

## IMPLEMENTASI *THUNDERSTORM ALGORITHM* UNTUK MINIMASI DINAMIKA PRODUKSI POLUSI PADA PEMBANGKIT TERMAL TENAGA LISTRIK

A.N. Afandi

**Abstrak:** Dewasa ini upaya untuk melakukan proteksi lingkungan terhadap berbagai polusi mulai ditingkatkan pada berbagai aspek. Sebagai salah satu penyumbang polusi udara melalui partikel yang ikut diproduksi akibat penggunaan bahan bakar fosil, maka operasi sistem tenaga listrik mulai juga dicermati untuk turut menekan terjadinya polusi di udara karena penyediaan energi listrik. Dengan demikian, sangat penting untuk menekan laju produksi polusi melalui berbagai strategi, agar produksi polusi dapat dikurangi. Pada artikel ini, persoalan tersebut didekati menggunakan dinamika produksi polusi (DPP) yang bertujuan untuk meminimumkan polusi pembangkit selama 24 jam. Selain itu, proses minimalisasi polusi ditentukan dengan *thunderstorm algorithm* menggunakan IEEE-30 bus sebagai model sistemnya. Berdasarkan durasi operasi, maka setiap pembangkit memiliki daya yang bervariasi kapasitasnya, termasuk kondisi produksi polusi juga berbeda satu sama lain. Dari sisi perubahan, setiap pembangkit mengalami penambahan dan pengurangan jumlah produksi pada setiap jam beroperasi.

**Kata kunci :** produksi polusi, sistem tenaga listrik, *thunderstorm algorithm*

Dewasa ini, integrasi sistem tenaga listrik dikelola dengan menggunakan berbagai strategi untuk menjamin proses pengiriman daya listrik dari pembangkit ke pusat beban memiliki keandalan dan kontinuitas yang tinggi. Strategi ini dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai batasan-batasan operasional yang berada pada sistem pembangkitan; transmisi; distribusi; dan beban, agar semua proses pengiriman daya tersebut tetap berada pada batas kualitas dan stabilitas yang tinggi. Secara umum, batasan-batasan tersebut merupakan kondisi dan situasi, dimana sistem tenaga listrik harus memenuhi semua kriteria yang ada, dan dinyatakan dalam suatu fungsi yang tercermin dalam suatu model pembatas yang berupa *equality/inequality constraints*, agar semua operasi berjalan sesuai dengan kriteria yang diinginkan. Secara teknis, operasi penyediaan energi listrik dilakukan dengan cara koordinasi pembangkit dari berbagai jenis dan lokasi yang berbeda untuk mendukung

ketersediaan energi listrik dalam jangka waktu tertentu. Hal ini dilakukan untuk mensuplai kebutuhan beban yang tersebar di setiap titik sesuai dengan areanya melalui unit komitmen penyediaan daya di setiap pembangkit. Dengan demikian diharapkan operasi berjalan secara kontinu dan sesuai kriteria teknis, serta optimal dalam pembiayaannya.

Saat ini, operasi sistem tenaga listrik juga dibatasi oleh proteksi lingkungan sebagai upaya untuk mengendalikan tingkat produksi polusi yang dihasilkan oleh *thermal power plants* yang menggunakan bahan bakar fosil. Upaya pengendalian polusi ini dilakukan dengan tujuan untuk menekan polusi-polusi di udara, terutama yang disebabkan oleh berbagai material gas, seperti CO; CO<sub>2</sub>; SO<sub>x</sub>; and NO<sub>x</sub> [Yunzhi; 2009, Gopalakrishnan; 2011, Mukesh; 2012, Chowdhury; 1990, Afandi; 2014]. Oleh karena itu, sebagai akibat dari upaya tersebut, persyaratan lingkungan ini menjadi bagian yang

sangat penting dalam pengelolaan sistem tenaga listrik selama kurun waktu beroperasi 24 jam. Sehingga, penyediaan energi listrik dengan berbagai kombinasi daya yang dihasilkan setiap pembangkit sesuai dengan batas polusi yang diijinkan. Selain itu, efek lingkungan yang tercermin dalam polusi tersebut patut diperhitungkan secara financial pula sebagai bagian dari biaya operasi yang menunjukkan kompensasi tingkat produksi polusi selama beroperasi [Afandi; 2014, Ioannis; 2013, Yong; 2006; Zeljko; 2007].

Selanjutnya, dengan mempertimbangkan persoalan polusi udara yang menjadi perhatian global ini, maka operasi sistem tenaga listrik semakin menjadi kompleks dan dinamis, dimana batasan lingkungan ini juga harus dipertimbangkan dalam menentukan strategi operasinya. Sehingga penetapan skenario operasi dan kombinasi pembangkit untuk mendukung unit komitmen juga menjadi semakin rumit dan perlu perhatian khusus, agar dapat ditetapkan kombinasi pembangkit yang mampu menekan produksi polusi dengan penyediaan daya ekonomis selama 24 jam. Oleh karena itu, dengan kriteria batas-batas operasi dan lingkungan, sangat penting untuk memantau produksi polusi di setiap pembangkit sebagai bagian dari efek konsumsi bahan bakar yang tidak ramah lingkungan pada *thermal power plants*. Untuk itu, kajian yang berorientasi pada reduksi produksi polusi perlu dimasukkan dalam pengambilan keputusan atas penyediaan energi listrik, agar sesuai dengan batas lingkungan dan batas teknis yang telah ditetapkan [Zeljko; 2013, Panciatici; 2014, Bishnu; Bommirani; 2013; Farhat; 2009, Afandi; 2014].

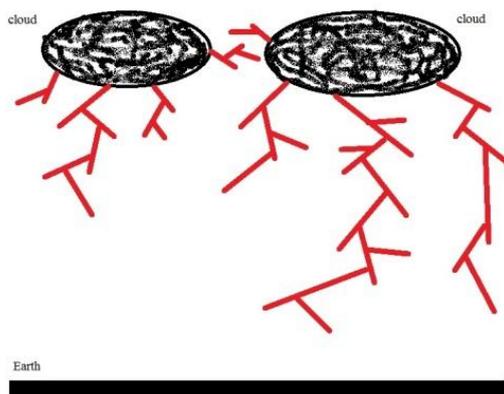
Secara umum, banyak pendekatan telah diterapkan pada sistem tenaga listrik, untuk memecahkan masalah-

masalah krusial dengan berbagai kategori masalah yang dikaji. Salah satunya, yaitu untuk mendefinisikan konsumsi bahan bakar pada setiap kombinasi pembangkit dengan menekan biaya operasi. Sehingga keseimbangan produksi daya dapat ditetapkan sesuai dengan kebutuhan konsumen, baik didekati dengan metode klasik ataupun cara intelijen komputasi [Mukesh; 2012, Ioannis; 2013, Bishnu; 2007; Afandi; 2014]. Pada implemetasinya, penggunaan metode klasik banyak menemui hambatan, terutama ketika batas standar polusi lingkungan dimasukan, serta lemah untuk diterapkan pada sistem yang besar dengan beragam limitasi operasi dan kombinasi [Bishnu; 2007, Afandi; 2014]. Saat ini, penggunaan intelijen komputasi melalui berbagai metode evolusionernya semakin banyak digunakan dikarenakan metode klasik yang banyak menemui kelemahan pada proses kalkulasinya. Sebagai bagian dari intelijen komputasi, artikel ini menyajikan metode terbaru yang bernama *Thunderstorm Algorithm* (TA), dengan penerapannya untuk meminimasi dinamika produksi polusi (DPP) pada operasi sistem tenaga listrik selama 24 jam.

### **THUNDERSTORM DAN POLUSI**

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, bahwa artikel ini menyajikan intelijen komputasi terbaru, maka pada bagian ini akan mengulas tentang TA, dalam proses pembentukannya dan hirarki prosedur implementasinya. Secara umum, TA diilhami oleh multi sambaran petir yang berasal dari gumpalan awan yang berdekatan, dengan tingkat perbedaan muatan yang tinggi antara tanah dan awan, serta awan dan awan. Selain itu, kondisi lingkungan dengan kandungan partikel pada uap air yang menyatu diawan juga menjadi perhatian lebih

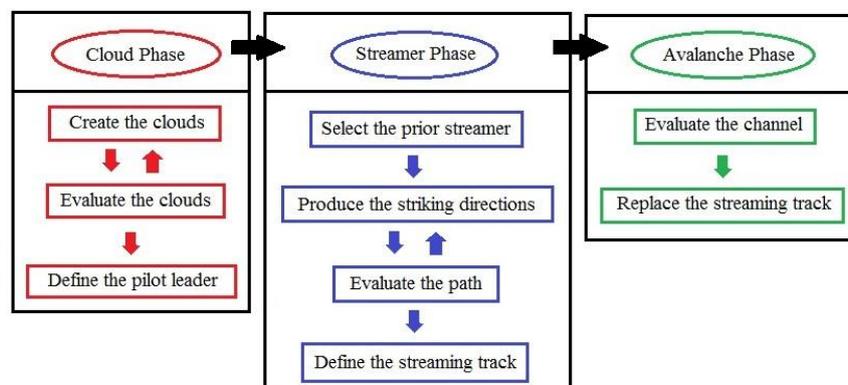
pada proses mekanismenya. Sehingga, produksi sambaran badai petir menjadi suatu pola tertentu yang menyalurkan semua muatan melalui jalur khusus yang terbentuk. Dengan inspirasi badai petir inilah TA diciptakan sebagai upaya untuk mentransformasikan semua gejala dan kejadian di alam menjadi suatu intelijen komputasi yang berbasis mekanisme badai petir. Kejadian sporadis badai petir menjadi awal inspirasi tersebut muncul, dan selanjutnya terus dikembangkan model intelijen representasinya dan formula matematis mekanismenya. Sehingga prosedur dan mekanismenya, serta formulasinya dapat ditetapkan sebagai intelijen komputasi yang merupakan metode evolusioner terbaru.



**Gambar 1.** Ilustrasi badai petir

Secara umum, situasi badai petir di alam dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1, dan kondisi ini dalam TA diilustrasikan seperti pada Gambar 2 sebagai tahapan intelijen komputasi yang merupakan metode evolusioner terbaru. Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa TA dieksekusi melalui beberapa tahap yang saling berkaitan. Masing-masing fase tersebut memiliki mekanisme tersendiri dan mendukung pencapaian titik optimal dalam proses komputasi. Dengan mengacu pada proses kejadian di alam, maka TA dinyatakan dalam *pseudo-codes* sebagai berikut ini:

- Fase Awan: membuat gugusan awan, mengevaluasi awan, dan menentukan sambaran awal;
- Fase Aliran: menentukan aliran awal, memproduksi arah sambaran badai, mengevaluasi arah badai, dan menentukan jalur aliran;
- Fase Avalan: mengevaluasi jalur avalan, dan penggantian jalur mati.



**Gambar 2.** Hirarki *Thunderstorm Algorithm*

Selanjutnya, gugusan awan dibangkitkan dengan menggunakan persamaan (1), dan arah sambaran badai dinyatakan menggunakan persamaan (2) dengan probabilitas tiap muatan dinatakan dalam (3).

$$\text{Gugusan awan: } Q_{sj}^m = (1 + k \cdot c) \cdot Q_{midj}^m, \quad (1)$$

$$\text{Depleksi sambaran: } D_{sj}^n = (Q_{sdep}^n) \cdot b \cdot k, \quad (2)$$

$$\text{Probabilitas: } \text{prob}Q_{sj} = \begin{cases} \frac{Q_{sj}^m}{\sum Q_s^m} \text{ for } m \\ \frac{Q_{sj}^n}{\sum Q_s^n} \text{ for } n \end{cases}, \quad (3)$$

dimana  $Q_{sj}$  adalah muatan terkini,  $Q_{midj}$  adalah nilai tengah rentang muatan,  $s$  adalah aliran,  $D_{sj}$  adalah posisi sambaran,  $Q_{sdep}$  adalah jarak depleksi,  $n$  adalah arah sambaran untuk  $h^{th}$ ,  $k$  adalah bilangan acak antara -1 dan 1,  $c$  adalah bilangan acak antara 1 dan  $h$ ,  $h$  adalah faktor badai,  $b$  adalah bilangan acak antara 1 dan  $a$ ,  $j \in (1,2,\dots,a)$ ,  $a$  adalah jumlah variabel,  $m \in (1,2,\dots,h)$ .

Selanjutnya, dengan mengacu pada hirarki yang ada, maka TA digunakan untuk menyelesaikan persoalan DPP melalui berbagai kriteria teknis dan persyaratan lingkungan yang ditetapkan. Hal ini digunakan agar semua proses komputasi berada pada daerah yang diijinkan bagi setiap solusi yang tercapai. Dengan semakin gencarnya upaya untuk proteksi lingkungan, maka emisi polusi dari pembangkit termal yang menggunakan bahan bakar fosil juga mulai dipertimbangkan dalam sistem tenaga listrik, serta untuk membatasi sumbangsih polusi ke udara dalam pemanasan global. Sehingga, pengurangan polusi selama produksi daya harus dapat ditekan dalam kurun waktu beroperasinya. Dengan mempertimbangkan dinamika operasi

selama 24 jam, maka secara praktis perubahan setiap operasi pembangkit untuk menghasilkan daya keluaran juga dibatasi oleh emisi polusi ke udara dan rentang perubahan daya (*ramp limits*) dalam setiap durasi waktu produksi [Shayeghi; 2012, Afandi; 2015]. Dengan mempertimbangkan batas perubahan daya dan polusi, maka operasi ini tidak bisa diselesaikan secara konvensional mengingat durasi beroperasinya 24 jam. Untuk itu, DPP didekati dengan menggunakan persamaan (4) dengan dibatasi oleh kondisi operasional yang dinyatakan pada persamaan (5) - (11). Batas operasional ini mencakup kondisi aliran daya (9); keseimbangan daya (5); batas kemampuan daya (6 dan 7); perubahan tegangan (8); kemampuan dinamika daya (10 dan 11), yang secara matematika diberikan dalam persamaan-persamaan berikut ini:

$$\sum_{t=1}^T EM_{total}^t = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ng} (\gamma_i + \beta_i \cdot P_i^t + \alpha_i (P_i^t)^2), \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{ng} P_i^t = PD^t + PL^t, \quad (5)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max}, \quad (6)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i^t \leq Q_i^{\max}, \quad (7)$$

$$V_p^{\min} \leq V_p^t \leq V_p^{\max}, \quad (8)$$

$$S_{pq}^t \leq S_{pq}^{\max}, \quad (9)$$

$$P_i^t - P_i^{(t-1)} \leq UR_i, \quad (10)$$

$$P_i^{(t-1)} - P_i^t \leq DR_i, \quad (11)$$

dimana  $t=1; 2; 3; \dots; T$ ,  $T$  adalah total waktu beroperasi,  $P_i^t$  adalah daya keluaran pada waktu  $t$  (MW),  $ng$  adalah jumlah unit pembangkit,  $\alpha_i; \beta_i; \gamma_i$  adalah koefisien emisi polusi unit pembangkit  $i$ ,  $PD^t$  adalah daya beban pada waktu  $t$  (MW),  $PL^t$  adalah total rugi daya pada waktu  $t$  (MW),  $P_i^{\min}$  adalah batas

minimum daya nyata untuk unit pembangkit  $i$  (MW),  $P_i^{\max}$  adalah batas daya nyata maksimum bagi unit pembangkit  $i$  (MW),  $Q_i^{\max}$  dan  $Q_i^{\min}$  adalah batas daya reaktif bagi unit pembangkit  $i$  (MVar),  $Q_i^t$  adalah daya reaktif keluaran untuk unit pembangkit  $i$  pada waktu  $t$  (MVar),  $V_p^{\max}$  dan  $V_p^{\min}$  adalah batas tegangan pada bus  $p$  (pu),  $S_{pq}^t$  adalah daya kirim antara bus  $p$  dan  $q$  pada waktu  $t$  (MVA),  $S_{pq}^{\max}$  adalah batas kemampuan daya kirim antara bus  $p$  and  $q$  (MVA),  $UD_i$  adalah batas atas ramp untuk unit pembangkit  $i$  (MW), dan  $DR_i$  adalah batas bawah ramp untuk unit pembangkit  $i$  (MW).

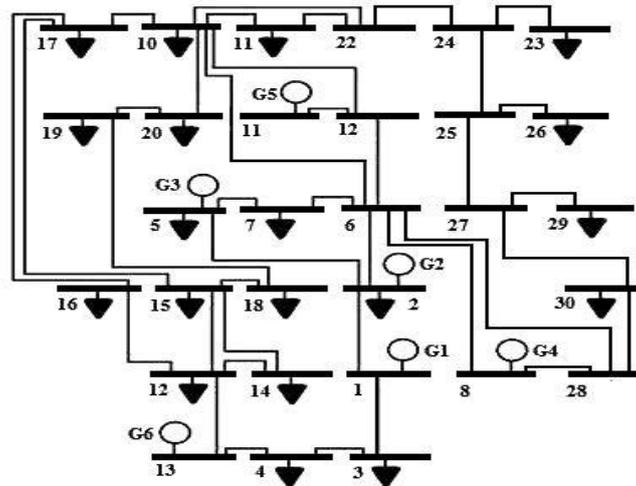
## METODE

Pada bagian ini, aplikasi TA diterapkan pada persoalan DPP yang menggunakan model *IEEE-30 bus system* dengan kondisi perubahan daya beban selama 24 jam. Model ini disusun oleh 6 generator, 30 bus, 19 bus beban, dan 41 saluran, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3 dengan posisi beban dan pembangkit yang tersebar. Selain itu, sistem tersebut menggunakan parameter operasional lainnya yang mencaup  $\pm 5\%$  untuk perubahan tegangan, rugi daya 10%, standard emisi 0,85 kg/jam, dan 0,5 untuk faktor kompromi. Selanjutnya untuk menyelesaikan DPP, implementasi TA mengacu pada Gambar 2 yang

merupakan urutan prosedur untuk mencari solusi. Pada studi ini, TA diimplementasikan dengan menggunakan parameter avalan = 1, muatan maksimum = 50, sambaran maksimum = 100, dan faktor badai = 6.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Kajian ini ditujukan untuk mengetahui dinamika produksi polusi pada sistem tenaga listrik melalui pendekatan masalah yang dinyatakan dalam DPP, kajian tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan batas-batas operasional untuk menentukan tingkat produksi polusi masing-masing pembangkit. Berdasarkan hasil eksekusi program untuk 24 jam operasi selama 100 siklus didapatkan seperti pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5. Masing-masing tabel tersebut menunjukkan hasil optimasi dengan mempertimbangkan kondisi perubahan setiap beban pada setiap jam operasi sebagaimana diberikan dalam Tabel 2. Secara keseluruhan hasil implementasi TA pada persoalan DPP pada sistem tenaga listrik disajikan pula dalam Gambar 3 dan Gambar 4, yang memberikan informasi produksi daya; polusi; dan perubahan-perubahannya selama 24 jam beroperasi untuk mensuplai beban.



**Gambar 3.** Diagram garis *IEEE-30 bus system*

**Tabel 1.** Koefisien produksi polusi dan batas daya operasi

| Bus | Gen | $\alpha$<br>(kg/MWh <sup>2</sup> ) | $\beta$<br>(kg/MWh) | $\gamma$ | $P_{min}$<br>(MW) | $P_{max}$<br>(MW) | $UR_i$<br>(MW) | $DR_i$<br>(MW) |
|-----|-----|------------------------------------|---------------------|----------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|
| 1   | G1  | 0,0126                             | -1,1000             | 22,9830  | 50                | 200               | 85             | 65             |
| 2   | G2  | 0,0200                             | -0,1000             | 25,3130  | 20                | 80                | 22             | 12             |
| 5   | G3  | 0,0270                             | -0,0100             | 25,5050  | 15                | 50                | 15             | 12             |
| 8   | G4  | 0,0291                             | -0,0050             | 24,9000  | 10                | 35                | 16             | 8              |
| 11  | G5  | 0,0290                             | -0,0040             | 24,7000  | 10                | 30                | 9              | 6              |
| 13  | G6  | 0,0271                             | -0,0055             | 25,3000  | 12                | 40                | 16             | 8              |

**Tabel 2.** Daya beban selama 24 jam operasi

| Jam   | MW     | Jam   | MW     | Jam   | MW     | Jam   | MW     |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 01:00 | 245,87 | 07:00 | 343,40 | 13:00 | 396,93 | 19:00 | 396,93 |
| 02:00 | 273,88 | 08:00 | 354,11 | 14:00 | 329,89 | 20:00 | 418,34 |
| 03:00 | 301,88 | 09:00 | 386,23 | 15:00 | 354,11 | 21:00 | 354,11 |
| 04:00 | 329,89 | 10:00 | 407,64 | 16:00 | 354,11 | 22:00 | 329,89 |
| 05:00 | 364,82 | 11:00 | 418,34 | 17:00 | 364,82 | 23:00 | 287,88 |
| 06:00 | 329,89 | 12:00 | 407,64 | 18:00 | 375,52 | 24:00 | 230,76 |

**Tabel 3.** Daya keluaran pembangkit dan rugi daya selama 24 jam

| Jam   | Daya keluaran (MW) |       |       |       |       |       |        | Rugi daya<br>(MW) |
|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------------|
|       | G1                 | G2    | G3    | G4    | G5    | G6    | Total  |                   |
| 01:00 | 59,75              | 66,34 | 36,77 | 24,40 | 26,98 | 35,12 | 249,36 | 3,49              |
| 02:00 | 88,06              | 68,74 | 35,00 | 27,78 | 24,49 | 35,00 | 279,07 | 5,19              |
| 03:00 | 94,27              | 77,72 | 50,00 | 22,63 | 25,06 | 38,19 | 307,87 | 5,99              |
| 04:00 | 99,87              | 89,72 | 62,00 | 28,33 | 20,00 | 35,93 | 335,85 | 5,96              |
| 05:00 | 157,16             | 85,70 | 51,48 | 25,07 | 20,00 | 37,91 | 377,32 | 12,5              |
| 06:00 | 133,42             | 75,05 | 39,94 | 35,00 | 20,02 | 36,74 | 340,17 | 10,28             |
| 07:00 | 153,74             | 72,76 | 36,86 | 27,47 | 27,10 | 35,54 | 353,47 | 10,07             |
| 08:00 | 159,42             | 79,68 | 35,00 | 33,75 | 33,10 | 37,01 | 377,96 | 23,85             |
| 09:00 | 187,76             | 73,57 | 49,19 | 41,75 | 27,55 | 35,00 | 414,82 | 28,59             |
| 10:00 | 230,36             | 64,42 | 41,17 | 33,85 | 29,31 | 35,78 | 434,89 | 27,25             |

|       |        |       |       |       |       |       |        |       |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 11:00 | 240,25 | 62,50 | 45,34 | 28,83 | 25,90 | 37,69 | 440,51 | 22,17 |
| 12:00 | 214,38 | 64,62 | 44,91 | 32,94 | 26,13 | 40,00 | 422,98 | 15,34 |
| 13:00 | 191,31 | 71,36 | 50,00 | 40,94 | 32,13 | 39,75 | 425,49 | 28,56 |
| 14:00 | 136,31 | 64,62 | 48,92 | 35,84 | 27,28 | 39,04 | 352,01 | 22,12 |
| 15:00 | 159,49 | 72,72 | 50,00 | 38,84 | 23,35 | 36,24 | 380,64 | 26,53 |
| 16:00 | 143,26 | 79,81 | 44,77 | 32,02 | 23,78 | 37,52 | 361,16 | 7,05  |
| 17:00 | 165,99 | 69,12 | 40,98 | 35,00 | 24,62 | 40,00 | 375,71 | 10,89 |
| 18:00 | 177,57 | 64,37 | 44,37 | 43,00 | 25,11 | 36,42 | 390,84 | 15,32 |
| 19:00 | 187,56 | 73,73 | 44,41 | 38,17 | 25,90 | 36,74 | 406,51 | 9,58  |
| 20:00 | 227,51 | 80,00 | 41,96 | 31,25 | 22,88 | 37,73 | 441,33 | 22,99 |
| 21:00 | 170,58 | 69,98 | 35,74 | 33,14 | 20,78 | 35,28 | 365,50 | 11,39 |
| 22:00 | 155,94 | 68,77 | 35,00 | 41,14 | 20,00 | 39,88 | 360,73 | 30,84 |
| 23:00 | 102,52 | 69,52 | 40,29 | 34,54 | 20,00 | 40,00 | 306,87 | 18,99 |
| 24:00 | 63,65  | 60,00 | 35,00 | 28,10 | 20,30 | 35,00 | 242,05 | 11,29 |

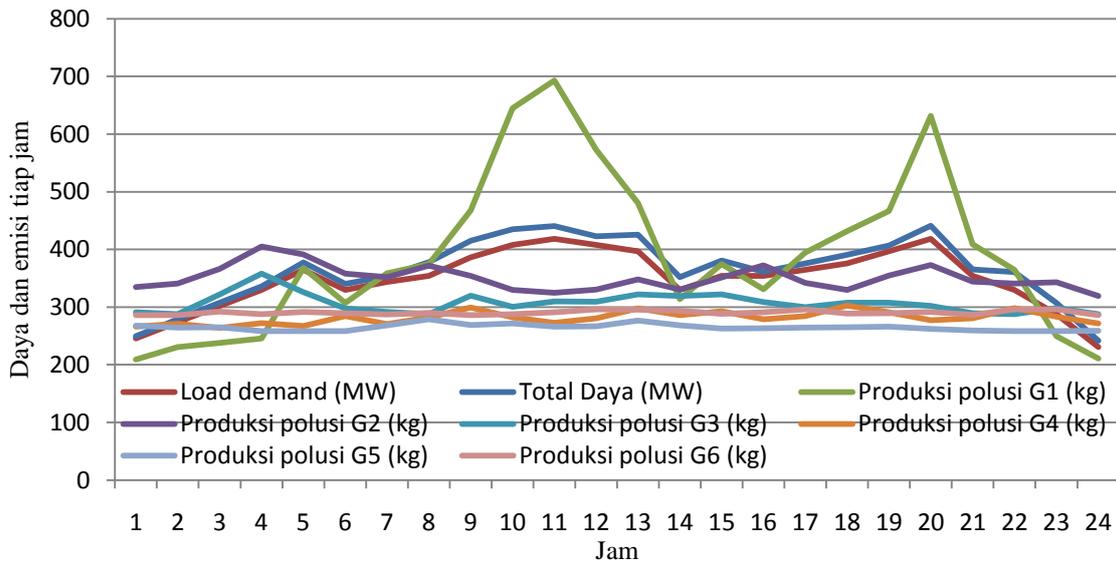
Tabel 4. Variasi produksi polusi selama 24 jam

| Jam   | Produksi polusi (kg) |        |        |        |        |        |          |
|-------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
|       | G1                   | G2     | G3     | G4     | G5     | G6     | Total    |
| 01:00 | 209,09               | 334,52 | 291,19 | 266,20 | 268,00 | 286,23 | 1.655,23 |
| 02:00 | 230,67               | 340,76 | 287,78 | 271,32 | 264,30 | 286,01 | 1.680,82 |
| 03:00 | 238,11               | 366,17 | 322,05 | 263,79 | 265,11 | 292,31 | 1.747,54 |
| 04:00 | 245,65               | 405,15 | 358,22 | 272,21 | 258,52 | 287,79 | 1.827,54 |
| 05:00 | 368,16               | 391,45 | 326,09 | 267,16 | 258,52 | 291,74 | 1.903,13 |
| 06:00 | 307,36               | 358,28 | 297,72 | 284,47 | 258,54 | 289,38 | 1.795,75 |
| 07:00 | 358,53               | 351,73 | 291,37 | 270,82 | 268,19 | 287,03 | 1.827,67 |
| 08:00 | 374,69               | 372,14 | 287,78 | 281,98 | 278,64 | 289,92 | 1.885,14 |
| 09:00 | 467,49               | 354,02 | 319,89 | 299,51 | 268,90 | 286,01 | 1.995,83 |
| 10:00 | 645,06               | 329,69 | 300,40 | 282,17 | 271,80 | 287,50 | 2.116,62 |
| 11:00 | 692,83               | 325,01 | 310,10 | 273,04 | 266,35 | 291,29 | 2.158,62 |
| 12:00 | 573,09               | 330,18 | 309,06 | 280,41 | 266,70 | 296,14 | 2.055,58 |
| 13:00 | 480,54               | 347,84 | 322,05 | 297,57 | 276,81 | 295,60 | 2.020,41 |
| 14:00 | 314,00               | 330,18 | 319,18 | 286,20 | 268,47 | 294,09 | 1.812,12 |
| 15:00 | 374,90               | 351,62 | 322,05 | 292,70 | 262,72 | 288,39 | 1.892,38 |
| 16:00 | 330,84               | 372,54 | 308,72 | 278,68 | 263,30 | 290,94 | 1.845,02 |
| 17:00 | 394,40               | 341,77 | 299,98 | 284,47 | 264,48 | 296,14 | 1.881,25 |
| 18:00 | 431,79               | 329,56 | 307,76 | 302,59 | 265,18 | 288,75 | 1.925,64 |
| 19:00 | 466,77               | 354,48 | 307,86 | 291,21 | 266,35 | 289,38 | 1.976,04 |
| 20:00 | 631,76               | 373,13 | 302,17 | 277,26 | 262,09 | 291,37 | 2.137,78 |
| 21:00 | 408,82               | 344,08 | 289,18 | 280,79 | 259,44 | 286,54 | 1.868,85 |
| 22:00 | 364,69               | 340,84 | 287,78 | 298,05 | 258,52 | 295,88 | 1.845,75 |
| 23:00 | 249,49               | 342,84 | 298,48 | 283,54 | 258,52 | 296,14 | 1.729,01 |
| 24:00 | 210,86               | 319,13 | 287,78 | 271,84 | 258,87 | 286,01 | 1.634,48 |

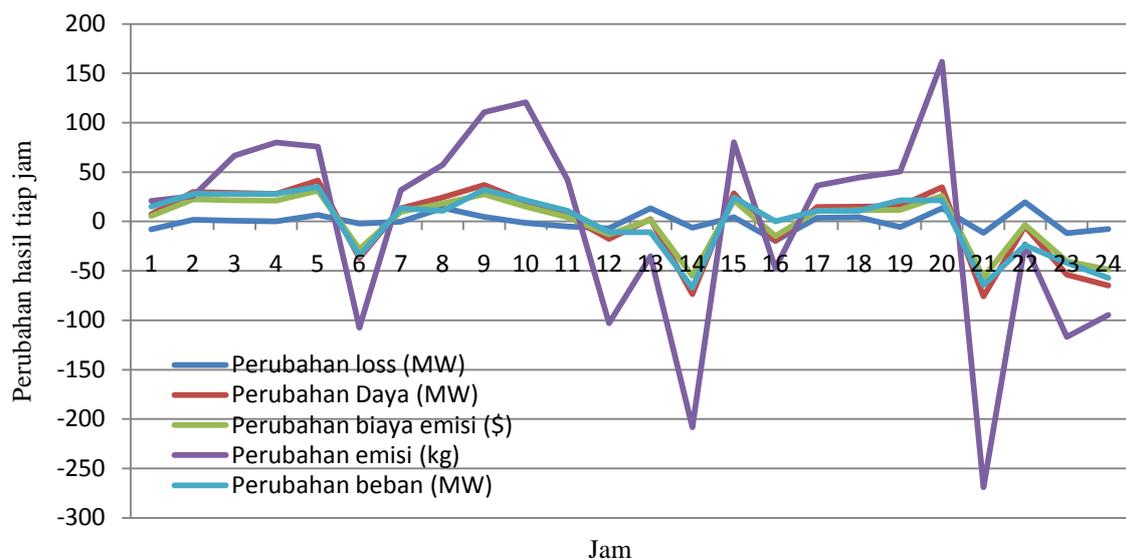
Tabel 5. Biaya kompensasi polusi selama 24 jam

| Jam   | Produksi polusi (\$) |       |       |       |       |       |        |
|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|       | G1                   | G2    | G3    | G4    | G5    | G6    | Total  |
| 01:00 | 44,81                | 49,76 | 27,58 | 18,30 | 20,24 | 26,34 | 187,02 |
| 02:00 | 66,05                | 51,56 | 26,25 | 20,84 | 18,37 | 26,25 | 209,30 |
| 03:00 | 70,70                | 58,29 | 37,50 | 16,97 | 18,80 | 28,64 | 230,90 |
| 04:00 | 74,90                | 67,29 | 46,50 | 21,25 | 15,00 | 26,95 | 251,89 |
| 05:00 | 117,87               | 64,28 | 38,61 | 18,80 | 15,00 | 28,43 | 282,99 |

|       |        |       |       |       |       |       |        |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 06:00 | 100,07 | 56,29 | 29,96 | 26,25 | 15,02 | 27,56 | 255,13 |
| 07:00 | 115,31 | 54,57 | 27,65 | 20,60 | 20,33 | 26,66 | 265,10 |
| 08:00 | 119,57 | 59,76 | 26,25 | 25,31 | 24,83 | 27,76 | 283,47 |
| 09:00 | 140,82 | 55,18 | 36,89 | 31,31 | 20,66 | 26,25 | 311,12 |
| 10:00 | 172,77 | 48,32 | 30,88 | 25,39 | 21,98 | 26,84 | 326,17 |
| 11:00 | 180,19 | 46,88 | 34,01 | 21,62 | 19,43 | 28,27 | 330,38 |
| 12:00 | 160,79 | 48,47 | 33,68 | 24,71 | 19,60 | 30,00 | 317,24 |
| 13:00 | 143,48 | 53,52 | 37,50 | 30,71 | 24,10 | 29,81 | 319,12 |
| 14:00 | 102,23 | 48,47 | 36,69 | 26,88 | 20,46 | 29,28 | 264,01 |
| 15:00 | 119,62 | 54,54 | 37,50 | 29,13 | 17,51 | 27,18 | 285,48 |
| 16:00 | 107,45 | 59,86 | 33,58 | 24,02 | 17,84 | 28,14 | 270,87 |
| 17:00 | 124,49 | 51,84 | 30,74 | 26,25 | 18,47 | 30,00 | 281,78 |
| 18:00 | 133,18 | 48,28 | 33,28 | 32,25 | 18,83 | 27,32 | 293,13 |
| 19:00 | 140,67 | 55,30 | 33,31 | 28,63 | 19,43 | 27,56 | 304,88 |
| 20:00 | 170,63 | 60,00 | 31,47 | 23,44 | 17,16 | 28,30 | 331,00 |
| 21:00 | 127,94 | 52,49 | 26,81 | 24,86 | 15,59 | 26,46 | 274,13 |
| 22:00 | 116,96 | 51,58 | 26,25 | 30,86 | 15,00 | 29,91 | 270,55 |
| 23:00 | 76,89  | 52,14 | 30,22 | 25,91 | 15,00 | 30,00 | 230,15 |
| 24:00 | 47,74  | 45,00 | 26,25 | 21,08 | 15,23 | 26,25 | 181,54 |



**Gambar 4.** Produksi polusi dan daya selama 24 jam



**Gambar 5.** Perubahan-perubahan selama 24 jam

Berdasarkan Tabel 3; Tabel 4; dan Tabel 5 dapat diketahui, bahwa produksi polusi pada unit pembangkit cukup beragam jumlahnya pada enam pembangkit yang eksis terintegrasi pada system tenaga listrik. Namun, selama beroperasi 24 jam, semua pembangkit telah membebaskan polusi sekitar 24.218,19 kg dengan produksi daya sebesar 8,743,11 MW untuk mensuplai daya 8.356,88 MW. Dengan demikian, untuk melayani kebutuhan daya beban, maka jaringan listrik tersebut telah menyerap daya sebesar 386,88 MW yang merupakan total rugi daya pada interkoneksi yang menghubungkan titik beban dan pusat pembangkit. Selanjutnya Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan perubahan performansi selama 24 jam dengan cukup bervariasi dari jam ke jam, baik produksi daya; produksi polusi; ataupun perkembangan rugi daya. Berdasarkan kedua gambar tersebut, dapat diketahui bahwa produksi polusi dan perubahan pembangkit mengalami pergeseran yang dinamis, baik pada saat penurunan atau peningkatan volumenya akibat komposisi kombinasi daya pembangkit

yang berubah.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Sebagaimana telah disebutkan, bahwa artikel ini menjelaskan tentang aplikasi *thunderstorm algorithm* untuk menyelesaikan persoalan DPP, maka algoritma tersebut dapat diterapkan untuk menentukan tingkat produksi polusi pada sistem tenaga listrik. Hal ini ditujukan untuk mendapatkan solusi terbaik yang dinyatakan dalam penyediaan daya pembangkit; produksi polusi pembangkit; perubahan rugi daya; dan perkembangan perubahan volume, selama sistem beroperasi dalam durasi 24 jam. Berdasarkan rentang operasi tersebut, maka setiap pembangkit memiliki daya yang tidak sama dan bervariasi kapasitasnya, termasuk kondisi produksi polusi juga berbeda satu sama lainnya. Dari sisi perubahan, masing-masing memiliki penambahan dan pengurangan jumlah volume produksi dalam setiap jam beroperasi. Dari hasil ini, hal terpenting yang dapat dilakukan untuk riset mendatang adalah aplikasi pada interkoneksi sistem riil yang

lebih besar dan variasi standar polusi untuk menetapkan biaya kompensasi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Yunzhi Cheng, Weiping Xiao, Wei-Jen Lee and Ming Yang. 2009. A new approach for emissions and security constrained economic dispatch. Proc. NAPS IEEE Conference.
- R. Gopalakrishnan, A. Krishnan. 2011. A novel combined economic and emission dispatch problem solving technique using non-dominated ranked genetic algorithm. European Journal of Scientific Research.
- Mukesh Garg, Surender Kumar. 2012. A survey on environmental economic load dispatch using lagrange multiplier method. International Journal of Electronics & Communication Technology.
- B.H. Chowdhury, Saifur Rahman. 1990. A review of recent advances in economic dispatch. IEEE Trans. On Power Systems.
- A.N. Afandi. 2014. Optimal scheduling power generations using HSABC algorithm considered a new penalty factor approach. IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy.
- Ioannis G. Damausis, Anastasios G. Bakirtzis, Petros S. Dokopoulos. 2012. Network constrained economic dispatch using real coded genetic algorithm. IEEE Trans. Power Systems.
- Yong Fu, Mohammad Shahidehpour, Zuyi Li. 2006. AC contingency dispatch based on security constrained unit commitment. IEEE Transactions on Power Systems.
- Zeljko Bogdan, Mislav Cehil, Damir Kopjar. 2007. Power system optimization. Energy. P. Panciatici, M.C. Campi, S. Garatti, S.H. Low, D.K. Molzahn, A.X. Sun, L. Whenkel. 2014. Advanced optimization methods for power systems. Power System Computation Conference.
- Bishnu Sahu, Avipsa Lall, Soumya Das, T. Manoj Patra. 2007. Economic load dispatch in power system using genetic algorithm. International Journal of Computer Applications.
- Bommirani B., Thenmalar K. 2013. Optimization technique for the economic dispatch in power system operation, International Journal of Computer and Information Technology.
- I.A. Farhat, M.E. El-Hawary. 2009. Optimization methods applied for solving the short-term hydrothermal coordination problem. Electric Power System Research.
- A.N. Afandi, Hajime Miyauchi. 2014. Improved artificial bee colony algorithm considering harvest season for computing economic dispatch on power system. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering.
- A.N. Afandi, Hajime Miyauchi. 2014. Solving combined economic and emission dispatch using harvest season artificial bee colony algorithm considering food source placements and modified rates. International Journal on Electrical Engineering and Informatics.
- H. Shayeghi, A. Ghasemi. 2012. Application of MOFSO for economic load dispatch solution with transmission losses. IJTPE Journal.
- A.N. Afandi. 2015. Optimal solution of the EPED problem considering space areas of HSABC on the power system operation. International Journal of Engineering and Technology.