

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi  
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional  
DOI: 10.22146/jnteti.v13i1.6332

# Studi Penerapan *Power Wheeling* Pembangkit Fotovoltaik Dengan Metode MW-km

Muhammad Bhayu Bramantyo<sup>1</sup>, Sasongko Pramonohadi<sup>1</sup>, Sarjiya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

[Diserahkan: 5 Desember 2022, Direvisi: 9 Januari 2023, Diterima: 10 Januari 2023]

Penulis Korespondensi: Muhammad Bhayu Bramantyo (email: muhammadbhayu@mail.ugm.ac.id)

**INTISARI** — Upaya dalam mengurangi emisi karbon pada sektor ketenagalistrikan adalah dengan menerapkan pembangkit energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Pembangkit fotovoltaik (*photovoltaic*, PV) sebagai pembangkit terdistribusi (*distributed generator*, DG) merupakan salah satu pembangkit dari energi terbarukan yang menjadi tren saat ini. DG merupakan pembangkit yang letaknya dekat dengan beban pada jaringan distribusi. Dalam penerapannya, PV DG akan memengaruhi besar rugi daya pada jaringan listrik yang sudah ada (*existing*), sehingga juga memengaruhi besar biaya rugi energi. Selain itu, ketersediaan lahan yang memadai juga diperlukan dalam pemasangan PV DG. Hal ini menyebabkan kerja sama antara pelaku usaha penyedia tenaga listrik PV DG dengan partner beban dilakukan secara berjauhan, sehingga menimbulkan masalah penyaluran. Pembangunan saluran distribusi oleh pelaku usaha untuk evakuasi produksi listriknya hampir tidak mungkin dilakukan. Sewa jaringan distribusi menjadi solusi yang menarik, yaitu melalui skema pemanfaatan bersama jaringan distribusi atau *power wheeling*. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi penerapan *power wheeling* pembangkit PV pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus, dengan mencari lokasi bus penempatan pembangkit *wheeling* PV yang menghasilkan total biaya rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi terkecil. Metode MW-km digunakan untuk perhitungan biaya sewa jaringan. Ketersediaan lahan tiap bus juga dipertimbangkan dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 8 menghasilkan biaya total rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi terkecil selama setahun. Hal tersebut menunjukkan bahwa penempatan pembangkit *wheeling* PV di sembarang tempat belum tentu menghasilkan total biaya rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi terkecil.

**KATA KUNCI** — *Power Wheeling*, Pembangkit Fotovoltaik, Jaringan Distribusi, MW-km.

## I. PENDAHULUAN

Seiring berkurangnya ketersediaan bahan bakar fosil serta terjadinya pemanasan global dan kerusakan atau pencemaran lingkungan, negara-negara di dunia saat ini berusaha untuk mengurangi emisi karbon di berbagai sektor. Kebutuhan energi listrik yang makin meningkat dengan penggunaan pembangkit energi listrik konvensional berbahan bakar fosil yang menimbulkan emisi gas rumah kaca menunjukkan bahwa sektor ketenagalistrikan memiliki pengaruh terhadap penyebab emisi gas rumah kaca [1]. Maka, transisi dari penggunaan bahan bakar fosil ke energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dalam pembangkitan energi listrik diperlukan saat ini. Pemerintah Indonesia sendiri juga berupaya meningkatkan penerapan energi terbarukan untuk pasokan energi listriknya, yaitu dengan menargetkan penerapan pembangkit dari energi baru dan terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 dan meningkat pada tahun 2030 sebesar 24,8% [2].

Pembangkit listrik menggunakan fotovoltaik (*photovoltaic*, PV) merupakan salah satu pembangkit terbarukan yang menjadi tren saat ini. Pembangkit PV dapat digunakan sebagai pembangkit terdistribusi (*distributed generator*, DG) yang letaknya dekat dengan beban pada jaringan distribusi. Makin banyaknya penerapan pembangkit DG didorong oleh faktor perubahan iklim dan melimpahnya sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Dalam penerapannya, pembangkit PV DG memengaruhi besar rugi daya pada jaringan yang sudah ada (*existing*), sehingga juga memengaruhi besarnya biaya rugi energi. Selain itu, pemasangan pembangkit PV DG juga membutuhkan ketersediaan lahan yang memadai [3]. Hal ini menyebabkan kerja sama antara pelaku usaha penyedia tenaga listrik pembangkit PV DG dengan partner

beban dilakukan berjauhan, sehingga menimbulkan masalah dalam proses penyaluran. Pembangunan saluran distribusi oleh pelaku usaha untuk evakuasi produksi listriknya ini hampir tidak mungkin dilakukan.

Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan penerapan skema *power wheeling*. *Power wheeling* merupakan skema pemanfaatan fasilitas penyedia jaringan tenaga listrik untuk mentransfer daya ke dan dari entitas lain, sehingga pelaku usaha penyedia tenaga listrik tidak perlu membangun jaringan tenaga listrik. Konsep ini muncul pada negara-negara maju akibat deregulasi ketenagalistrikan, yaitu sektor pembangkit, transmisi, dan distribusi menjadi sektor mandiri [4]. Pembangkit energi terbarukan yang bergantung pada lokasi sumber energi primernya dapat memanfaatkan skema ini [5]. Di Indonesia peraturan terkait *power wheeling* atau pemanfaatan bersama jaringan tenaga listrik (PBJTL) diatur dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 11 tahun 2021 tentang Pelaksanaan Usaha Ketenagalistrikan [6]. Pihak penyedia tenaga listrik yang ingin membangun pembangkit energi listrik pada suatu wilayah dapat memanfaatkan jaringan transmisi atau jaringan distribusi milik perusahaan utilitas yang telah tersedia untuk proses penyaluran tenaga listrik.

Beberapa penelitian menggunakan skema *power wheeling* untuk penerapan pembangkit dari sumber energi terbarukan seperti pembangkit PV dan angin serta tren dari penggunaan DG pada jaringan distribusi [7]–[9]. Perangkat lunak HOMER dan DIGSILENT digunakan untuk melakukan studi kelayakan teknis dan kelayakan finansial berdasarkan *levelized cost of electricity* (LCOE) dan *net present cost* (NPC) terhadap penerapan *power wheeling* pembangkit PV dan angin pada

jaringan distribusi di Nigeria dan Afrika Selatan [7], [8]. Penerapan *power wheeling* DG energi terbarukan memengaruhi kondisi teknis jaringan yang sudah ada seperti profil tegangan, gangguan, dan rugi daya aktif beserta daya reaktif pada saluran.

Penerapan skema *power wheeling* membebaskan biaya sewa jaringan kepada pelaku usaha. Referensi [10] membandingkan metode perhitungan biaya sewa jaringan berbasis aliran daya, yaitu metode *MW-mile*, *MVA-mile*, dan *current base* pada penerapan *power wheeling* di sistem interkoneksi Jawa-Bali. Metode perhitungan biaya sewa jaringan *MW-mile* dan *MVA-mile* memiliki hasil yang lebih realistis dibandingkan metode *current base* berdasarkan harga listrik di Indonesia. Penelitian lainnya menentukan biaya sewa jaringan distribusi dengan metode *MW-mile* berdasarkan perbedaan magnitudo aliran daya saluran untuk penerapan *power wheeling* pada sistem jaringan distribusi di Thailand [11]. Metode *MW-mile* juga digunakan untuk mengevaluasi biaya sewa jaringan terkait penggunaan sistem jaringan distribusi di Australia untuk pembangkit PV [9].

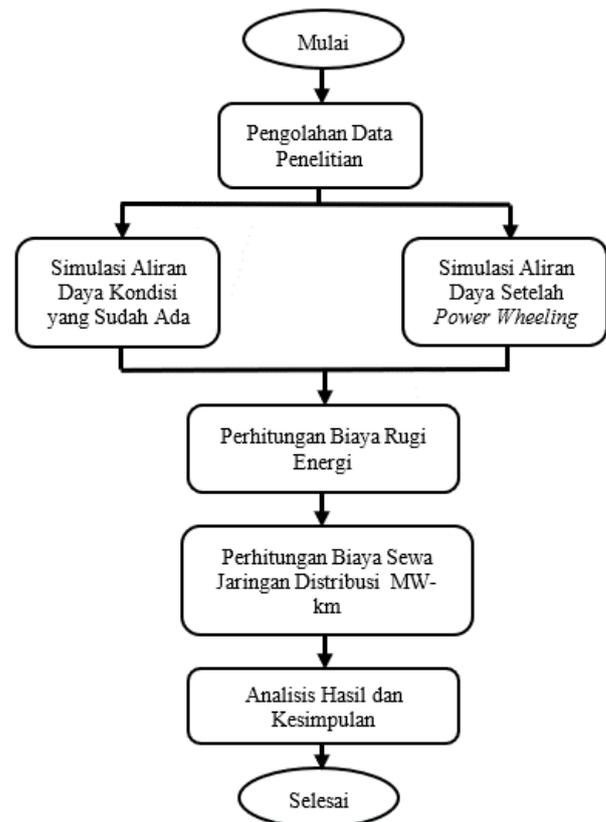
Berdasarkan hal tersebut, makalah ini membahas studi penerapan *power wheeling* pembangkit PV dengan menyimulasikannya pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus. Penelitian ini mencari lokasi bus penempatan pembangkit *wheeling* PV berdasarkan jumlah keseluruhan biaya rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi terkecil beserta ketersediaan lahan tiap bus. Perhitungan biaya sewa jaringan menggunakan metode *MW-km*.

## II. METODOLOGI

Skema *power wheeling* pembangkit PV diterapkan pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus 12,6 kV yang memiliki panjang keseluruhan saluran sebesar 20,35 km. Jumlah beban pada sistem adalah 3,71 MW [12], [13]. Batas tegangan minimum hingga maksimum dijaga sebesar 0,9 p.u hingga 1,1 p.u [14]. Gambar 1 menunjukkan jalannya penelitian ini. Tahapan dimulai dari pengolahan data yang diperlukan dan diasumsikan dalam proses penelitian, seperti data parameter beban, parameter saluran jaringan distribusi IEEE 33 bus, dan data keuangan. Pada penelitian ini, studi aliran daya dilakukan menggunakan *toolbox* MATPOWER. Data keuangan seperti harga energi listrik dan biaya total saluran sistem jaringan distribusi digunakan untuk perhitungan biaya rugi energi beserta perhitungan biaya sewa jaringan distribusi menggunakan metode *MW-km*. Pada tahapan selanjutnya, dilakukan simulasi aliran daya berdasarkan kondisi yang sudah ada dan setelah penerapan *power wheeling* pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus untuk mengetahui rugi daya aktif dan selisih aliran daya, yang digunakan dalam proses perhitungan biaya rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi.

### A. PEMBANGKIT TERDISTRIBUSI

DG merupakan pembangkit tenaga listrik, baik dengan sumber energi terbarukan ataupun bukan energi terbarukan, yang diterapkan pada jaringan distribusi atau diletakkan dekat di sisi konsumen [15], [16]. DG menjadi salah satu tren pada sistem tenaga listrik yang digunakan untuk membantu memenuhi permintaan energi listrik yang makin meningkat. DG dapat dibedakan berdasarkan tipe injeksi daya yang dibangkitkan serta kapasitasnya [17], [18]. Berdasarkan tipe injeksi daya yang dibangkitkan, terdapat empat jenis DG, yaitu sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

- Tipe 1 merupakan tipe DG yang hanya membangkitkan daya aktif (P). Contohnya adalah pembangkit PV, mikroturbin, dan *fuel cell*.
- Tipe 2 merupakan tipe DG yang hanya membangkitkan daya reaktif (Q), seperti kompensator sinkron.
- Tipe 3 merupakan tipe DG yang mampu membangkitkan P dan Q, misalnya generator sinkron dan turbin angin.
- Tipe 4 merupakan tipe DG yang mampu membangkitkan P dan mengonsumsi Q, seperti generator induksi.

Sementara itu, berdasarkan kapasitasnya, DG dapat dibagi menjadi:

- kapasitas mikro, dengan ukuran antara 1 W hingga 5 kW;
- kapasitas kecil, sebesar 5 kW hingga 5 MW;
- kapasitas menengah, dengan ukuran 5 MW hingga 50 MW; dan
- kapasitas besar, dengan ukuran 50 MW hingga 300 MW.

Salah satu DG dari energi terbarukan adalah pembangkit PV, yang merupakan pembangkit terdesentralisasi dan bebas emisi karbon karena tidak menggunakan bahan bakar fosil. Energi yang dihasilkan pembangkit PV bersumber dari energi surya, yang jumlahnya tak terbatas. Dalam penerapannya, produksi listrik dari pembangkit PV dipengaruhi oleh kondisi cuaca [19].

### B. RUGI DAYA AKTIF

Daya aktif listrik mengalir dari pembangkit menuju beban pada saluran di sistem jaringan tenaga listrik. Proses tersebut mengakibatkan terjadinya rugi daya aktif karena adanya nilai resistans pada sistem, sehingga menimbulkan biaya rugi energi [20]. Perhitungan biaya rugi energi daya aktif dilakukan menggunakan (1).

$$C_p = P_{losses} \times C_E \times N \quad (1)$$

dengan  $C_p$  adalah biaya rugi energi (Rp),  $P_{losses}$  adalah rugi daya aktif (kW),  $C_E$  adalah harga energi listrik (Rp/kWh), dan  $N$  adalah waktu (jam).

### C. POWER WHEELING

*Power wheeling* merupakan transaksi pemanfaatan bersama jaringan transmisi atau distribusi tenaga listrik milik perusahaan utilitas untuk menyalurkan tenaga listrik pihak lain. Dalam penerapannya, biaya dari pemanfaatan atau sewa jaringan ditanggung oleh pihak pengguna jaringan tenaga listrik [5]. Metode *MW-mile* atau *MW-km* merupakan salah satu metode perhitungan biaya sewa jaringan distribusi berdasarkan pemakaian aktual jaringan tenaga listrik.

Metode ini menghitung aliran daya aktif yang mengalir pada seluruh saluran distribusi. Aliran daya dikalikan dengan panjang saluran ( $L_k$ ) dan biaya per panjang saluran distribusi ( $C_k$ ), seperti ditunjukkan pada (2) [10], [21], [22].

$$MWkm_t = \sum C_k \times L_k \times MW_k \quad (2)$$

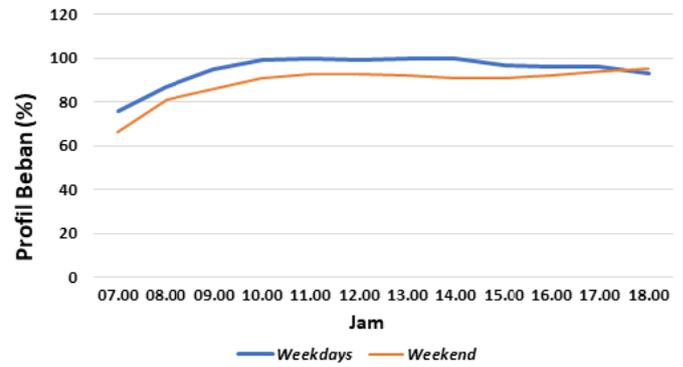
Sementara itu, untuk menghitung alokasi biaya transaksi *wheeling* pada jaringan distribusi digunakan (3).

$$TC_t = TC \times \frac{dMWkm_t}{\sum MWkm_t} \quad (3)$$

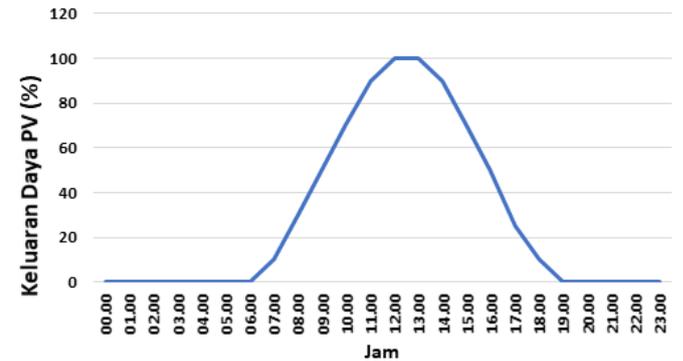
dengan  $TC_t$  adalah biaya sewa jaringan distribusi untuk pengguna jaringan (Rp),  $TC$  adalah total biaya seluruh saluran (Rp),  $C_k$  adalah biaya per panjang saluran jaringan distribusi (Rp/km),  $L_k$  adalah panjang saluran  $k$  (km),  $dMWkm_t$  adalah selisih *MW-km* antara sesudah dan sebelum penerapan *power wheeling* (Rp MW), dan  $\sum MWkm_t$  adalah jumlah seluruh *MW-km* setelah penerapan *power wheeling* (Rp MW).

Metode *MW-km* memiliki tiga pendekatan yang berbeda, dengan biaya setiap saluran dialokasikan untuk semua pengguna jaringan, yaitu *MW-km* absolut (*absolute MW-km*), *MW-km* terbalik (*reverse MW-km*), dan *MW-km* dominan (*dominant MW-km*). Pada pendekatan *MW-km* absolut, biaya jaringan distribusi hanya berdasarkan magnitudo atau besar aliran daya dalam saluran dengan mengabaikan adanya *counter flow*. Pada pendekatan *MW-km* terbalik, pengurangan biaya sewa jaringan distribusi diberikan ketika arah aliran daya berlawanan dengan arah aliran daya pembangkit ke beban. Pada pendekatan *MW-km* dominan, aliran daya yang berlawanan pada sistem jaringan distribusi akan diabaikan, sehingga biaya sewa jaringan distribusi hanya dihitung dari aliran daya yang mengalir searah dengan aliran daya pembangkit.

Pada penelitian ini, biaya rugi energi dihitung berdasarkan harga energi listrik PLN, yaitu sebesar Rp1.444,7 per kWh. Perhitungan biaya sewa jaringan *MW-km* dilakukan menggunakan pendekatan absolut, dengan besaran biaya saluran yang diasumsikan berdasarkan biaya operasi tegangan menengah dari data statistik milik PLN tahun 2017 [23]. Biaya operasi PLN 2017 adalah sebesar Rp275.474.094 juta. Diasumsikan bahwa biaya tetap tegangan menengah adalah 3% dari keseluruhan biaya operasi, sehingga biaya operasi untuk jaringan tegangan menengah adalah Rp8.264.222 juta. Dengan total panjang saluran tegangan menengah PLN adalah 401.959,41 km, biaya per panjang saluran distribusi ( $C_k$ ) adalah sebesar Rp20.559.844,14 per km per tahun atau Rp2.347,01 per km per jam. Pada penelitian ini, panjang sistem tes jaringan distribusi IEEE 33 bus adalah 20,35 km, sehingga



Gambar 2. Variasi profil beban weekdays dan weekend.



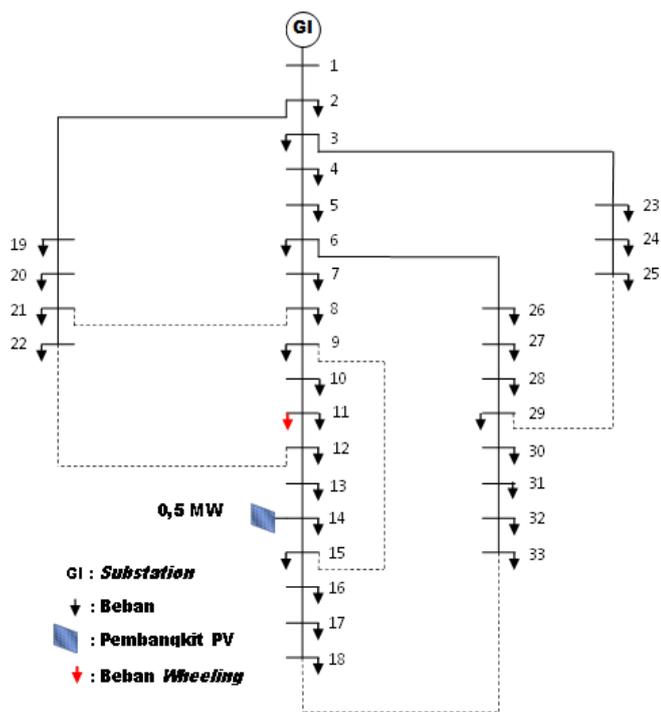
Gambar 3. Keluaran daya PV.

biaya seluruh saluran jaringan distribusi ( $TC$ ) adalah sebesar Rp47.761,73 per jam. Simulasi aliran daya dilakukan dengan mempertimbangkan variasi beban tiap jam berdasarkan profil beban *weekdays* (hari kerja) dan *weekend* (akhir pekan) sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus yang ditunjukkan pada Gambar 2 beserta keluaran daya PV pada Gambar 3 [24], [25]. Perhitungan biaya rugi energi dan biaya sewa jaringan pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus dilakukan selama setahun, dengan *weekdays* sebanyak 261 hari dan *weekend* sebanyak 104 hari.

### III. SIMULASI PENERAPAN POWER WHEELING

Studi penerapan *power wheeling* pembangkit PV disimulasikan pada sistem jaringan distribusi radial IEEE 33 bus. Arah aliran daya pada sistem jaringan distribusi radial adalah searah, yaitu dari bus sumber (*substation*) menuju beban. Diasumsikan beban *wheeling* sebesar 0,5 MW ditambahkan pada bus 11 yang terletak di tengah sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus. PV DG tipe 1, yang menginjeksi daya aktif (P) dengan kategori kapasitas kecil sebesar 0,5 MW, ditentukan sebagai pembangkit *wheeling* atau pelaku *power wheeling*. Penempatan pembangkit *wheeling* PV ditentukan berdasarkan lokasi bus yang menghasilkan total biaya rugi energi dan biaya sewa jaringan terkecil saat melakukan transaksi *power wheeling*. Maka, dilakukan transaksi *power wheeling* dengan penempatan pembangkit *wheeling* PV pada seluruh bus yang berbeda pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus. Sebagai ilustrasi, Gambar 4 menunjukkan penerapan *power wheeling* pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus dengan pembangkit *wheeling* PV di bus 15 dan beban di bus 11.

Selanjutnya, ketersediaan lahan tiap bus juga dipertimbangkan dalam studi ini. Diasumsikan panel surya dengan daya maksimal 100 Wp memiliki luas panel sebesar 0,73 m<sup>2</sup>, sehingga pembangkit *wheeling* PV berkapasitas 0,5 MW membutuhkan ketersediaan lahan sebesar 3.650 m<sup>2</sup>. Tabel



Gambar 4. Sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus dengan penerapan pembangkit wheeling PV.

TABEL I  
KETERSEDIAAN LAHAN

Bus	Ketersediaan Lahan	Bus	Ketersediaan Lahan
2	Tersedia	18	Tersedia
3	Tidak tersedia	19	Tidak tersedia
4	Tidak tersedia	20	Tersedia
5	Tersedia	21	Tersedia
6	Tersedia	22	Tersedia
7	Tersedia	23	Tidak tersedia
8	Tersedia	24	Tidak tersedia
9	Tidak tersedia	25	Tersedia
10	Tidak tersedia	26	Tersedia
11	Tidak tersedia	27	Tidak tersedia
12	Tidak tersedia	28	Tersedia
13	Tidak tersedia	29	Tersedia
14	Tidak tersedia	30	Tersedia
15	Tidak tersedia	31	Tidak tersedia
16	Tidak tersedia	32	Tidak tersedia
17	Tidak tersedia	33	Tersedia

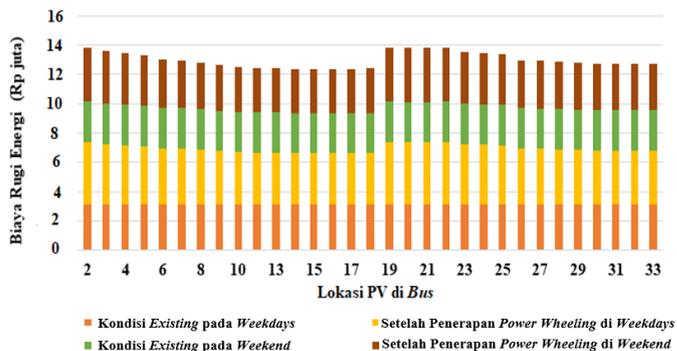
I menunjukkan kondisi ketersediaan lahan pada tiap bus di sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus untuk penempatan pembangkit wheeling PV dalam penelitian ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

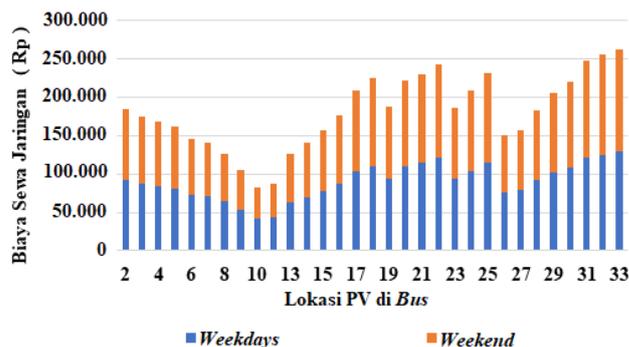
Simulasi aliran daya antara kondisi yang sudah ada dengan kondisi sesudah penerapan power wheeling telah dilakukan. Perbandingan biaya rugi energi antara kedua kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5. Biaya sewa jaringan distribusi menggunakan metode MW-km ditunjukkan pada Gambar 6, sedangkan biaya sewa jaringan distribusi dan biaya rugi energi selama setahun ditunjukkan pada Gambar 7.

A. BIAYA RUGI ENERGI

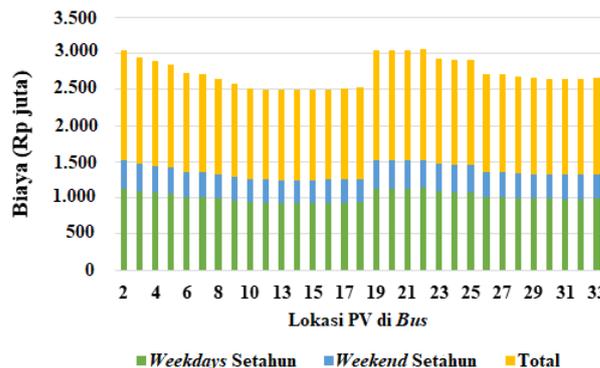
Gambar 5 memperlihatkan grafik hasil perbandingan antara biaya rugi energi total pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus untuk kondisi yang sudah ada dengan kondisi setelah



Gambar 5. Biaya rugi energi.



Gambar 6. Biaya sewa jaringan distribusi.



Gambar 7. Biaya sewa jaringan distribusi dan rugi energi selama setahun.

penerapan power wheeling, dengan variasi beban pada weekdays dan weekend serta penempatan pembangkit wheeling PV di tiap bus.

Pada weekdays, biaya rugi energi pada kondisi yang sudah ada adalah sebesar Rp3,16 juta per hari. Setelah penerapan power wheeling, penempatan pembangkit wheeling PV di bus 15 menghasilkan biaya rugi energi terkecil pada sistem, yaitu 3,48 juta per hari. Penempatan pembangkit wheeling PV di bus 2 menghasilkan biaya rugi energi terbesar, yaitu Rp4,23 juta per hari. Sementara itu, pada weekend, biaya rugi energi kondisi yang sudah ada adalah sebesar Rp2,74 juta per hari. Setelah penerapan power wheeling, penempatan pembangkit wheeling PV di bus 15 menghasilkan biaya rugi energi terkecil pada sistem, yaitu sebesar 3 juta per hari. Penempatan pembangkit wheeling PV di bus 2 menghasilkan biaya rugi energi terbesar, yaitu sebesar Rp3,68 juta per hari. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, diketahui bahwa terdapat kenaikan biaya rugi energi setelah penerapan power wheeling terhadap kondisi yang sudah ada.

B. BIAYA SEWA JARINGAN DISTRIBUSI

Biaya sewa jaringan dibebankan kepada pelaku power wheeling sebagai pengguna jaringan distribusi. Penerapan

*power wheeling* akan berdampak pada saluran sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus. Penempatan pembangkit *wheeling* PV pada bus yang berbeda untuk tiap penerapan *power wheeling* memengaruhi besar biaya sewa jaringan distribusi. Perhitungan biaya sewa jaringan distribusi dilakukan menggunakan metode MW-km.

Gambar 6 merupakan grafik hasil perhitungan biaya sewa jaringan distribusi saat *weekdays* dan *weekend* menggunakan metode MW-km untuk penempatan pembangkit *wheeling* PV di tiap bus pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus. Pada *weekdays*, penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 10 menghasilkan biaya sewa jaringan distribusi terkecil pada sistem, yaitu sebesar Rp42.537,81/hari atau Rp12,24/kWh. Penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 33 menghasilkan biaya sewa jaringan distribusi terbesar, yaitu Rp128.687,63 per hari atau Rp37,03/kWh. Untuk *weekend*, penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 10 menghasilkan biaya sewa jaringan distribusi terkecil pada sistem, yaitu Rp40.415,20 per hari atau Rp11,63/kWh, sedangkan enempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 33 menghasilkan biaya sewa jaringan distribusi terbesar, yaitu Rp134.096,97 per hari atau Rp38,59/kWh. Berdasarkan hasil perhitungan biaya sewa jaringan yang diperoleh, disimpulkan bahwa penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 10 memiliki biaya sewa jaringan distribusi terkecil saat *weekdays* dan *weekend*.

**C. LOKASI BUS PENEMPATAN PEMBANGKIT WHEELING**

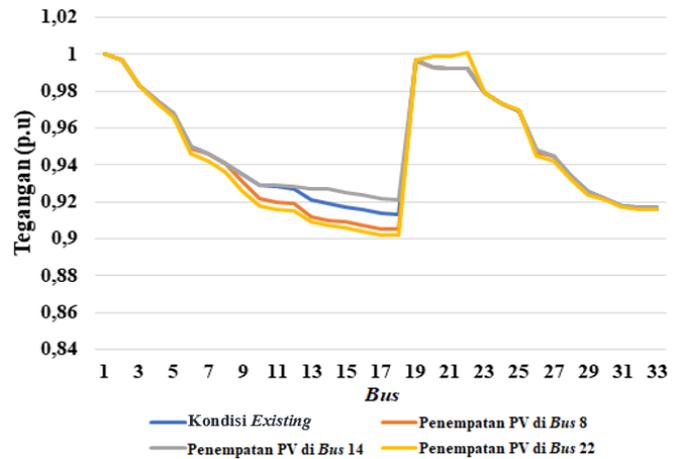
Gambar 7 menunjukkan biaya total rugi energi dan sewa jaringan distribusi yang dihitung selama setahun berdasarkan penempatan pembangkit *wheeling* PV di tiap bus sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus.

Penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 14 menghasilkan biaya total rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi terkecil selama setahun, yaitu Rp1.247,49 juta, sedangkan penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 22 menghasilkan biaya total rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi terbesar selama setahun, yaitu sebesar Rp1.530,34 juta. Berdasarkan hasil perhitungan biaya total selama setahun, bus 14 merupakan lokasi penempatan pembangkit *wheeling* PV untuk penerapan *power wheeling* pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus. Namun, berdasarkan data ketersediaan lahan pada Tabel I, pada bus 14 tidak tersedia lahan untuk penempatan pembangkit *wheeling* PV. Oleh karena itu, dipilih bus 8 sebagai lokasi penempatan pembangkit *wheeling* karena pada lokasi tersebut tersedia lahan dan bus 8 memiliki total biaya terkecil selama setahun, yaitu sebesar Rp1.327,54 juta.

Gambar 8 memperlihatkan grafik perbandingan profil tegangan antara kondisi yang sudah ada dengan kondisi setelah penerapan *power wheeling*, dengan penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 8, bus 14, dan bus 22 saat pemakaian beban penuh. Dapat diketahui bahwa setelah penerapan *power wheeling* terhadap kondisi yang sudah ada, telah terjadi perubahan profil tegangan, yaitu perbaikan profil tegangan dan jatuh tegangan. Profil tegangan setelah penerapan *power wheeling* dengan penempatan pembangkit *wheeling* di bus 8, bus 14, dan bus 22 masih pada batas tegangan minimum dan maksimum yang dijaga, yaitu 0,9 hingga 1,1 p.u, sehingga penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 8 dapat diterapkan.

**V. KESIMPULAN**

Penerapan *power wheeling* mengakibatkan terjadinya kenaikan biaya rugi energi terhadap kondisi sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus yang sudah ada, berdasarkan



Gambar 8. Profil tegangan.

penempatan pembangkit *wheeling* PV di tiap bus yang berbeda. Penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 15 saat *weekdays* dan *weekend* menghasilkan biaya rugi energi terkecil. Biaya rugi energi terkecil saat *weekdays* adalah Rp3,48 juta per hari dan saat *weekend* sebesar Rp3 juta per hari. Pada perhitungan biaya sewa jaringan distribusi menggunakan metode MW-km, penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 10 untuk *weekdays* dan *weekend* menghasilkan biaya sewa jaringan distribusi terkecil, yaitu Rp42.537,81 per hari dan Rp40.415,20 per hari. Penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 14 menghasilkan biaya total rugi energi dan biaya sewa jaringan distribusi terkecil selama setahun, yaitu Rp1.247,49 juta. Dengan mempertimbangkan ketersediaan lahan dan profil tegangan, penempatan pembangkit *wheeling* PV di bus 8 memiliki biaya total rugi energi dan sewa jaringan distribusi terkecil selama setahun, yaitu sebesar Rp1.327,54 juta.

**KONFLIK KEPENTINGAN**

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penyusunan penelitian dengan judul “Studi Penerapan *Power Wheeling* Pembangkit Fotovoltaik Dengan Metode MW-km” ini, baik kepentingan pribadi yang mungkin ditafsirkan akan memengaruhi representasi atau interpretasi hasil penelitian.

**KONTRIBUSI PENULIS**

Konseptualisasi, Muhammad Bhayu Bramantyo dan Sasongko Pramonohadi; tema penelitian, Muhammad Bhayu Bramantyo; perangkat lunak, Muhammad Bhayu Bramantyo; validasi, Muhammad Bhayu Bramantyo, Sasongko Pramonohadi, dan Sarjiya; analisis formal, Muhammad Bhayu Bramantyo; data parameter, Muhammad Bhayu Bramantyo; penulisan—penyusunan draf asli, Muhammad Bhayu Bramantyo dan Sasongko Pramonohadi; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Muhammad Bhayu Bramantyo, Sasongko Pramonohadi, dan Sarjiya.

**REFERENSI**

- [1] M. Ahsan, “Tantangan dan peluang pembangunan proyek pembangkit listrik energi baru terbarukan (EBT) di Indonesia,” *J. Ilm. Suted*, vol. 11, no. 2, hal. 81–93, Des. 2021, doi: 10.33322/suted.v11i2.1575.
- [2] “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2021 Sampai Dengan Tahun 2030,” Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2021.
- [3] L. Mehigan, J.P. Deanae, B.P.O. Gallachoir, dan V. Bertsch, “A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems,” *Energy*, vol. 163, hal. 822–836, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.022.

- [4] R. Fatchurrahman dan A.B. Zakaria, "Study of determining cost compensation of power wheeling transaction on composite system reliability by optimal power flow," *2019 Int. Conf. Technol. Policies Elect. Power, Energy*, 2019, hal. 1-6, doi: 10.1109/IEECONF48524.2019.9102562.
- [5] 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.
- [6] "Pelaksanaan Usaha Ketenagalistrikan," Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, No. 11, 2021.
- [7] A.B. Abdullahi, L. Olatomiwa, J. Tsado, dan A.A. Sadiq, "Impact assessment of wheeling renewable distributed generation to residential load," *Int. Conf. Elect. Comput. Energy Technol. (ICECET)*, 2021, hal. 1-6, doi: 10.1109/ICECET52533.2021.9698780.
- [8] W. Murray dan M. Adonis, "Efficacy of energy wheeling to endorse renewable energy generation," *AIUE Proc. 17th Ind. Commer. Use Energy (ICUE) Conf. 2019*, 2019, hal. 1-8, doi: 10.2139/ssrn.3658901.
- [9] 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)*, 2017, hal. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2017.8282392.
- [10] 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.
- [11] S. Larbwisuthisaroj dan S. Chaitusaney, "Wheeling charge considering line flow differentiation based on power flow calculation," *2018 15th Int. Conf. Elect. Eng./Electron. Comput. Telecommun. Inf. Technol. (ECTICON)*, 2018, hal. 293-296, doi: 10.1109/ECTICON.2018.8619951.
- [12] S. Ghasemi dan J. Moshtagh, "Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers," *Int. J. Elect. Eng. Inform.*, vol. 5, no. 3, hal. 297-315, Sep. 2013, doi: 10.15676/ijeei.2013.5.3.5.
- [13] A. Wazir dan N. Arbab, "Analysis and optimization of IEEE 33 bus radial distributed system using optimization algorithm," *J. Emerg. Trends Appl. Eng.*, vol. 1, no. 2, hal. 17-21, 2016.
- [14] K. Huang, Z. Li, W. Tang, dan T. Qian, "Voltage assessment of high PV penetration in radial power distribution network," *2021 Int. Conf. New Energy Res. Appl.*, 2021, hal. 1-7, doi: 10.1088/1755-1315/838/1/012009.
- [15] T. Ackermann, G. Andersson, dan L. Söder, "Distributed generation: A definition," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 57, no. 3, hal. 195-204, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [16] O. Ayan, N. Jafarzadeh, dan B. Turkay, "An examination of the effects of distributed generation on distribution systems by load flow analysis," *2018 20th Int. Symp. Elect. App. Technol. (SIELA)*, 2018, hal. 1-6, doi: 10.1109/SIELA.2018.8447117.
- [17] D.Q. Hung, N. Mithulananthan, dan R.C. Bansal, "Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, hal. 814-820, Sep. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2044414.
- [18] M. Purlu dan B.E. Turkay, "Optimal allocation of renewable distributed generations using heuristic methods to minimize annual energy losses and voltage deviation index," *IEEE Access*, vol. 10, hal. 21455-21474, Feb. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3153042.
- [19] S. Jiang dkk., "Distributed photovoltaic generation in the electricity market: Status, mode and strategy," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 4, no. 3, hal. 263-272, Sep. 2018, doi: 10.17775/cseejpes.2018.00600.
- [20] J. Armas dan A. Ivanov, "Determination of the total cost of active power losses and methods to reduce power losses in low-voltage distribution networks," *2019 IEEE 60th Int. Sci. Conf. Power Elect. Eng. Riga Tech. Univ. (RTUCON)*, 2019, hal. 1-6, doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982319.
- [21] M. Rosyada, H. Hermawan, dan S. Handoko, "Perhitungan biaya sewa jaringan transmisi 500 kV Jawa-Bali dengan metode MW-mile," *Transient, J. Ilm. Tek. Elekt.*, vol. 3, no. 4, hal. 642-649, Des. 2014, doi: 10.14710/transient.v3i4.642-649.
- [22] B. Kharbas, M. Fozdar, dan H. Tiwari, "Comparative assessment of MW-mile and MVA-mile methods of transmission tariff allocation and revenue reconciliation," *2013 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2013, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672407.
- [23] "PLN Statistics 2017," PT PLN (Persero), 2018.
- [24] M. Sheikhan dan N. Mohammadi, "Time series prediction using PSO-optimized neural network and hybrid feature selection algorithm for IEEE load data," *Neural Comput., Appl.*, vol. 23, no. 3-4, hal. 1185-1194, Sep. 2013, doi: 10.1007/s00521-012-0980-8.
- [25] A. Jahid, M.K.H. Monju, M.S. Hossain, dan M.F. Hossain, "Hybrid power supply solutions for off-grid green wireless networks," *Int. J. Green Energy*, vol. 16, no. 1, hal. 12-33, 2019, doi: 10.1080/15435075.2018.1529593.