

# Unit Commitment dengan Kekangan Keandalan Menggunakan Algoritme Genetika Mempertimbangkan Ketidakpastian Beban

Sarjiya<sup>1</sup>, Sasongko Pramono Hadi<sup>2</sup>, Daniar Rizki Wijayanti<sup>3</sup>

**Abstract**—Unit commitment problem is associated with satisfying load demand and minimizing the total operating cost of the generating unit without violation of unit and system constraints. The solution of unit commitment should be reliable which has adequate spinning reserve in order to anticipate the uncertainty issue. This research proposes a method to handle two uncertainty issues, i.e. unit unavailability and load forecast uncertainty. The unit commitment problem is solved by genetic algorithm with priority list approach. The evaluation of spinning reserve capacity is based on probabilistic criterion by incorporating two reliability indices, i.e. loss of load probability (LOLP) and expected unserved energy (EUE). The effectiveness of the proposed method is tested using IEEE Reliability Test System-1996. The simulation results show that the proposed method is capable for solving unit commitment problem at total operational cost of \$ 722186.93 and risk index at 0.347% (while EUE 0.01%, LOLP 1% and standard deviation (SD) 5%). The simulation results also demonstrate that several solution of the method have slightly lower cost up to 0.43% than those obtained in benchmark which the solution based on Simulated Annealing method.

**Intisari**— Permasalahan penjadwalan pembangkit berkaitan dengan pemenuhan seluruh permintaan beban dan pencarian total biaya operasi pembangkitan yang optimal tanpa melanggar semua kekangan, baik kekangan unit dan kekangan sistem. Penjadwalan yang dilakukan harus memenuhi kriteria keandalan yaitu memiliki kapasitas cadangan berputar yang cukup untuk mengantisipasi kemungkinan kegagalan unit pembangkit. Pada makalah ini diajukan metode penyelesaian permasalahan penjadwalan pembangkit yang dapat mengantisipasi dua permasalahan, yaitu kemungkinan kegagalan pembangkit dan ketidakpastian peramalan beban. Permasalahan diselesaikan menggunakan Algoritme Genetika dengan pendekatan *priority list*. Evaluasi kapasitas cadangan berputar didasarkan pada kriteria probabilistik menggunakan dua indeks keandalan yaitu *loss of load probability (LOLP)* dan *expected unserved energy (EUE)*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diajukan mampu menyelesaikan permasalahan penjadwalan pembangkit secara baik yaitu dengan biaya \$722.186,93 dan indeks resiko rata rata sebesar 0,347%, yang diperoleh saat EUE 0,01%, LOLP 1%, dan standar deviasi (SD) 5%. Diharapkan beberapa solusi dengan total biaya operasi hingga 0,43% lebih baik dibandingkan

dengan hasil penelitian lain yang berbasis metode *Simulated Annealing* sebagai pembanding.

**Kata Kunci**— *unit commitment*, kekangan keandalan, ketidakpastian peramalan beban, algoritme genetika, *simulated annealing*, cadangan berputar, kriteria probabilistik, LOLP, EUE

## I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik dewasa ini telah menjadi kebutuhan primer untuk menyokong pertumbuhan ekonomi yang setiap tahunnya diharapkan terus meningkat. Karakteristik beban terkait kebutuhan energi listrik selalu berubah-ubah setiap harinya, sehingga daya yang dibangkitkan harus dapat diprediksi dan pembangkitan yang cukup harus dijadwalkan sedemikian rupa. *Unit commitment (UC)* merupakan metode optimasi untuk mendapatkan perencanaan penjadwalan pembangkitan dengan biaya seminimal mungkin. Di samping terpenuhinya beban dengan biaya minimal, penyelesaian UC juga harus menjamin tercapainya keandalan sistem. Penyelesaian UC dengan memperhitungkan kekangan keandalan berarti solusi perlu mempertimbangkan aspek-aspek penyebab ketidakpastian, baik berupa kemungkinan kegagalan unit pembangkit maupun ketidakpastian beban.

Untuk menjamin keandalan sistem tenaga listrik, kapasitas cadangan berputar atau *spinning reserve (SR)* harus dijadwalkan. Pada metode tradisional, persyaratan untuk SR menggunakan kriteria deterministik, dengan kelemahan berupa kemungkinan terjadinya *overscheduling* atau *underscheduling*. Penentuan SR berbasis kriteria probabilistik memungkinkan diperolehnya kapasitas pembangkit sesuai kebutuhan keandalan sistem [1]. Untuk memenuhi kebutuhan keandalan sistem, maka penentuan nilai SR dengan kriteria probabilistik juga harus mempertimbangkan karakteristik ketidakpastian dalam peramalan beban.

Penyelesaian permasalahan UC membutuhkan perhitungan nonlinear berskala besar yang sangat kompleks. Dalam perkembangannya, solusi UC yang mendekati nilai optimal sebenarnya didekati dengan menggunakan *artificial intelligence (AI)* berbasis *metaheuristic* seperti *simulated annealing* [2], *particle swarm optimization (PSO)* [3], algoritme genetika (AG), dan lain-lain. Metode AG sudah banyak digunakan dalam mencari penyelesaian UC, seperti dengan penambahan operator pada AG [4], [5] dan dengan mengkombinasikannya dengan metode *priority list* [6], [7].

Penelitian mengenai UC dengan kekangan keandalan saja telah dilakukan [8]. Telah diteliti juga pengaruh ketidakpastian peramalan beban (*Load forecast uncertainty/LFU*) dalam keandalan sistem [9]-[11]. Penelitian

<sup>1,2</sup> Staf pengajar Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika No.2 Kampus UGM, Sinduadi, Mlati, Sleman, Yogyakarta 55281, INDONESIA. (telp: 0274-552305); e-mail: sarjiya@ugm.ac.id

<sup>3</sup> Alumni, Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika No.2 Kampus UGM, Sinduadi, Mlati, Sleman, Yogyakarta, 55281, INDONESIA

mengenai UC dengan kekangan keandalan dan LFU menggunakan metode yang berbeda-beda, yaitu *simulated annealing*, *monte carlo*, dan *evolutionary algorithm* juga telah dilakukan [2], [12], [13]. Pada makalah ini akan dibahas penyelesaian UC menggunakan metode AG dengan penentuan SR berbasis kriteria probabilistik dan memperhatikan ketidakpastian beban.

## II. PERMASALAHAN UNIT COMMITMENT

*Unit commitment* merupakan proses pembuatan keputusan untuk menentukan penjadwalan pembangkit yang optimal (waktu hidup dan mati pembangkit) dan daya keluaran optimal setiap generator untuk meminimalkan total biaya operasi pada kurun waktu tertentu, biasanya 24 jam [14].

### A. Formulasi Fungsi Tujuan Unit Commitment

Formulasi fungsi tujuan dari permasalahan UC adalah meminimalkan total biaya (*total cost/TC*) yang terdiri atas dua elemen, yaitu biaya menghidupkan pembangkit (*start-up cost/SU*) dan biaya bahan bakar (*fuel cost/FC*) [15]. Dalam penyelesaian UC untuk memenuhi semua kekangan, fungsi tujuan dinyatakan sebagai jumlahan dari total biaya dengan penambahan penalti. Persamaan (2) suku kedua (*penalty*) merupakan penalti yang diberikan akibat terlanggarnya kekangan unit dan penalti kekangan indeks keandalan LOLP. Sementara itu, penalti atas pelanggaran kekangan indeks keandalan EUE dinyatakan dengan UVL yang dikalikan dengan *penalty multiplier* (PM) sehingga diperoleh  $PM \times UVL$  yang didasarkan pada [2].

$$TC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NG} (U_{i,t} \cdot FC_i(P_{i,t}) + U_{i,t} \cdot SU_{i,t}) \quad (1)$$

$$TC_{final} = TC + penalty + PM \times UVL \quad (2)$$

Pada (1) dan (2), notasi TC merupakan total biaya, FC adalah biaya bahan bakar, SU adalah biaya *start-up* pembangkit, U adalah status unit ON/OFF (1 jika status ON dan 0 jika status OFF), dan P adalah daya keluaran unit pembangkit. Notasi i dan t masing-masing menunjukkan unit ke-i dan jam ke-t. Formulasi persamaan fungsi biaya bahan bakar dapat dilihat pada (3) dan formulasi persamaan fungsi biaya *start-up* dapat dilihat pada (4).

$$FC_i(P_{i,t}) = a_i \cdot P_{i,t}^2 + b_i \cdot P_{i,t} + c_i \quad (3)$$

$$S_i(t) = U_i(t)(1 - U_i(t-1)) \left[ \alpha_i + \beta_i \left[ 1 - \exp(-X_i^{off}(t)/\tau_i) \right] \right] \quad (4)$$

Parameter a, b, dan c pada (3) merupakan koefisien biaya bahan bakar masing-masing unit pembangkit. Sementara itu, koefisien biaya *start-up* yang ditunjukkan pada (4) adalah  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\tau$ .

### B. Kekangan-kekangan pada Unit Commitment

Kekangan-kekangan yang dipertimbangkan dalam makalah ini meliputi kekangan sistem dan kekangan pada unit pembangkit.

$$\sum_{i=1}^{NG} (U_{i,t} \cdot P_{maks_i}) \geq D_t + SR_t \quad (5)$$

Persamaan (5) merupakan kekangan sistem yang menjelaskan bahwa total daya yang dibangkitkan unit pembangkit ( $U_{i,t} \cdot P_{maks_i}$ ) haruslah sama dengan jumlahan dari permintaan daya dari beban pada jam yang bersangkutan ( $D_t$ ) dan kapasitas cadangan berputar yang dibutuhkan ( $SR_t$ ). Selanjutnya, unit pembangkit memiliki batasan daya yang dibangkitkan yang dijelaskan pada (6).

$$P \min_i \leq P_{i,t} \leq P \max \quad (6)$$

Unit-unit pembangkit termal memiliki batasan dalam pengoperasiannya. Persamaan (7) merupakan batasan *minimum up time* ( $MUT_i$ ) dan *minimum down time* ( $MDT_i$ ) dengan  $X_i^{on}$  dan  $X_i^{off}$  merupakan waktu nyala dan mati pembangkit. Persamaan (8) merupakan fungsi *ramp up* ( $UR_i$ ) dan *ramp down* ( $DR_i$ ) dari pembangkit yang menjelaskan batasan penambahan dan pengurangan energi panas dari satu waktu ke waktu yang lain.

Untuk memenuhi kekangan keandalan, maka digunakan batasan maksimum indeks keandalan LOLP dan EUE untuk evaluasi kapasitas SR.

$$\begin{aligned} X_i^{on}(t) &\geq MUT_i, \\ X_i^{off}(t) &\geq MDT_i, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_i^{t-1} \leq P_i^t &\leq P_i^{t-1} + UR_i, \\ P_i^{t-1} \geq P_i^t &\geq P_i^{t-1} - DR_i \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} LOLP_t &\leq LOLP_{max}, \\ EUE_{total} &\leq EUE_{max}, \\ t &\in [1, T] \end{aligned} \quad (9)$$

## III. METODE PENENTUAN KEKANGAN KEANDALAN

Kekangan keandalan dibutuhkan dalam penyelesaian permasalahan UC untuk menentukan kapasitas SR pada tiap periode penjadwalan melalui metode probabilistik. Penggunaan indeks keandalan *loss of load* atau *loss of energy* merupakan teknik probabilistik yang digunakan dalam makalah ini. Indeks keandalan ini akan diatur nilai maksimumnya dan dipertimbangkan dalam kekangan pada permasalahan UC melalui (8).

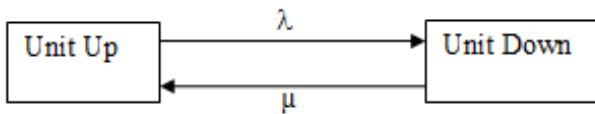
### A. Pemodelan Kegagalan Unit Pembangkit

Unit pembangkit pada makalah ini didekati dengan model yang terdiri atas dua keadaan yang ditunjukkan dalam Gbr. 1. Probabilitas pada unit yang gagal selama periode sistem pembangkitan tersebut tidak dapat digantikan direpresentasikan dalam formulasi *outage replacement rate* (ORR). Formulasi ini dijelaskan dalam (10), dengan  $\lambda$  adalah tingkat kegagalan yang diharapkan,  $\mu$  adalah tingkat perbaikan yang diharapkan, dan LT adalah *leadtime*.

Perhitungan probabilitas kehilangan beban karena kegagalan pembangkit dilakukan dengan *Capacity Outage Probability Table* (COPT). Tabel ini berisikan susunan level

kapasitas unit pembangkit serta probabilitas terjadinya dalam nilai ORR. Pembentukan tabel ini dilakukan berdasarkan [16].

$$U_i(LT) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} (1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)LT}) \quad (10)$$



Gbr. 1 Model dua keadaan sistem pembangkit [17].

**B. Perhitungan indeks keandalan LOLP dan EUE**

Indeks LOLP menyatakan probabilitas sistem pembangkit tidak dapat memenuhi permintaan peramalan beban. Sedangkan indeks EUE menyatakan energi yang diperkirakan tidak dapat dilayani oleh sistem pembangkit [2]. Formula perhitungan indeks EUE dan LOLP ditunjukkan dalam (11) dan (12).

Dengan nilai  $F_Y^t$  ( $y=P_r^t$ ) adalah probabilitas kumulatif dari  $y=P_r$  pada jam ke-t,  $CR_j$  adalah kapasitas pembangkit *in service* pada baris ke-j tabel COPT, dan  $PR_j$  adalah probabilitas individual pada baris ke-j tabel COPT. Pada makalah ini semua kapasitas *outage* yang probabilitas kumulatifnya kurang dari  $10^{-8}$  akan diabaikan.

$$LOLP_t = F_Y^t(y = P_r^t) \quad (11)$$

$$EUE_t = \sum_{j=1}^n PR_j LOSS_j (LOAD_t - CR_j) \quad (12)$$

$$LOSS_j = \begin{cases} 1, & \text{if } CR_j < LOAD_t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Untuk memasukkan kekangan EUE ke dalam permasalahan UC, maka setiap pelanggaran kekangan EUE diberikan penalti kuadratis UVL yang dituliskan dalam (13).

$$UVL = (EUE_{tot} - EUE_{max})^2 \quad (13)$$

UVL kemudian dikalikan dengan *dynamic penalty multiplier* dalam formulasinya. Besarnya *penalty multiplier* (PM) dituliskan dalam (14) [2].

$$\text{Penalti multiplier} = \min(P_{max}, inc^{generasi} \times PM) \quad (14)$$

PM yang digunakan nilainya rendah saat awal generasi AG dan nilainya akan meningkat seiring bertambahnya jumlah generasi hingga mencapai batas atasnya yaitu  $P_{max}$ . Pada generasi pertama, nilai inisial *penalty multiplier* diset bernilai 1. Semakin bertambahnya generasi, diberikan penambahan nilai yang disebut *inc* yang nilainya konstan lebih besar tetapi sangat dekat dengan 1. Penggunaan batas atas  $P_{max}$  dibutuhkan untuk menghindari peningkatan yang tak hingga dari *penalty multiplier*.

**C. Pemodelan Parameter Ketidakpastian Peramalan Beban**

LFU atau ketidakpastian peramalan beban dapat direpresentasikan dengan distribusi probabilitas yang

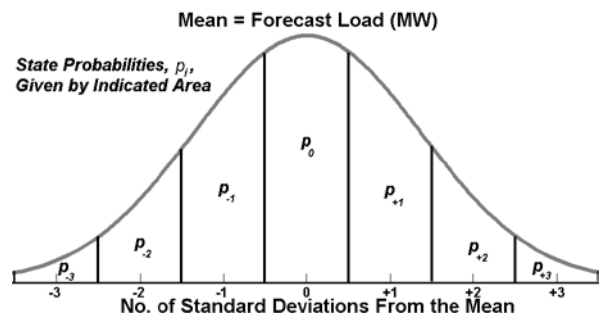
parameternya didapatkan dari kejadian masa lampau, pemodelan beban masa mendatang, dan evaluasi kemungkinan secara subjektif. Sangatlah sulit untuk mengumpulkan cukup data historis untuk mendapatkan distribusi LFU [10]. Beberapa peneliti menyarankan bahwa ketidakpastian dapat direpresentasikan dengan distribusi normal dengan rata-rata sebesar 0 dan standar deviasi (SD) biasanya sebesar 5% [9] - [13].

Probabilitas LFU dipotong-potong ke dalam interval kelas yang diskret. Daerah dari setiap interval kelas merepresentasikan probabilitas beban dapat terjadi dan nilai beban yang diramalkan direpresentasikan dengan nilai tengah kelas intervalnya. Pada makalah ini digunakan distribusi normal 7-step seperti yang digambarkan pada Gbr. 2. Interval kelas memiliki nilai -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 dan probabilitas beban dapat terjadi digambarkan sebagai luas wilayah dari P-1, P-2, P-3, P0, P1, P2, P3.

Besar resiko keandalan didapatkan dari perkalian antara indeks keandalan pada setiap beban yang direpresentasikan oleh interval kelas dengan probabilitas bebannya. Hal ini dirumuskan dalam (15).

$$\sum_{i=1}^m LOLP_i(m) PL_i(m) = LOLP_i \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m EUE_i(m) PL_i(m) = EUE_i$$



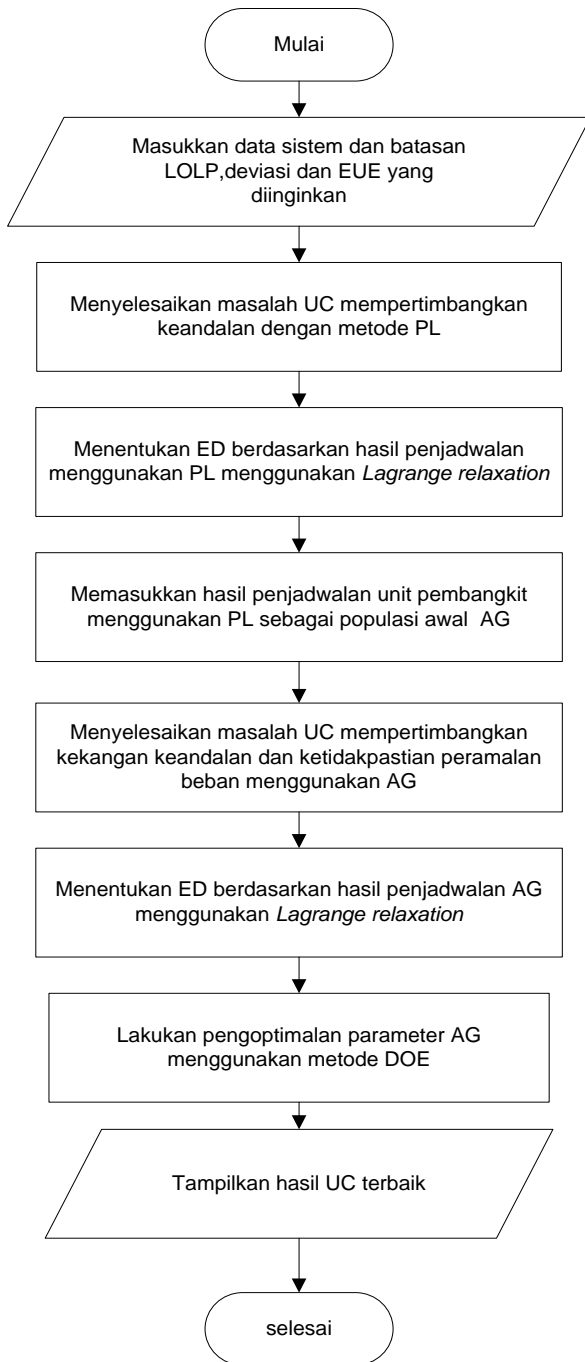
Gbr. 2 Pendekatan LFU dengan distribusi normal.

**IV. IMPLEMENTASI ALGORITME GENETIKA DALAM PENYELESAIAN PERMASALAHAN UC**

Penyelesaian permasalahan UC dibagi menjadi dua permasalahan utama yaitu permasalahan penjadwalan unit pembangkit dan permasalahan ED. Penjadwalan pembangkit menjadi permasalahan utama dan lebih dahulu diselesaikan untuk mendapatkan penjadwalan yang optimal, kemudian ditentukan besar daya optimal yang dibangkitkan melalui ED menggunakan metode *lagrange dispatch* berdasarkan [18]. Diagram alir penyelesaian masalah UC diperlihatkan pada Gbr. 3.

Seperti ditunjukkan pada Gbr. 3, langkah awal penyelesaian permasalahan UC ini adalah memasukkan data sistem uji, seperti data pembangkitan dan data beban aktif, ke dalam .m file dari MATLAB. Langkah kedua yaitu menyelesaikan permasalahan penjadwalan unit pembangkitnya dengan menggunakan metode *priority list* (PL). Melalui metode PL, solusi awal tidak perlu dibangkitkan secara acak, sehingga

kualitas dari solusi keseluruhan yang dihasilkan menjadi lebih efisien.



Gbr. 3 Penyelesaian UC berbasis Algoritme Genetika.

Permasalahan ED ketika menyelesaikan permasalahan penjadwalan unit pembangkit menggunakan metode AG dengan kode biner diselesaikan menggunakan metode *Lagrange relaxation*. Selanjutnya dilakukan pengoptimalan parameter AG menggunakan metode DOE sehingga didapatkan hasil penjadwalan yang paling baik dengan parameter AG yang paling optimal. Penjelasan lebih detail

mengenai metode PL, *lambda iteration*, dan AG dengan kode biner dijalankan, diberikan pada sub-bab selanjutnya.

AG merupakan suatu metode optimasi berbasis pengetahuan biosains yang mengadopsi sifat seleksi alam seperti sifat pindah silang, mutasi, pewarisan generasi atau keturunan, dan lain-lainnya. Metode AG yang digunakan dalam penyelesaian UC adalah metode AG dengan pengkodean biner. Metode AG digunakan hanya untuk menyelesaikan permasalahan penjadwalan. Komponen-komponen dari AG dapat dijelaskan sebagai berikut.

#### A. Inisialisasi Populasi

Populasi ke-1 dari AG dibangkitkan dari hasil penyelesaian UC dengan PL untuk mempercepat proses pencarian optimasi. Populasi lainnya dibangkitkan secara acak yang selanjutnya dilakukan perbaikan status agar tidak melanggar kekangan pada UC yang meliputi *minimum up time*, *minimum down time*, dan kekangan LOLP.

#### B. Evaluasi Individu

Pada evaluasi individu dilakukan pemberian penalti terhadap kromosom pada populasi yang masih melanggar kekangan.

#### C. Fungsi fitness

Fungsi *fitness* berupa total biaya operasi pembangkitan dan penalti-penalti akibat pelanggaran kekangan.

#### D. Elitisme

Terhadap hasil penjadwalan dengan biaya total operasi terkecil kemudian dilakukan penduplikatan kromosom terbaik agar pada generasi selanjutnya hasil penjadwalan ini tidak rusak akibat operasi dari AG.

#### E. Operator-operator pada AG

Operator-operator pada AG ini diaplikasikan pada setiap kromosom pada setiap generasi. Operator dalam AG di antaranya pindah silang dan mutasi. Pada makalah ini diberi tambahan operator pada AG yaitu operator *swap window* dan *window mutation* yang diterapkan pada seluruh kromosom AG serta *swap mutation*, *swap window hill climbing like*, *mutation hour*, dan *elit window mutation* yang hanya diterapkan pada kromosom individu terbaik.

### V. HASIL DAN ANALISIS

Dalam pengujian ini digunakan standar uji sistem IEEE - *Reliability Test System-1996* dengan 26 pembangkit dan periode penjadwalan selama 24 jam. Data beban dan data laju kegagalan pembangkit diambil dari [19]. Sedangkan probabilitas keridakpastian peramalan beban diambil dari [20]

Parameter AG didapatkan dengan mencoba beberapa kemungkinan secara *fractional factorial* melalui metode *design of experience* (DOE) berdasarkan [21]. Pencarian DOE dilakukan berdasarkan Tabel I.

Pengaruh nilai pendefinisian batasan parameter keandalan LOLP dan EUE, *leadtime*, dan standar deviasi dari LFU memiliki akibat yang signifikan dalam solusi UC. Oleh karena itu, dilakukan analisis variasi parameter keandalan.

TABEL I  
PENGUJIAN DOE 4 FAKTOR 2 LEVEL

Simbol				Kenyataan			
Uk. Populasi	Maks Generasi	Prob Pindah silang	Prob Mutasi	Uk. Populasi	Maks Generasi	Prob Pindah silang	Prob Mutasi
-1	-1	-1	-1	30	100	0,5	0,04
-1	0	0	0	30	200	0,7	0,08
-1	1	1	1	30	300	0,9	0,12
0	-1	0	1	40	100	0,7	0,12
0	0	1	-1	40	200	0,9	0,04
0	1	-1	0	40	300	0,5	0,08
1	-1	1	0	50	100	0,9	0,08
1	0	-1	1	50	200	0,5	0,12
1	1	0	-1	50	300	0,7	0,04

A. Pengaruh indeks keandalan LOLP dan EUE

Pengujian dilakukan menggunakan variasi nilai LOLPmax 1,5% dan EUEmax 0,05%, dengan nilai LOLPmax 1% dan EUEmax 0,01%. Nilai *leadtime* tetap yaitu sebesar 4 jam pada semua pengujian. Pengaruh kedua indeks keandalan ini terhadap total biaya operasi digambarkan pada Gbr. 4. Sedangkan Gbr. 5 menunjukkan nilai indeks resiko tiap jam terhadap variasi tingkat keandalan yang berbeda.

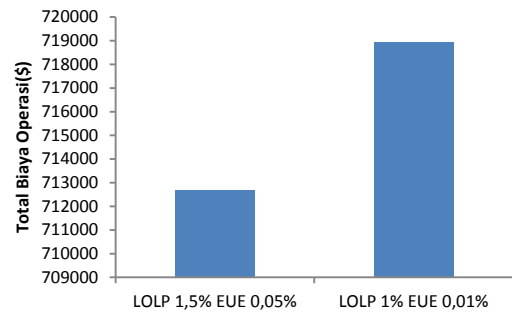
Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin kecil tingkat keandalan yang diinginkan, akan dibutuhkan lebih banyak unit pembangkit yang dinyalakan, yang mempengaruhi secara signifikan nilai total biaya operasinya dan indeks keandalan pada setiap jamnya. Terdapat *trade-off* antara keandalan sistem terhadap total biaya operasi pembangkitan. Semakin kecil indeks keandalan maksimum yang didefinisikan menyebabkan total biaya operasi yang semakin besar, namun indeks resiko sistem yang lebih kecil.

Pengaruh nilai indeks keandalan LOLP terhadap total biaya secara langsung dapat didekatkan dengan regresi linear agar didapatkan nilai kenaikan biaya terhadap setiap penurunan 0,1% LOLP, seperti diperlihatkan pada Gbr. 6. Penurunan 0,1% LOLP menyebabkan kenaikan biaya sebesar \$1270,5.

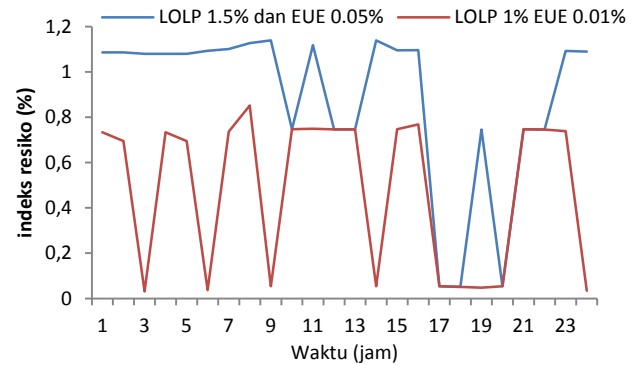
Pada saat EUE sebesar 0,05% dan LOLP sebesar 1,5%, didapatkan indeks resiko rata-rata sebesar 0,88%. Sedangkan saat EUE sebesar 0,01% dan LOLP sebesar 1%, didapatkan indeks resiko rata-ratanya adalah 0,48%. Nilai indeks resiko pada pengujian ini selalu lebih rendah dari nilai LOLP maksimum yang ditentukan di awal, menunjukkan bahwa penyelesaian UC dengan kekangan keandalan telah mencapai tingkat keandalan yang diinginkan.

B. Efek Variasi Leadtime

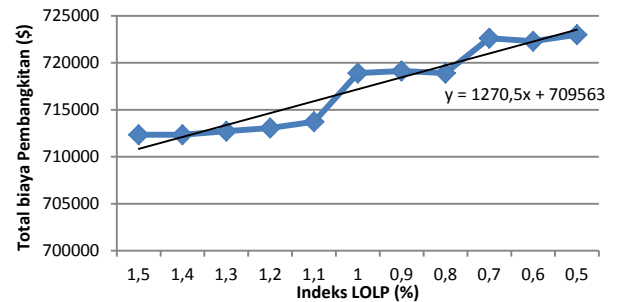
Untuk mendemonstrasikan efek variasi *leadtime* terhadap solusi unit commitment, batasan indeks keandalan diatur sama yaitu dengan LOLP 1,5% dan EUE 0,05%. Pada pengujian ini, ketidakpastian peramalan beban tidak diperhitungkan sehingga standar deviasi sebesar 0. Dapat dilihat besar total biaya operasi minimum Hasil simulasi tiap tiap percobaan *leadtime* pada Gbr. 7.



Gbr. 4 Perbandingan total biaya operasi terhadap variasi nilai EUE dan LOLP.



Gbr. 5 Indeks resiko per jam pada variasi nilai LOLP dan EUE.

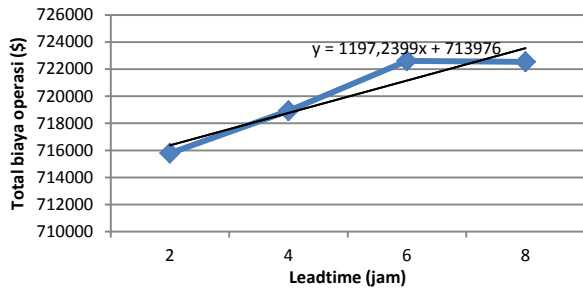


Gbr. 6 Grafik pengaruh penurunan indeks LOLP terhadap kenaikan biaya.

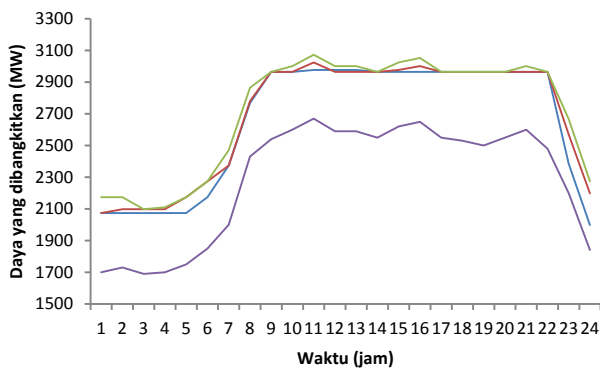
Kenaikan nilai *leadtime* menyebabkan kenaikan nilai ORR (probabilitas kegagalan sebuah pembangkit) pada masing-masing pembangkit. Hal ini akan mempengaruhi perhitungan nilai indeks resiko pada sistem, yang menyebabkan semakin tingginya resiko sistem mengalami kegagalan. Akibatnya, untuk mendapatkan nilai keandalan yang sama, perlu lebih banyak unit yang dinyalakan. Akibat perlunya penambahan unit, dengan kapasitas daya total pembangkit yang aktif akan semakin meningkat, dan dapat dilihat pada Gbr. 8. Penambahan kapasitas total ini akan mengakibatkan semakin tingginya nilai biaya operasi sistem. Kenaikan nilai *leadtime* sebesar 1 jam menyebabkan kenaikan biaya sebesar \$1197,239.

Besarnya nilai kapasitas pembangkit total yang aktif selain mempengaruhi total biaya operasi minimum, juga mempengaruhi besar indeks resikonya. Besar rata-rata indeks resiko pada saat *leadtime* 2h adalah 1,436%, sedangkan rata-

rata indeks resiko pada saat *leadtime* 4h adalah 1,062%, dan pada saat *leadtime* 8h adalah 1,047%. Semakin besar kapasitas pembangkit total yang aktif akibat meningkatnya nilai *leadtime*, maka indeks resiko pada jam tersebut akan semakin berkurang, sehingga sistem akan menjadi lebih handal

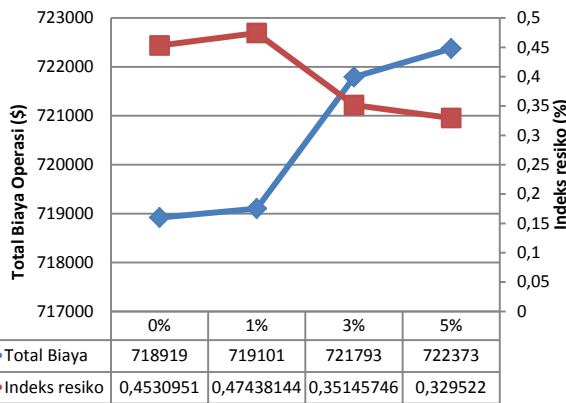


Gbr. 7 Diagram batang total biaya operasi dengan variasi nilai *leadtime*.



Gbr. 8 Grafik kapasitas pembangkit total yang aktif dan permintaan beban pada variasi *leadtime*.

— Leadtime 2 jam      — Leadtime 4 jam  
 — Leadtime 8 jam      — permintaan beban



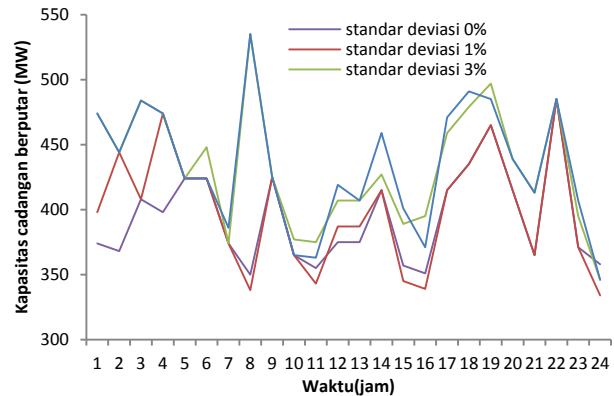
Gbr. 9 Perbandingan total biaya operasi dan indeks keandalan pada variasi standar deviasi.

**C. Efek Variasi Standar Deviasi pada Ketidakpastian Peramalan Beban**

Simulasi ini dilakukan dengan parameter EUE 0,01% dan LOLP 1%. Nilai *leadtime* pada semua simulasi ini adalah nilai tetap sebesar 4 jam. Variasi nilai dari standar deviasi akan mempengaruhi nilai dari total biaya operasi dan indeks resiko

sistem. Hal ini digambarkan dalam grafik pada Gbr. 9. Semakin besar nilai standar deviasi pada pemodelan ketidakpastian peramalan beban menyebabkan kenaikan total biaya pembangkitan dan penurunan indeks resiko rata-rata. Setiap kenaikan 1% standar deviasi akan menyebabkan kenaikan total biaya operasi sebesar \$744,96.

Standar deviasi menunjukkan sensitivitas kesalahan prakiraan beban, sehingga semakin tinggi nilai standar deviasi, diperlukan cadangan berputar yang lebih besar agar sistem dapat mengantisipasi melehetnya prakiraan beban pada skenario terburuk. Peningkatan kapasitas cadangan berputar mempengaruhi total biaya operasi dan indeks resiko sistem. Efek variasi standar deviasi terhadap kapasitas cadangan berputar dijelaskan pada Gbr. 10.



Gbr. 10 Perbandingan total biaya operasi dan indeks keandalan pada variasi standar deviasi.

**D. Komparasi Total Biaya Metode AG dengan Pendekatan PL terhadap Metode Acuan**

Pada pengujian ini, dilakukan dua jenis pengujian untuk menguji performa metode terhadap metode pada makalah acuan, yaitu metode *simulated annealing*. Jenis pengujian pertama yaitu komparasi total biaya terhadap variasi *leadtime*, yang ditunjukkan pada Tabel II. Pengujian kedua yaitu komparasi total biaya terhadap variasi standar deviasi ditunjukkan pada Tabel III.

Perlu diperhatikan bahwa persentase beda didapatkan dari perbandingan nilai total biaya yang paling minimum (*best cost*) antara dua metode yang telah disebutkan.

TABEL II  
 KOMPARASI TOTAL BIAYA DENGAN VARIASI LEADTIME

EUE (%)	LOLP (%)	SD (%)	LT (h)	Algoritma Genetika			Simulated Annealing			beda (best cost)
				Best Cost (\$)	Worst Cost (\$)	Av. Cost (\$)	Best Cost (\$)	Worst Cost (\$)	Av. Cost (\$)	
0,05	1,5	0	2	709112	709229	709164	708791	709421	709068	0,045
0,05	1,5	0	4	712680	712710	712698	712067	713473	712704	0,086
0,05	1,5	0	8	717585	718199	717887	720718	720966	720821	-0,43
0,01	1	0	2	715782	715953	715843	716083	717965	716831	-0,04
0,01	1	0	4	718920	718928	718923	718574	718827	718714	0,048
0,01	1	0	8	722532	722633	722593	723300	724253	723699	-0,11

Dari Tabel II dan Tabel III dapat diamati bahwa beberapa solusi dari metode AG lebih baik daripada metode yang dijadikan acuan yaitu *simulated annealing* dengan perbedaan



nilai hingga 1,14%, sedangkan beberapa lainnya memiliki solusi nilai total biaya minimum (*best cost*) yang masih lebih mahal daripada metode acuan. Namun, nilai maksimal dari total biaya pembangkitan (*worst cost*) pada metode AG lebih baik dibanding metode *simulated annealing*.

TABEL III  
KOMPARASI TOTAL BIAYA DENGAN VARIASI KETIDAKPASTIAN BEBAN

EUE (%)	LOLP (%)	SD (%)	LT (h)	Algoritma Genetika			Simulated Annealing			beda (best cost)
				Best Cost (\$)	Worst Cost (\$)	Av. Cost (\$)	Best Cost (\$)	Worst Cost (\$)	Av. Cost (\$)	
0,05	1,5	0	4	712680	712710	712698	712067	713473	712704	0,086
0,05	1,5	1	4	718199	718261	718223	712216	712638	712384	0,84
0,05	1,5	3	4	713802	714018	713875	713855	714390	714119	-0,01
0,05	1,5	5	4	716607	716632	716621	716862	717318	717098	-0,04
0,01	1	0	4	718920	718928	718923	718574	718827	718714	0,048
0,01	1	1	4	719102	719156	719120	718843	719334	719071	0,036
0,01	1	3	4	721794	722368	722837	722544	723107	722859	-0,1
0,01	1	5	4	722373	733641	726067	730675	731448	731027	-1,14

## VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian mengenai penyelesaian permasalahan UC dengan kekangan keandalan dan ketidakpastian peramalan beban, dapat diambil beberapa kesimpulan. Metode AG dengan pendekatan PL dapat menghasilkan beberapa solusi yang lebih baik dengan perbaikan sebesar 1,14% dibandingkan dengan metode *simulated annealing* pada penyelesaian masalah UC dengan kekangan keandalan mempertimbangkan ketidakpastian beban. Terdapat *trade-off* antara indeks keandalan sistem terhadap total biaya operasi pembangkitan. Pengaturan nilai parameter keandalan yang tepat dapat mengimbangi *output* antara total biaya operasi pembangkitan dan keandalan sistem, sehingga keduanya memiliki hasil yang baik. Analisis sensitivitas solusi UC terhadap perubahan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap besarnya biaya total menunjukkan bahwa pengetatan indeks LOLP sebesar 0,1% menyebabkan kenaikan total biaya sebesar \$1270,5. Selanjutnya, kenaikan nilai *leadtime* sebesar 1 jam menyebabkan kenaikan total biaya sebesar \$1197,239, sedangkan kenaikan standar deviasi sebesar 1% akan menyebabkan kenaikan total biaya operasi sebesar \$744,96.

## REFERENSI

- [1] D. Chattopadhyay and R. Baldick, "Unit Commitment With Probabilistic Reserve," hal. 280-285, 2002.
- [2] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatzas and C. D. Vournas, "Reliability Constrained Unit Commitment Using Simulated Annealing", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 4, 2006.
- [3] T. Ghanbarzadeh, S. Golejani and M. P. Moghaddam, "Reliability Constrained Unit Commitment with Electric Vehicle to Grid Using Hybrid Particle Swarm Optimization and Ant Colony Optimization", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [4] S. Kazarlis, A. Bakirtzis and V. Petridis, *A genetic Algorithm Solution to the Unit Commitment Problem*, vol. 11, no. No.1, 1996.
- [5] G. Sheble, T. Maifeld and K. Brittig, "Unit commitment by genetic algorithm with penalty methods and a comparison of Lagrangian search and genetic algorithm-economic dispatch example", *Int.J.Electr.Power Energy Syst*, vol. 18, pp. 339-346, 1996.
- [6] Sarjiya, A. B. Mulyawan and A. Sudiarso, "Unit Commitment Solution Using Genetic Algorithm based on Priority List Approach", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 28th February 2015, Vol. 72, No. 3 pp 394-403.
- [7] A. Setiawan, "Optimasi Penjadwalan Pembangkit Thermal Sistem Kelistrikan Jawa Bali tahun 2010 Menggunakan Algoritma Genetika", Universitas Gadjah Mada, 2012.
- [8] A. B. Mulyawan, "Network Constrained Unit Commitment Menggunakan Metode Algoritma Genetika Dengan Pendekatan Metode Priority List Mempertimbangkan Kekangan Keandalan", Universitas Gadjah Mada, 2014.
- [9] Bo Wang, You Li, and Junzo Watada, "Supply Reliability and Generation Cost Analysis Due to Load Forecast Uncertainty in Unit Commitment Problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 2242-2252, 2013.
- [10] N. V. Hernandez, "Load Forecast Uncertainty Consideration in Bulk Electrical System Adequacy Assessment," University of Saskatchewan, 2009.
- [11] R. Billinton and D. Huang, "Effects of Load Forecast Uncertainty on Bulk Electric System Reliability Evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 418-425, May 2008.
- [12] A. Trivedi, D. Sharma and D. Srinivasan, "Multi-objectivization of Short-Term Unit Commitment under Uncertainty using Evolutionary Algorithm", *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 2012.
- [13] D. Zhai, A. Breipohl, F. Lee and R. Adapa, "The Effect of Load Uncertainty on Unit Commitment Risk", *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 9, pp. 510-517, 1994.
- [14] P. Xiong and P. Jirutitijaroen, "A Stochastic Optimization Formulation of Unit Commitment With Reliability Constraints", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 4, 2013.
- [15] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, Control*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [16] *Module PE.PAS.U20.5 Operating reserve evaluation*, Power Learn Electric Power Engineering Education, 2012.
- [17] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Massachusetts: Pitman advanced Publishing Program, 1984.
- [18] N. R. Ramadhani, "Optimasi Penjadwalan Pembangkit Terminal Dengan Media Penyimpanan Energi Menggunakan Algoritma Genetika", Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2013.
- [19] C. Grigg, P. Wong and P. Albrecht, "The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, pp. 1010-1020, 1999.
- [20] R. Allan, R. Billinton and N. Abdel-Gawad, "The IEEE Reliability Test System - Extensions to and Evaluation of The Generating System", *IEEE Transactions on Power Systems*, 1986.
- [21] A. Sudiarso, *Design of Experiment #1*, in *Statistics for Industrial Engineers 2 1B*, 2012.