

# PERBANDINGAN UNJUK KERJA BERBAGAI TIPE BUS DISTRIBUTED GENERATION BERDASARKAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA

Nratha, I.A.M1<sup>1</sup>, Muljono, A.B2<sup>2</sup>, Sultan3<sup>3</sup>, Ginarsa, I.M4<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

<sup>1</sup>[nratha@te.ftunram.com](mailto:nratha@te.ftunram.com), <sup>2</sup>[agungbm@yahoo.com](mailto:agungbm@yahoo.com), <sup>3</sup>[sultandarma@yahoo.com](mailto:sultandarma@yahoo.com), <sup>4</sup>[kadekgin@yahoo.com](mailto:kadekgin@yahoo.com)

## Abstrak

Perkembangan pemanfaatan energi alternatif disamping energi konvensional untuk pembangkit energi listrik seperti energi surya, energi panas bumi, energi angin, energi air menyebabkan banyak terbangun pembangkit listrik yang letaknya tersebar (*distributed generation/DG*). DG pada sistem tenaga listrik dapat dimodelkan ke dalam berbagai tipe bus tergantung dari jenis generator yang digunakan. Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan pembangkit diesel yang menggunakan generator sinkron dapat dimodelkan sebagai bus kontrol tegangan (bus tipe PV), Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) yang menggunakan generator induksi dapat dimodelkan sebagai bus injeksi daya aktif dan reaktif (bus tipe PQ), sedangkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat dimodelkan sebagai bus injeksi daya aktif (bus tipe P). Penelitian ini memilih lokasi pada bus 33 kV dari sistem IEEE 30 bus untuk penempatan dan penentuan kapasitas optimal DG dengan berbagai tipe bus menggunakan algoritma genetika. Hasil penelitian menunjukkan DG dengan bus tipe P, selain mengurangi rugi daya aktif juga dapat mengurangi rugi daya reaktif pada sistem. Perbaikan profil tegangan dan reduksi rugi daya terbaik diperoleh dari kombinasi bus DG tipe PQ, PQ, PQ, pada bus ke-19, bus ke-30 dan bus ke-18.

**Kata kunci** : *distributed generation*, optimasi, algoritma genetika.

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan pembangkitan tenaga listrik semakin meningkat, kemajuan dalam deregulasi daya dan restrukturisasi utilitas serta kendala yang ketat terhadap pembangunan jalur transmisi baru untuk transmisi jarak jauh telah menimbulkan meningkatnya ketertarikan pada pembangkit tersebar (*Distributed Generation/DG*).

*Distributed Generation* adalah istilah untuk pembangkit yang letaknya tersebar sepanjang saluran distribusi sehingga lokasi pembangkit dekat dengan pusat-pusat beban. DG mempunyai rentang daya pembangkitan 1–300 MWatt, untuk *micro DG* (1 W - < 5 kW), *small DG* (5 kW - < 5 MW), *medium DG* (5 MW - < 50 MW) dan *large DG* (50 MW - < 300 MW), Guseynov & Akhundov (2006).

*Distributed Generation* yang ditempatkan pada tempat strategis dalam sistem tenaga dapat memperkuat jaringan, mengurangi rugi-rugi daya dan biaya operasi saat beban puncak, meningkatkan profil tegangan dan faktor beban, menunda atau menghilangkan kebutuhan untuk upgrade sistem, dan meningkatkan integritas sistem, kehandalan dan efisiensi, Wang (2006).

Manfaat lain DG dalam sistem adalah sebagai pembangkit siaga, pembangkit pendukung beban puncak, pembangkit untuk beban dasar, pendukung untuk penyediaan daya aktif dan daya reaktif, pendukung perbaikan tegangan, stabilitas jaringan, dan cadangan berputar. Dari aspek lingkungan dan

ketahanan energi pemakaian DG dapat mengurangi nilai emisi udara dan memberikan peran bauran energi yang cukup signifikan.

*Distributed Generation* dapat berasal dari sumber energi konvensional maupun energi terbarukan. Pada saat ini yang menjanjikan untuk diaplikasikan DG adalah sistem sel surya (PLTS), mikrohidro (PLTMh), sistem konversi energi angin (PLTB), pembangkit diesel, energi panas bumi, sistem *electrolizer* dan sistem listrik panas cahaya.

Bus-bus DG pada sistem tenaga listrik dapat dimodelkan ke dalam berbagai tipe bus. Untuk PLTB dan pembangkit diesel yang menggunakan generator sinkron dimodelkan sebagai bus kontrol tegangan (bus tipe PV), PLTMh yang menggunakan motor induksi yang dioperasikan sebagai generator (MISG) sebagai bus tipe PQ, sedangkan PLTS dimodelkan sebagai bus tipe P.

Penentuan kapasitas optimal dan lokasi DG sehingga didapatkan kerugian daya minimum pada sistem distribusi radial dapat menggunakan metode faktor sensitivitas rugi-rugi saluran, Gözel & Hocaoglu (2009). Penambahan unit DG ke dalam sistem dapat memberikan penghematan bahan bakar dan unit DG dapat menyebabkan rugi-rugi daya saluran menurun oleh Budiman, *et al* (2010) yang disimulasikan pada sistem IEEE 14 dan 30 bus menggunakan *Algoritma Genetika Breeder* (AGB). Penentuan lokasi penempatan dan kapasitas optimal DG pada sistem IEEE 30 bus menggunakan PSO dengan *multi objective function* (MOF),

memperoleh hasil lokasi dan kapasitas optimal DG dalam mengurangi rugi saluran dan meningkatkan profil tegangan, Ghadimi (2013). Penempatan DG dan kapasitor di jaringan distribusi standar IEEE 33 bus dan 69 bus menggunakan Algoritma Genetika (GA) dan metode *Newton Raphson* untuk meminimalkan kerugian daya aktif, kerugian daya reaktif dan meningkatkan profil tegangan, Irannezhad, *et al* (2014).

Penelitian yang diusulkan ini merupakan pengembangan penelitian terhadap DG ditinjau dari sumber energi alternatif dan energi konvensional yang dikonversi menjadi energi listrik. Sumber energi yang dikonversi menjadi energi listrik dapat mempengaruhi tipe bus (bus pembangkit dengan bus tipe P, PQ atau PV). Pemilihan metoda algoritma genetika karena metoda algoritma genetika memiliki kekokohan dan kecendrungan konvergensi yang baik dari beberapa metoda optimasi menggunakan metoda-metoda heuristik *Particle Swarm Optimization*, Kansal, *et al* (2011), *Artificial Bee Colony*, Murthy *et al* (2012) dan *Ant Colony Optimization*, Farat (2013), metoda algoritma genetika lebih stabil dalam memperoleh kecendrungan konvergensi (nilai optimum sistem selalu sama untuk setiap kali pengulangan pada sebuah kasus optimasi dengan nilai toleransi tertentu).

## 2. Optimasi DG pada Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik dapat dipresentasikan ke dalam tiga bagian besar yaitu pembangkitan, penyaluran dan pendistribusian. Penelitian ini menggunakan data sistem tenaga listrik IEEE 30 bus. Sistem tersebut terdiri dari 6 bus pembangkit, dengan level tegangan 132 kV, 33 kV, 11 kV dan 1 kV. Diagram segaris sistem pada Gambar 3.

Informasi kondisi operasi dan unjuk kerja sistem tenaga listrik seperti profil tegangan setiap bus, rugi-rugi setiap saluran, pembangkitan daya aktif dan reaktif dari pembangkit dapat diperoleh dari studi aliran daya. Penyelesaian aliran daya membutuhkan presentasi tiga tipe bus yaitu bus referensi/bus slack, bus kontrol tegangan (PV) dan bus beban (PQ). Terdapat berbagai metoda untuk penyelesaian studi aliran daya seperti: Gauss Siedel, Newton Rapshon, dan Fast Decouple. Penelitian ini menggunakan metoda Newton Rapshon untuk penyelesaian aliran daya sistem IEEE 30 bus. Program aliran daya metoda Newton Rapshon yang digunakan dari program MATPOWER versi 5.1, Zimmermen & Sánchez (2015). Informasi bus-bus yang memiliki drop tegangan tertinggi pada sistem 33 kV dipilih sebagai lokasi penempatan berbagai tipe bus DG.

Kapasitas optimal DG pada sistem tenaga listrik ditentukan dengan kriteria rugi daya minimum. Persamaan rugi daya dapat di rumuskan sebagai berikut:

$$P_{Loss} = \text{real} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{|v_i - v_j|^2}{z_{ij}^*} \right) \quad (1)$$

dengan,  $P_{Loss}$ ,  $N$ ,  $v_i$ ,  $z_{ij}$ , adalah rugi daya total pada sistem, jumlah bus pada sistem, tegangan bus ke- $i$ , dan impedansi yang menghubungkan bus- $i$  ke bus- $j$ .

Fungsi tujuan untuk optimasi DG pada sistem tenaga dapat dituliskan:

$$\text{Min}(F) = P_{Loss} \quad (2)$$

kekangan:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{N_d} P_{di} + P_{Loss} \quad (3)$$

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad (4)$$

dengan  $F$ ,  $N_g$ ,  $P_{Gi}$ ,  $N_d$ ,  $P_{di}$ ,  $V_{i,min}$ ,  $V_{i,max}$  adalah fungsi tujuan (minimisasi rugi daya) akibat lokasi dan kapasitas DG untuk berbagai tipe bus, jumlah bus pembangkit, daya pembangkit ke- $i$ , jumlah bus beban, daya beban ke- $i$ , tegangan minimum bus ke- $i$  dan tegangan maksimum bus ke- $i$ .

Kapasitas optimal DG yang diperoleh dari optimasi dapat memberikan informasi penetrasi DG pada sistem. Penetrasi DG menunjukkan perbandingan kapasitas DG terhadap total beban pada sistem tenaga listrik.

## 3. Optimasi DG dengan Algoritma Genetika

Dalam algoritma genetika, kumpulan parameter (suatu individu) atau dalam biologi disebut kromosom untuk suatu permasalahan dalam hal ini adalah fungsi tujuan, dibentuk atau dikodekan dalam bentuk biner. Dan dalam setiap generasi, sejumlah individu (populasi) dievaluasi secara paralel untuk pencocokan mereka, sebagai harga tujuan yang akan diminimumkan. Populasi yang baru dan yang disempurnakan dibangkitkan dari yang lama melalui aplikasi operator genetika seperti seleksi, crossover, dan mutasi.

Seleksi adalah suatu operator sederhana dimana suatu untaian yang lama dicopy ke kelompok perkawinan (*mating pool*). Sesuai dengan prinsip kelangsungan pencocokan, string dicocokkan lebih tinggi lagi (mempunyai nilai *fitness* yang lebih kuat) mendapat kemungkinan yang lebih besar untuk terseleksi mengikuti operasi dari operator lainnya.

Crossover secara acak memilih sepasang induk dalam kelompok (*pool*) dan membentuk dua keturunan melalui penukaran segmen yang bersesuaian dari induk. Populasi dari crossover dipilih secara acak dalam string. Penukaran crossover bersamaan dengan materi genetika dari kedua induk kromosom yang mengakibatkan gen dari kedua induk yang berbeda dikombinasikan ke dalam keturunan mereka yang baru.

Mutasi adalah suatu perubahan acak dari posisi string. Dalam penyajian string secara biner, perubahan sederhana mengartikan 0 menjadi 1 dan atau sebaliknya. Pemutasian acak memberikan

variasi latar belakang dan menghasilkan manfaat material ke populasi.

Berikut adalah kode untuk algoritma genetika yang digunakan untuk penyelesaian lokasi dan kapasitas optimal DG untuk mendapatkan fungsi tujuan (*fitness*) yaitu minimisasi rugi daya.

```

{ % Generate random population of chromosomes
  Initialize population;
  % Evaluate the fitness of each chromosome in the
  % population
  Evaluate population; [Fitness]
  % Create, accept, and test a new population:
  while Termination_Criteria_Not_Satisfied
  { % Select according to fitness
    Select parents for reproduction; [Selection]
    % With a crossover probability perform crossover or
    % copy parents
    Perform crossover; [Crossover]
    % With a mutation probability mutate offspring at
    % each position in chromosome
    Perform mutation; [Mutation]
    Accept new generation;
    Evaluate population; [Fitness]
  }
}
    
```

Jumlah setiap populasi dari kromosom yang dibangkitkan (penelitian ini sebanyak lima puluh kromosom) dalam rentang tertentu berupa daya aktif untuk DG dengan tipe bus P dan DG dengan tipe bus PV, daya aktif dan reaktif untuk DG dengan tipe bus PQ. Nilai *fitness* dievaluasi menggunakan aliran daya untuk mendapatkan rugi daya sistem. DG tipe bus PV, tipe bus P, tipe bus PQ dalam aliran daya dimodelkan sebagai bus kontrol tegangan, bus beban dengan injeksi daya aktif dan bus beban dengan injeksi daya aktif dan reaktif.

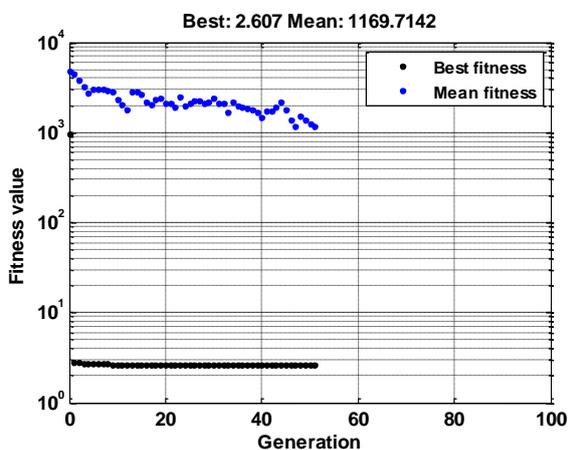
Kriteria terminasi yang digunakan pada penelitian ini adalah jumlah generasi sebanyak seratus dan toleransi fungsi sebesar  $10^{-9}$ . Seleksi/evaluasi menggunakan fungsi *stochastic uniform*, fungsi *cossover* adalah *scattered*, membuat vektor biner random dan memilih pembawa sifat di dalam keturunan dimana vektor adalah satu dari orang tua pertama, dan pembawa sifat di dalam keturunan dimana vektor adalah nol dari orang tua kedua dan menggabungkan pembawa sifat di dalam keturunan untuk membentuk keturunan. Fungsi mutasi adalah *Gaussian*.

**4. Hasil dan Analisis**

Sistem IEEE 30 bus yang menjadi objek penelitian memiliki total beban sebesar 189.20 MW dan 107.20 MVar. Pemilihan tegangan minimum dan maksimum untuk sistem IEEE 30 bus pada bus ke-*i* (Persamaan 4) merujuk pada level tegangan pelayanan, SPLN No. 1, 1995 yaitu -10% s/d +5% dari tegangan nominal.

Hasil aliran daya sistem IEEE 30 bus menggunakan metoda Newton Rapshon diperoleh lokasi penempatan DG berdasarkan drop tegangan tertinggi sampai drop tegangan terendah pada bus-bus 33 kV dengan urutan: bus ke-19, bus ke-30, bus ke-18, bus ke-20, bus ke-26, bus ke-14, bus ke-17, bus ke-16, bus ke-29, bus ke-15, bus ke-10, bus ke-12, bus ke-24, bus ke-25, bus ke-21, bus ke-22, bus ke-23, dan bus ke-27. Lokasi penempatan tiga tipe bus DG dipilih dari tiga urutan lokasi pertama yaitu pada bus ke-19, bus ke-30 dan bus ke-18 dengan pertimbangan tiga bus urutan pertama tersebut memiliki drop tegangan tertinggi dan terdapat tiga tipe bus DG. Hasil simulasi lokasi dan kapasitas optimal berbagai tipe bus DG menggunakan algoritma genetika ditabelkan pada Tabel 1.

Karakteristik konvergensi dari algoritma genetika untuk salah satu contoh optimasi kapasitas tiga DG dengan semua bus tipe P pada Gambar 1.



Gambar 1. Karakteristik konvergensi algoritma GA

Karakteristik konvergensi algoritma genetika pada Gambar 1 menunjukkan pengurangan nilai *fitness* dengan bertambahnya generasi. Kriteria terminasi yaitu jumlah generasi sebanyak seratus terpenuhi, ditunjukkan dengan terminasi terjadi pada generasi ke lima puluh empat, hal ini disebabkan perubahan fungsi *fitness* pada generasi tersebut sudah lebih kecil dari nilai toleransi fungsi yang besarnya  $10^{-9}$ .

Kombinasi DG untuk berbagai kombinasi tipe bus pada Tabel 1 diperoleh pengurangan rugi daya aktif tertinggi yaitu: sebesar 37,76% untuk kombinasi DG dengan bus tipe PQ, PQ, PV; pengurangan rugi daya aktif terendah yaitu sebesar 32,56% untuk kombinasi DG dengan bus tipe PQ, PQ, PQ; pengurangan rugi daya reaktif tertinggi yaitu sebesar 22,04% untuk kombinasi DG dengan bus tipe PV, PQ, PQ; dan pengurangan rugi daya reaktif terendah yaitu sebesar 17,18% untuk kombinasi DG dengan bus tipe P, P, P.

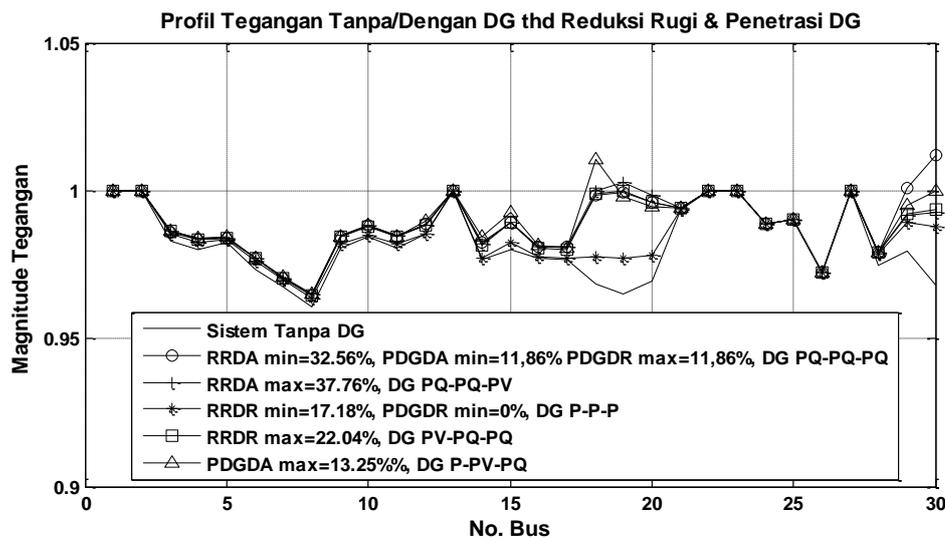
Tabel 1. Kombinasi lokasi dan kapasitas optimal DG untuk berbagai tipe bus dengan algoritma genetika.

| Kombinasi DG<br>(Tipe Bus)<br>bus ke- |    |    | Hasil Optimasi Kapasitas DG dengan Algoritma genetika |                        |                      |                        |                      |                        |                      |                        |                         |                           |                   | Reduksi<br>Rugi (%) |       |
|---------------------------------------|----|----|---|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------|-------|
|                                       |    |    | 19  |                        | 30                   |                        | 18                   |                        | Total Daya           |                        | P <sub>Loss</sub><br>MW | Q <sub>Loss</sub><br>MVar | P <sub>Loss</sub> |                     |       |
| 19                                    | 30 | 18 | P <sub>G</sub><br>MW                                  | Q <sub>G</sub><br>MVar | P <sub>G</sub><br>MW | Q <sub>G</sub><br>MVar | P <sub>G</sub><br>MW | Q <sub>G</sub><br>MVar | P <sub>G</sub><br>MW | Q <sub>G</sub><br>MVar |                         |                           |                   |                     |       |
| Tanpa DG                              |    |    | -   | -                      | -                    | -                      | -                    | -                      | -                    | -                      | -                       | 2,443                     | 8,990             |                     |       |
| P                                     | P  | P  | 12,865  | -                      | 9,830                | -                      | 1,756                | -                      | 24,451               | 0,000                  | 1,627                   | 7,445                     | 33,42             | 17,18               |       |
| P                                     | P  | PQ | 14,230  | -                      | 7,082                | -                      | 3,427                | 12,086                 | 24,740               | 12,086                 | 1,558                   | 7,096                     | 36,26             | 21,07               |       |
| P                                     | PQ | P  | 13,925  | -                      | 3,839                | 4,056                  | 7,179                | -                      | 24,943               | 4,056                  | 1,633                   | 7,222                     | 33,19             | 19,67               |       |
| PQ                                    | P  | P  | 6,952   | 13,825                 | 8,068                | -                      | 10,014               | -                      | 25,034               | 13,825                 | 1,578                   | 7,230                     | 35,42             | 19,57               |       |
| P                                     | P  | PV | 12,485  | -                      | 7,983                | -                      | 4,535                | 10,656                 | 25,003               | 10,656                 | 1,552                   | 7,142                     | 36,48             | 20,56               |       |
| P                                     | PV | P  | 9,556   | -                      | 7,988                | 4,375                  | 7,497                | -                      | 25,042               | 4,375                  | 1,611                   | 7,348                     | 34,08             | 18,26               |       |
| PV                                    | P  | P  | 10,442  | 11,676                 | 7,723                | -                      | 6,376                | -                      | 24,541               | 11,676                 | 1,544                   | 7,130                     | 36,81             | 20,69               |       |
| PQ                                    | PQ | PQ | 11,466  | 8,426                  | 10,888               | 6,183                  | 0,078                | 6,209                  | 22,431               | 20,817                 | 1,648                   | 7,433                     | 32,56             | 17,32               |       |
| PQ                                    | PQ | P  | 4,252   | 12,416                 | 8,919                | 3,547                  | 11,030               | -                      | 24,201               | 15,963                 | 1,599                   | 7,309                     | 34,57             | 18,70               |       |
| PQ                                    | P  | PQ | 7,914   | 4,037                  | 9,065                | -                      | 7,979                | 10,632                 | 24,957               | 14,669                 | 1,587                   | 7,259                     | 35,07             | 19,25               |       |
| P                                     | PQ | PQ | 10,206  | -                      | 8,881                | 3,869                  | 5,433                | 15,749                 | 24,519               | 19,618                 | 1,613                   | 7,277                     | 34,00             | 19,05               |       |
| PQ                                    | PQ | PV | 14,003  | 10,119                 | 6,718                | 2,957                  | 3,858                | 3,231                  | 24,578               | 16,308                 | 1,521                   | 7,020                     | 37,76             | 21,91               |       |
| PQ                                    | PV | PQ | 11,560  | 3,858                  | 8,367                | 4,167                  | 5,038                | 10,267                 | 24,964               | 18,292                 | 1,552                   | 7,149                     | 36,50             | 20,48               |       |
| PV                                    | PQ | PQ | 13,462  | 6,083                  | 6,471                | 2,218                  | 4,580                | 6,785                  | 24,513               | 15,086                 | 1,524                   | 7,009                     | 37,62             | 22,04               |       |
| PV                                    | PV | PV | 14,108  | 6,946                  | 8,021                | 4,357                  | 2,904                | 5,884                  | 25,033               | 17,187                 | 1,523                   | 7,083                     | 37,69             | 21,21               |       |
| PV                                    | PV | PQ | 15,862  | 5,801                  | 6,407                | 5,255                  | 2,706                | 6,550                  | 24,975               | 17,606                 | 1,529                   | 7,021                     | 37,42             | 21,91               |       |
| PV                                    | PQ | PV | 11,710  | 8,138                  | 5,745                | 4,631                  | 7,491                | 3,745                  | 24,946               | 16,514                 | 1,537                   | 7,029                     | 37,10             | 21,82               |       |
| PQ                                    | PV | PV | 11,023  | 10,465                 | 4,622                | 6,267                  | 9,232                | 1,547                  | 24,876               | 18,278                 | 1,581                   | 7,079                     | 35,30             | 21,26               |       |
| PV                                    | PV | P  | 13,300  | 10,976                 | 6,928                | 4,964                  | 4,652                | -                      | 24,880               | 15,940                 | 1,528                   | 7,065                     | 37,47             | 21,42               |       |
| PV                                    | P  | PV | 13,996  | 6,957                  | 8,730                | -                      | 2,085                | 6,273                  | 24,811               | 13,230                 | 1,537                   | 7,137                     | 37,11             | 20,61               |       |
| P                                     | PV | PV | 13,539  | -                      | 10,629               | 2,940                  | 0,326                | 12,215                 | 24,493               | 15,154                 | 1,595                   | 7,339                     | 34,72             | 18,37               |       |
| P                                     | PQ | PV | 13,099  | -                      | 8,691                | 2,797                  | 3,281                | 11,026                 | 25,071               | 13,823                 | 1,546                   | 7,161                     | 36,74             | 20,34               |       |
| PQ                                    | PV | P  | 8,952   | 13,829                 | 8,103                | 4,312                  | 7,745                | -                      | 24,800               | 18,141                 | 1,561                   | 7,186                     | 36,14             | 20,07               |       |
| PV                                    | P  | PQ | 12,262  | 7,615                  | 7,472                | -                      | 5,083                | 5,132                  | 24,817               | 12,747                 | 1,531                   | 7,076                     | 37,36             | 21,30               |       |
| P                                     | PV | PQ | 17,612  | -                      | 6,993                | 4,927                  | 0,480                | 12,791                 | 25,085               | 17,718                 | 1,560                   | 7,093                     | 36,19             | 21,10               |       |
| PQ                                    | P  | PV | 7,079   | 10,891                 | 8,549                | -                      | 9,315                | 2,414                  | 24,943               | 13,305                 | 1,568                   | 7,223                     | 35,83             | 19,65               |       |
| PV                                    | PQ | P  | 17,795  | 10,086                 | 5,742                | 5,210                  | 1,306                | -                      | 24,842               | 15,296                 | 1,531                   | 7,015                     | 37,36             | 21,97               |       |
|                                       |    |    |   |                        |                      |                        |                      |                        | min                  | 22,431                 | 0,000                   | 1,521                     | 7,009             | 32,56               | 17,18 |
|                                       |    |    |   |                        |                      |                        |                      |                        | max                  | 25,085                 | 20,817                  | 2,444                     | 8,990             | 37,76               | 22,04 |

Kapasitas daya aktif atau reaktif untuk kombinasi DG dengan berbagai tipe bus pada Tabel 1, yaitu: kapasitas total daya aktif terendah adalah kombinasi DG dengan bus tipe PQ, PQ, PQ sebesar 22,431 MW (11,86% penetrasi daya aktif DG pada sistem); kapasitas total daya aktif tertinggi adalah kombinasi DG dengan bus tipe P, PV, PQ sebesar 25,085 MW (13,25% penetrasi daya aktif DG pada sistem); kapasitas total daya reaktif terendah adalah kombinasi DG dengan bus tipe P, P, P, yaitu sebesar 0 MW (0% penetrasi

daya reaktif DG pada sistem); dan kapasitas total daya reaktif tertinggi adalah kombinasi DG dengan bus tipe PQ, PQ, PQ sebesar 20,817 MW (19,42% penetrasi daya reaktif DG pada sistem).

Kombinasi berbagai tipe bus DG yang menghasilkan pengurangan rugi daya optimum, dan penetrasi daya DG terhadap profil tegangan dibandingkan dengan sistem tanpa DG, ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Profil tegangan sistem dengan/tanpa DG pada kombinasi optimal

RRDA, RRDR, PDGDA, PDGDR adalah reduksi rugi daya aktif, reduksi rugi daya reaktif, penetrasi DG daya aktif, penetrasi DG daya reaktif. Gambar 2 menunjukkan penambahan berbagai kombinasi DG dapat memperbaiki profil tegangan sistem. Perbaikan profil tegangan terendah diperoleh untuk kombinasi bus DG tipe P, P, P. Kombinasi bus DG tipe PQ, PQ, PQ memiliki profil tegangan cukup baik dengan total pembangkitan daya aktif dari tiga DG tersebut adalah terkecil.

## 5. Kesimpulan dan Saran

Reduksi rugi daya aktif maupun reaktif dapat diperoleh dengan berbagai kombinasi tipe bus DG. Profil tegangan lebih baik setelah penambahan berbagai kombinasi tipe bus DG pada sistem. Perbaikan profil tegangan terendah diperoleh untuk kombinasi bus DG tipe P, P, P. Penetrasi DG terendah untuk perbaikan unjuk kerja sistem adalah untuk kombinasi bus DG tipe PQ, PQ, PQ yaitu sebesar 11,86%.

## Saran

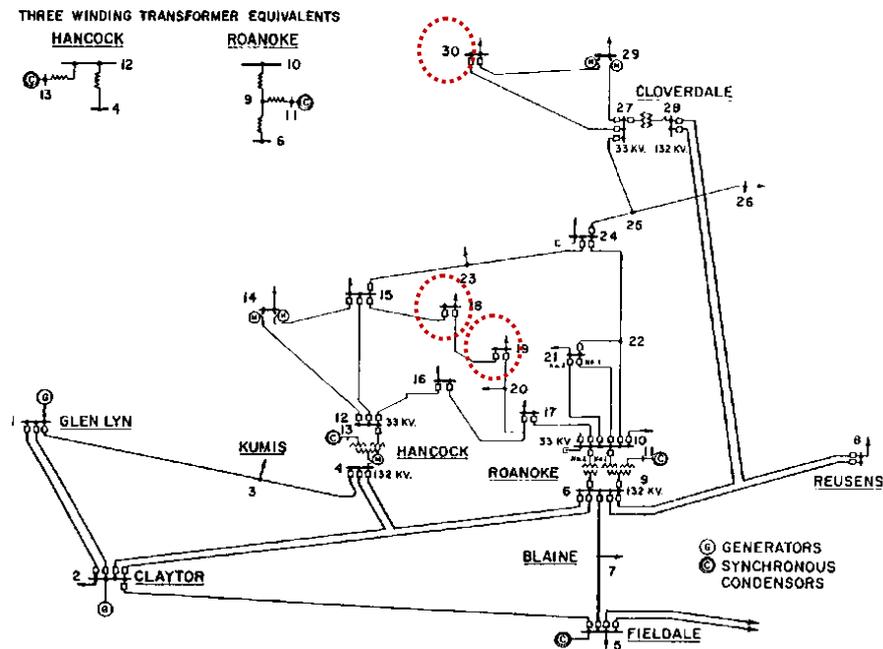
Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan memperhatikan pertumbuhan dan perubahan beban pada sistem.

**Ucapan terima kasih:** terima kasih penulis sampaikan kepada Universitas Mataram atas dukungan dananya sehingga penelitian ini bisa berlangsung melalui Dana PNPB Universitas Mataram 2015.

## Daftar Pustaka

- \_\_\_\_\_: *Power Systems Test Case Archive*, <https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>, diakses Maret 2015.
- \_\_\_\_\_: *Tegangan – tegangan Standar*, SPLN 1:1995, PT PLN (Persero).
- Budiman, A., Penangsang, O., dan Soeprijanto, A. (2010): *Penempatan dan Penentuan Kapasitas Pembangkit Kecil Tersebar Menggunakan Algoritma Genetika Breeder Multiobjektif*, Tesis, Teknik Elektro, Pasca Sarjana ITS.

- Farat, I.A. (2013): *Ant Colony Optimization for Optimal Distributed Generation in Distribution Systems*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer, Control, Quantum and Information Engineering, Vol. 7, No. 8.
- Ghadimi N. (2013): *A Method For Placement Of Distributed Generation (DG) Units Using Particle Swarm Optimization*, International Journal of Physical Sciences, Vol. 8 (27), pp. 1417-1423.
- Gözel, T., dan Hocaoglu, M.H. (2009): *An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems*, Electric Power Systems Research, Vol. 79, pp. 912-918, Elsevier B.V., all rights reserve.
- Guseynov, A.M., dan Akhundov, B.S. (2006): *Defining Impact of Distributed Generation on Power System Stability*, Azerbaijan Scientific Research Institute of Energetics and Energi Design.
- Irannezhad, F., Vahidi, B., Abedi, M., dan Dehghani, D. (2014): *Optimal Design With Considering Distributed Generation In Distribution Systems*, Science International A Multi-Disciplinary Journal, Lahore, Vol. 26 (1), pp. 51-56.
- Kansal, S., Sais, B.B.R., Tyagi, B., dan Kumar, B. (2011): *Optimal Placement Of Distributed Generation In Distribution Networks*, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 47-55.
- Murthy, G.V.K., Sivanagaraju, Satyanarayana, S., dan Rao, B.H. (2012): *Artificial Bee Colony Algorithm For Distribution Feeder Reconfiguration With Distributed Generation*, International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, Volume 3, Issue 2, pp: 50-59.
- Wang C. (2006): *Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuelcell Distributed Generation System*, Montana: Montana State University.
- Zimmerman, R.D., dan Sánchez, C.E.M. (2015): *MATPOWER 5.1 User's Manual*, Power Systems Engineering Research Center (Pserc), All Rights Reserved.



Gambar 3. Sistem tenaga IEEE 30 bus  
 (<https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>)