

# **Advance Game Theory Optimization Method for Generation Expansion Planning by Considering Computation Time and Uncertainty Factors**

Proposal Penelitian untuk Disertasi S-3

Program Studi S2 Teknik Elektro

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik



Diajukan oleh

Rizki Firmansyah Setya Budi

kepada

PASCASARJANA TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS GADJAH MADA

2018

**Proposal Penelitian**

**Advance Game Theory Optimization Method for Generation  
Expansion Planning by Considering Computation Time and  
Uncertainty Factors**

yang diajukan oleh  
Rizki Firmansyah Setya Budi

telah disetujui oleh:

Promotor

**Sarjiya, S.T., M.T., Ph.D.**

tanggal .....

Co-promotor

**Lesnanto Multa P., S.T., M.Eng., Ph.D.**

tanggal .....

Co-promotor

**Dr. Suparman**

tanggal .....

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

*Independent power producer* (IPP) adalah produsen listrik swasta yang dibentuk konsorsium untuk melakukan *power purchase agreement* (PPA) dengan PT. PLN dan untuk mengembangkan, membangun, memiliki serta mengoperasikan pembangkit listrik. PPA adalah perjanjian jual beli energi listrik antara IPP dengan PT. PLN[1]. Proses pembelian energi listrik yang dilakukan PT. PLN dari IPP dibagi menjadi tiga macam proses yaitu penunjukan langsung (*direct appointment*), pemilihan langsung (*direct selection*), dan lelang terbuka (*open tender*).

Data statistik PLN menunjukkan bahwa jumlah pembangkit dan energi yang dibangkitkan dari IPP semakin meningkat dari tahun ke tahun[2]–[6]. Jumlah ini akan terus meningkat seiring dengan kebijakan pemerintah yang mendorong peran swasta untuk ikut berpartisipasi dalam pengembangan sektor kelistrikan. Salah satu contoh kebijakan tersebut adalah program pembangkit listrik 35.000 MW dimana 25.904 MW direncanakan akan dibangun oleh IPP baik dengan proses penunjukan langsung ataupun lelang terbuka[7]. Data tersebut menunjukkan bahwa sektor pembangkitan energi listrik di Indonesia sudah mulai bergeser dari *regulated* menjadi *deregulated*.

Selain faktor keekonomian, beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam proses optimasi perencanaan pengembangan pembangkit adalah faktor keandalan sistem, faktor lingkungan khususnya emisi CO<sub>2</sub>, dan faktor ketidakpastian[8]–[11]. Dengan mempertimbangkan faktor tersebut, maka didapatkan sebuah perencanaan pengembangan pembangkit yang ekonomis, handal, dan ramah lingkungan.

Sebuah perencanaan pengembangan pembangkit tidak lepas dari adanya ketidakpastian. Hal tersebut disebabkan karena proses perencanaan tersebut menggunakan jangka waktu yang lama. Beberapa unsur ketidakpastian yang harus diperhatikan adalah ketidakpastian biaya investasi, biaya bahan bakar, biaya O&M, dan pasokan bahan bakar dan energi primer.

Ketidakpastian pada biaya investasi sangat berpengaruh terhadap proyek pembangunan yang membutuhkan biaya investasi yang besar seperti PLTN. Biaya

investasi PLTN mempunyai porsi sebesar kurang lebih 70% terhadap nilai *levelized cost of electricity* (LCOE) nya. Ketidakpastian pada biaya bahan bakar dan biaya O&M sangat berpengaruh terhadap proyek pembangunan pembangkit konvensional khususnya pembangkit fosil karena porsi terbesar LCOE berasal dari komponen biaya bahan bakar dan biaya O&M. Ketidakpastian pada pasokan bahan bakar dan energi primer akan sangat berpengaruh terhadap proyek pembangunan pembangkit *renewable energy* karena salah satu permasalahan dalam pembangunan pembangkit *renewable energy* adalah pasokan energi primer yang fluktuatif. Sebagai contoh pembangkit *renewable* yang memiliki ketidakpastian pasokan energi primer adalah PLTS, PLTBayu, dan PLTA. Ketidakpastian pada unsur-unsur tersebut akan berpengaruh terhadap keekonomian pembangkit sehingga jika ketidakpastian tersebut tidak diperhitungkan dalam sebuah metode optimasi, hasil optimasi yang didapatkan sangat dimungkinkan menjadi tidak optimum.

Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, maka diperlukan sebuah model optimasi pengembangan pembangkit yang dapat merepresentasikan proses penunjukan langsung ataupun lelang terbuka dengan tetap mempertimbangkan faktor keekonomian, lingkungan, keandalan sistem, dan ketidakpastian. Faktor ketidakpastian yang digunakan adalah faktor ketidakpastian biaya, pasokan bahan bakar dan pasokan energi primer. Diharapkan dengan model optimasi tersebut, akan didapatkan perencanaan yang lebih optimum dengan mempertimbangkan proses lelang, ketidakpastian, dan *multi objective function*.

Penelitian [12]–[21] menunjukkan bahwa *game theory*, *multi-period framework*, dan *bi-level optimization* dapat digunakan untuk proses optimasi pengembangan pembangkit dengan memperhatikan ketidakpastian pasar ketenagalistrikan. *Game theory* digunakan untuk proses optimasi dengan cara menirukan proses lelang. Penelitian [22]–[28] menunjukkan bahwa *tri-objective function* dapat digunakan untuk optimasi pengembangan pembangkit.

Penelitian [29] telah menggabungkan penggabungan antara *game theory*, *multi-period framework*, *bi-level optimization*, dan *tri-objective problem*. *Game theory* digunakan untuk merepresentasikan proses lelang dan penunjukan langsung

IPP. *Multi-period* digunakan untuk merepresentasikan rentang waktu pengembangan mulai dari tahun 2015-2035. *Multi-objective optimization method* digunakan untuk merepresentasikan aspek biaya, keandalan, dan emisi CO<sub>2</sub> yang dipertimbangkan dalam pengembangan pembangkit. Aspek biaya dan emisi CO<sub>2</sub> menggunakan fungsi nilai minimum untuk menentukan keoptimalan pembangkit, sedangkan aspek keandalan menggunakan nilai batas ( $\leq 0,274\%$ ) sehingga tidak dapat dijadikan satu dengan aspek biaya dan emisi CO<sub>2</sub>. *Bi-level optimization method* digunakan untuk memecahkan permasalahan perbedaan fungsi optimasi tersebut. Kekurangan dari metode optimasi tersebut adalah pada waktu komputasi dan belum adanya pertimbangan faktor ketidakpastian.

Penambahan faktor ketidakpastian tersebut akan menyebabkan proses komputasi menjadi lebih lama karena adanya peningkatan ukuran matriks. Permasalahan waktu komputasi tersebut perlu di atasi sehingga proses optimasi dapat diterapkan pada sistem kelistrikan dengan ukuran besar.

Oleh karena itu diperlukan pengembangan metode optimasi pada penelitian [29] sehingga dapat memasukkan unsur ketidakpastian dalam pencarian solusi yang optimum. Selain memasukkan unsur ketidakpastian, perbaikan waktu komputasi juga diperlukan, karena salah satu permasalahan pada metode optimasi tersebut adalah waktu komputasi. Beban komputasi pada penelitian [29] disebabkan karena ukuran matriks yang besar dan digunakan secara berulang kali dalam proses optimasi.

Dengan hasil penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh sebuah perencanaan pembangkit listrik yang lebih optimum dan sesuai dengan kondisi yang ada. Dengan perencanaan yang lebih tepat dan optimum tersebut, maka target pertumbuhan ekonomi dan target komposisi energi dalam kebijakan energi nasional (KEN) dapat lebih mudah tercapai. Hal tersebut disebabkan karena dengan perencanaan yang tepat dan optimum maka akan terciptat keamanan suplai energi yang berdampak langsung pada pertumbuhan ekonomi dan perencanaan yang tepat akan lebih mudah tercapai sehingga target komposisi energi dalam KEN lebih *feasible* untuk dicapai.

## 1.2. Perumusan Masalah

Sebuah metode optimasi pengembangan pembangkit yang dapat merepresentasikan proses lelang dan penunjukkan langsung IPP dengan mempertimbangkan *multi objective function* (ekonomis, handal, dan ramah lingkungan) dan faktor ketidakpastian diperlukan dalam proses perencanaan pengembangan pembangkit. Penelitian [29] telah melakukan penelitian tentang pembuatan sebuah metode optimasi dengan mempertimbangkan adanya faktor kepentingan pada proses lelang dan penunjukkan langsung *independent power producer* (IPP). Hasil penelitian tersebut adalah sebuah metode optimasi dengan menggunakan *game theory:multi-period framework multi-objective function*. Kekurangan metode optimasi tersebut adalah pada waktu komputasi dan belum adanya pertimbangan faktor ketidakpastian. Oleh karena itu diperlukan pengembangan metode optimasi *game theory:multi-period framework multi-objective function* sehingga dapat memperhitungkan faktor ketidakpastian dengan waktu komputasi yang lebih cepat.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah membuat sebuah metode optimasi yang merupakan pengembangan dari metode optimasi pada penelitian [29]. Pengembangan yang dilakukan adalah penggunaan faktor ketidakpastian dalam proses optimasi dan peningkatan waktu komputasi.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah diperolehnya metode *game theory:multi-period framework multi-objective function* yang dapat memperhitungkan faktor ketidakpastian dengan waktu komputasi yang lebih cepat. Dengan menggunakan metode tersebut diharapkan hasil perencanaan pembangkit listrik dapat lebih optimum dan sesuai dengan kondisi yang ada sehingga dapat mendukung pertumbuhan ekonomi dan target dalam KEN.

## 2. TINJUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

### 2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian [12] menunjukkan bahwa *game theory* dapat digunakan untuk proses optimasi pengembangan pembangkit dengan cara meniru proses lelang. Setiap pembangkit akan diberi nilai *pay off* yang digunakan untuk menentukan komposisi pembangkit yang akan dijadikan sebagai solusi optimal. Komposisi pembangkit yang mempunyai nilai *pay off* paling besar akan dijadikan sebagai solusi optimal.

Penggunaan *bi-level model* untuk pengembangan pembangkit listrik dengan mempertimbangkan pengaruh saluran transmisi dan kompetisi biaya investasi telah dilakukan pada penelitian [12]–[15]. Penelitian [12], [13] menggunakan model statis tanpa memperhitungkan faktor ketidakpastian. *Probabilistik dynamic programming model* telah digunakan untuk memecahkan permasalahan biaya investasi dengan mempertimbangkan ketidakpastian permintaan beban listrik[16]. Pengembangan pembangkit dengan *bi-level model* dengan mempertimbangkan ketidakpastian beban listrik dan penawaran kompetitor telah dilakukan pada penelitian[17]–[19]. *Hybrid dynamic programming/game framework* telah digunakan pada penelitian [20] untuk memecahkan permasalahan investasi dalam pengembangan pembangkit listrik. Pada penelitian [20], *cournot game* digunakan untuk memodelkan strategi produsen listrik di *spot market*. Penelitian [21] menggunakan *multi-period framework* untuk melakukan pengembangan pembangkit listrik dengan mempertimbangkan ketidakpastian pasar ketenagalistrikan. Permasalahan investasi pada penelitian [21] dimodelkan dengan *bi-level optimization problem*.

Sebagian besar model optimasi pembangkit listrik masih menggunakan *single-objective problem* sedangkan pada kenyataannya, pengembangan pembangkit listrik mempunyai beberapa tujuan yang harus dicapai seperti: meminimalkan biaya, meminimalkan dampak negatif ke lingkungan, memaksimalkan keandalan sistem, meminimalkan jumlah bahan bakar impor dan lain-lain[22]–[27]. Penelitian [28] telah menggunakan *tri-objective problem* dalam pengembangan pembangkit listrik yaitu: memaksimalkan energi yang dibangkitkan pembangkit, meminimalkan emisi CO<sub>2</sub>, dan meminimalkan biaya. Metode yang digunakan dalam penelitian [28] adalah

mengubah *multi-objective problem* menjadi *single objective problem* dengan menggunakan *linearization and parameterization approach*.

Berdasarkan penelitian [12]–[21] diperoleh bahwa *multi-period framework* dengan *bi-level optimization problem* dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ketidakpastian pasar ketenagalistrikan dalam rentang waktu yang telah ditentukan. *Game theory* dapat digunakan untuk proses optimasi pengembangan pembangkit dengan cara meniru proses lelang. Sedangkan dari penelitian [22]–[28] diperoleh bahwa *tri-objective problem* dapat digunakan dalam perencanaan pengembangan pembangkit listrik.

Penelitian [29] telah melakukan penelitian tentang pembuatan sebuah metode optimasi dengan mempertimbangkan adanya faktor kepentingan pada proses lelang dan penunjukkan langsung *independent power producer* (IPP). Penelitian [29] merupakan gabungan dari penelitian [12]–[28] tanpa memasukkan unsur ketidakpastian. Hasil penelitian tersebut adalah sebuah metode optimasi dengan menggunakan *game theory:multi-period framework multi-objective function*. *Game theory* digunakan untuk merepresentasikan proses lelang dan penunjukkan langsung IPP. *Multi-period* digunakan untuk merepresentasikan rentang waktu pengembangan. *Multi-objective optimization method* digunakan untuk merepresentasikan aspek biaya, keandalan, dan emisi CO<sub>2</sub> yang dipertimbangkan dalam pengembangan pembangkit. Aspek biaya dan emisi CO<sub>2</sub> menggunakan fungsi nilai minimum untuk menentukan keoptimalan pembangkit, sedangkan aspek keandalan menggunakan nilai batas ( $\leq 0,274\%$ ) sehingga tidak dapat dijadikan satu dengan aspek biaya dan emisi CO<sub>2</sub>. *Bi-level optimization method* digunakan untuk memecahkan permasalahan perbedaan fungsi optimasi tersebut.

Kekurangan metode optimasi pada penelitian [29] adalah pada waktu komputasi dan belum adanya pertimbangan faktor ketidakpastian. Oleh karena itu diperlukan pengembangan metode optimasi *game theory:multi-period framework multi-objective function* sehingga dapat memperhitungkan faktor ketidakpastian dengan waktu komputasi yang lebih cepat. Penelitian ini akan melakukan



pengembangan metode optimasi pada penelitian [29] sehingga dapat memasukkan faktor ketidakpastian dalam proses optimasi dan dalam waktu yang lebih cepat.

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat diperoleh *state of the art* dari penelitian ini. *State of the art* dari penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. *State of the art* Penelitian**

Penulis dan Tahun	Metode Penelitian	Dapat merepresentasikan skema lelang	Multi-objective	Multi-period	Bi-Level Optimization	Ketidakpastian	Mempercepat waktu komputasi
Ahn (1993) [13]	Preference-order dynamic programming	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
Kalika, Frant (1996) [14]	Multicriteria Optimization	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Tidak
Antunes, Martins, Brito (2004) [12]	Multiple objective mixed integer linear programming model	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
Murphy, Smeers (2005) [1]	Game theory : Non cooperative game	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak
Botterud, Ilic, Wangenstein (2005)[5]	Probabilistik dynamic programming model	Ya	Tidak	Ya	Tidak	Ya	Tidak
Kaymaz, Valenzuela, Park (2007) [2]	Game Theory: Cournot competition game	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak
Meza, Yildirim, Masud (2007) [11]	Multiperiod multiobjective GEP	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
Ruiz, Conejo (2009)[6]	Multiperiod network-constrained market-clearing algorithm	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak
Barforoushi, Moghaddam, Javidi, Sheikh-El-Eslami (2010) [9]	Hybrid dynamic programming/game framework (Cournot game)	Ya	Tidak	Tidak	Tidak	Ya	Tidak
Kazempour, Conejo, Ruiz	Game Theory using complementary	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Tidak

(2011) [7]	approach						
Kazempour, Conejo (2012) [8]	Game Theory using Benders Decomposition	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Tidak
Masud, Yildirim (2012)[15]	Multi-criteria decision making	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
Kazempour, Conejo, Ruiz (2013a, b) [3], [4]	Game Theory	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak
Hu, Huang, Cai, Sun (2014)[16]	Lower-side attainment degrees based inexact fuzzy chance-constraint	Tidak	Tidak	Ya	Tidak	Ya	Ya
Valinejad, Barforoushi (2015) [10]	Game theory based on dynamic stochastic MPEC	Ya	Tidak	Ya	Ya	Ya	Tidak
Chen, Huang, Fan (2015)[17]	Linearization and parameterization approach	Tidak	Ya	Ya	Ya	Tidak	Tidak
Rizki FSB, Sarjiya, and Sasongko PH (2017) [18]	Game Theory: Multi-period framework, Bi- level, and multi- objective	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Tidak
Penelitian ini	Advance Game Theory Optimization Method	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya

Untuk dapat memecahkan permasalahan dalam penelitian ini, maka diperlukan pencarian metode yang tepat. Dengan menggunakan metode yang tepat tersebut diharapkan dapat memasukkan unsur ketidakpastian dalam proses optimasi dan dapat mempercepat waktu komputasi.

*Parallel computation* adalah sebuah metode komputasi yang digunakan untuk mempercepat proses komputasi dengan membagi program yang ada menjadi master program dan beberapa *slave* program. Pada *slave program*, komputasi dapat dilakukan secara paralel dengan menggunakan beberapa processor yang berbeda

sehingga dapat mempercepat waktu. Penelitian [30]–[38] menunjukkan penggunaan *parallel computation* untuk mempercepat waktu komputasi. Persamaan beberapa penelitian tersebut adalah adanya pembagian program menjadi *master program* dan *slave program*. Pembagian tersebut berdasarkan ada tidaknya hubungan antara bagian program yang satu dengan yang lain. Program yang tidak saling berpengaruh dapat dipisah untuk dijalankan bersamaan dengan menggunakan processor yang berbeda. Karakteristik pada program optimasi dengan menggunakan *game theory* pada penelitian [29] adalah *sequential* dan saling berpengaruh satu sama lain sehingga *parallel computing* tidak dapat digunakan pada program optimasi pada penelitian tersebut.

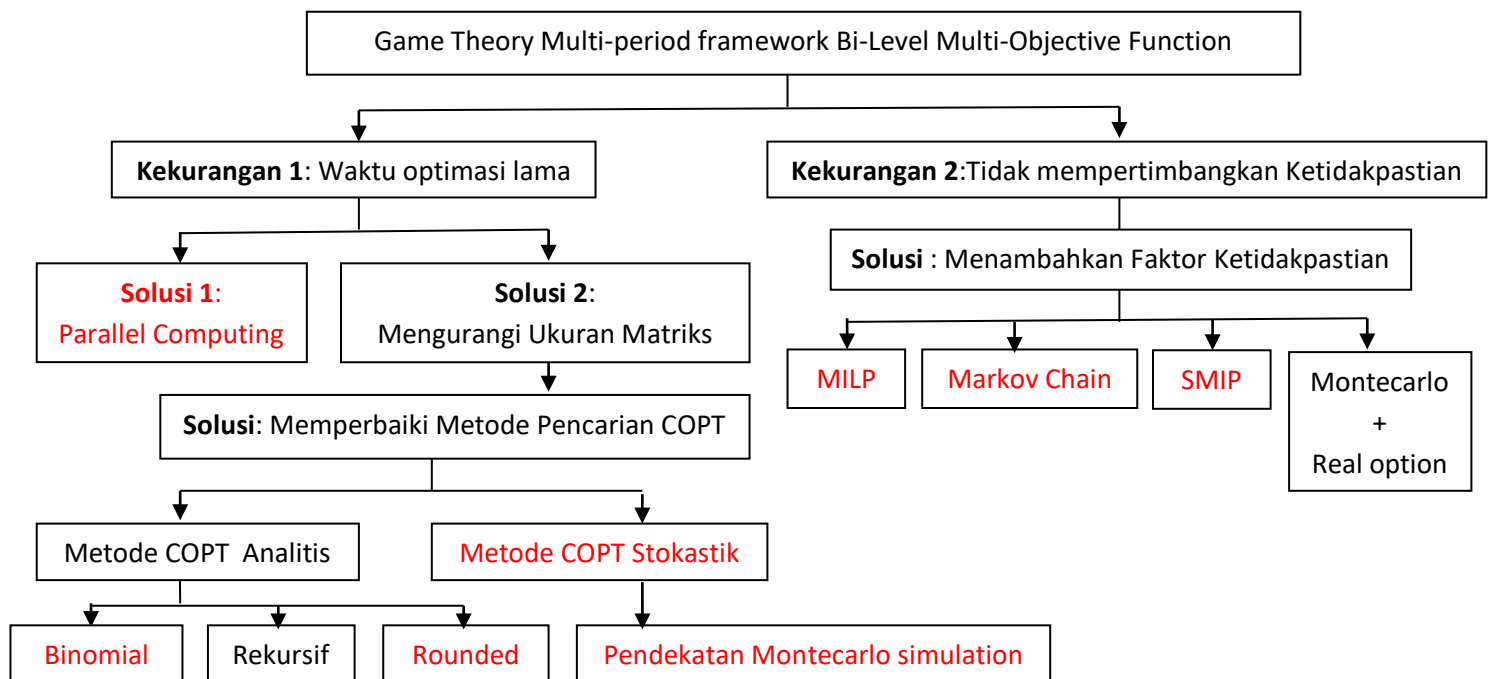
Penelitian [39]–[46] menunjukkan bahwa perhitungan LOLP khususnya dalam pembentukan COPT dapat menggunakan metode analitis dan stokastik. Metode analitis terdiri dari metode binomial, rounded, dan rekursif. Sedangkan metode stokastik dilakukan berdasarkan simulasi montecarlo. Berdasarkan hasil penelitian tersebut diketahui bahwa metode stokastik mempunyai waktu komputasi yang lebih cepat dibandingkan dengan metode analitis. Akan tetapi, hasil perhitungan metode stokastik mempunyai error yang lebih besar karena adanya proses pendekatan probabilitas. Metode binomial mempunyai waktu komputasi yang lebih cepat jika dibandingkan dengan metode binomial dan rekursif tetapi hasilnya mempunyai error yang lebih besar karena adanya proses pembulatan.

Penelitian [47]–[52] telah memperhitungkan pengaruh ketidakpastian pasokan energi primer, harga bahan bakar, biaya investasi, dan biaya O&M terhadap pengembangan pembangkit. Metode-metode yang digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian tersebut adalah *mixed integer linear programming* (MILP), *markov chain*, *stochastic mixed integer programming* (SMIP), dan *montecarlo simulation*. Pemodelan ketidakpastian dengan MILP pada dasarnya menggunakan prinsip optimasi pencarian kemiripan sebuah data dengan fungsi obyektif standar deviasi minimum. Data historis akan dimodelkan menjadi sebuah persamaan linear dengan menggunakan batasan, variabel, dan parameter tertentu. Berdasarkan persamaan dan fungsi obyektif tersebut maka akan dicari nilai dari

variabel yang akan memberikan standar deviasi minimum. Dengan kata lain ada sebuah proses pen-deterministik-an data historis yang merupakan hasil dari sebuah proses ketidakpastian. Hasil dari MILP ini adalah sebuah perkiraan data yang deterministik. Karakteristik dari metode *markov chain* adalah adanya hubungan sebab akibat antara sebuah ketidakpastian dengan ketidakpastian yang lain. Dan tidak semua kejadian ketidakpastian mempunyai hubungan sebab akibat. Prinsip dasar SMIP pada dasarnya sama dengan MILP, perbedaannya terletak pada tidak harusnya menggunakan persamaan linear dan parameter pada SMIP berupa data stokastik. *Monte carlo simulation* menggunakan angka acak yang dibangkitkan berdasarkan distribusi data historis. *Monte carlo simulation* banyak digunakan dalam analisis ketidakpastian karena dapat lebih tepat menggambarkan kejadian ketidakpastian dengan proses pembangkitan bilangan acak tersebut.

Penelitian [53]–[59] telah menggunakan metode *real option* untuk melakukan evaluasi kelayakan investasi yang dipengaruhi oleh faktor-faktor ketidakpastian. Dalam metode *real option*, investor tidak diwajibkan untuk mengambil sebuah keputusan investasi, tetapi investor akan diberikan alternatif-alternatif keputusan yang mungkin terjadi. Berdasarkan alternatif-alternatif ini, investor akan mempunyai fleksibilitas dalam menentukan pilihannya. Fleksibilitas untuk memilih inilah yang menjadi kelebihan dari metode *real option*. Dengan penggabungan *montecarlo simulation* dengan *real option*, maka dapat dilakukan pengambilan keputusan yang paling menguntungkan berdasarkan ketidakpastian yang mungkin terjadi.

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dilakukan, diperoleh kedudukan penelitian yang akan dilakukan dan metode yang dapat digunakan untuk memecahkan permasalahan dalam penelitian ini. Kedudukan penelitian dan metode yang dapat digunakan ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1. Kedudukan Penelitian dan Metode yang Digunakan untuk Memecahkan Permasalahan Penelitian**

Warna merah dalam Gambar 1 menunjukkan alternatif solusi yang dapat digunakan untuk memecahkan permasalahan pada penelitian [29] tetapi kurang tepat untuk digunakan. Berdasarkan Gambar 1 diketahui bahwa untuk memecahkan permasalahan waktu optimasi menggunakan metode recursive dalam perhitungan COPT. Sedangkan permasalahan ketidakpastian menggunakan metode monte carlo yang digabungkan dengan metode real option.

## 2.2. Dasar teori

Metode optimasi perencanaan pengembangan pembangkit yang digunakan pada penelitian [29] adalah *game theory* dengan *multi-period framework*, *bi-level*

*optimization*, dan *multi-objective function*. Fungsi obyektif yang digunakan pada penelitian tersebut adalah keekonomian, keandalan, dan emisi CO<sub>2</sub>. Fungsi obyektif dan emisi CO<sub>2</sub> merupakan fungsi optimasi mencari nilai minimum sehingga dapat dijadikan satu. Sedangkan fungsi obyektif keandalan adalah fungsi batasan sehingga tidak dapat dijadikan satu dengan keekonomian dan emisi CO<sub>2</sub>.

*Game theory* adalah sebuah model matematis yang digunakan untuk pengambilan keputusan pada saat terjadi konflik kepentingan diantara banyak pihak. *Game theory* melibatkan lebih dari satu pihak yang saling berpengaruh satu sama lain [60]. Kondisi optimum dalam *game theory* terjadi pada saat kondisi *nash equilibrium*. Kondisi *nash equilibrium* terjadi pada saat setiap pihak atau pemain tidak akan mengubah keputusannya tiap pemain sudah mendapatkan keuntungan yang maksimal pada saat *nash equilibrium*[61]. Pada *multi period framework*, *nash equilibrium* dicari pada tiap tahunnya. Proses pencarian tersebut dapat dilakukan dengan mudah menggunakan proses iterasi. Hasil dari iterasi pada tahun ke-n akan menjadi data masukan untuk iterasi ke n+1[21]. *Bi level optimization method* adalah salah satu metode yang digunakan dalam *game theory* untuk memecahkan permasalahan optimasi yang mempunyai dua level fungsi obyektif[21]. Penggunaan *bi level optimization* dapat memecahkan permasalahan fungsi obyektif keandalan yang berupa fungsi batasan dan fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO<sub>2</sub> yang fungsi optimasi mencari nilai minimum. Fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO<sub>2</sub> merupakan fungsi obyektif yang saling berlawanan. Hal tersebut disebabkan karena pada saat salah satu fungsi obyektif mencari titik optimum nya, fungsi obyektif yang lain akan menjadi tidak optimum. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan *multi objective fractional programming*. *Fractional programming* akan mengubah *multi objective function* menjadi *single objective function* dengan berdasarkan teorema Dinklebach dan pendekatan Guzel.

Fungsi obyektif keandalan yang digunakan dalam penelitian [29] adalah *lost of load probability* (LOLP). Persamaan (1) digunakan untuk menghitung indeks LOLP[37,40,41].

$$\text{LOLP} = \sum_{i=0}^n P_i t_i \quad (1)$$

Keterangan:

P = Probabilitas kumulatif kapasitas pembangkit

t = durasi kehilangan beban

Fungsi obyektif keekonomian yang digunakan dalam penelitian [29] adalah *levelized total cost*. Perhitungan *levelized total cost* dilakukan menggunakan persamaan (2). Fungsi obyektif emisi CO<sub>2</sub> yang digunakan dalam penelitian [29] adalah *levelized total CO<sub>2</sub> emission cost*. Perhitungan *levelized total CO<sub>2</sub> emission cost* dilakukan menggunakan persamaan (3).

$$Levelized\ Total\ Cost = \sum_{t=0}^n \left( \frac{Investment_t + O\&M_t + Fuel_t}{(1+r)^t} \right) \quad (2)$$

dengan

Investment<sub>t</sub> = Biaya investasi pada tahun ke t

O&M<sub>t</sub> = Biaya operasi dan pemeliharaan pada tahun ke t

Fuel<sub>t</sub> = Biaya bahan bakar pada tahun ke t

r = Discount rate

$$Levelized\ Total\ CO_2\ Emission\ Cost = \sum_{t=0}^n \left( \frac{CO_2\ emission\ cost_t}{(1+r)^t} \right) \quad (3)$$

dengan

CO<sub>2</sub> emission cost<sub>t</sub> = Biaya emisi CO<sub>2</sub> pada tahun ke t

r = Discount rate

Permasalahan pada metode optimasi yang digunakan pada penelitian [29] tersebut adalah waktu komputasi yang lama dan belum mempertimbangkan faktor ketidakpastian. Waktu komputasi dapat dipersingkat dengan memperkecil ukuran matriks. Ukuran matriks dapat diperkecil dengan menggunakan metode *recursive*

dalam perhitungan indeks LOLP khususnya pada perhitungan COPT nya. Perhitungan COPT dengan metode *recursive* dilakukan dengan melihat kondisi COPT sebelumnya. Dengan kata lain untuk penambahan pembangkit baru, COPT tidak dihitung dari awal lagi, COPT hanya dihitung dengan menambahkan pembangkit baru saja. Hal ini berbeda dengan cara perhitungan metode binomial. Metode binomial akan menghitung dari awal kembali setiap ada perubahan jumlah pembangkit[39], [46]. Perhitungan COPT dengan menggunakan metode *recursive* dilakukan menggunakan persamaan(4).

$$P(x) = (1 - U) P'(x) + U P'(x - c) \quad (4)$$

dengan

$P(x)$  = Probabilitas kumulatif pada saat kapasitas pembangkit  $x$  MW setelah adanya penambahan kapasitas  $c$  MW

$P'(x)$  = Probabilitas kumulatif pada saat kapasitas pembangkit  $x$  MW sebelum adanya penambahan kapasitas  $c$  MW

$U$  = *Forced outage rate* (FOR)

Permasalahan ketidakpastian akan diselesaikan dengan menggunakan metode *monte carlo* yang dikombinasikan dengan *real option*. Metode *monte carlo* menggunakan distribusi dari sebaran data historis. Berdasarkan data historis tersebut maka dapat diperoleh tipe distribusi data. Dengan menggunakan tipe distribusi data tersebut maka akan dibangkitkan data yang akan digunakan untuk analisis selanjutnya yaitu untuk menghitung nilai *levelized total cost* dan *levelized total CO<sub>2</sub> emission cost*. Kedua unsur biaya tersebut akan dijadikan satu dengan metode *dinkle bach* sehingga akan menghasilkan fungsi obyektif yang akan digunakan dalam proses optimasi. Akan tetapi hasil perhitungan fungsi obyektif dengan metode *monte carlo* tersebut berupa nilai sebaran beserta nilai probabilitas kejadiannya. Untuk menentukan opsi mana yang akan diambil sebagai solusi optimum maka digunakan metode *real option*. Berdasarkan sebaran nilai fungsi obyektif tersebut maka akan dapat diketahui kemungkinan-kemungkinan opsi yang dapat diambil beserta



keuntungan yang didapat. Dengan menggunakan pertimbangan dan skenario yang diinginkan maka dapat dipilih opsi yang paling optimum. Metode *real option* ini memberikan fleksibilitas untuk menentukan solusi yang paling optimum berdasarkan kondisi yang akan terjadi.

### **3. METODE PENELITIAN**

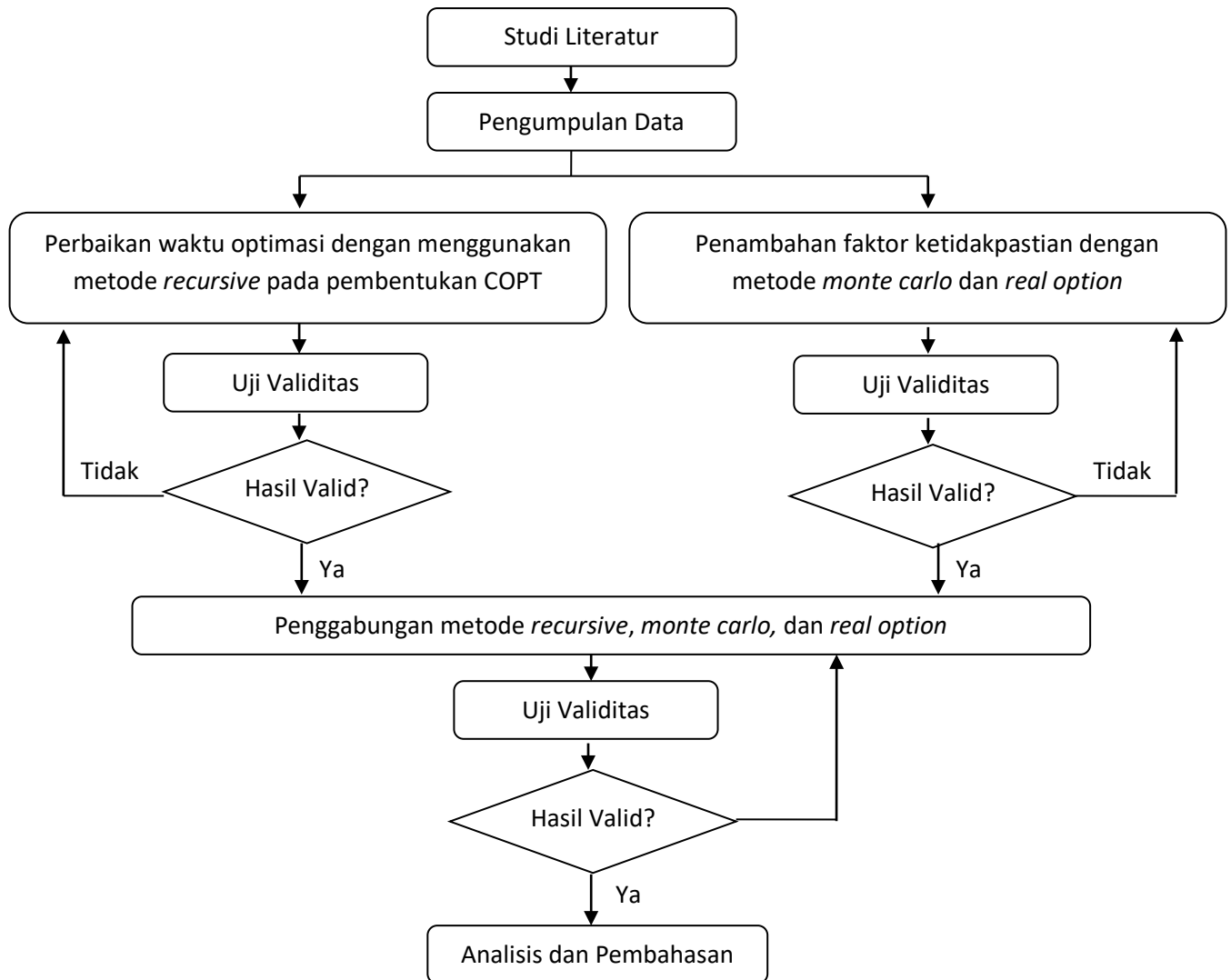
#### **3.1. Alat dan Bahan**

Peralatan yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah komputer berbasis *windows operating systems*, *microsoft word*, *microsoft excel*, dan program Matlab. *Microsoft word* digunakan untuk membuat laporan. *Microsoft excel* digunakan untuk mengolah data yang digunakan sebagai data input dalam program Matlab. Program Matlab digunakan untuk membuat *source code* optimasi pengembangan pembangkit. Komputer berbasis *windows operating systems* digunakan untuk menjalankan program-program di atas.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa data-data sekunder berupa data keekonomian pembangkit listrik, kebutuhan listrik, parameter teknis pembangkit, karakteristik beban listrik, bahan bakar, dan emisi CO<sub>2</sub>. Data-data tersebut dapat diperoleh dari PT.PLN (Pesero), Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, BATAN, dan penelitian sebelumnya.

#### **3.2. Metode dan Alur Penelitian**

Penelitian ini berjenis penelitian eksperimen dengan tujuan untuk membuat sebuah metode optimasi yang merupakan pengembangan dari metode optimasi pada penelitian [29]. Pengembangan yang dilakukan adalah penggunaan faktor ketidakpastian dalam proses optimasi dan peningkatan waktu komputasi. Eksperimen dilakukan dengan cara simulasi menggunakan program Matlab. **Gambar 2** menunjukkan *flowchart* penelitian yang dilakukan.



**Gambar 2. Flowchart Penelitian**

Studi literatur diperlukan untuk mendapatkan metode yang dapat digunakan untuk memecahkan permasalahan pada penelitian ini. Hasil dari studi literatur adalah metode yang dapat digunakan untuk mempercepat waktu komputasi dan memasukkan

faktor ketidakpastian. Proses selanjutnya yang dilakukan adalah mengumpulkan data-data sekunder yang dibutuhkan.

Pengumpulan data diperlukan karena data sekunder yang dibutuhkan tersebar di beberapa macam sumber. Setelah data-data tersebut dikumpulkan, maka dilakukan perbaikan waktu komputasi dengan metode *recursive* dan penambahan faktor ketidakpastian dengan metode *monte carlo* dan *real option*. Kedua proses tersebut dilakukan secara paralel. Jika hasil perbaikan waktu komputasi dan penambahan faktor ketidakpastian valid maka langkah selanjutnya akan dilakukan penggabungan kedua proses tersebut menjadi satu sehingga dapat memecahkan permasalahan metode optimasi penelitian [29]. Uji validitas dilakukan dengan cara membandingkan hasil pada penelitian ini dengan hasil pada penelitian sebelumnya.

Penggabungan kedua proses di atas, menghasilkan sebuah metode yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan pada metode optimasi penelitian [29]. Uji validitas hasil optimasi dilakukan dengan cara *benchmarking* terhadap hasil dari penelitian sebelumnya. Dengan uji validitas tersebut, dapat diketahui bahwa metode yang telah dibuat valid dan dapat digunakan.

Setelah hasil dinyatakan valid, maka selanjutnya akan dilakukan analisis dan pembahasan hasil. Analisis hasil optimasi tersebut akan dilakukan dengan kombinasi metode analisis trend dan analisis deskriptif. Analisis trend digunakan untuk menganalisa pola pertumbuhan kapasitas dan unit pembangkit, sedangkan analisis deskriptif digunakan untuk menjelaskan permasalahan, keunggulan, dan kekurangan dari hasil analisis trend yang telah dilakukan. Metode pembahasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah gabungan antara deskriptif kualitatif dan kuantitatif [48,49].

#### **4. JADWAL PENELITIAN**

Penelitian dilaksanakan mulai semester 1 tahun ajaran 2018/2019 hingga semester 8 tahun ajaran 2021/2017 dengan rincian waktu seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Jadwal Rencana Penelitian**

No	Deskripsi Kegiatan	2018/2019		2019/2020		2020/2021		2021/2022	
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.	<i>Literature Review</i>								
2.	Identifikasi Permasalahan								
3.	Penyusunan Proposal								
4.	Perbaikan waktu optimasi								
5.	Memasukkan faktor ketidakpastian								
6.	Penggabungan perbaikan waktu optimasi dengan faktor ketidakpastian								
7.	Uji validitas model								
8.	Analisis dan pembahasan								
9.	Penulisan Laporan Penelitian								

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT PLN, “Buku IPP,” 2015. [Online]. Available: <http://www.pln.co.id/wp-content/uploads/2011/03/Buku-IPP.pdf>. [Accessed: 01-Dec-2015].
- [2] PT PLN, *Statistik PLN 2011*. Jakarta: PT. PLN, 2012.
- [3] PT PLN, *Statistik PLN 2012*. Jakarta: PT. PLN, 2013.
- [4] PT PLN, *Statistik PLN 2013*. Jakarta: PT. PLN, 2014.
- [5] PT PLN, *Statistik PLN 2014*. Jakarta: PT. PLN, 2015.
- [6] PT PLN, *Statistik PLN 2015*. Jakarta: PT. PLN, 2016.
- [7] PT PLN, “35.000 MW untuk Indonesia,” *PT PLN (Persero)*, 2015. [Online]. Available: <http://www.pln.co.id/?p=12187>. [Accessed: 02-Sep-2016].
- [8] “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Pesero) Tahun 2017-2026.” 2017.
- [9] P. Rocha, T. K. Das, V. Nanduri, and A. Botterud, “Impact of CO<sub>2</sub> cap-and-trade programs on restructured power markets with generation capacity investments,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 71, pp. 195–208, 2015.
- [10] M. Benidris, S. Elsaiah, and J. Mitra, “An emission-constrained approach to power system expansion planning,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 81,

pp. 78–86, 2016.

- [11] S. Rebennack, “Generation expansion planning under uncertainty with emissions quotas,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 78–85, 2014.
- [12] F. H. Murphy and Y. Smeers, “Generation Capacity Expansion in Imperfectly Competitive Restructured Electricity Markets,” *Oper Res*, vol. 53(4), no. August 2005, pp. 646–661, 2005.
- [13] P. Kaymaz, J. Valenzuela, and C. S. Park, “Transmission congestion and competition on power generation expansion,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 156–163, 2007.
- [14] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, “Generation investment equilibria with strategic producers-Part I: Formulation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2613–2622, 2013.
- [15] S. J. Kazempour, S. Member, A. J. Conejo, and C. Ruiz, “Generation Investment Equilibria With Strategic Producers — Part II: Case Studies,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2623–2631, 2013.
- [16] A. Botterud, M. D. Ilic, and I. Wangenstein, “Optimal investments in power generation under centralized and decentralized decision making,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 254–263, 2005.
- [17] C. Ruiz and A. J. Conejo, “Pool strategy of a producer with endogenous formation of locational marginal prices,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1855–1866, 2009.
- [18] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, “Strategic generation investment using a complementarity approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 940–948, 2011.
- [19] S. J. Kazempour and A. J. Conejo, “Strategic generation investment under uncertainty via Benders decomposition,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 424–432, 2012.
- [20] T. Barforoushi, M. P. Moghaddam, M. H. Javidi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, “Evaluation of regulatory impacts on dynamic behavior of investments in electricity markets: A new hybrid DP/GAME framework,” *IEEE Trans. Power*

*Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1978–1986, 2010.

- [21] J. Valinejad and T. Barforoushi, “Generation expansion planning in electricity markets: A novel framework based on dynamic stochastic MPEC,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 70, pp. 108–117, 2015.
- [22] J. L. C. Meza, M. B. Yildirim, and A. S. M. Masud, “A model for the multiperiod multiobjective power generation expansion problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 871–878, 2007.
- [23] C. H. Antunes, A. G. Martins, and I. S. Brito, “A multiple objective mixed integer linear programming model for power generation expansion planning,” *Energy*, vol. 29, no. 4, pp. 613–627, 2004.
- [24] B. H. Ahn, “Multicriteria Generation-Expansion Planning with Global Environmental Considerations,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 40, no. 2, pp. 154–161, 1993.
- [25] V. Kalika and S. Frant, “Methodology of power generation system planning: multicriteria optimization accounting for uncertainty factors,” in *Proceedings of 19th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 1996, pp. 91–93.
- [26] A. S. M. Masud and M. B. Yildirim, “Three Multiple Criteria Models for Power Generation Expansion Planning : A Review,” *Manuf. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 1146–1151, 2012.
- [27] Q. Hu, G. H. Huang, Y. P. Cai, and W. Sun, “Planning of electric power generation systems under multiple uncertainties and constraint-violation levels,” *J. Environ. Informatics*, vol. 23, no. 1, pp. 55–64, 2014.
- [28] F. Chen, G. Huang, and Y. Fan, “A linearization and parameterization approach to tri-objective linear programming problems for power generation expansion planning,” *Energy*, vol. 87, pp. 240–250, 2015.
- [29] R. F. S. Budi, “Optimasi Pengembangan Pembangkit Sistem Kelistrikan Jawa-Madura-Bali Menggunakan Game Theory: Multi-period Framework, Bi-level, dan Multi-objective Optimization Method,” 2017.
- [30] H. Wang, Z. Lu, H. Zhao, and H. Feng, “Application of Parallel Computing in

- Robust Optimization Design Using MATLAB,” in *Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, 2015, pp. 1228–1231.
- [31] Y. Cao and D. Sun, “A Parallel Computing Framework for Large-Scale Air Traffic Flow Optimization,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 1855–1864, 2012.
  - [32] J. C. Moreira, E. Miguez, C. Vilacha, and A. F. Otero, “Large-Scale Network Layout Optimization for Radial Distribution Networks by Parallel Computing: Implementation and Numerical Results,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 3, pp. 1468–1476, 2012.
  - [33] A. A. Eroftiev, N. E. Timofeeva, and A. N. Savin, “Parallel Computing in Application to Global Optimization Problem Solving,” in *the 34th International Convention MIPRO*, 2011, pp. 185–190.
  - [34] K. Mohamed and O. Mohamed, “Parallel Computing in Heterogeneous Machines Based on the CPU Donation Approach,” in *First International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS)*, 2017, pp. 1–6.
  - [35] R. Reddy, N. Kompala, and N. R. Chowdary, “Digital image processing through parallel computing in single-core and multi-core systems using MATLAB,” in *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2017, pp. 462–465.
  - [36] G. Panpan, “An Algorithm of Functional Gradient Thermal Barrier Coating Material Running on Parallel Computing,” in *16th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science (DCABES)*, 2017, pp. 233–236.
  - [37] E. Araujo, M. A. Stefanos, V. de O. Ferlete, and L. C. S. Rozante, “Multiple Sequence Alignment using Hybrid Parallel Computing,” in *IEEE 17th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering Multiple*, 2017, pp. 1–8.
  - [38] L. Wang and C. Singh, “Reliability evaluation of composite power systems

using parallel genetic algorithms: Some conceptual and simulation studies,” in *EEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009, pp. 1–7.

- [39] A. H. Hashim, S. E. H. Chan, and M. T. Au, “A Combined Probabilistic and Deterministic Method for An Improved Capacity Outage Probability Table Synthesis using Monte Carlo Methods,” in *3rd International Conference on Energy and Environment*, 2009, pp. 140–144.
- [40] K. Chaiamarit and S. Nuchprayoon, “An Approximated Multi State Model for Reliability Evaluation of Renewable Generation,” in *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2016, pp. 1–6.
- [41] Z. Shu, P. Jirutitijaroen, and B. Bordeeerath, “Reliability Evaluation of Composite Power Systems Using Sequential Simulation with Latin Hypercube Sampling,” in *Power Systems Computation Conference*, 2014, pp. 1–6.
- [42] M. Parvania, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and A. Abiri-Jahromi, “Reliability-Constrained Unit Commitment Using Stochastic Mixed-Integer Programming,” in *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2010*, 2010, pp. 200–205.
- [43] M. Yang, F. L. Cheng, X. S. Han, B. Yang, and X. X. Meng, “A Fast Heuristic Algorithm for Maximum LOLP Constrained Unit Commitment,” in *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia*, 2012, pp. 1–6.
- [44] X. Luo, C. Singh, and Q. Zhao, “Loss-of-Load Probability Calculation Using Learning Vector Quantization,” in *International Conference on Power System Technology*, 2000, pp. 1707–1712.
- [45] P. Yang, C. Zhu, L. Zhao, M. Wang, Y. Liu, and X. Ning, “Spinning Reserve Optimization Based on Unit Commitment with Loss-of-load-probability Constraint,” in *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference*, 2016, pp. 1409–1412.
- [46] K. A. Pinanditho, “Evaluasi Perencanaan Keandalan Pembangkit Wilayah Jawa-Bali dengan Mempertimbangkan Ketidakpastian Beban,” 2016.
- [47] A. Baharvandi, J. Aghaei, T. Niknam, M. Shafie-khah, R. Godina, and J. P. S.



- Catalao, “Bundled Generation and Transmission Planning under Demand and Wind Generation Uncertainty based on a Combination of Robust and Stochastic Optimization,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, pp. 1–9, 2018.
- [48] D. Apostolopoulou, Z. De Gr, and M. Mcculloch, “Robust Optimisation for Hydroelectric System Operation under Uncertainty,” *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–8, 2018.
- [49] P. Yin and S. Chen, “Simulation Evolution and Optimization for PV Solar Farm Configuration Under Weather and Soiling Uncertainty,” in *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2017, pp. 1–7.
- [50] E. Gil, I. Aravena, and R. Cárdenas, “Generation Capacity Expansion Under Hydro Uncertainty Using Stochastic Mixed Integer Programming and Scenario Reduction,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 1–10, 2015.
- [51] R. E. Oviedo-Sanabria and R. A. González-Fernández, “Short-term Operation Planning of The Itaipu Hydroelectric Plant Considering Uncertainties,” in *19th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2016, pp. 1–6.
- [52] G. Locatelli and M. Mancini, “Small-medium sized nuclear coal and gas power plant: A probabilistic analysis of their financial performances and influence of CO<sub>2</sub>cost,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 10, pp. 6360–6374, 2010.
- [53] G. R. T. Esteves and I. M. S. Leite, “Solar Energy for Decentralized Energy Supply : A Real Option Approach,” in *14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2017, pp. 1–6.
- [54] J. Han, J. Xiang, J. Zhang, and G. Hua, “Dual Sourcing Problem with Real Option,” in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2016, pp. 481–486.
- [55] B. Zou, J. Wang, and F. Wen, “Optimal Investment Strategies for Distributed Generation in Distribution Networks with Real Option Analysis,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 3, pp. 804–813, 2017.
- [56] M. Mancini, R. Sala, D. Tedesco, and A. Travaglini, “A Real Options Investment Model for the Evaluation of Wind and Photovoltaic Plants,” in *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering*

*Management (IEEM)*, 2016, pp. 1101–1105.

- [57] A. C. Passos, A. Street, L. A. Barroso, S. Member, and C. Constants, “A Dynamic Real Option-Based Investment Model for Renewable Energy Portfolios,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 883–895, 2017.
- [58] R. Pringles, F. Olsina, and F. Garcés, “Power Transmission Investment under Uncertainty : A Real Option Framework,” in *18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, 2015, pp. 1–7.
- [59] M. Osthues, G. Blanco, C. Rehtanz, M. Negnevitsky, and M. C. Simulation, “Real Options on Power System Planning under Uncertainties and Efficiency Constraints,” in *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2014, pp. 1–7.
- [60] T. L. Turocy, B. Von Stengel, and B. von Stengel, “Game Theory,” 2001.
- [61] B. Chatterjee, “An optimization formulation to compute Nash equilibrium in finite games,” in *2009 Proceeding of International Conference on Methods and Models in Computer Science (ICM2CS)*, 2009.