. Instrum., Control Automat. ICMICA 2020*, 2020, hal. 1–5, doi: 10.1109/ICMICA48462.2020.9242701.
- [7] Hermawan dan T. Andromeda, “Comparison of Cost Estimation Methods in Power Wheeling for Java-Bali Interconnection System,” *2017 4th Int. Conf. Inf. Technol. Comput., Elect. Eng. (ICITACEE)*, 2017, hal. 127–130, doi: 10.1109/ICITACEE.2017.8257689.
- [8] X. Gao, P. You, dan M. Wen, “Fixed Cost Allocation Based on Current Electromagnetic Fields on Power Market,” *2018 2nd IEEE Conf. Energy Internet, Energy Syst. Integr. (EI2)*, 2018, hal. 1–4, doi: 10.1109/EI2.2018.8582065.
- [9] B. Kharbas, M. Fozdar, dan H. Tiwari, “Efficient Transmission Cost Allocation by Composite MVA-Mile Method with Network Usage Approach,” *Int. J. Comput. Appl.*, hal. 15–20, 2017.
- [10] S. Ghimire, J. Marasini, dan M. Paudyal, “A Case Study of MW-Mile, MVA-Mile, MVA-Mile and Power Factor based Transmission Pricing in Integrated Nepal Power System,” *2019 IEEE Int. Conf. Electr. Comput., Commun. Technol. (ICECCT)*, 2019, hal. 1–5, doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869392.
- [11] F. Zhou, J. Anderson, dan S.H. Low, “The Optimal Power Flow Operator: Theory and Computation,” *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, Vol. 8, No. 2, hal. 1010–1022, Jun. 2021, doi: 10.1109/TCNS.2020.3044258.
- [12] Z. Jing dan W. Xie, “Distribution Pricing Based on Improved Long-Run Incremental Cost Pricing with Dynamic Security Factor,” *2018 Int. Conf. Power Syst. Technol. (POWERCON)*, 2019, hal. 763–769, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601852.
- [13] Y.S. Wijoyo, S.P. Hadi, dan Sarjiya, “Review Perhitungan Biaya *Wheeling*,” *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 9, No. 1, hal. 116–122, Feb. 2020, doi: 10.22146/jnteti.v9i1.114.
- [14] M.H. Sulaiman, M.W. Mustafa, dan O. Aliman, “Transmission Loss and Load Flow Allocations via Genetic Algorithm Technique,” *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conf.*, 2009, hal. 1–5, doi:

- 10.1109/TENCON.2009.5396005.
- [15] A.N. Afandi dkk., "An Opportunity of Artificial Salmon Tracking Algorithm for the Optimal Power Wheeling Considering Open Tariffing Systems of the Transmission Charges," *2018 Conf. Power Eng., Renew. Energy (ICPERE)*, 2018, hal. 1-6, doi: 10.1109/ICPERE.2018.8739318.
- [16] S.H.M. Kerta, Z.A. Hamid, dan I. Musirin, "An Ant Colony-Pollinated Flower Algorithm: A New Approach on Reactive Power Load Tracing for Deregulated Power System," *Int. J. Simul. Syst. Sci., Technol.*, Vol. 17, No. 41, hal. 3.1-3.8, 2016, doi: 10.5013/IJSSST.a.17.41.03.
- [17] Y.S. Wijoyo, S.P. Hadi, dan Sarjiya, "Opportunity Cost Allocation for Wheeling Using Power Flow Tracing," *2019 Int. Conf. Technol., Policies Elect. Power, Energy*, 2019, hal. 1-5, doi: 10.1109/IEECONF48524.2019.9102537.
- [18] K.S. Ahmed, S.P. Karthikeyan, dan M.V. Rao, "Proportional Generation and Proportional Load Based Transmission Loss Allocation Considering Reactive Power Demand in Restructured Environment," *TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conf.*, 2017, hal. 992-997, doi: 10.1109/TENCON.2017.8228002.
- [19] B. Tranberg dkk., "Flow-Based Analysis of Storage Usage in a Low-Carbon European Electricity Scenario," *2018 15th Int. Conf. Eur. Energy Mark. (EEM)*, 2018, hal. 1-5, doi: 10.1109/EEM.2018.8469951.
- [20] M. Hotz dan W. Utschick, "hynet: An Optimal Power Flow Framework for Hybrid AC/DC Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 35, No. 2, hal. 1036-1047, Mar. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2942988.
- [21] J. Hörsch dkk., "Flow Tracing as a Tool Set for the Analysis of Networked Large-Scale Renewable Electricity Systems," *Int. J. Elect. Power, Energy Syst.*, Vol. 96, hal. 390-397, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.024.
- [22] P. Kumar, N. Gupta, K.R. Niazi, dan A. Swarnkar, "A Circuit Theory-Based Loss Allocation Method for Active Distribution Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 10, No. 1, hal. 1005-1012, Jan. 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2757059.
- [23] B. Li, D.A. Robinson, dan A. Agalgaonkar, "Identifying the Wheeling Costs Associated with Solar Sharing in LV Distribution Networks in Australia Using Power Flow Tracing and MW-Mile Methodology," *2017 Australas. Univ. Power Eng. Conf. (AUPEC)*, 2018, hal. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2017.8282392.
- [24] P. Muangkhiew dan K. Chayakulkheeree, "Unified Optimal Power Flow Incorporating Full AC Control Variables," *2021 9th Int. Elect. Eng. Congr. (iEECON)*, 2021, hal. 177-180, doi: 10.1109/iEECON51072.2021.9440375.
- [25] Y. Arkeman, K.B. Seminar, dan H. Gunawan, *Algoritma Genetika: Teori dan Aplikasinya untuk Bisnis dan Industri*. Bogor, Indonesia: IPB Press, 2012.
- [26] H.Y. Heng dan F. Li, "Literature Review of Long-Run Marginal Cost Pricing and Long-Run Incremental Cost Pricing," *2007 42nd Int. Univ. Power Eng. Conf.*, 2007, hal. 73-77, doi: 10.1109/UPEC.2007.4468923.
- [27] The MathWorks Inc. (2018) *MATLAB version: 9.7.0.1190202 (R2019b)*.