

**Pemodelan *Modified Game Theory* untuk Perencanaan
Pengembangan Pembangkit dengan Mempertimbangkan Faktor
Ketidakpastian
Studi Kasus: Sistem Kelistrikan Jawa Bali**

Proposal Penelitian untuk Disertasi S-3

Program Studi S3 Teknik Elektro

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik



Diajukan oleh

Rizki Firmansyah Setya Budi

kepada

PASCASARJANA TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS GADJAH MADA

2019

**Pemodelan *Modified Game Theory* untuk Perencanaan Pengembangan Pembangkit
dengan Mempertimbangkan Faktor Ketidakpastian
Studi Kasus: Sistem Kelistrikan Jawa-Bali**

**Proposal Disertasi untuk memperoleh
derajat Doktor dalam ilmu Teknik Elektro pada
Universitas Gadjah Mada**

**Dipertahankan di hadapan Dewan Penguji Program Pascasarjana
Teknik Elektro, Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Pada tanggal: 7 Agustus 2019**

**Oleh
Rizki Firmansyah Setya Budi**

**Lahir
di Yogyakarta**

HALAMAN PERSETUJUAN

Tim Promotor menyetujui naskah disertasi:

Nama : Rizki Firmansyah Setya Budi

NIM : 18/435491/STK/00694

Judul : Pemodelan Modified Game Theory untuk Perencanaan Pengembangan Pembangkit
dengan Mempertimbangkan Faktor Ketidakpastian Studi Kasus: Sistem Kelistrikan
Jawa-Bali

yang telah diperbaiki sesuai saran dari Tim Penguji Ujian Komprehensif.

Tanda Tangan

Tanggal

Sarjiva, S.T., M.T., Ph.D.

Promotor

.

Prof. Dr. Ir. Sasongko Pramono Hadi, DEA

Ko-Promotor

.

HALAMAN PERSETUJUAN

Tim Penguji menyetujui naskah disertasi:

Nama : Rizki Firmansyah Setya Budi

NIM : 18/435491/STK/00694

Judul : Pemodelan Modified Game Theory untuk Perencanaan Pengembangan Pembangkit
dengan Mempertimbangkan Faktor Ketidakpastian Studi Kasus: Sistem Kelistrikan
Jawa-Bali

yang telah diperbaiki sesuai saran dari Tim Penguji Ujian Komprehensif.

Tanda Tangan

Tanggal

Hanung Adi Nugroho, S.T., M.E., Ph.D.

Ketua Tim Penguji

.....

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

Anggota Tim Penguji

.....

Prof. Dr. Ir. Sasongko Pramono Hadi, DEA

Anggota Tim Penguji

.....

Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D.

Anggota Tim Penguji

.....

Lesnanto Putra Multanto, S.T., M.Eng., Ph.D.

Anggota Tim Penguji

.....

Dr.Eng. F. Danang Wijaya, S.T., M.T.

Anggota Tim Penguji

.....

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
DAFTAR ISI	iv
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	14
1.3. Tujuan Penelitian	16
1.4. Manfaat Penelitian	16
2. TINJUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	17
2.1. Tinjauan Pustaka.....	17
2.1.1. <i>Metode optimasi untuk deregulated market</i>	17
2.1.2. <i>Multi-objective optimization</i>	20
2.1.3. <i>Ketidakpastian dalam Perencanaan Pengembangan Pembangkit</i> ...	22
2.1.4. <i>Perbandingan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya</i>	25
2.2. Dasar teori.....	34
2.2.1. <i>Fungsi Obyektif dan Kekangan dalam Perencanaan Pengembangan Pembangkit</i>	34
2.2.2. <i>Game Theory Optimization Method</i> [121].....	38
2.2.3. <i>Forward Moving Approach and Block Mechanism Method</i>	46
2.2.4. <i>Algoritma Genetik</i> [133]	47
2.2.5. <i>Montecarlo simulation</i>	53
2.2.6. <i>Pemodelan output PLTBayu berdasarkan kecepatan angin</i>	55
2.2.7. <i>Pemodelan output PLTS berdasarkan iradiasi dan temperature</i>	56
2.3. Hipotesis	57

3.	METODE PENELITIAN	58
3.1	Alat dan Bahan.....	58
3.2	Metode dan Alur Penelitian	58
3.2.1	<i>Pemodelan Ketidakpastian</i>	61
3.2.2	<i>Pemodelan Modified Game Theory</i>	65
4.	JADWAL PENELITIAN	69

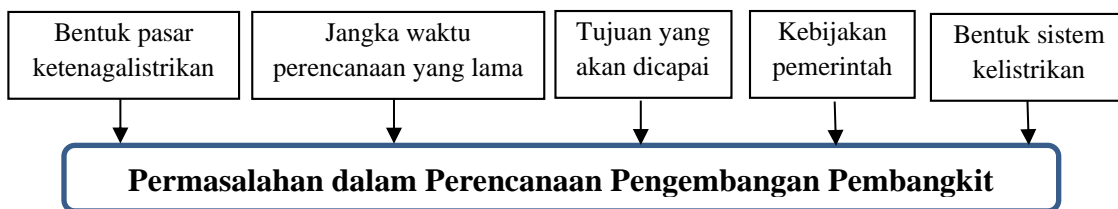
1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perencanaan pengembangan pembangkit merupakan sebuah topik penelitian yang telah dimulai sejak tahun 1950. Model optimasi pertama kali yang digunakan dalam perencanaan pengembangan pembangkit adalah *linear programming*[1]. Perencanaan pengembangan pembangkit merupakan sebuah topik penelitian yang sangat dinamis[2]. Hal tersebut disebabkan karena sistem tenaga listrik bertambah kompleks dari waktu ke waktu seiring bertambahnya tantangan dan permasalahan yang harus dihadapi sehingga berdampak pada kompleksitas perencanaan pengembangan pembangkit[3].

Kompleksitas perencanaan pengembangan pembangkit tersebut disebabkan karena semakin banyaknya faktor yang harus diperhitungkan seperti: *demand side management*[4], ketidakpastian, pergeseran pasar ketenagalistrikan dari *regulated* menjadi *deregulated*[5], *multi-objective problems*[6] dan batasan lingkungan[7]. Selaras dengan peningkatan kompleksitas perencanaan pengembangan pembangkit, beberapa metode digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu: *non-linear programming*[8], *mixed integer programming*[9], *mixed integer linear programming*[10], *dynamic programming*[11], *decomposition techniques*[12], *heuristic*[13], *metaheuristic*[14], dan lain lain.

Selain penggunaan metode-metode baru untuk melakukan pengembangan pembangkit, terdapat beberapa permasalahan lain yang harus dihadapi dalam perencanaan pengembangan pembangkit. Berdasarkan penelitian[1], [3], [15]–[22], permasalahan yang dihadapi dalam proses perencanaan pengembangan pembangkit dapat dikelompokkan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Permasalahan dalam Perencanaan Pengembangan Pembangkit

Pertumbuhan beban listrik yang terus meningkat, mengakibatkan dibutuhkannya pembangunan pembangkit baru dalam jumlah yang besar. Di sisi lain, kemampuan keuangan utilitas untuk membangun pembangkit baru terbatas. Untuk mengatasi permasalahan keuangan tersebut, peran serta pihak swasta dalam pengembangan pembangkit. Keikutsertaan pihak swasta berpengaruh terhadap bentuk pasar ketenagalistrikan. Jika pada awalnya semua pembangkit adalah milik utilitas dan bentuk pasar ketenagalistrikan berupa *regulated market*, dengan adanya pihak swasta tersebut maka bentuk pasar ketenagalistrikan berubah menjadi *partially deregulated market* dan *deregulated market*[3].

Pada tipe *regulated market*, semua investasi pembangkit listrik ditentukan oleh satu pengambil keputusan (utilitas) tanpa ada peranan dari pihak swasta [19] sehingga tidak ada faktor kompetisi antar pembangkit swasta. Sedangkan *deregulated market* adalah tipe pasar ketenagalistrikan yang sepenuhnya pembangkit listriknya berasal dari pihak swasta sehingga ada faktor kompetisi untuk menentukan pembangkit mana yang akan dipilih. Pada *deregulated market*, utilitas tidak dapat mengatur investasi pembangkit. Investasi pembangkit sepenuhnya bergantung pada kemauan pihak swasta untuk berinvestasi. Kemauan pihak swasta tersebut bergantung pada tingkat keuntungan yang diperoleh[19]. Dengan kata lain permasalahan pada *deregulated market* adalah pada adanya kompetisi dan *profit maximization*[15].

Partially deregulated merupakan langkah awal terjadinya perubahan dari *regulated* menjadi *deregulated*. Pada *partially deregulated*, tidak semua pembangkit listrik yang ada dalam sistem kelistrikan dimiliki oleh utilitas, tetapi ada sebagian yang dimiliki swasta. Pembangkit swasta tersebut akan menjual energi listrik yang diproduksi ke utilitas. Pada tipe kelistrikan ini, permasalahan pengembangan pembangkit dapat dipandang dari dua sudut pandang, yaitu sudut pandang pihak swasta yang berupa *profit maximization* maupun utilitas yang berupa *cost minimization*[3].

Pemodelan tipe pasar ketenagalistrikan tersebut berpengaruh terhadap metode optimasi yang digunakan karena tidak semua metode optimasi dapat digunakan pada *deregulated market*. Pada *deregulated market* diperlukan metode optimasi yang merepresentasikan konflik kepentingan pihak swasta yang berusaha untuk mencari

keuntungan maksimal. Pemilihan tipe pasar dan metode optimasi yang kurang tepat akan berpengaruh pada kesalahan dalam perencanaan pengembangan pembangkit.

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 profil beban, pertumbuhan beban, strategi *independent power producer* (IPP), biaya investasi, biaya bahan bakar, biaya O&M, pasokan bahan bakar fosil, dan pasokan energi baru terbarukan khususnya angin dan matahari.

Ketidakpastian profil beban dipengaruhi pola konsumsi pelanggan yang tidak dapat diatur. Pola konsumsi pelanggan tersebut dipengaruhi oleh berbagai macam faktor seperti cuaca, kebutuhan pelanggan, gangguan, dan lain-lain. Selain ketidakpastian profil beban, pada penelitian ini juga memperhitungkan ketidakpastian pertumbuhan beban. Ketidakpastian pertumbuhan beban tersebut dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi dan pertumbuhan jumlah penduduk. Kedua ketidakpastian yang berhubungan dengan beban tersebut akan berpengaruh terhadap jumlah energi yang dibutuhkan yang harus dipasok oleh pembangkit. Proyeksi profil beban dan pertumbuhan beban yang kurang akurat akan membuat perencanaan pengembangan pembangkit menjadi *overcapacity* maupun *undercapacity*. *Overcapacity* akan merugikan dalam sisi keekonomian, sedangkan *undercapacity* akan merugikan dalam hal keandalan sistem.

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 akan sangat berpengaruh terhadap pembangkit fosil karena proses pembangkitan energi listriknya bergantung pada

ketersediaan bahan bakar. Ketidakpastian pasokan EBT akan sangat berpengaruh terhadap proyek pembangunan PLTS dan PLTbayu karena pasokan energi angin dan matahari yang fluktuatif merupakan permasalahan utama dalam pembangunan pembangkit tersebut. Selain itu 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.

Tujuan perencanaan pengembangan pembangkit dipengaruhi oleh faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal bersumber dari dalam utilitas yang melakukan pengembangan. Sedangkan faktor eksternal bersumber dari luar utilitas, yaitu kebijakan pemerintah. Jika utilitas hanya mempertimbangkan faktor internal tanpa dipaksa untuk memenuhi dorongan faktor eksternal, maka utilitas akan melakukan pengembangan pembangkit dengan tujuan untuk meminimalkan biaya saja (*single objective function*). Dengan adanya dorongan dari faktor eksternal seperti kebijakan pengurangan emisi dan pemenuhan indeks keandalan, maka utilitas dipaksa untuk melakukan pengembangan pembangkit dengan mempertimbangkan beberapa faktor lain selain biaya minimum (*multi-objective function*). Hal tersebut menyebabkan munculnya permasalahan dalam pengembangan pembangkit yang disebabkan oleh tujuan pengembangan yang akan dicapai. Permasalahan tersebut berdampak pada diperlukannya adanya pemodelan fungsi obyektif dan pemilihan batasan (*constraints*) yang tepat.

Batasan yang digunakan dalam perencanaan pengembangan pembangkit secara umum dapat dibedakan menjadi 4 kelompok yaitu ekonomi, teknis, lingkungan dan kebijakan[19]. Faktor ekonomi, lingkungan dan keandalan, selain sebagai fungsi obyektif, dapat juga digunakan sebagai sebuah batasan. Jika pada fungsi obyektif, faktor tersebut akan dicari nilai optimumnya, maka pada batasan, faktor tersebut akan digunakan sebagai nilai batasan. Penelitian [23] menggunakan emisi lingkungan dan keandalan sebagai batasan, sedangkan penelitian [24] menggunakan faktor ekonomi sebagai batasan dalam menentukan pilihan pembangkit yang akan dibangun.

Selain berpengaruh terhadap pemodelan fungsi obyektif dan pemilihan batasan, terdapat beberapa kebijakan pemerintah yang berdampak pada sisi lain pengembangan pembangkit. Beberapa kebijakan pemerintah tersebut adalah *feed in tariff*, *demand side management*, kebijakan kendaraan listrik, dan penetrasi energi baru terbarukan (EBT). *Feed in tariff* berdampak pada pemodelan biaya di pembangkit yang mendapatkan kebijakan *feed in tariff*. *Demand side management* dan kebijakan kendaraan listrik berdampak pada pemodelan profil beban dalam pengembangan pembangkit. Penetrasi EBT berdampak pada pemodelan ketidakpastian pasokan EBT dan penggabungan dengan pembangkit/sistem lain dalam bentuk sistem *hybrid*.

Pada umumnya, bentuk sistem kelistrikan dapat digolongkan menjadi sistem kelistrikan interkoneksi (*centralized*) dan sistem kelistrikan tersebar (*distributed*). Bentuk sistem kelistrikan tersebut menimbulkan sebuah permasalahan dalam pemodelan optimasi pembangkit khususnya dalam pemodelan letak pembangkit. Pada sistem interkoneksi, letak pembangkit dianggap tidak berpengaruh dalam proses optimasi. Sedangkan pada sistem tersebar, letak pembangkit berpengaruh dalam proses optimasi. Oleh karena itu, pada sistem interkoneksi hanya dibutuhkan pengembangan pembangkit saja, sedangkan pada sistem tersebar dibutuhkan penggabungan antara pengembangan pembangkit dengan pengembangan saluran transmisi/distribusi.

Selain mempertimbangkan permasalahan-permasalahan di atas, perencanaan pengembangan pembangkit yang tepat memerlukan penggunaan metode optimasi yang tepat juga. Pemilihan metode optimasi tersebut bergantung pada tujuan dan permasalahan dalam perencanaan pengembangan pembangkit. Oleh karena pentingnya penggunaan metode optimasi yang tepat, beberapa penelitian sebelumnya telah menjadikan penggunaan metode optimasi sebagai topik penelitian [16], [18], [22], [25]. Berdasarkan penelitian tersebut, metode optimasi dapat dibedakan menjadi *mathematical method*, *approximate method*, dan *hybrid method*. *Mathematical method* menghasilkan penyelesaian yang optimal, dibuktikan secara analitis menggunakan metode matematis. *Approximate method* tidak menjamin hasil penyelesaiannya optimal, untuk menentukan keoptimalannya dilakukan dengan perbandingan hasil. Proses pencarian solusi optimal pada *approximate method* dilakukan secara iteratif dan

akan berhenti ketika selisih antar iteratif lebih kecil dari nilai toleransi yang digunakan. Sedangkan *hybrid method* merupakan penggabungan lebih dari satu metode optimasi.

Berdasarkan uraian di atas, dapat diketahui permasalahan perencanaan pengembangan pembangkit yang harus diperhatikan dan menjadi topik penelitian agar didapatkan solusi dari permasalahan tersebut. Permasalahan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Topik penelitian dalam Perencanaan Pengembangan Pembangkit

Sistem Jawa-Bali merupakan sistem kelistrikan terbesar di Indonesia dengan kapasitas mencapai 74% dari kapasitas pembangkit Indonesia. Porsi yang cukup besar tersebut menunjukkan bahwa sistem Jawa-Bali merupakan sistem yang penting untuk diperhatikan khususnya dalam perencanaan pengembangan ke depan. Seperti halnya sistem kelistrikan yang lain, Sistem kelistrikan Jawa-Bali juga mengalami permasalahan dalam pengembangan pembangkit. Beberapa laporan tahunan baik yang resmi dikeluarkan PLN[26], instansi pemerintah[27] maupun lembaga lainnya[28], [29] telah mengungkapkan beberapa permasalahan dalam pengembangan sistem kelistrikan Jawa-Bali. Beberapa permasalahan tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Permasalahan Pengembangan Pembangkit di Sistem Jawa-Bali

Saat ini, sistem pembangkitan tenaga listrik di Jawa-Bali dipasok oleh pembangkit yang dimiliki oleh PT.PLN (Persero) dan IPP. Jumlah pembangkit IPP di Sistem Jawa-Bali semakin bertambah jumlah dan porsinya dari tahun ke tahun. Hal tersebut menunjukkan bahwa sektor pembangkitan tenaga listrik di Sistem Jawa-Bali mulai beralih dari *regulated* menjadi *deregulated*. Selain itu, Sistem Jawa-Bali sedang mengalami *overcapacity* dimana total pembangkit terpasang lebih dari jumlah yang dibutuhkan. Hal tersebut disebabkan karena realisasi pertumbuhan beban jauh lebih rendah dari asumsi pertumbuhan beban yang direncanakan[29]. *Overcapacity* akan berakibat pada menurunnya keekonomian dan membengkaknya biaya.

Pembangkit terpasang di Sistem Jawa-Bali didominasi oleh PLTU Batubara. Dominasi PLTU Batubara tersebut berdampak buruk pada kesehatan masyarakat di sekitar PLTU dan lingkungan[30]. Hal tersebut bertentangan dengan salah satu kebijakan pemerintah yang mengembangkan pembangkit dengan memperhatikan faktor lingkungan.

Sebagai respon terhadap pertumbuhan beban di Sistem Jawa-Bali, PT. PLN telah melakukan perencanaan pengembangan pembangkit yang dituangkan dalam

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL). Dalam perencanaan tersebut, tidak semua pembangkit dapat dibangun sesuai waktu yang telah direncanakan[31]. Keterlambatan tersebut disebabkan karena munculnya berbagai hambatan dalam implementasi rencana pengembangan pembangkit. Hambatan tersebut dapat bersumber dari aspek peraturan pemerintah, teknis, sosial budaya, maupun lingkungan[26][29]. Dengan adanya hambatan dan keterlambatan tersebut, PT. PLN melakukan revisi perencanaan pengembangan pembangkit setiap tahun[32], [33].

Hambatan dari aspek peraturan pemerintah bersumber pada ketidakpastian atau sering berubahnya peraturan pemerintah khususnya dalam investasi pihak swasta pada sektor pembangkitan. Selain ketidakpastian peraturan tersebut, rendahnya nilai kontrak jual beli listrik swasta (*power purchase agreement* = PPA) juga memegang peranan penting dalam terjadinya keterlambatan. Hambatan dari aspek teknik bersumber pada ketersediaan teknologi pembangkit dan kualitas pembangkit. Pembangkit yang berkualitas rendah akan lebih sering mengalami kerusakan bahkan sebelum pembangkit tersebut beroperasi secara komersial. Hal tersebut menyebabkan adanya keterlambatan dalam pengoperasian secara komersialnya. Hambatan dari aspek sosial budaya bersumber pada adanya penolakan pembangunan pembangkit yang dapat disebabkan oleh berbagai hal khususnya dalam aspek lingkungan dan pembebasan lahan. Hambatan dari aspek lingkungan bersumber pada adanya penambahan biaya yang dikeluarkan sebagai kompensasi terhadap keselamatan lingkungan dari pencemaran yang bersumber dari pembangkit.

Bentuk negara Indonesia yang berupa kepulauan menyebabkan tidak semua sistem kelistrikan dapat diinterkoneksi. Selain itu, persebaran sumber energi di Indonesia tidak merata antar satu pulau dengan pulau lainnya[26], [28], [29]. Dengan porsi pembangkit yang mencapai 74% dari total pembangkit Indonesia dan didominasi pembangkit berbahan bakar fosil, tentu saja Sistem Jawa Bali memerlukan pasokan bahan bakar fosil yang cukup besar. Di sisi lain, sumber daya bahan bakar fosil terkonsentrasi di Sumatera dan Kalimantan. Hal tersebut menyebabkan Sistem Jawa-Bali sangat bergantung pada pasokan bahan bakar fosil dari Sumatera dan Kalimantan[28][31]. Lokasi Jawa yang dipisahkan oleh lautan baik dengan Sumatera

dan Kalimantan berakibat pada adanya resiko ketidakpastian pasokan yang disebabkan oleh keterlambatan pasokan bahan bakar akibat pengaruh cuaca buruk. Kebergantungan dan ketidakpastian pasokan bahan tersebut menyebabkan kerentanan keamanan energi di Sistem Jawa-Bali.

Perencanaan pengembangan pembangkit Sistem Jawa-Bali mempunyai jangka waktu yang panjang. Salah satu permasalahan dalam perencanaan jangka panjang adalah ketidakpastian. Ketidakpastian yang dihadapi perencanaan pengembangan pembangkit di Sistem Jawa-Bali adalah ketidakpastian biaya pembangkitan, beban listrik, ketidakpastian peraturan dalam sektor pembangkitan tenaga listrik, dan pasokan sumber energi baik energi fosil maupun EBT[26], [28], [29].

Ketidakpastian biaya pembangkitan tenaga listrik dipengaruhi oleh ketidakpastian dari tiga komponen biaya, yaitu biaya bahan bakar, biaya O&M, dan biaya investasi. Statistik PLN menyebutkan bahwa adanya perubahan biaya bahan bakar, biaya O&M, dan biaya investasi[32], [34]. Perubahan biaya pembangkitan tenaga listrik berakibat pada tingkat keekonomian yang berdampak pada kurang optimumnya perencanaan yang dilakukan.

Ketidakpastian beban dipengaruhi oleh ketidakpastian profil beban dan pertumbuhan beban. Ketidakpastian profil beban dipengaruhi pola konsumsi pelanggan yang tidak dapat diatur. Pola konsumsi pelanggan tersebut dipengaruhi oleh berbagai macam faktor seperti cuaca, kebutuhan pelanggan, gangguan, dan lain-lain. Ketidakpastian pertumbuhan beban tersebut dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi dan pertumbuhan jumlah penduduk. Kedua ketidakpastian tersebut akan berpengaruh terhadap jumlah energi yang dibutuhkan yang harus dipasok oleh pembangkit. Proyeksi profil beban dan pertumbuhan beban yang kurang akurat akan membuat perencanaan pengembangan pembangkit menjadi *overcapacity* maupun *undercapacity*[28]. *Overcapacity* akan merugikan dalam sisi keekonomian, sedangkan *undercapacity* akan merugikan dalam hal keandalan sistem. Pada RUPTL terbaru, PT. PLN telah melakukan revisi terhadap hasil perencanaannya akibat dari perubahan nilai pertumbuhan beban listrik[26][29].

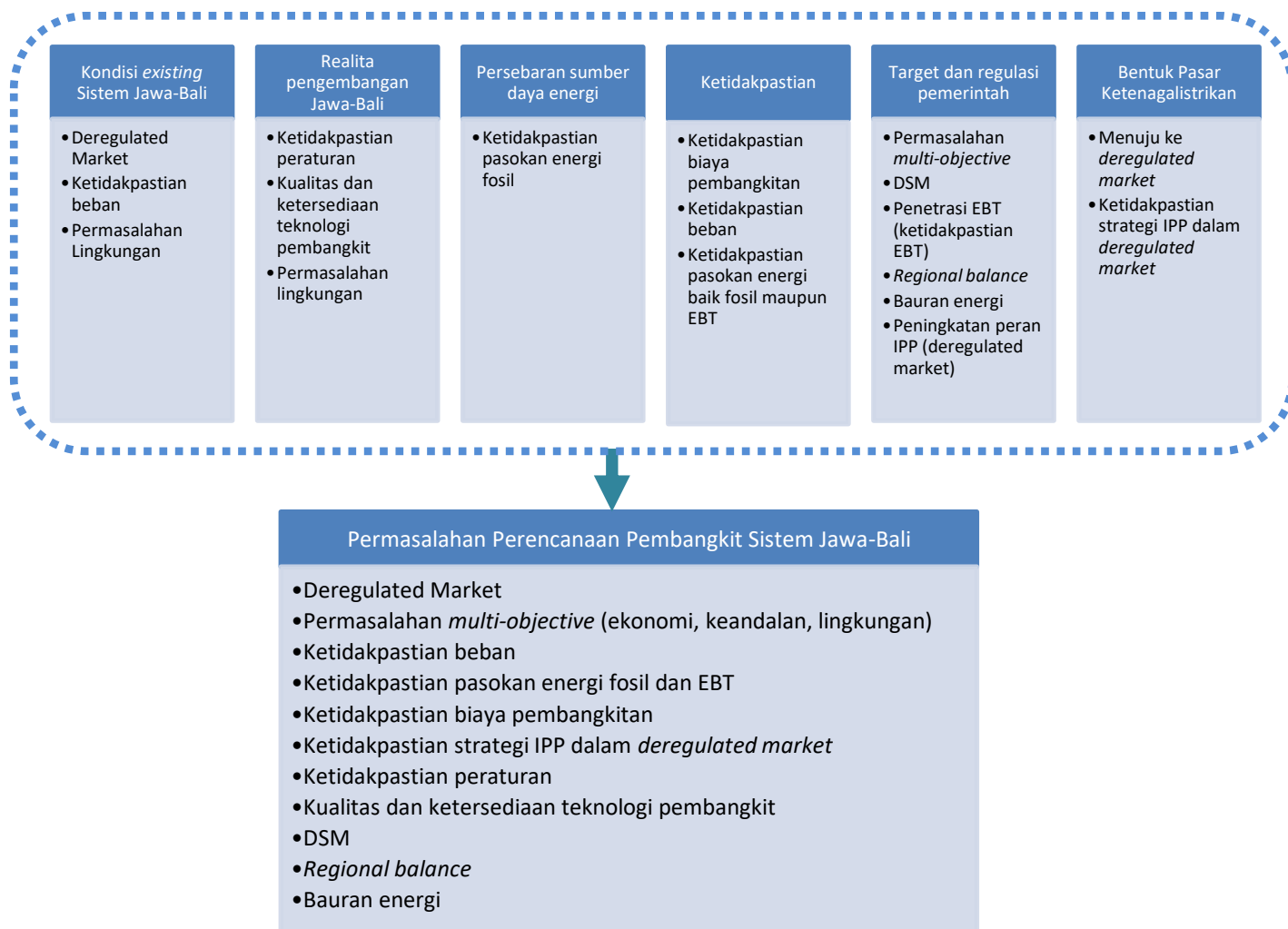
Peraturan pemerintah yang berubah-ubah di bidang ketenagalistrikan dalam hal investasi pihak swasta membuat investor swasta menjadi kurang tertarik untuk berinvestasi. PPA yang kurang mendukung membuat investasi di sektor EBT menjadi kurang menarik[28][29]. Kondisi tersebut bertolak belakang dengan kebijakan pemerintah dalam hal peningkatan porsi EBT[28].

Bentuk negara yang berupa negara kepulauan dan peningkatan porsi EBT akan menyebabkan adanya permasalahan dalam hal ketidakpastian pasokan energi fosil dan EBT. Ketidakpastian pasokan EBT disebabkan karena sifat intermiten EBT khususnya untuk angin dan surya.

Berdasarkan kebijakan energi nasional (KEN), perencanaan pengembangan pembangkit harus mempertimbangkan faktor keekonomian, keandalan, dan lingkungan[35]. Oleh karena itu, PT. PLN dalam melakukan perencanaan pengembangan pembangkit di Sistem Jawa-Bali menggunakan fungsi obyektif keekonomian, keandalan, dan lingkungan[29]. Selain menggunakan multi fungsi obyektif tersebut, perencanaan tersebut juga dilakukan dengan memperhatikan target dan regulasi yang telah ditetapkan oleh pemerintah, seperti *demand side management* (DSM)[26], rasio elektrifikasi[36], peningkatan porsi EBT[26], *regional balance*[26], bauran energi[28][35], dan peningkatan peran swasta (IPP)[28].

Peningkatan porsi IPP menunjukkan bahwa Sistem Jawa-Bali mulai beralih dari *regulated* menjadi *partially deregulated*. Selama ini, perencanaan pengembangan pembangkit di Sistem Jawa-Bali dilakukan menggunakan WASP IV yang berbasis pada *regulated market*. Hal tersebut menyebabkan kurang tepatnya pemodelan konflik kepentingan pihak swasta yang ditandai dengan banyaknya pembangkit IPP yang mengalami keterlambatan akibat kurang tertariknya pihak swasta untuk berinvestasi.

Berdasarkan uraian permasalahan pengembangan pembangkit di Jawa-Bali, maka dapat diketahui bahwa permasalahan Jawa-Bali dapat diringkas menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Intisari Permasalahan Pengembangan Pembangkit Sistem Jawa-Bali

Berdasarkan kondisi sistem Jawa-Bali saat ini, terdapat beberapa permasalahan yang mendesak untuk diselesaikan, yaitu perubahan pasar ketenagalistrikan di Sistem Jawa-Bali dari *regulated market* menjadi *deregulated market*, *multi-objective function*, dan ketidakpastian. Perubahan pasar ketenagalistrikan menjadi *deregulated market* akan berpengaruh terhadap kompetisi antar IPP dalam pengembangan pembangkit. Tanpa mempertimbangkan *deregulated market*, perencanaan yang dibuat menjadi kurang akurat karena asumsi yang digunakan pada perencanaan saat ini adalah *regulated market* yang tidak memperhitungkan konflik kepentingan antar IPP.

Selain faktor keekonomian, kebijakan pengembangan saat ini harus memperhitungkan faktor keandalan dan lingkungan. Tanpa memperhitungkan ketiga faktor tersebut dalam proses optimasi (*multi-objective function*), hasil pengembangan menjadi kurang optimal dan menyalahi kebijakan pengembangan pembangkit tersebut.

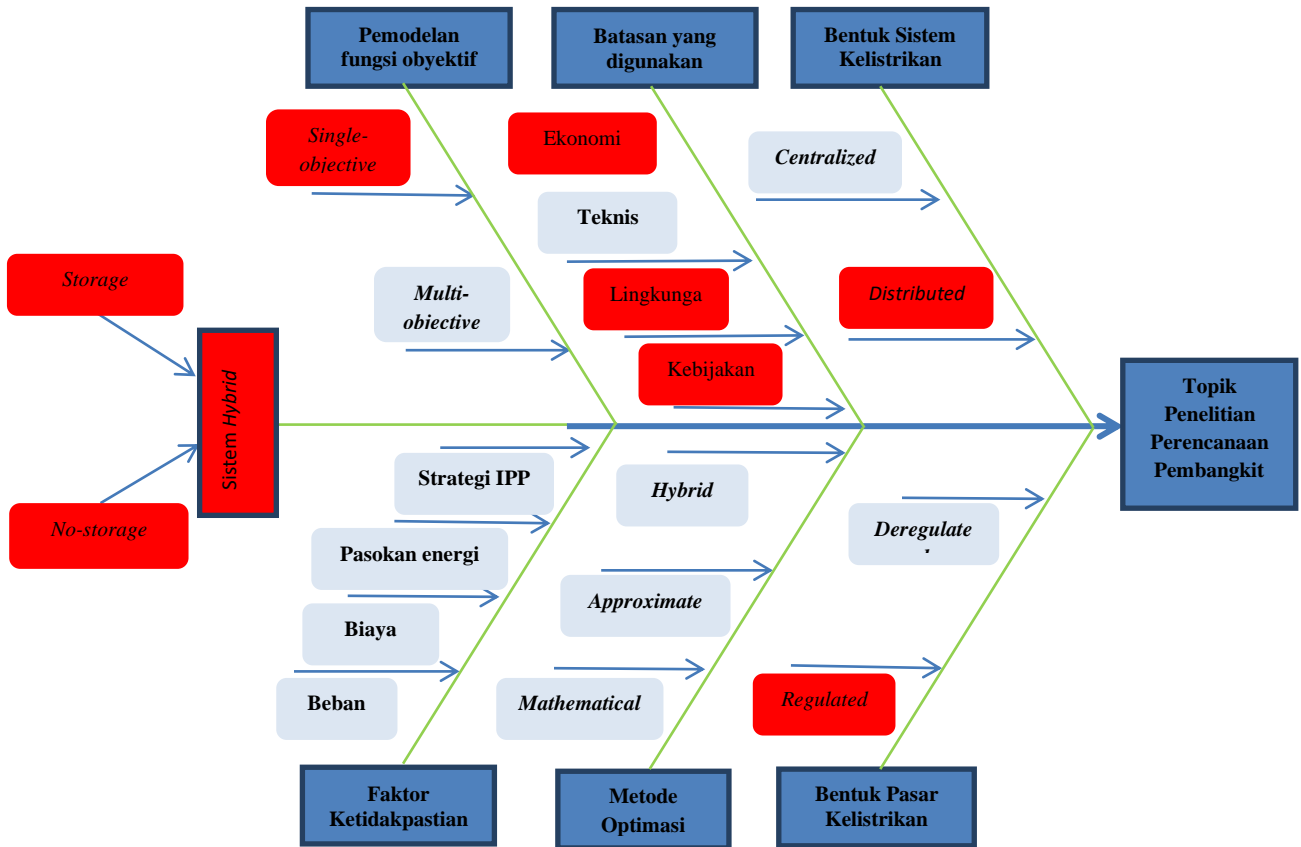
Perencanaan pengembangan pembangkit di sistem Jawa-Bali dilakukan untuk jangka waktu yang panjang. Jangka waktu yang panjang tersebut akan berdampak pada munculnya ketidakpastian. Ketidakpastian tersebut jika tidak diselesaikan dengan tepat akan mengakibatkan hasil perencanaan menjadi kurang tepat. Jenis ketidakpastian yang dapat diukur secara langsung dan berdampak secara langsung terhadap hasil pengembangan pembangkit adalah ketidakpastian beban, pasokan energi fosil dan EBT, biaya pembangkitan, dan strategi IPP dalam *deregulated market*.

Dengan mempertimbangkan permasalahan dalam perencanaan pengembangan pembangkit pada umumnya dan permasalahan perencanaan pengembangan pembangkit yang mendesak untuk diselesaikan di Sistem Jawa-Bali, penelitian ini akan berfokus pada beberapa topik permasalahan seperti *multi-objective function*, *deregulated market*, dan faktor ketidakpastian. Faktor ketidakpastian yang dipertimbangkan adalah pertumbuhan beban listrik, biaya pembangkitan, pasokan energi, dan strategi IPP dalam *deregulated market*. Gambar 5 menunjukkan posisi dari topik penelitian ini dalam topik penelitian yang umum digunakan dalam perencanaan pengembangan pembangkit. Kotak yang berwarna merah adalah topik yang tidak digunakan dalam penelitian ini.

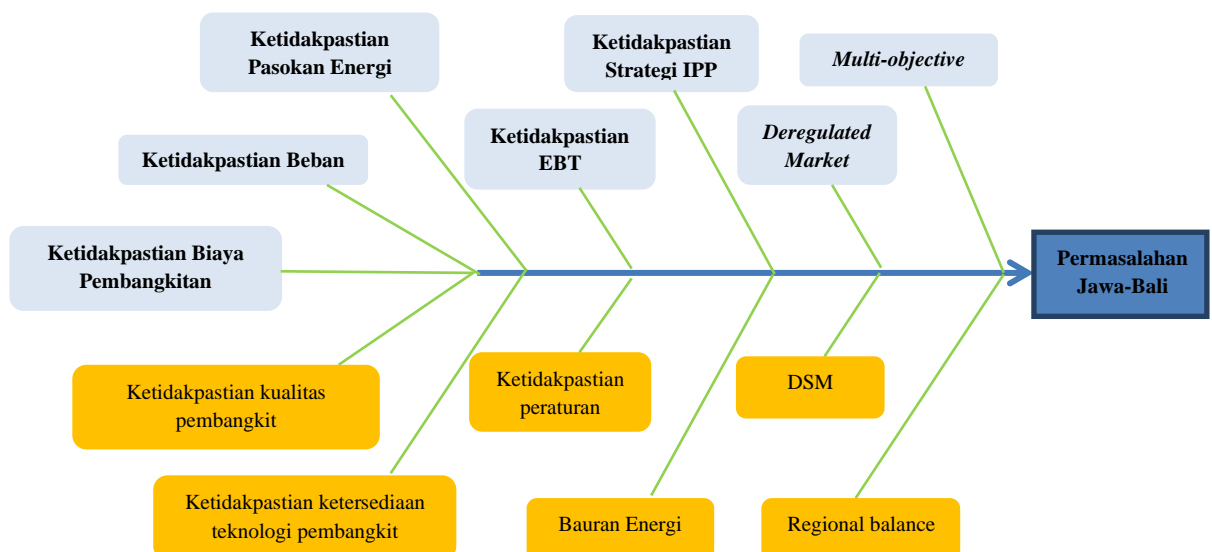
Gambar 6 menunjukkan posisi permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini terhadap permasalahan perencanaan pengembangan pembangkit listrik di Sistem Jawa-Bali. Kotak berwarna merah pada Gambar 6 menunjukkan permasalahan kelistrikan Sistem Jawa-Bali yang tidak diangkat sebagai topik permasalahan dalam penelitian ini.

Untuk mendapatkan hasil pengembangan pembangkit yang optimal dan sesuai dengan kondisi permasalahan yang diangkat dalam permasalahan ini, diperlukan sebuah metode optimasi yang dapat digunakan pada *deregulated market* dengan mempertimbangkan *multi-objective function* dan faktor ketidakpastian. Faktor

ketidakpastian yang dipertimbangkan adalah beban listrik, biaya pembangkitan, pasokan energi, dan strategi IPP dalam *deregulated market*.



Gambar 5. Posisi Topik Penelitian ini dalam Topik yang Umum digunakan dalam Penelitian Perencanaan Pengembangan Pembangkit



Gambar 6. Posisi Permasalahan Penelitian ini terhadap Permasalahan Perencanaan Pengembangan Pembangkit Sistem Jawa-Bali

Setiap faktor ketidakpastian yang dipertimbangkan pada penelitian ini akan memberikan pengaruh yang berbeda dengan nilai signifikansi yang berbeda pula. Untuk mengetahui pengaruh setiap faktor ketidakpastian beserta signifikansinya terhadap perencanaan pengembangan pembangkit pada *multi-objective deregulated market*, dilakukan analisis sensitivitas terhadap masing-masing ketidakpastian pada penelitian ini.

Dengan menggunakan hasil penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh sebuah metode optimasi yang dapat digunakan pada *deregulated market* dengan mempertimbangkan *multi-objective function*, ketidakpastian beban listrik (profil dan pertumbuhan beban), ketidakpastian biaya pembangkitan (biaya investasi, biaya O&M, dan biaya bahan bakar), ketidakpastian pasokan energi baik fosil maupun EBT, dan ketidakpastian strategi IPP dalam *deregulated market*. Selain itu diharapkan dengan metode optimasi dalam penelitian ini dapat diimplementasikan untuk melakukan perencanaan pengembangan pembangkit berdasarkan permasalahan yang ada dalam Sistem Jawa-Bali. Hasil perencanaan tersebut dapat dijadikan sebagai pertimbangan para pemangku kepentingan dalam membuat perencanaan pengembangan pembangkit di Sistem Jawa-Bali dengan lebih tepat.

1.2. Perumusan Masalah

Semakin kompleksnya perencanaan pengembangan pembangkit dari waktu ke waktu menimbulkan berbagai macam permasalahan khususnya pada Sistem Jawa-Bali. Beberapa permasalahan yang mendesak untuk diselesaikan di Sistem Jawa-Bali adalah perubahan pasar ketenagalistrikan di Sistem Jawa-Bali dari *regulated market* menjadi *deregulated market*, *multi-objective function*, dan ketidakpastian. Perubahan pasar ketenagalistrikan menjadi *deregulated market* akan berpengaruh terhadap kompetisi antar IPP dalam pengembangan pembangkit. Tanpa mempertimbangkan *deregulated market*, perencanaan yang dibuat menjadi kurang akurat karena asumsi yang digunakan

pada perencanaan saat ini adalah *regulated market* yang tidak memperhitungkan konflik kepentingan antar IPP.

Selain faktor keekonomian, kebijakan pengembangan saat ini harus memperhitungkan faktor keandalan dan lingkungan. Tanpa memperhitungkan ketiga faktor tersebut dalam proses optimasi (*multi-objective function*), hasil pengembangan menjadi kurang optimal dan menyalahi kebijakan pengembangan pembangkit tersebut.

Perencanaan pengembangan pembangkit di sistem Jawa-Bali dilakukan untuk jangka waktu yang panjang. Jangka waktu yang panjang tersebut akan berdampak pada munculnya ketidakpastian. Ketidakpastian tersebut jika tidak diselesaikan dengan tepat akan mengakibatkan hasil perencanaan menjadi kurang tepat. Jenis ketidakpastian yang dapat diukur secara langsung dan berdampak secara langsung terhadap hasil pengembangan pembangkit adalah ketidakpastian beban, pasokan energi fosil dan EBT, biaya pembangkitan, dan strategi IPP dalam *deregulated market*.

Oleh karena itu, penelitian ini mengangkat permasalahan *deregulated market*, *multi-objective function*, dan faktor ketidakpastian sebagai permasalahan penelitian yang harus diselesaikan. Faktor ketidakpastian tersebut adalah ketidakpastian beban listrik (profil dan pertumbuhan beban), ketidakpastian biaya pembangkitan (biaya investasi, biaya O&M, dan biaya bahan bakar), ketidakpastian pasokan energi baik fosil maupun EBT, dan ketidakpastian strategi IPP dalam *deregulated market*. Oleh karena itu, untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan tersebut diperlukan sebuah metode optimasi yang dapat memodelkan kompetisi antar IPP dalam proses lelang (*deregulated market*), *multi-objective function*, dan ketidakpastian.

Setiap faktor ketidakpastian yang dipertimbangkan pada penelitian ini akan memberikan pengaruh yang berbeda dengan nilai signifikansi yang berbeda pula. Untuk mengetahui pengaruh setiap faktor ketidakpastian beserta signifikansinya terhadap perencanaan pengembangan pembangkit pada *multi-objective deregulated market*, diperlukan analisis sensitivitas terhadap masing-masing ketidakpastian pada penelitian ini.

Pemilihan permasalahan penelitian dengan mempertimbangkan kondisi permasalahan pada Sistem Jawa-Bali memungkinkan implementasi model optimasi

penelitian ini untuk menyelesaikan permasalahan pengembangan pembangkit di Sistem Jawa-Bali. Untuk dapat menyelesaikan permasalahan tersebut diperlukan analisis strategi solusi berdasarkan permasalahan Sistem Jawa-Bali yaitu *deregulated market*, *multi-objective function* dan ketidakpastian.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

- Membuat sebuah metode optimasi yang dapat merepresentasikan proses kompetisi IPP dalam lelang (*deregulated market*) dengan tetap mempertimbangkan faktor keekonomian, lingkungan, keandalan sistem, dan faktor ketidakpastian.
- Mendapatkan karakteristik pengaruh setiap faktor ketidakpastian yang digunakan beserta signifikansinya terhadap perencanaan pengembangan pembangkit pada *multi-objective deregulated market*.
- Membuat strategi solusi perencanaan pengembangan pembangkit Sistem Jawa-Bali yang berbasis pada permasalahan yang ada.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah

- Diperolehnya metode optimasi yang dapat merepresentasikan proses penunjukkan langsung ataupun lelang terbuka dengan tetap mempertimbangkan faktor keekonomian, lingkungan, keandalan sistem, dan faktor ketidakpastian.
- Diketuainya karakteristik dan besarnya pengaruh dari setiap faktor ketidakpastian yang digunakan sehingga dapat ditentukan skala prioritas penanganan dari setiap ketidakpastian tersebut.
- Diketuainya strategi solusi yang sesuai untuk Sistem Jawa-Bali sehingga dapat mendukung pertumbuhan ekonomi dan tercapainya target dalam kebijakan energi nasional.

2. TINJUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Sebuah metode optimasi pengembangan pembangkit yang dapat merepresentasikan *deregulated market* dengan mempertimbangkan *multi objective function* (ekonomis, handal, dan ramah lingkungan) dan faktor ketidakpastian diperlukan untuk menyelesaikan permasalahan perencanaan pengembangan pembangkit pada penelitian ini. Oleh karena itu, pada Bab 2 ini akan menjelaskan tentang tinjauan pustaka dan dasar teori yang berkaitan dengan permasalahan pada penelitian ini, yaitu *deregulated market*, *multiobjective function*, dan ketidakpastian. Selain itu, pada Bab 2 ini akan menjelaskan kedudukan penelitian ini terhadap penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Metode optimasi untuk *deregulated market*

Berdasarkan tipe sistem pasar ketenagalistrikannya, metode optimasi dapat dikelompokkan dalam 2 macam, yaitu metode optimasi untuk *regulated power system* dan *deregulated power system*. Metode optimasi untuk *regulated power system* menggunakan sudut pandang bahwa pada sistem ketenagalistrikan tersebut masih bersifat monopoli (tidak terdapat persaingan antar perusahaan pembangkitan tenaga listrik). Sedangkan pada metode optimasi untuk *deregulated power system* menggunakan sudut pandang bahwa pada sistem ketenagalistrikan tersebut bersifat oligopoli sehingga terdapat persaingan antar perusahaan pembangkitan tenaga listrik. Persaingan antar perusahaan pembangkitan tersebut diwujudkan dalam bentuk sebuah lelang. Oleh karena itu, metode optimasi untuk *deregulated power system* harus dapat merepresentasikan proses lelang pada pasar ketenagalistrikan. Tabel 1 menunjukkan metode-metode optimasi yang telah digunakan oleh penelitian-penelitian sebelumnya dan telah dibedakan berdasarkan tipe pasar ketenagalistrikannya.

Tabel 1. Metode Optimasi berdasarkan Pasar Ketenagalistrikan

Tipe Pasar	Metode Optimasi
<i>Regulated</i>	<i>Linear programming</i> [37] <i>Sequential linear programming</i> [37]

	<p> <i>Stochastic linear model</i>[38] <i>Dynamic Linear programming</i>[39] <i>Mixed integer linear programming (MILP)</i> [40] <i>Non linear programming</i>[41] <i>Mixed integer nonlinear model (MINLP)</i> [42] <i>Quadratic programming</i> [43] <i>Analytic Hierarchy Approach (AHP)</i>[44] <i>Decision tree approach / branch and bound</i> [45] <i>Dynamic programming (DP)</i> [41] <i>Stochastic dynamic programming (SDP)</i> [46] <i>Sistem dynamic method</i> [47] <i>Network flow programming (NFP)</i> [48] <i>Iterative algorithm</i> [49] <i>Bender's decomposition</i> [50] <i>Fixed-point iteration algorithm</i> [41] <i>L shaped Algorithm</i> [51] <i>Dinkelbach Theorem</i> [52] <i>Cutting Plane</i> [53] <i>Normal Boundary Intersection</i> [54] <i>Discrepancy Bounded Local Search</i> [55] <i>Conditional-value-at-risk (CVaR) method</i> [56] <i>Support-vector-regression and Inexact chance-constrained programming</i>[57] <i>Q-learning algorithm</i> [58] <i>Progresive Hedging</i> [59] <i>Forward selection in wait-and-see clusters (FSWC)</i> [45] <i>Screening curves approach</i> [60] <i>RED (relative electrical distance)</i> [61] <i>Genetic algorithm (GA)</i>[18] <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)</i> [62] <i>Differential evolution</i> [18] <i>Evolutionary programming</i> [18] <i>Evolutionary strategy</i> [18] <i>Particle swarm optimization(PSO)</i>[18] <i>Tabu search</i> [18], [63] <i>Simulated annealing</i> [18], [25] <i>Fuzzy programming</i> [49] <i>Ant colony programming</i> [14] <i>Shuffled frog leaping algorithm (SFLA)</i>[64] <i>Honey Bee Mating Optimization (HBMO)</i> [65] <i>Artificial immune sistem</i> [66] <i>Evolutionary computation concept-based algorithm (EA)</i> [67] <i>Expert Sistem</i> [68] <i>Neural network</i> [69] <i>Genetic Algorithm and Benders Decomposition</i> [23] <i>Simulated Annealing Genetic Algorithm (ASAGA)</i> [70] <i>Refined Immune Algorithm RIA (the immune algorithm + Tabu search)</i> [71] </p>
--	--

	<i>Dynamic programming + Fuzzy</i> [72] <i>Dynamic programming (DP) + expert systems</i> [73] <i>Dynamic programming (DP) +GA</i> [74], [75] <i>Differential evolution + Simulated annealing</i> [25] <i>Mixed-integer linear programming (MILP) +Fuzzy</i> [76] <i>Linear programming and analytical hierarchy process (AHP)</i> [44] <i>Lexicographic optimization + augmented epsilon-constraint method + AHP</i> [77] <i>NSGA +Fuzzy</i> [78] <i>Expert systems + decision tree</i> [79] <i>Differential Algorithm +Simulated Anealling</i> [25] <i>Refined genetic algorithm (GA) and dynamic programming (DP)</i> [80] <i>MILP. + Modified Normal Boundary Intersection method</i> [81] <i>Immune algorithm (IA) +Tabu search (TS) + refined immune algorithm (RIA)</i> [71]
<i>Deregulated</i>	<i>Game theory</i> [82] <i>Agent-based (sistem dynamic)</i> [47] <i>Agent-based (benders decomposition)</i> [83] <i>Agent based (Q-learning algorithm)</i> [58] <i>Agent based (MPEC)</i> [52] <i>Game Theory + GA</i> [84] <i>Game Theory + PSO</i> [85] <i>DP + Game Theory</i> [86] <i>Game theory + nonlinear differential equations</i> [87] <i>Stochastic dynamic programming (SDP) algorithm +Game theory</i> [88] <i>Dynamic programming algorithm and game theory</i> [89] <i>PSO +Game theory</i> [90] <i>MILP +Game theory</i> [91]

Tabel 1 menunjukkan bahwa metode optimasi berdasarkan tipe pasar ketenagalistrikannya dapat dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu metode optimasi untuk *regulated power system* dan metode optimasi untuk *deregulated power system*. Metode optimasi untuk *regulated power system* tidak dapat digunakan secara tepat untuk *deregulated power system* yang bersifat oligopoli. Hal tersebut disebabkan karena pada *regulated power system*, optimasi dilakukan tanpa mempertimbangkan konflik kepentingan antar IPP untuk mencapai keuntungannya masing-masing. Begitu pula sebaliknya, metode optimasi untuk *deregulated power system* yang proses optimasi nya mempertimbangkan konflik kepentingan antar IPP tidak dapat digunakan secara tepat untuk *regulated power system* yang bersifat monopoli.

Berdasarkan Tabel 1, dapat diperoleh bahwa metode optimasi yang digunakan pada *deregulated power system* berbasis pada *stochastic linear programming, dynamic*

programming, dan *game theory*. Penggunaan *stochastic linear programming* dan *dynamic programming* untuk proses optimasi pada *deregulated power system* memerlukan sebuah mekanisme untuk merepresentasikan perubahan strategi dari tiap IPP. Mekanisme perubahan strategi tersebut akan dilakukan secara berulang sampai tiap IPP tidak mengubah strateginya. Selain itu, pada *stochastic linear programming* dan *dynamic programming*, proses perubahan strategi tersebut belum mempertimbangkan pengaruh perubahan strategi antar IPP.

Game theory melakukan optimasi pengembangan pembangkit dengan menggunakan *nash equilibrium*. Pada *nash equilibrium*, perubahan strategi tiap IPP dipengaruhi oleh kepentingan IPP itu sendiri (internal) dan pengaruh strategi dari IPP lainnya (eksternal). Oleh karena itu, *game theory* lebih tepat digunakan untuk merepresentasikan proses pengembangan pembangkit pada *deregulated power system*. Dengan menggunakan persamaan matematis pada *nash equilibrium*, keoptimalan solusi yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan dan dibuktikan secara matematis (*exact*).

2.1.2. Multi-objective optimization

Pemodelan *multi-objective function* dapat dibedakan menjadi *single level* dan *multi-level*. Pada *single-level* maupun *multi-level* terdapat mekanisme pencarian solusi optimal yang berbeda satu sama lain. Tabel 2 menunjukkan mekanisme pencarian solusi optimal pada *multi-objective function* berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya.

Tabel 2. Pembagian penelitian sebelumnya berdasarkan tipe *multi-objective function* yang digunakan

<i>Multi Objective</i>		Mekanisme pencarian solusi optimal
<i>Single-level</i>	<i>Single level</i>	<i>No-weighted</i> [64]
		<i>Weighted</i> [92]
		<i>Pareto-optimal solution</i> [54]
		<i>Gravitational search algorithm</i> [93]
		<i>Augmented epsilon constraint</i> [77]
		<i>Fuzzy</i> [65]
		<i>Analytical hierarchy process</i> [77]
		<i>Performance order ranking</i> [94]
		<i>Utility theory</i> [95]

		<i>Normal boundary interaction</i> [54]
		<i>Trade off curves</i> [96]
		<i>Fractional programming</i> [52]
<i>Multi-level</i>	<i>Bi-level</i>	<i>Master and Sub-Master</i> [51]
	<i>Three-level</i>	<i>Master and two sub-master</i> [97]

Tabel 2 menunjukkan bahwa pada *single level*, mekanisme pencarian solusi optimum terdiri dari berbagai macam mekanisme. Persamaan paling mendasar pada mekanisme-mekanisme tersebut adalah adanya *trade off* untuk mencari solusi optimal dan digunakan pada fungsi optimasi yang bertipe pencarian nilai maksimum atau minimum.

Pada *bi-level*, mekanisme pencarian solusi optimum dilakukan dengan *master and sub-master method*. Mekanisme pencarian ini dapat digunakan pada fungsi optimasi yang bertipe pencarian nilai maksimum atau minimum maupun fungsi optimasi yang bertipe pembatasan.

Pada *three-level*, mekanisme pencarian solusi dilakukan dengan menggunakan *master and two sub master method*. Dua level digunakan untuk memecahkan permasalahan fungsi obyektif yang mempunyai tipe pembatasan dan minimum atau optimum. Sedangkan satu level digunakan untuk menggabungkan antara optimasi pengembangan pembangkit dan pengembangan saluran transmisi. Dengan kata lain, pada *three-level*, dua level digunakan untuk proses optimasi dengan menggunakan fungsi obyektif, sedangkan satu level selanjutnya digunakan untuk menghubungkan antara 2 bagian yang berbeda (optimasi pembangkit dengan optimasi saluran transmisi).

Fungsi obyektif yang digunakan pada penelitian ini adalah keekonomian, keandalan, dan emisi CO₂. Fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂ bertipe pencarian nilai minimum, yaitu minimum biaya pembangkitan dan minimum biaya emisi CO₂. Sedangkan fungsi obyektif keandalan bertipe pembatasan sehingga hanya *multi-level* saja yang dapat digunakan pada penelitian ini.

Penggunaan metode metaheuristik dalam optimasi penentuan strategi investasi IPP pada penelitian ini, menyebabkan perlunya penggunaan *four-level optimization model* yang merupakan pengembangan dari *three-level model*. *Lower level* terdiri dari

sub-lower 1 dan *sub-lower 2*. *Sub-lower 1* digunakan untuk memastikan bahwa strategi yang diambil oleh IPP tidak melanggar fungsi obyektif keandalan. *Sub-lower 2* digunakan untuk melakukan optimasi strategi tiap IPP dengan fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂. *Upper level* digunakan untuk mencari strategi yang paling optimal dengan mempertimbangkan faktor kepentingan dari IPP pesaing beserta batasan-batasan yang ada (mempertimbangkan *deregulated market*). *Upper level* terdiri dari *sub-upper 1* dan *sub-upper 2*. *Sub-upper 1* digunakan untuk proses optimasi dengan menggunakan fungsi obyektif keandalan dengan mempertimbangkan *deregulated market*. *Sub-upper 2* digunakan untuk melakukan optimasi strategi tiap IPP dengan fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂ dengan mempertimbangkan *deregulated market*.

2.1.3. Ketidakpastian dalam Perencanaan Pengembangan Pembangkit

Jenis-jenis ketidakpastian yang terdapat dalam perencanaan pengembangan pembangkit dapat diselesaikan dengan cara memodelkannya menjadi sebuah fungsi matematis sehingga dapat dimasukkan ke dalam metode pencarian nilai optimum yang digunakan. Pemodelan ketidakpastian dapat dikelompokkan menjadi *stochastic approach*[41], *fuzzy*[49], *scenario set*[98], dan *montecarlo simulation*[51]. *Stochastic approach* menggunakan *probability distribution function* (pdf) untuk memodelkan ketidakpastian. Pdf didapatkan dari data historis. Penelitian [49] menambahkan *fuzzy logic* ke dalam pdf. Dengan menggunakan *feasibility degrees* yang ada dalam *fuzzy logic*, maka akan didapatkan nilai ketidakpastian yang digunakan. Berdasarkan pdf juga, dapat dibentuk beberapa *scenario* yang dapat mewakili ketidakpastian yang ada. Penggunaan *scenario set* bertujuan untuk menyederhanakan ketidakpastian. Berdasarkan prinsip *scenario set* dan *stochastic approach*, terbentuk sebuah metode pemodelan ketidakpastian yang dinamakan dengan *montecarlo simulation*. *Montecarlo simulation* menggunakan bilangan acak untuk membangkitkan skenario dalam jumlah banyak sesuai dengan pdf yang dimiliki. Pembangkitan skenario dalam jumlah banyak ini bertujuan untuk mensimulasikan berbagai macam kemungkinan yang dapat muncul akibat adanya faktor ketidakpastian.

Kelebihan penggunaan *montecarlo simulation* dibandingkan dengan yang lain adalah penggunaan jumlah sample yang banyak sehingga akan memberikan akurasi pemodelan ketidakpastian yang lebih baik[99]. Selain memberikan akurasi yang lebih baik, *montecarlo* membutuhkan waktu yang lebih lama sebagai *trade off* dari peningkatan akurasi. Akan tetapi peningkatan waktu tersebut masih dapat ditoleransi jika dibandingkan dengan akurasi yang didapatkan[100].

Faktor ketidakpastian yang dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah ketidakpastian strategi investasi IPP, biaya bahan bakar, biaya investasi, biaya O&M, pasokan bahan bakar dan energi baru terbarukan (EBT), pertumbuhan beban, dan profil beban. Beberapa penelitian sebelumnya telah memasukkan unsur ketidakpastian dalam metode optimasi yang digunakan untuk perencanaan pengembangan pembangkit pada *deregulated power systems*.

Penelitian [101], [102] telah memasukkan faktor ketidakpastian penawaran IPP dalam proses optimasi pada *deregulated power system*. Ketidakpastian penawaran IPP dapat dimodelkan menggunakan *particle swarm optimization*[102], algoritma genetik[103], *montecarlo simulation*[104], dan *scenario set*[105].

Penelitian [90], [106], [107] telah memasukkan faktor ketidakpastian energi angin dalam proses optimasi pada *deregulated system*. Ketidakpastian energi angin dapat dimodelkan menggunakan *weibull distribution*[88], fungsi distribusi berdasarkan data eksisting[108], *normal probability distribution function (pdf)*[90], *montecarlo simulation*[107], dan *scenario set*[106].

Penelitian [89] telah memasukkan faktor ketidakpastian energi angin dan *demand respons* ke dalam proses optimasi pada *deregulated power systems*. Ketidakpastian energi angin dimodelkan dengan menggunakan pdf data eksisting dan ketidakpastian *demand respons* dimodelkan menggunakan data historis respons pelanggan terhadap perubahan keadaan sistem ketenagalistrikan.

Penelitian[91] telah memasukkan faktor ketidakpastian kecepatan angin dan kegagalan peralatan. Ketidakpastian pada penelitian ini dimodelkan dengan menggunakan *scenario sets* berdasarkan data eksisting. Penelitian [97] telah memasukkan faktor ketidakpastian beban, angin, dan tenaga air.

Selain beberapa penelitian yang telah disebutkan, Terdapat beberapa penelitian lain yang telah memasukkan faktor ketidakpastian dalam proses optimasi perencanaan pengembangan pembangkit. Penelitian [109]–[114] telah memperhitungkan pengaruh ketidakpastian pasokan energi baru terbarukan, 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 yang dapat dijelaskan secara pasti. 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.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya di atas, dapat ditentukan model ketidakpastian yang dapat digunakan untuk memodelkan permasalahan ketidakpastian pada penelitian ini. Faktor ketidakpastian yang dipertimbangkan pada penelitian ini adalah faktor ketidakpastian strategi investasi IPP, ketidakpastian biaya bahan bakar, biaya investasi, biaya O&M, ketidakpastian pasokan energi baru terbarukan. Ketidakpastian strategi IPP dimodelkan dengan menggunakan optimasi berdasarkan

metode *metaheuristic* seperti yang dilakukan pada penelitian[102],[85], dan [103]. Pemilihan metode *metaheuristic* dilakukan dengan pertimbangan bahwa setiap IPP akan memilih strateginya dengan tujuan untuk mendapatkan keuntungan maksimal sehingga jika direpresentasikan dengan sebuah probabilitas fungsi obyektif menjadi kurang tepat.

Ketidakpastian profil beban, pasokan bahan bakar dan EBT diselesaikan dengan menggunakan *montecarlo simulation*. Pemilihan *montecarlo simulation* untuk memodelkan ketidakpastian tersebut berdasarkan karena ketidakpastian tersebut bersifat lebih bebas tidak seperti ketidakpastian strategi IPP.

Sedangkan untuk ketidakpastian pertumbuhan beban, biaya investasi, biaya bahan bakar, dan biaya O&M diselesaikan dengan *montecarlo+Brownian motion*. Penambahan *Brownian motion* tersebut disebabkan karena ketidakpastian pertumbuhan beban, biaya investasi, biaya bahan bakar, dan biaya O&M mempunyai trend yang berhubungan dan dipengaruhi oleh kondisi yang telah terjadi. Oleh karena kondisi ketidakpastian tersebut, penelitian-penelitian sebelumnya banyak yang menggunakan *Brownian motion* untuk menyelesaikan permasalahan ketidakpastian pada pertumbuhan beban dan komponen biaya pembangkitan seperti biaya bahan bakar, investasi, dan O&M[115]–[119].

2.1.4. Perbandingan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya

Sebuah metode optimasi dengan menggunakan *game theory: multi-period framework multi-objective function* telah dimodelkan dalam penelitian [82]. Model dalam penelitian tersebut digunakan untuk melakukan optimasi dengan mempertimbangkan faktor kepentingan pada proses lelang dan penunjukkan langsung IPP (*deregulated market*) tanpa mempertimbangkan pengaruh faktor ketidakpastian dalam optimasi pengembangan pembangkit.

Di sisi lain, ketidakpastian merupakan sebuah faktor yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan pengembangan pembangkit mengingat jangka waktu perencanaan yang lama. Oleh karena itu beberapa penelitian sebelumnya telah memasukkan unsur

ketidakpastian dalam metode optimasi dalam perencanaan pengembangan pembangkit pada *deregulated power systems*.

Faktor ketidakpastian penawaran IPP dalam proses lelang telah dimodelkan dalam penelitian [102] dan [85]. Metode optimasi yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah *game theory*, sedangkan ketidakpastian penawaran IPP dimodelkan dengan menggunakan *particle swarm optimization*. Fungsi obyektif yang digunakan adalah yaitu keuntungan maksimal (*single objective function*). Perbedaan kedua penelitian tersebut adalah pada penggunaan *bi-level optimization model*. Penelitian [102] tidak menggunakan *bi-level optimization model* sedangkan penelitian [85] telah menambahkan *bi-level optimization* yang digunakan untuk membedakan antara fungsi optimasi dengan fungsi pemenuhan batasan. Pada *lower level*, IPP akan memaksimalkan keuntungan mereka, dan pada *upper level*, operator (*utility company*) akan memeriksa apakah semua batasan yang ditetapkan sudah terpenuhi atau belum.

Selain penelitian [102] dan [85], faktor ketidakpastian penawaran IPP dalam proses lelang dan *single objective function* (keuntungan maksimal) juga telah dimodelkan dalam penelitian [103] dan [104]. Metode optimasi yang digunakan adalah *game theory*. Perbedaan kedua penelitian tersebut adalah pada metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan ketidakpastian penawaran IPP, penelitian [103] menggunakan algoritma genetik, penelitian [104] menggunakan *montecarlo simulation*.

Penggunaan *scenario set method* untuk memodelkan ketidakpastian penawaran IPP pada *deregulated power systems* telah dilakukan pada penelitian [105]. Metode optimasi yang digunakan pada penelitian tersebut adalah *game theory based on dynamic stochastic MPEC*. Penelitian tersebut menggunakan *single objective function* dan *bi-level optimization model*.

Ketidakpastian energi angin dalam proses optimasi pada *deregulated system* telah dimodelkan dalam penelitian [88], [108], [106], [90], dan [107]. Penelitian [88] dan [108] menggunakan *single objective function* yaitu keuntungan maksimal. Metode optimasi yang digunakan adalah *game theory*. Penelitian [88] menggunakan *adjusted weibull distribution* untuk memodelkan ketidakpastian energi angin, sedangkan

penelitian [108] menggunakan fungsi distribusi berdasarkan data *existing* angin. Penelitian [90] dan [107] telah memasukkan *bi-level optimization* ke dalam optimasi pada *deregulated market* dengan mempertimbangkan faktor ketidakpastian energi angin. Metode optimasi yang digunakan pada penelitian [90] dan [107] menggunakan *agen based model* dengan menggunakan *metaheuristic method (particle swarm optimization)*. Ketidakpastian energi angin pada penelitian [90] dan [107] dimodelkan menggunakan *normal probability distribution function (pdf)* dan *montecarlo simulation*. Penelitian [106] telah menambahkan *bi-level optimization model* dan *multi-objective function* ke dalam optimasi pada *deregulated market* dengan mempertimbangkan faktor ketidakpastian energi angin. Metode optimasi yang digunakan adalah *game theory* dan ketidakpastian energi angin diselesaikan dengan menggunakan *scenario set method* berdasarkan data *existing* pola energi angin.

Penelitian [89] telah memasukkan faktor ketidakpastian energi angin dan *demand respons* ke dalam proses optimasi pada *deregulated power systems*. Metode optimasi yang digunakan pada penelitian tersebut adalah *dynamic programming* yang digabungkan dengan *game theory*. Penelitian [89] tersebut menggunakan *single objective function* dan *single level optimization model*. Ketidakpastian energi angin diselesaikan dengan menggunakan pdf berdasarkan data *existing* dan ketidakpastian *demand respons* dimodelkan menggunakan data historis respons pelanggan terhadap perubahan keadaan sistem ketenagalistrikan.

Penelitian [91] telah memasukkan faktor ketidakpastian kecepatan angin dan kegagalan peralatan. Metode optimasi yang digunakan pada penelitian tersebut adalah *non-cooperative game theory*. Penelitian tersebut menggunakan *multi-objective function* dan *bi-level optimization model*. Setiap IPP akan memaksimalkan keuntungannya pada *lower level*. Strategi yang paling menguntungkan untuk tiap IPP tersebut kemudian akan dikirimkan kepada operator sistem ketenagalistrikan (ISO). Setelah mendapatkan semua strategi IPP, ISO akan melakukan optimasi untuk memperoleh biaya pembangkitan paling minimal. Hasil optimasi ISO akan dikirimkan kembali ke tiap IPP dan IPP akan memberikan respon apakah tetap dengan strategi

sebelumnya atau berubah. Ketidakpastian pada penelitian [91] dimodelkan dengan menggunakan *scenario sets* berdasarkan data *existing*.

Penelitian [97] telah memasukkan faktor ketidakpastian beban. Metode optimasi yang digunakan adalah *three level game theory*. Ketidakpastian beban diselesaikan dengan menggunakan *scenario set*. *Three level optimization method* digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *multi-objective function* pada penelitian tersebut. *Three level optimization method* terdiri dari *lower level* dan *upper level*. *Lower level* digunakan untuk optimasi pengembangan pembangkit yang terdiri dari 2 *sub-lower level*. *Upper level* digunakan untuk mengkoordinasikan antara perencanaan pengembangan pembangkit dengan perencanaan pengembangan saluran transmisi.

Penelitian [45] telah menggunakan *two-stage stochastic programming* yang digabungkan dengan *forward selection in wait-and-see clusters (FSWC)* untuk melakukan perencanaan pengembangan pembangkit dengan mempertimbangkan ketidakpastian beban dan harga bahan bakar. Ketidakpastian beban dan harga bahan bakar pada penelitian [45] dimodelkan dengan *scenario tree method* yang digabungkan dengan *Brownian motion method*. Penelitian [118] menggunakan sebuah metode stokastik bertingkat untuk melakukan pengembangan pembangkit dengan mempertimbangkan ketidakpastian harga bahan bakar dan pertumbuhan beban. Ketidakpastian pada penelitian [118] diselesaikan dengan *Brownian motion*.

Penelitian [120] telah mengajukan sebuah metode untuk mendapatkan fleksibilitas dalam proses optimasi yang mempertimbangkan faktor ketidakpastian. Metode tersebut adalah *forward moving approach and block mechanism*.

Berdasarkan uraian di atas, permasalahan *deregulated power system*, *multi-objective function* dan ketidakpastian dalam perencanaan pengembangan pembangkit dapat diselesaikan dengan menggunakan *game theory* yang digabungkan dengan *multi-level modelling*, *forward moving approach and block mechanism*, *metaheuristic*, *montecarlo simulation*, dan *brownian motion*. *Game theory* digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi pada *deregulated power system*.

Metaheuristic method digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada ketidakpastian strategi IPP. Pemilihan metode *metaheuristic* dilakukan dengan

pertimbangan bahwa setiap IPP akan memilih strateginya dengan tujuan untuk mendapatkan keuntungan maksimal sehingga jika direpresentasikan dengan sebuah probabilitas fungsi obyektif menjadi kurang tepat.

Montecarlo simulation digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada faktor ketidakpastian profil beban, pasokan bahan bakar dan EBT (energi angin dan matahari) karena ketidakpastian yang bersifat lebih bebas. Sedangkan untuk ketidakpastian pertumbuhan beban, biaya investasi, biaya bahan bakar, dan biaya O&M diselesaikan dengan *montecarlo+ Brownian motion*.

Penambahan *Brownian motion* tersebut disebabkan karena ketidakpastian pertumbuhan beban, biaya investasi, biaya bahan bakar, dan biaya O&M mempunyai trend yang berhubungan dan dipengaruhi oleh kondisi yang telah terjadi. Oleh karena kondisi ketidakpastian tersebut, penelitian-penelitian sebelumnya banyak yang menggunakan Brownian motion untuk menyelesaikan permasalahan ketidakpastian pada pertumbuhan beban dan komponen biaya pembangkitan seperti biaya bahan bakar, investasi, dan O&M[115]–[119].

Forward moving approach and block mechanism digunakan untuk mendapatkan fleksibilitas pengembangan pembangkit dengan mempertimbangkan adanya faktor-faktor ketidakpastian. Penggunaan metode metaheuristik dalam optimasi penentuan strategi investasi IPP, menyebabkan perlunya penggunaan *four-level optimization model* yang merupakan pengembangan *three-level* pada penelitian[97]. *Lower level* digunakan untuk melakukan optimasi penentuan strategi investasi IPP tanpa memperhitungkan faktor *deregulated market*. *Lower level* terdiri dari *sub-lower 1* dan *sub-lower 2*. *Sub-lower 1* digunakan untuk memastikan bahwa strategi yang diambil oleh IPP tidak melanggar fungsi obyektif keandalan. *Sub-lower 2* digunakan untuk melakukan optimasi strategi tiap IPP dengan fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂. *Upper level* digunakan untuk mencari strategi yang paling optimal dengan mempertimbangkan faktor kepentingan dari IPP pesaing beserta batasan-batasan yang ada (mempertimbangkan *deregulated market*). *Upper-level* terdiri dari *sub-upper 1* dan *sub-upper 2*. *Sub-upper 1* digunakan untuk proses optimasi dengan menggunakan fungsi obyektif keandalan dengan mempertimbangkan *deregulated market*. *Sub-upper*

2 digunakan untuk melakukan optimasi strategi tiap IPP dengan fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂ dengan mempertimbangkan *deregulated market*.

State of the art dari penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3. Pada Tabel 3 dapat diketahui bahwa semua metode yang digunakan pada penelitian[85], [88], [106]–[108], [121], [89]–[91], [97], [102]–[105] dapat digunakan untuk merepresentasikan *deregulated power system*. Jika pada penelitian-penelitian sebelumnya, metode yang digunakan untuk merepresentasikan *deregulated power system* adalah *game theory*, *agent-based model*, dan *hybrid model (dynamic programming + game theory)*. Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah *modified game theory (game theory + four-level+ forward moving approach and block mechanism)*. Selain itu perbedaan penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya adalah pada faktor penggunaan *multi-objective function*, *multi-level optimization*, ketidakpastian yang dipertimbangkan, dan metode yang digunakan untuk menyelesaikan faktor ketidakpastian.

Tabel 3. *State of the art* dari penelitian yang dilakukan

Penulis dan Tahun	Metode Penelitian	Dapat merepresentasikan <i>deregulated power system</i>	Multi-objective	Multi-Level Optimization	Jenis Ketidakpastian	Metode pemodelan ketidakpastian
Moghddas-Tafreshi (2011) [85]	<i>Game theory</i>	Ya	Tidak	Ya (<i>Bi-level</i>)	Ketidakpastian strategy IPP	PSO
E. Alishahi (2011)[88]	<i>Game theory</i>	Ya	Tidak	Tidak	Energi angin	<i>Weibull distribution</i>
Pandasi (2012)[103]	<i>Game theory</i>	Ya	Tidak	Tidak	Ketidakpastian strategy IPP	Algoritma genetik
E.Alishahi (2012)[108]	<i>Game theory</i>	Ya	Tidak	Tidak	Energi angin	<i>Probability distribution function</i> dari data historis

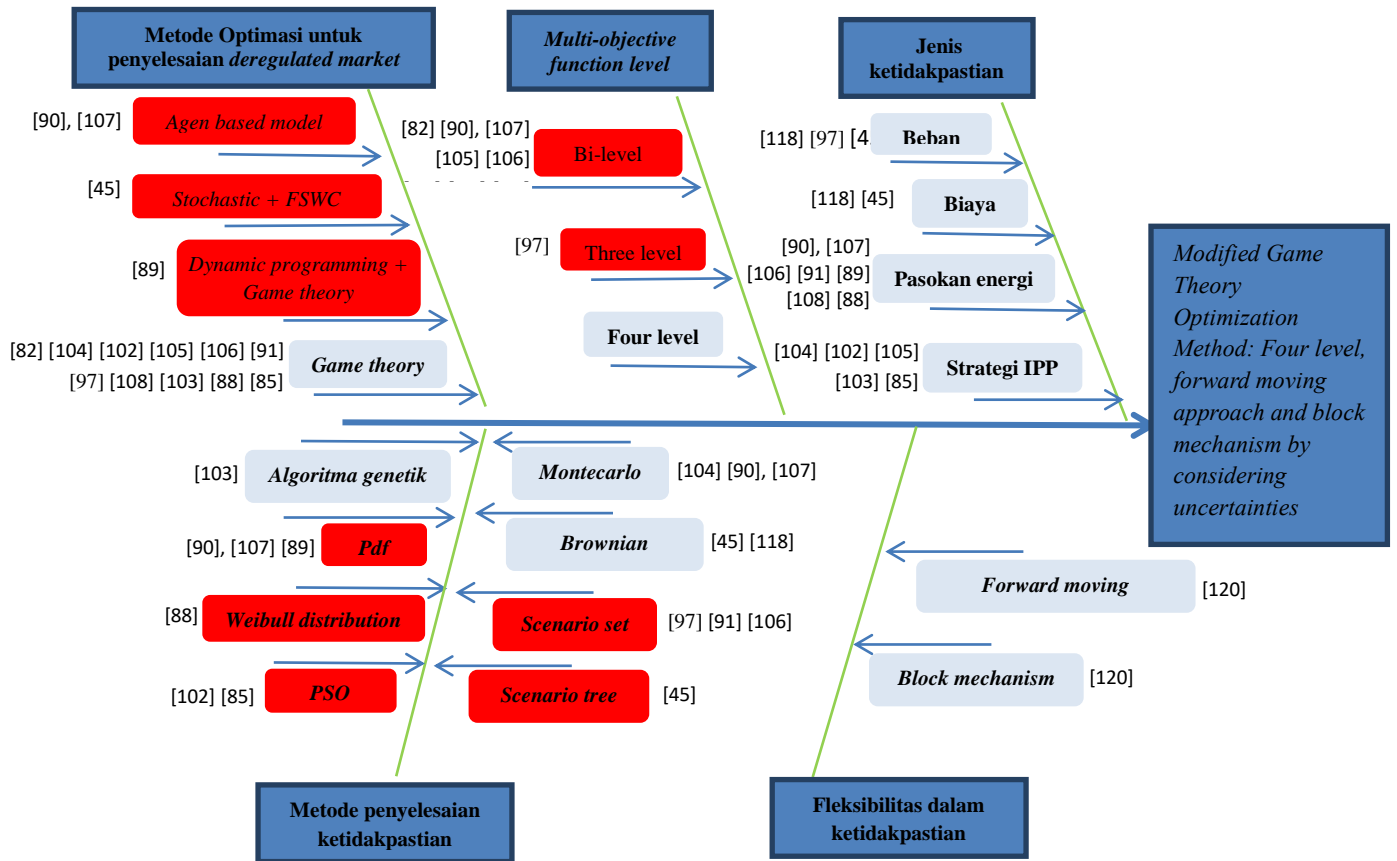
Yonghan Feng (2013)[45]	<i>Stochastic programming +forward selection in wait- and-see clusters (FSWC)</i>	Not mentioned	Ya	Ya (bi-level)	Beban dan harga bahan bakar	<i>Scenario tree + Brownian motion</i>
Sheikhi Fini, (2013)[89]	<i>Dynamic programming + Game theory</i>	Ya	Tidak	Tidak	Energi angin dan Demand responses	<i>Probability distribution function dari data historis</i>
David Pozo (2013)[97]	<i>Three level game theory</i>	Ya	Ya	Ya (<i>Three level</i>)	Demand	<i>Scenario set</i>
S. Pineda (2014)[91]	<i>Non-cooperative game (game theory)</i>	Ya	Ya	Ya (<i>Bi-level</i>)	Kegagalan peralatan dan energi angin	<i>Scenario set</i>
S. Kamalinia (2014)[106]	<i>Non-cooperative game theory</i>	Ya	Ya	Ya (<i>Bi-level</i>)	Energi angin	<i>Scenario set</i>
A. Seddighi (2015)[118]	<i>Not clearly mentioned</i>	Tidak	Ya	Ya	Beban, harga bahan bakar	<i>Brownian motion</i>
B. Valinejad (2015)[105]	<i>Game theory based on dynamic stochastic MPEC</i>	Ya	Tidak	Ya (<i>Bi-level</i>)	Ketidakpastian strategi IPP	<i>Scenario set</i>
N. Neshat (2015) [102]	<i>Game theory</i>	Ya	Tidak	Tidak	Ketidakpastian strategi IPP	<i>Particle Swarm Optimization</i>
R. Hemmati (2013, 2016) [90], [107]	<i>Agen based model: PSO</i>	Ya	Tidak	Ya (<i>Bi-level</i>)	Energi angin	<i>Normal probability distribution function (PDF) and Monte-Carlo simulation (MCS)</i>
Y. Manabe (2016) [104]	<i>Game theory</i>	Ya	Tidak	Tidak	Ketidakpastian strategy IPP	<i>Montecarlo simulation</i>
Sarjiya (2019) [82]	<i>Game Theory: Multi-period framework, Bi-level, and multi-objective</i>	Ya	Ya	Ya (<i>Bi-level</i>)	Tidak	-

Penelitian ini	<i>Modified Game Theory Optimization Method: Four level, forward moving approach and block mechanism</i>	Ya	Ya	Ya (<i>Four level</i>)	Ketidakpastian strategi IPP, harga bahan bakar, biaya investasi, biaya O&M, pasokan EBT (matahari dan angin), pertumbuhan beban, dan profil beban	<i>Metaheuristic, Montecarlo simulation, Brownian motion</i>
----------------	--	----	----	--------------------------	---	--

Penelitian [91], [97], [106], [118], [121] telah menggunakan *multi-objective function* dan *multi-level optimization*. Terdapat dua jenis *multi-level optimization model* yang digunakan pada penelitian sebelumnya, yaitu *bi-level*[91], [106], [121] dan *three level*[97]. Penelitian ini telah mempertimbangkan *multi objective function* dan *multi level optimization*. Penelitian ini menggunakan *four-level* untuk memodelkan *multi level optimization*. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian [97] adalah pada *multi-level optimization model*, faktor ketidakpastian yang dipertimbangkan dan metode untuk memodelkan faktor ketidakpastian tersebut. Penelitian ini menggunakan *four-level model* yang merupakan pengembangan dari *three-level model*. Faktor ketidakpastian yang dipertimbangkan pada penelitian [97] adalah beban listrik. Pada penelitian ini mempertimbangkan ketidakpastian strategi IPP, harga bahan bakar, biaya investasi, biaya O&M, pasokan EBT (angin dan matahari), pertumbuhan beban listrik, dan profil beban. Pada penelitian [97] metode yang digunakan untuk memodelkan permasalahan ketidakpastian adalah *scenario set*, sedangkan penelitian ini menggunakan *metaheuristic method* dan *montecarlo simulation* yang dikombinasikan dengan *Brownian motion* untuk memodelkan permasalahan ketidakpastian.

Selain ditunjukkan pada Tabel 3, *state of the art* dari penelitian ini juga ditunjukkan oleh *fishbone diagram* pada Gambar 7. Untuk membuat sebuah metode *modified game theory: Four level, forward moving approach and block mechanism* dengan mempertimbangkan ketidakpastian diperlukan beberapa komponen pendukung utama yaitu komponen metode optimasi untuk penyelesaian *deregulated market, multi-*

objective function level, jenis ketidakpastian, metode untuk menyelesaikan ketidakpastian, dan fleksibilitas dalam ketidakpastian. Setiap komponen pendukung utama tersebut terdiri dari beberapa sub pendukung beserta penelitian-penelitian yang berkaitan dengan sub pendukung tersebut. Tidak semua sub pendukung tersebut digunakan dalam penelitian ini. Warna merah pada Gambar 7 menunjukkan sub pendukung yang tidak digunakan dalam penelitian ini. Metode optimasi yang digunakan untuk menyelesaikan optimasi pada *deregulated market* adalah *game theory*. *Multi-objective function* dimodelkan menggunakan *four level*. Jenis ketidakpastian yang dipertimbangkan adalah beban, biaya, pasokan energi, dan strategi IPP.



Gambar 7. Fishbone diagram dari state of the art penelitian

2.2. Dasar teori

Sebuah metode optimasi pengembangan pembangkit yang dapat merepresentasikan *deregulated market* dengan mempertimbangkan *multi objective function* (ekonomis, handal, dan ramah lingkungan) dan faktor ketidakpastian diperlukan dalam proses perencanaan pengembangan pembangkit khususnya pada Sistem kelistrikan Jawa-Bali.

2.2.1. Fungsi Obyektif dan Kekangan dalam Perencanaan Pengembangan Pembangkit

Pada umumnya perencanaan pengembangan pembangkit listrik dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa jenis fungsi obyektif, antara lain adalah fungsi obyektif keekonomian, keandalan, dan emisi CO₂. Fungsi obyektif keekonomian yang digunakan dalam penelitian ini adalah *levelized total cost* (LTC). LTC sangat cocok untuk digunakan pada sistem kelistrikan yang menggunakan mekanisme *tarrif adjustment* seperti pada sistem kelistrikan Indonesia[121]. Perhitungan *levelized total cost* dilakukan menggunakan persamaan (1)[121].

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

dengan

$Investment_t$ = Biaya investasi pada tahun ke t

$O\&M_t$ = Biaya operasi dan pemeliharaan pada tahun ke t

$Fuel_t$ = Biaya bahan bakar pada tahun ke t

r = *Discount rate*

Fungsi obyektif yang digunakan selanjutnya adalah fungsi obyektif emisi CO₂. Emisi CO₂ dipilih sebagai fungsi obyektif disebabkan karena emisi CO₂ merupakan kontributor terbesar penyebab terjadinya pemanasan global[122]. Emisi CO₂ dihitung berdasarkan koefisien emisi tiap jenis pembangkit yang digunakan. Koefisien tersebut

diperoleh dari data perhitungan yang telah dilakukan oleh United National Development Programme (UNDP)[123]. Fungsi obyektif emisi CO₂ yang digunakan dalam penelitian ini adalah *levelized total CO₂ emission cost*. Perhitungan *levelized total CO₂ emission cost* dilakukan menggunakan persamaan (2)[121].

$$\text{Levelized Total CO}_2 \text{ Emission Cost} = \sum_{t=0}^n \left(\frac{\text{CO}_2 \text{ emission cost}_t}{(1+r)^t} \right) \quad (2)$$

dengan

CO₂ emission cost_t = Biaya emisi CO₂ pada tahun ke t

r = Discount rate

Perhitungan biaya emisi CO₂ dilakukan menggunakan persamaan (3) dan (4).

$$\text{Emisi CO}_2 = \text{Faktor emisi} \times \text{Energi yang dibangkitkan} \quad (3)$$

$$\text{Biaya Emisi CO}_2 = \text{Emisi CO}_2 \times \text{Harga emisi CO}_2 \quad (4)$$

Fungsi obyektif selanjutnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah fungsi obyektif keandalan. Fungsi obyektif keandalan dapat direpresentasikan dengan indeks keandalan. Indeks keandalan adalah sebuah indikator keandalan yang dinyatakan dalam bentuk probabilitas[121]. Indeks keandalan yang digunakan pada penelitian ini adalah *loss of load probability* (LOLP). Pemilihan LOLP sebagai fungsi obyektif keandalan berdasarkan pertimbangan bahwa LOLP telah dijadikan dasar indeks keandalan pada berbagai macam sistem kelistrikan, salah satunya adalah sistem kelistrikan di Indonesia[124]. Indeks LOLP dipengaruhi oleh pola beban harian, kapasitas unit pembangkit, dan *forced outage rate* (FOR). Indeks LOLP dihitung dengan menggunakan persamaan (5)[121].

$$\text{LOLP} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{T_{LDC}} \quad (5)$$

Keterangan:

- P_i = Probabilitas kumulatif kapasitas pembangkit pada kombinasi ke-i
 t_i = Durasi kehilangan beban pada saat kombinasi ke-i (jam)
 n = Jumlah total kombinasi dari pembangkit yang ada
 T_{LDC} = Rentang waktu LDC (jam)

Fungsi obyektif ekonomi dan lingkungan merupakan fungsi optimasi maksimum dan fungsi optimasi minimum. Penelitian [52] dan [125] telah menggunakan *fractional programming* untuk mengubah *multi-objective function* yang memiliki fungsi optimasi maksimum dan minimum. Dengan menggunakan *fractional programming*, *multi-objective function* digabungkan menjadi *single objective function*. Pada penelitian ini, fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂ digabungkan menggunakan *fractional programming*. *Fractional programming* mengubah *multi-objective function* menjadi *single objective function* dengan berdasarkan teorema Dinklebach dan pendekatan Guzel. *Fractional programming* mengubah *multi-objective function* menjadi *single objective function* dengan menggunakan persamaan (6)[125].

$$\begin{aligned}
 \text{Max } F &= N_x, D_x \\
 \text{Max } F &= \text{Max } \frac{N_x}{D_x}
 \end{aligned} \tag{6}$$

dengan

N_x = Fungsi optimasi maksimum

D_x = Fungsi optimasi minimum

Penelitian ini menggunakan 3 fungsi obyektif yang terdiri dari dua fungsi obyektif untuk mencari nilai minimum dan satu fungsi obyektif berupa fungsi obyektif batasan. Selain itu, fungsi obyektif gabungan ketiga fungsi obyektif tersebut berupa fungsi obyektif untuk mencari nilai minimum. Oleh karena itu, untuk penggabungan dua fungsi obyektif pencarian nilai minimum, diperlukan adanya modifikasi pada persamaan (6). Modifikasi dilakukan dengan mengubah F menjadi optimasi mencari nilai minimum dan N_x menjadi D_x (optimasi untuk mencari nilai minimum). N_x

merupakan $1/D_x$. Persamaan (7) menunjukkan hasil modifikasi persamaan (6). Nilai F tersebut merupakan *pay off* dari tiap unit pembangkit.

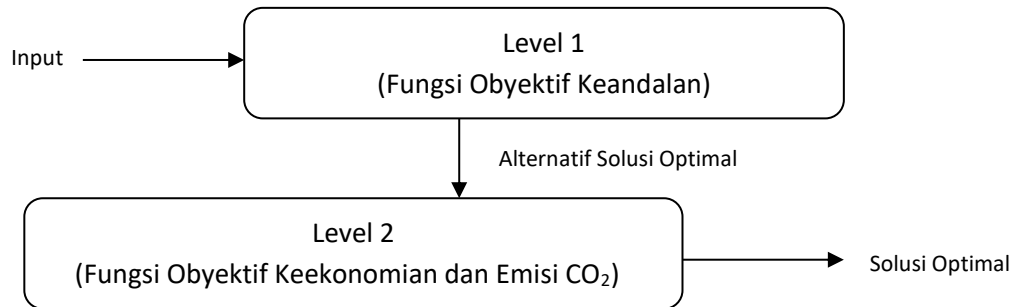
$$Max F = Max(N_x/D_x) \rightarrow Min F = Min (N_{x1} \times N_{x2}) \quad (7)$$

dengan

$$N_{x1} = Total\ levelized\ cost$$

$$N_{x2} = Total\ levelized\ CO_2\ emission\ cost$$

Sedangkan fungsi obyektif keandalan merupakan sebuah fungsi batasan ($\leq 0,274\%$) sehingga tidak dapat digabungkan dengan fungsi obyektif ekonomi dan lingkungan. Permasalahan penggabungan tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan *bi-level optimization model*. Gambar 8 menunjukkan skema dari *bi-level optimization model*. Pada level 1, optimasi dilakukan menggunakan fungsi obyektif keandalan (indeks LOLP) dan menghasilkan beberapa alternatif solusi yang optimal. Beberapa solusi optimal tersebut akan dioptimasi kembali di level 2 dengan menggunakan gabungan fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂ dan menghasilkan solusi optimal yang diinginkan. Penggabungan dua fungsi obyektif tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan (7).



Gambar 8. Skema Bi Level Optimization Model [121].

Selain menggunakan fungsi obyektif, optimasi pengembangan pembangkit dilakukan dengan mempertimbangkan kekangan-kekangan yang ada. Beberapa kekangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kekangan kecukupan bahan

bakar, kekangan keseimbangan pasokan listrik dan kebutuhan listrik, dan kekangan produksi energi listrik.

Kekangan kecukupan bahan bakar digunakan untuk memastikan bahwa sumber daya energi (SDE) yang digunakan sebagai bahan bakar masih mencukupi untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar dalam proses pembangkitan energi listrik. Kekangan kecukupan bahan bakar ditunjukkan pada persamaan (8).

$$\text{Energi listrik dibangkitkan} \times \text{efisiensi thermal} \leq \text{SDE} \quad (8)$$

Kekangan keseimbangan pasokan listrik dan kebutuhan listrik digunakan untuk memastikan bahwa energi listrik yang dibangkitkan mencukupi untuk memenuhi kebutuhan listrik. Kekangan tersebut ditunjukkan pada persamaan (9).

$$\text{Energi listrik dibangkitkan} \geq \text{Kebutuhan energi listrik} \quad (9)$$

Kekangan produksi energi listrik digunakan untuk memastikan bahwa energi listrik yang dibangkitkan tidak lebih besar dari kemampuan maksimal pembangkit membangkitkan listrik. Kekangan tersebut ditunjukkan pada persamaan (10).

$$\text{Energi listrik dibangkitkan} \leq \text{Produksi maksimal pembangkit} \quad (10)$$

2.2.2. *Game Theory Optimization Method*[121].

Permasalahan perencanaan pengembangan pembangkit pada penelitian ini diselesaikan dengan menggunakan *game theory* yang digabungkan dengan *four-level modelling*, *forward moving approach and block mechanism*, *metaheuristic*, *montecarlo simulation*, dan *brownian motion*. Metode tersebut pada penelitian ini selanjutnya disebut dengan *Modified Game Theory Optimization Method*.

Game theory (GT) adalah sebuah model matematis yang digunakan untuk proses pengambilan keputusan pada saat terdapat konflik kepentingan diantara banyak pihak. *Game theory* melibatkan lebih dari satu pihak yang saling berkaitan satu sama lain[126]. *Game theory* terdiri dari 3 komponen utama yaitu *game*, *player* (pemain), dan *strategy*. *Game* adalah proses saling keterkaitan dalam proses pengambilan

keputusan. Sedangkan individu yang terlibat dalam proses pengambilan keputusan tersebut disebut pemain. Keputusan pemilihan strategi tiap pemain dipengaruhi juga oleh keputusan strategi pemain lain. Hal tersebut disebabkan karena adanya keterkaitan setiap keputusan dari tiap pemain terhadap keuntungan (*pay off*) dari strategi pemain lainnya[127]. Secara rasional setiap pemain akan memilih strategi yang dapat memberikan keuntungan maksimal.

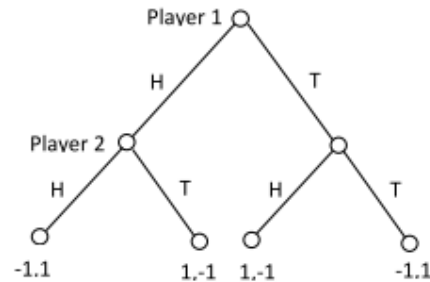
Game theory dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok berdasarkan karakteristiknya. *Game theory* dapat dibedakan menjadi *static game* dan *dynamic game*. *Static game* hanya dimainkan sekali sedangkan *dynamic game* dimainkan beberapa kali secara berurutan maupun bertingkat. *Game theory* juga dapat dibedakan menjadi *complete* dan *incomplete game*, *perfect* dan *imperfect game*, dan *cooperative* dan *non-cooperative game*. *Complete game* adalah *game* dengan karakteristik semua pemain mengetahui semua informasi dan aturan *game*, sedangkan *incomplete game*, pemain hanya mengetahui sebagian informasi dan sebagian aturan *game* atau hanya sebagian pemain yang mengetahui semua informasi dan aturan dari *game*. *Perfect game* adalah *game* dengan karakteristik semua pemain mengetahui semua langkah-langkah sebelumnya yang telah dimainkan. Sedangkan *imperfect game*, pemain tidak mengetahui langkah-langkah sebelumnya. *Cooperative game* adalah *game* dengan karakteristik adanya kerja sama antar pemain. Sedangkan *non-cooperative game*, tidak ada kerja sama antar pemain[127].

Selain berdasarkan karakteristik *game*, *game theory* dapat dibedakan berdasarkan bentuk *game*. Berdasarkan bentuknya, *game theory* dapat dibedakan menjadi *strategic form (normal form)* dan *extensive form*. *Strategic form* hanya menampilkan strategi dan hasil dari masing-masing pemain untuk setiap kemungkinan. Hasil dinyatakan dalam bentuk *pay off* terpisah untuk setiap pemain. *Extensive form* menampilkan tampilan yang lebih detail jika dibandingkan dengan *strategic form*. Selain menampilkan strategi dan *pay off* setiap pemain, *extensive form* menampilkan juga cara permainan, misal: urutan pemain yang bermain, informasi permainan, dan ketidakpastian dalam permainan[126]. Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan contoh dari *strategic form* dan *extensive form*[127]. Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa hanya

strategi (*cooperate* dan *defect*) dan *pay off* dari setiap strategi pemain yang ditampilkan. Sedangkan pada Gambar 10 dapat dilihat urutan dari pemain dalam bermain. Pemain 1 terlebih dahulu bermain dan setelah memperoleh hasil, pemain 2 bermain.

		Player 2	
		Cooperate	Defect
Player 1	Cooperate	3, 3	0, 4
	Defect	4, 0	1, 1

Gambar 9. Contoh Strategic Form



Gambar 10. Contoh Extensive Form

Berdasarkan karakteristik, *game theory* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *static, complete, perfect*, dan *non cooperative game*. Sedangkan berdasarkan bentuknya, *game theory* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *strategic form (normal form)*.

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. Hal tersebut terjadi karena tiap pemain sudah mendapatkan keuntungan yang maksimal pada saat *nash equilibrium*, sehingga ketika pemain mengubah keputusannya tidak akan mendapatkan keuntungan yang lebih besar[128].

Contoh dari kondisi *nash equilibrium* ditunjukkan oleh kotak berwarna kuning pada Gambar 9. Ketika *player 1* memilih strategi *cooperate* dengan *pay off* 3, maka *player 2* akan memilih *defect* karena memiliki *pay off* 4 (lebih besar dibandingkan jika memilih *cooperate* yang memiliki *pay off* 3). Ketika *player 2* telah memilih *defect*, maka *pay off player 1* akan menjadi 0. Oleh karena itu, *player 1* memberikan respon dengan mengubah strateginya menjadi *defect* sehingga *pay off* naik menjadi 1. Perubahan strategi *player 1* tersebut akan memaksa *player 2* memberikan respon. *Player 2* merespon dengan tidak mengubah strategi nya karena jika strategi diubah

menjadi *cooperate*, maka *player 2* akan berkurang nilai *pay off* nya. Oleh karena tidak ada perubahan lagi dari tiap *player* (tiap *player* sudah mendapatkan *pay off* maksimum) maka kondisi tersebut disebut dengan *nash equilibrium*. Kondisi *nash equilibrium* pada Gambar 9 disebut dengan *single nash equilibrium* karena hanya memiliki satu kondisi *nash equilibrium*[126], [127].

Kondisi *single nash equilibrium* tidak bisa terjadi pada setiap *game*. *Game* bisa saja mempunyai lebih dari satu kondisi *nash equilibrium*, atau bahkan tidak punya[126], [127]. Gambar 11 menunjukkan contoh *game* yang mempunyai 2 kondisi *nash equilibrium*[127].

		Player 2	
		Cooperate	Defect
Player 1	Cooperate	5, 5	0, 4
	Defect	4, 0	1, 1

Gambar 11. Game dengan Kondisi Multi Nash Equilibrium

				Player 2		Expected Utility Player 2
			Strategi	S ₁	S ₂	
			Peluang	B ₁	1-B ₁	
	Strategi	Peluang				
Player 1	S ₁	A ₁		S ₁₁ ,S ₁₁	S ₁₂ ,S ₂₁	S ₁₁ *B ₁ + S ₂₁ *(1-B ₁)
	S ₂	1-A ₁		S ₂₁ ,S ₁₂	S ₂₂ ,S ₂₂	S ₁₂ *B ₁ + S ₂₂ *(1-B ₁)
Expected Utility Player 1				S ₁₁ *A ₁ +S ₂₁ *(1-A ₁)	S ₁₂ *A ₁ +S ₂₂ *(1-A ₁)	

Gambar 12. Expected Utility tiap Pemain

Pada saat tidak ada kondisi *nash equilibrium* atau *nash equilibrium* lebih dari 1, maka untuk menentukan strategi yang akan diambil dapat menggunakan *mixed strategies*. *Mixed strategies* dilakukan dengan cara memberikan nilai probabilitas pada setiap strategi yang ada. Strategi yang memiliki probabilitas paling besar, maka strategi tersebut yang diambil. Pemberian nilai probabilitas tersebut dilakukan dengan berdasarkan *expected utility* dari tiap pemain sebagai respon dari strategi pemain lainnya. Gambar 12 menunjukkan perhitungan *expected utility* tiap pemain.

Pada Gambar 12 dapat dilihat bahwa *expected utility* tiap pemain terdiri dari 2 macam, yaitu: *expected utility* pada saat pemain lainnya memilih strategi 1 dan pada saat pemain lainnya memilih strategi 2. Kedua *expected utility* tersebut memiliki nilai yang sama. Oleh karena nilai *pay off* masing-masing strategi pemain diketahui, maka dapat diketahui probabilitas (B1 dan A1) dengan menggunakan persamaan (11) dan (12)[127].

$$s_{11} * B_1 + s_{21} * (1 - B_1) - s_{12} * B_1 + s_{22} * (1 - B_1) = 0 \quad (11)$$

$$S_{11} * A_1 + S_{21} * (1 - A_1) - S_{12} * A_1 + S_{22} * (1 - A_1) = 0 \quad (12)$$

Persamaan (11) dan (12) dapat digunakan dengan mudah jika pemain berjumlah sedikit. Jika pemain berjumlah banyak maka persamaan tersebut akan menjadi lebih rumit untuk diselesaikan. Penelitian [128] menggunakan *sequential quadratic programming based quasi newthon technique* untuk mencari nilai probabilitas strategi tiap pemain. Agar dapat diselesaikan dengan teknik tersebut, matriks *game theory* perlu diubah menjadi sebuah persamaan non linear yang dapat merepresentasikan kondisi *nash equilibrium*.

$$\min \sum_{i=1}^N (\beta^i - \mu^i(\sigma)) \quad (13)$$

$$\mu^i(\sigma^{-i}, s_j^i) - \beta^i \leq 0 \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^m (\sigma_j^i - 1) = 0 \quad (15)$$

$$\sigma_j^i \geq 0 \quad (16)$$

Dengan

β^i = *Pay off* optimum pemain ke i

$\mu^i(\sigma)$ = *Pay off* pemain ke i

$\mu^i(\sigma^{-i}, s_j^i)$ = *Pay off* pemain ke i untuk setiap alternatif strategi j
tanpa memperhitungkan probabilitas strategi pemain ke i

σ_j^i = Probabilitas strategi ke j dari pemain i

Persamaan (13) merepresentasikan kondisi *nash equilibrium* dimana selisih *pay off* optimum (β^i) dengan *pay off* pemain yang telah dikalikan dengan probabilitas yang berhubungan dengan strategi pemain tersebut menjadi sangat kecil. Semakin mendekati nol selisihnya, maka itulah *pay off* pada kondisi *nash equilibrium* nya. Persamaan (14) menunjukkan persyaratan yang harus dipenuhi (*constrain*). Nilai *pay off* optimum (β^i) harus lebih besar daripada *pay off* semua alternatif pemain ke i tanpa memperhitungkan probabilitas pemain tersebut. Hal tersebut menunjukkan kondisi ketika pemain ke i mengubah strateginya maka tidak akan menghasilkan *pay off* yang lebih besar. Selain itu, persamaan (14) akan mencegah nilai minimum pada persamaan (13) menjadi negatif sehingga nilai minimum nya adalah nol. Persamaan (15) menunjukkan bahwa penjumlahan semua nilai probabilitas pada setiap strategi pada setiap pemain harus bernilai 1. Persamaan (16) menunjukkan bahwa setiap nilai probabilitas dari setiap strategi tiap pemain harus bernilai positif.

Dengan menggunakan persamaan (13), (14), (15), dan (16), maka nilai optimum dari *pay off* tiap pemain (β^i) dan probabilitas tiap strategi pemain (σ_j^i) dapat ditentukan. Penentuan nilai *pay off* dan probabilitas tersebut dilakukan menggunakan metode *sequential quadratic program (SQP) based quasi newton method*.

SQP adalah sebuah teknik yang efektif untuk memecahkan permasalahan optimasi fungsi non linear dengan menggunakan *lagrangian*. Optimasi fungsi non linear dinyatakan dengan persamaan (17)[129].

$$\min f(x) \quad (17)$$

dengan batasan:

$$h(x) = 0$$

$$g(x) \geq 0$$

Persamaan (17) diselesaikan dengan *lagrangian* menggunakan persamaan (18).

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) - \lambda h(x) - \mu g(x) \quad (18)$$

Nilai x , λ , dan μ yang menghasilkan L minimum dicari dengan menggunakan *quasi-newton method* (QNM). QNM adalah sebuah metode optimasi yang digunakan pada persamaan non linear apabila persamaan non linear tersebut sulit atau membutuhkan waktu yang lama jika diselesaikan dengan *full newton method*. Inti dari QNM adalah penggunaan *hessian* dan *gradien* untuk memperbarui nilai x , λ , dan μ [130]. Dengan menggunakan QNM pada persamaan (18), maka diperoleh persamaan (19) untuk mencari nilai optimum. Nilai optimum diperoleh pada saat δx , δy , dan $\delta \mu$ sama dengan nol atau lebih kecil dari nilai toleransi yang digunakan.

$$\begin{bmatrix} \nabla^2 L(x, \lambda, \mu) & N_{\lambda}^T & N_{\mu}^T \\ N_h^T & 0 & 0 \\ N_g^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla L(x, \lambda, \mu) \\ h(x) \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Dengan

$$N_h^T = \nabla h(x)$$

$$N_g^T = \nabla g(x)$$

Permasalahan dalam *mixed strategy* adalah pada jumlah pemain dan strategi. Jika jumlah pemain dan strategi banyak maka waktu yang dibutuhkan pun meningkat dengan signifikan [128]. Salah satu solusi yang dapat digunakan untuk menghemat waktu komputasi adalah dengan cara memanfaatkan *majority of dominant strategy*.

Dominant strategy adalah strategi pemain yang memberikan *pay off* paling baik walaupun pemain lainnya mengubah strateginya. Secara rasional setiap pemain akan memilih strategi yang memberikan *pay off* paling besar. Dengan kata lain dengan mencari letak strategi yang memberikan *pay off* paling optimum maka dapat diketahui kondisi *nash equilibrium*. Akan tetapi, permasalahan yang mungkin muncul dari *dominant strategy* adalah jika pemain tidak mempunyai *dominant strategy* atau pemain mempunyai *dominant strategy* lebih dari satu. Hal tersebut akan menyebabkan terjadinya *no unique solution*. *No unique solution* berarti bahwa tidak ada kondisi *nash equilibrium* atau *nash equilibrium* lebih dari satu.

Kondisi *no unique solution* dapat dipecahkan dengan menggunakan *majority rule game*. *Majority rule game* adalah strategi yang dipilih oleh lebih dari setengah pemain akan dijadikan sebagai strategi terpilih (optimum) [131], [132]. Pencarian kondisi *nash*

equilibrium dengan menggunakan metode *majority of dominant strategy* dilakukan dengan cara mencari lokasi mayoritas dari *dominant strategy* setiap pemain. Langkah pertama adalah dengan mencari nilai *pay off* maksimal (*dominant strategy*) dari setiap pemain. Pencarian nilai *pay off* maksimal tersebut menggunakan persamaan (20). Persamaan (21) digunakan untuk mencari lokasi *pay off* maksimalnya. Lokasi dapat diketahui dari indeks *j* pada *dominant strategy*. *Dominant strategy* dan lokasinya akan dicari untuk setiap pemain.

$$\text{dominant strategy} = \max \mu_j \quad (20)$$

$$Loc_{dom}^i = j \quad (21)$$

Dengan :

μ_j = Pay off dari strategi *j*

Loc_{dom}^i = Lokasi dominant strategy player *i*

j = indeks strategi ke *j* dari maksimum pay off

Setelah diketahui lokasi *dominant strategy* tiap pemain, langkah selanjutnya adalah mencari lokasi *majority of dominant strategy*. Terdapat dua jenis *majority of dominant strategy*, yaitu: *absolute majority* dan *relative majority*[132]. *Absolute* dan *relative majority* dapat dicari dengan persamaan (22) dan (23). Jika lebih dari setengah pemain memilih strategi ke *j*, maka strategi ke *j* adalah *absolute majority of dominant strategy*. Jika sebagian besar player memilih strategi ke *j* tetapi jumlah yang memilih tersebut kurang atau sama dengan setengah dari jumlah total player, maka strategi ke *j* adalah *relative majority of dominant strategy*. Setelah diketahui strategi yang menjadi *majority of dominant strategy*, maka dapat diketahui lokasi dari strategi tersebut dengan cara melihat dari indeks *j* (persamaan (24)).

$$\text{absolute majority} = S_j \mid S_j > \frac{n}{2} \quad (22)$$

$$\text{relative majority} = S_j \mid S_j > (n - S_{-j}) \quad (23)$$

$$Loc_{major} = j \quad (24)$$

Dengan :

S_j = Jumlah *dominant strategy* yang berada di j

n = Jumlah pemain

S_{-j} = Jumlah *dominant strategy* yang tidak berada di j

j = indeks strategi ke j dari *majority of dominant*

Dalam proses pencarian lokasi *majority of dominant strategy* tidak terdapat proses iteratif seperti pada pencarian nilai peluang *mixed strategy*. Proses pencarian kondisi *nash equilibrium* dengan *majority of dominant strategy* di atas akan dilakukan setiap tahun selama masa studi.

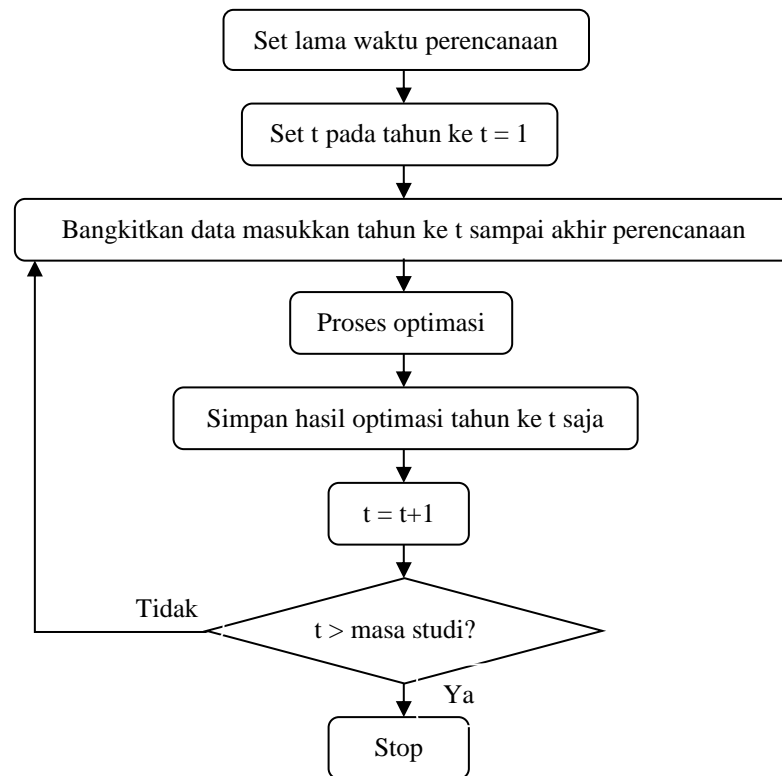
Berdasarkan proses pencarian *nash equilibrium* nya, dapat dilihat perbandingan beban komputasi antara *mixed strategy* dan *majority of dominant strategy*. Beban komputasi *majority of dominant strategy* lebih ringan karena hanya mencari lokasi maksimum diantara semua strategi yang ada dan tidak adanya proses iteratif.

2.2.3. *Forward Moving Approach and Block Mechanism Method*

Metode *forward moving approach and block mechanism* ditambahkan ke dalam *game theory* dengan tujuan untuk mendapatkan fleksibilitas perencanaan akibat adanya faktor ketidakpastian. Inti dari *forward moving approach* adalah melakukan perencanaan untuk tahun sekarang dan dimasa yang akan datang. Sedangkan *block mechanism* prinsipnya adalah perencanaan yang telah ditetapkan tidak dapat diubah walaupun ada perubahan data akibat adanya faktor ketidakpastian. Perubahan tersebut hanya berdampak pada perencanaan pada tahun berlaku dan setelahnya[120].

Gambar 13 menunjukkan *flowchart* dari *forward moving approach and block mechanism*. Pembangkitan data masukkan bertujuan untuk membangkitkan data dengan mempertimbangkan ketidakpastian yang akan terjadi. Dengan kata lain antara tahun ke t dengan ke $t+1$, data masukkan yang digunakan dalam proses optimasi menjadi tidak sama karena adanya faktor ketidakpastian. Data yang tidak sama tersebut tentu saja akan menghasilkan hasil optimasi yang berbeda.

Proses optimasi dilakukan dengan menggunakan metode optimasi pada setiap pemodelan yang digunakan. Hasil optimasi pada tahun ke t akan disimpan dan tidak berubah ketika terjadi proses optimasi pada tahun ke $t+1$. Proses tersebut akan dilakukan terus menerus sampai dengan akhir tahun perencanaan.



Gambar 13. Forward moving approach and block mechanism

2.2.4. Algoritma Genetik[133]

Permasalahan ketidakpastian pada penelitian ini diselesaikan dengan menggunakan tiga model yang berbeda menyesuaikan karakteristik ketidakpastiannya. Ketidakpastian strategi IPP dimodelkan dengan menggunakan metode metaheuristik. Berdasarkan penelitian [103], metode algoritma genetik dapat digunakan dengan tepat untuk memodelkan ketidakpastian strategi IPP. Oleh karena itu pada penelitian ini, pemodelan ketidakpastian strategi IPP diselesaikan dengan menggunakan algoritma genetik.

Algoritma genetik merupakan metode yang meniru kejadian yang ada di alam, tepatnya kejadian perolehan sesuatu yang terbaik melalui proses-proses yang terjadi pada evolusi makhluk hidup. Algoritma genetik dimulai dengan satu set solusi acak. Satu set solusi acak dinamakan populasi. Setiap solusi acak dalam populasi merepresentasikan satu buah solusi yang mungkin memecahkan masalah optimisasi. Setiap solusi acak tersebut dinamakan kromosom atau individu. Kromosom mempunyai tipe data string dan biasanya berupa *bit string biner*.

Secara umum, algoritma genetik meniru teori evolusi dimana sebuah populasi yang terdiri dari beberapa kromosom akan mengikuti proses seleksi, mutasi dan reproduksi. Setiap kromosom atau individu akan diberi suatu nilai yang menunjukkan kemampuan mempertahankan diri (nilai *fitness*). Penilaian ini mengikuti aturan dan rumus tertentu. Kromosom yang memiliki nilai *fitness* baik mempunyai peluang yang lebih tinggi untuk terpilih menjadi kromosom-kromosom induk yang siap bereproduksi. Sifat keturunan ditentukan oleh kombinasi dari sifat kedua induknya (dalam algoritma genetik dinamakan dengan *crossover*), yang dalam kondisi tertentu muncul sifat-sifat baru yang disebabkan oleh proses mutasi genetik (dalam algoritma genetik dinamakan mutasi). Proses ini berlangsung terus menerus sehingga didapatkan keturunan atau generasi yang mempunyai nilai *fitness* yang tinggi.

Komponen-Komponen Algoritma Genetik

- Populasi Kromosom

Populasi kromosom yang mewakili individu-individu pada awalnya dikenali secara acak dengan ukuran yang berbeda untuk setiap kasus. Ukuran yang dimaksud adalah jumlah individu dalam satu populasi dan jumlah gen yang menjadi penyusun kromosom.

x1					x2				
1	0	0	1	1	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
gen1		gen5			gen6		gen10		

Gambar 14. Satu populasi yang terdiri dari 4 kromosom.

Gambar 14 menunjukkan 4 kromosom yang terdapat pada satu populasi. Kromosom tersebut di kode kan dengan menggunakan *binary encoding*. Tiap kromosom pada Gambar 14 terdiri dari dua variabel (x_1 dan x_2) dengan tiap variabel terdiri dari 5 gen. Jadi pada satu kromosom tersebut terdiri dari 10 gen. Gen dalam kromosom pada Gambar 14 berfungsi mengkodekan informasi berupa parameter atau variabel yang digunakan untuk proses optimisasi. Jumlah kromosom maupun gen tergantung dari jenis kasus optimisasi yang akan dipecahkan. Banyaknya solusi dalam satu populasi akan menentukan jumlah kromosom, sedangkan ketelitian dari variabel yang dikodekan akan menentukan jumlah gen.

- *Evaluasi*

Evaluasi bertujuan untuk mendapatkan sebuah nilai yang disebut nilai *fitness* dari suatu individu. Nilai *fitness* tersebut diperoleh dengan menggunakan persamaan (25). Nilai *fitness* tersebut menunjukkan tingkat kemampuan atau kelebihan yang dimiliki tiap individu. Individu yang memiliki nilai *fitness* yang tinggi akan lebih mampu bertahan hidup pada generasi berikutnya, sedangkan yang bernilai *fitness* rendah akan mati.

Setiap kromosom (v) yang merupakan vector yang terdiri dari variabel (x) akan dievaluasi (*eval*) dengan cara memasukkan nilai tiap variabel (x) kedalam suatu fungsi objektif. Sehingga fungsi evaluasi *eval* untuk kromosom ekuivalen dengan fungsi f terhadap x .

$$eval(v) = f(x) \quad (25)$$

- *Elitisme*

Karena seleksi dilakukan secara acak, maka tidak ada jaminan individu yang bernilai *fitness* tertinggi akan selalu terpilih. Walaupun terpilih, ada kemungkinan individu tersebut akan rusak akibat proses pindah silang atau karena proses mutasi. Untuk menjaga agar individu tersebut tidak hilang, maka perlu dibuat kopinya. Untuk ukuran populasi ganjil, dibuat satu kopi dari individu terbaik. Sedangkan untuk ukuran

populasi genap, dibuat dua kopi dari individu terbaik. Proses ini dikenal dengan *elitisme*.

- *Linear Fitness Ranking*

Selama proses evaluasi, ada kemungkinan evolusi mencapai optimum lokal disebabkan kecilnya perbedaan nilai-nilai *fitness* pada semua individu dalam suatu populasi. Proses *linear fitness ranking* bertujuan mengurangi kecenderungan untuk konvergen pada optimum lokal, dengan cara melakukan penskalaan nilai-nilai *fitness*. Individu-individu yang berjumlah N dalam sebuah populasi akan diurutkan berdasarkan nilai *fitness* masing-masing. Setiap individu ke- i akan diberi ranking $R(i)$.

$R(i) = 1$ untuk individu bernilai *fitness* tertinggi, dan

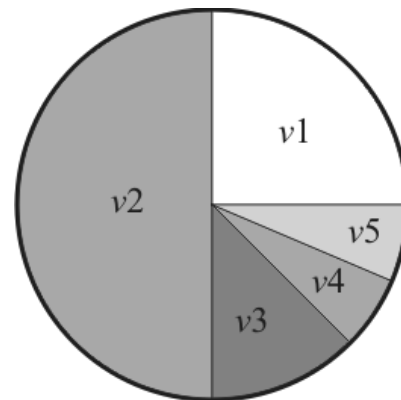
$R(i) = N$ untuk individu bernilai *fitness* terendah.

Kemudian akan diperoleh nilai *fitness* yang baru untuk tiap individu yang berada dalam interval f_{\min} sampai f_{\max} . Nilai *fitness* yang baru tersebut diperoleh dengan menggunakan persamaan (26).

$$f(i) = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) \left(\frac{R(i) - 1}{N - 1} \right) \quad (26)$$

- Seleksi Roda *Roulette*

Kromosom	Nilai <i>fitness</i>
v_1	1
v_2	2
v_3	0,5
v_4	0,25
v_5	0,25
Jumlah	4



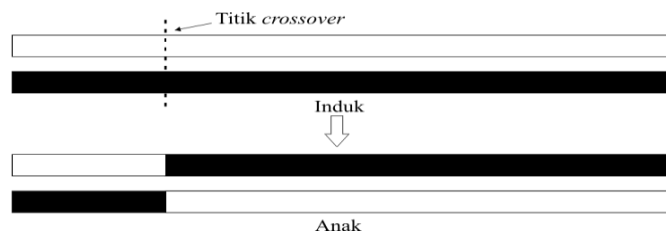
Gambar 15. Penempatan kromosom pada lingkaran roda *roulette*

Seleksi digunakan untuk memilih individu-individu yang akan menjadi induk dalam proses pindah silang (*crossover*). Metode yang umum digunakan adalah metode seleksi roda *roulette* (*roulette-wheel*). Sesuai dengan namanya, metode ini meniru permainan roda *roulette*. Masing-masing kromosom menempati potongan lingkaran pada roda *roulette* secara proporsional sesuai dengan nilai *fitness*-nya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15, kromosom yang memiliki nilai *fitness* tinggi akan menempati potongan lingkaran yang lebih besar dari pada kromosom yang bernilai *fitness* rendah.

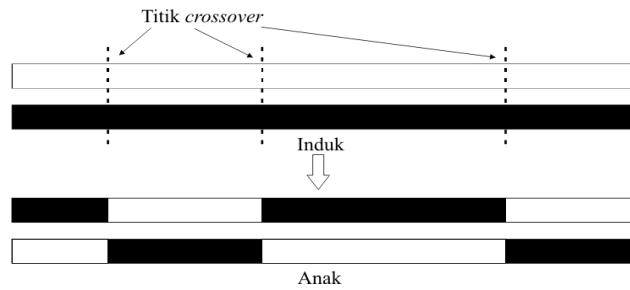
Kemudian kromosom induk dipilih dengan cara memutar roda *roulette*. Kromosom yang menempati potongan lingkaran yang besar akan memiliki peluang terpilih lebih besar dan lebih dari satu kali untuk beberapa kali putaran. Jumlah putaran disesuaikan dengan jumlah induk yang akan dipilih.

- *Crossover*

Crossover bertujuan untuk mengkombinasikan nilai-nilai gen guna mendapatkan kromosom yang lebih baik dari generasi sebelumnya. Populasi kromosom induk yang terpilih pada seleksi roda *roulette* akan menghasilkan keturunan atau populasi kromosom baru melalui proses pindah silang (*crossover*). Dua kromosom induk terpilih akan menghasilkan dua kromosom baru. Pada proses ini, tiap kromosom induk akan dipotong pada titik *crossover* dan akan menjadi dua bagian. Salah satu bagian dari satu kromosom induk akan digantikan oleh satu bagian dari kromosom induk yang lain. Titik *crossover* ditentukan secara acak. Penjelasan diatas dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 16.



Gambar 16. Proses *crossover* satu titik



Gambar 17. Proses *crossover* banyak titik

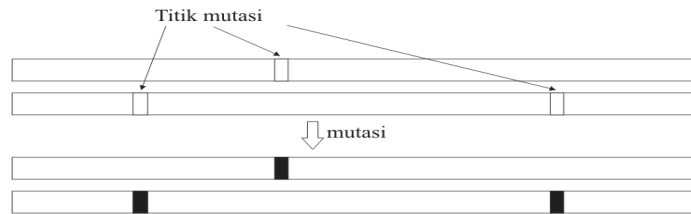
Selain satu titik, dikenal juga *crossover* dengan banyak titik seperti pada Gambar 17. *Crossover* yang dilakukan dengan banyak titik akan memperbaiki kinerja sistem dan sangat baik untuk kromosom dengan jumlah gen yang banyak.

Crossover akan berakibat buruk jika ukuran populasinya sangat kecil. Dalam satu populasi yang sangat kecil, suatu kromosom yang memiliki gen-gen terbaik akan sangat cepat menyebar ke kromosom yang lain sehingga sulit ditemukan kromosom yang lebih baik pada generasi berikutnya. Hal ini diatasi dengan menggunakan aturan probabilitas pindah silang p_{cross} . Artinya, pindah silang hanya dapat dilakukan jika suatu bilangan acak yang dibangkitkan antara 0 sampai 1 kurang dari nilai p_{cross} yang ditentukan. Pada umumnya nilai p_{cross} berkisar antara 0,6 sampai 1.

- *Mutasi*

Mutasi adalah proses mengubah satu atau lebih nilai gen dari kromosom-kromosom hasil pindah silang menggunakan perubahan secara acak dan probabilitas mutasi p_{mutasi} yang kecil. Probabilitas mutasi (*mutation rate*) yang digunakan berkisar antara 0 sampai 0,1. Angka tersebut sangat kecil yang sesuai dengan realitas di alam bahwa peluang mutasi yang terjadi adalah sangat langka. Proses mutasi memiliki kemungkinan untuk menghasilkan kromosom yang lebih baik dari generasi sebelumnya. Prosedur mutasi sangat sederhana seperti pada Gambar 18. Jika dalam satu populasi terdapat N kromosom dan tiap kromosom terdiri dari n gen, maka akan dibangkitkan bilangan acak r sebanyak $N \times n$. Jika bilangan acak $r < p_{mutasi}$, maka gen tersebut akan dikenai proses mutasi. Pada mutasi gen biner, angka 0 menjadi 1 atau sebaliknya, sedangkan pada mutasi gen dengan bilangan *real*, angka pada gen tersebut

diubah menjadi angka lain yang masih berada di dalam interval bilangan *real* yang ditentukan.



Gambar 18. Proses mutasi

- *Regenerasi*

Kromosom-kromosom yang didapat setelah melewati proses seleksi, pindah silang dan mutasi akan membentuk populasi baru yang akan menggantikan populasi yang lama. Penggantian tersebut merupakan proses regenerasi. Pada regenerasi, populasi baru ditambahkan kromosom terbaik dari populasi yang lama yang melalui proses *elitisme*. Populasi yang baru akan membentuk generasi baru dan siap untuk dievaluasi kembali.

2.2.5. *Montecarlo simulation*

Ketidakpastian profil beban, pasokan bahan bakar fosil dan energi baru terbarukan dimodelkan dengan *montecarlo simulation*. *Montecarlo simulation* membangkitkan sebuah nilai secara acak berdasarkan parameter statistik dari data historis yang ada [134], [135]. Pembangkitan nilai acak dilakukan berkali-kali untuk menjamin *robustness* hasil ketidakpastian.

Berdasarkan data historis dapat diperoleh distribusi sebaran datanya. Berdasarkan distribusi sebaran data historis tersebut dapat diperoleh rata-rata data (*mean*) dan standar deviasi nya. Berdasarkan nilai *mean* dan standar deviasi tersebut, dapat dibangkitkan bilangan acak dengan menggunakan persamaan (27). Bilangan acak tersebut akan dibangkitkan beberapa kali hingga dapat mewakili sifat *robustness*. Setiap bilangan acak yang telah didapatkan akan disimpan sebagai hasil *montecarlo simulation*, sehingga setelah beberapa kali proses pembangkitan bilangan acak tersebut, hasil dari *montecarlo simulation* berbentuk sebuah data yang mempunyai

fungsi distribusi. *Robustness* hasil *montecarlo simulation* didapatkan ketika penambahan jumlah pembangkitan bilangan acak tidak berdampak signifikan terhadap fungsi distribusi data hasil *montecarlo simulation*.

$$\text{Bilangan acak} = \text{NORM.INV}(\text{random } p, u, \sigma) \quad (27)$$

Dengan p = probabilitas, dengan nilai antara 0 sampai dengan 1

u = *mean*

σ = standar deviasi

Data hasil *montecarlo simulation* tersebut akan digunakan sebagai data masukkan pada proses optimasi. Data hasil *montecarlo simulation* yang berupa fungsi distribusi tersebut, akan berpengaruh terhadap beban komputasi.

Ketidakpastian pertumbuhan beban, biaya investasi, biaya bahan bakar, dan biaya O&M dimodelkan dengan *montecarlo + Brownian motion*. Perbedaan pemodelan ini dengan pemodelan *montecarlo* adalah pada pembangkitan bilangan acaknya. Pada pemodelan ini, pembangkitan bilangan acak menggunakan *general Brownian motion*. Pembangkitan bilangan acak tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan (28) dan (29). Data hasil *montecarlo simulation + Brownian motion* yang berupa fungsi distribusi tersebut, akan berpengaruh terhadap beban komputasi.

$$\text{Bilangan acak} = PV \times e^r \quad (28)$$

$$r = \left(u - \frac{\sigma^2}{2} \right) + \sigma \times \text{NORM.INV}(\text{random } p, u, \sigma) \quad (29)$$

Dengan PV = nilai sebelumnya

p = probabilitas, dengan nilai antara 0 sampai dengan 1

u = *mean*

σ = standar deviasi

Untuk dapat memasukkan ketidakpastian hasil dari pemodelan *montecarlo* dan *montecarlo Brownian motion* serta untuk mengurangi beban komputasi, maka digunakan persamaan (30). Dengan menggunakan persamaan tersebut, dapat diperoleh hasil dari pemodelan ketidakpastian yang dapat digunakan dalam perencanaan pengembangan pembangkit.

$$\text{Bilangan acak} = \sum_{p=0,1\%}^{99.9\%} Pm_p \text{ Bilangan acak}_p \quad (30)$$

Dengan

p = Probabilitas kumulatif

Pm_p = Probability mass pada saat probabilitas kumulatif p

Bilangan acak_p = Ketidakpastian beban pada saat probabilitas kumulatif p

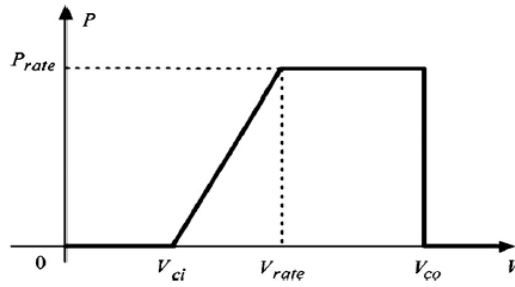
2.2.6. Pemodelan output PLTBayu berdasarkan kecepatan angin

PLTBayu merupakan pembangkit yang bersifat *intermitten* dimana produksi energi listriknya sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin. Penelitian ini memodelkan pengaruh ketidakpastian energi angin berdasarkan kecepatan anginnya. Perubahan kecepatan angin akan berdampak terhadap energi listrik yang dibangkitkan PLTBayu. Hubungan antara kecepatan angin dengan energi listrik yang dibangkitkan PLTBayu ditunjukkan pada persamaan (31)[90].

$$P = \begin{cases} 0 & 0 \leq V \leq V_{ci} \\ P_{rate} \frac{(V - V_{ci})}{(V_{rate} - V_{ci})} & V_{ci} \leq V \leq V_{rate} \\ P_{rate} & V_{rate} \leq V \leq V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq V \end{cases} \quad (31)$$

Parameter yang berpengaruh dalam hubungan non linear antara kecepatan angin dengan energi listrik yang dibangkitkan adalah *cut in speed* (V_{ci}), *rated speed* (V_{rate}), dan *cut out speed* (V_{co}). Jika kecepatan angin berada diantara 0 dengan V_{ci} maka PLTBayu tidak menghasilkan listrik. Jika kecepatan angin berada antara V_{ci} dengan

V_{rate} maka PLTBayu akan menghasilkan energi listrik sesuai dengan persamaan (31). Jika kecepatan angin berada antara V_{rate} dengan V_{co} maka energi listrik yang dihasilkan sebesar P_{rate} dari PLTBayu. Akan tetapi jika kecepatan angin lebih dari V_{co} maka energi listrik yang dihasilkan menjadi 0. Gambar 19 menunjukkan hubungan antara kecepatan angin dengan daya keluaran PLTBayu[90].



Gambar 19. Hubungan antara kecepatan angin dengan daya PLTBayu

Dengan menggunakan data kecepatan angin selama satu tahun, maka total energi yang dibangkitkan PLTBayu dalam satu tahun dapat dihitung menggunakan persamaan (31). Energi yang dibangkitkan oleh PLTBayu selama satu tahun tersebut akan menjadi batasan energi yang mampu dibangkitkan oleh PLTBayu selama satu tahun dan menjadi data acuan faktor kapasitas PLTBayu. Data tersebut digunakan sebagai data masukan untuk memodelkan karakteristik energi yang dibangkitkan oleh PLTBayu dalam proses optimasi.

2.2.7. *Pemodelan output PLTS berdasarkan iradiasi dan temperature*

PLTS memiliki sifat *intermitten* yang sama dengan PLTBayu. Jika PLTBayu dipengaruhi oleh kecepatan angin, PLTS dipengaruhi oleh iradiasi dan temperatur. Pemodelan energi listrik yang dibangkitkan oleh PLTS dengan menggunakan parameter iradiasi dan temperatur merupakan pemodelan yang telah terbukti memiliki akurasi yang baik. Energi listrik yang dibangkitkan oleh PLTS dapat dihitung menggunakan persamaan (32) dan (33)[136].

$$P_{PV} = P_{rc} \frac{G_T}{G_{stc}} [1 + K(T_c - T_r)] \quad (32)$$

$$T_c = T_a + \frac{(T_r - 20)G_T}{800} \quad (33)$$

Dengan :

P_{PV} = Daya listrik keluaran PLTS

P_{rc} = Kapasitas PLTS

G_T = Nilai perkiraan iradiasi

G_{stc} = Nilai iradiasi pada saat tes kondisi standar

K = Koefisien daya ke temperatur

T_c = Temperatur kerja dari PLTS

T_r = *Reference temperature*

T_a = *Ambient temperature*

Dengan menggunakan data iradiasi dan temperatur selama satu tahun, maka total energi yang dibangkitkan PLTS dalam satu tahun dapat dihitung menggunakan persamaan (32) dan (33). Energi yang dibangkitkan oleh PLTS selama satu tahun tersebut akan menjadi batasan energi yang mampu dibangkitkan oleh PLTS selama satu tahun dan menjadi data acuan faktor kapasitas PLTS. Data tersebut digunakan sebagai data masukan untuk memodelkan karakteristik energi yang dibangkitkan oleh PLTS dalam proses optimasi.

2.3. Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka dan dasar teori di atas, diperoleh bahwa permasalahan *deregulated market*, *multi-objective function*, dan ketidakpastian dalam perencanaan pengembangan pembangkit dapat diselesaikan menggunakan metode *game theory* yang digabungkan dengan *four-level modelling*, *forward moving approach* and *block mechanism*, *metaheuristic*, *montecarlo simulation*, dan *brownian motion (modified game theory)*.

Faktor ketidakpastian tersebut akan berpengaruh terhadap hasil perencanaan pengembangan pembangkit. Seberapa besar dan seperti apa pengaruh nya bergantung pada jenis ketidakpastian dan besar nilai ketidakpastiannya. Dengan mempertimbangkan dampak ketidakpastian tersebut, maka ketidakpastian dalam

perencanaan pengembangan pembangkit perlu dimasukkan dalam proses perencanaan pengembangan pembangkit untuk mencari alternatif solusi yang tepat pada Sistem Jawa-Bali.

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, emisi CO₂, kecepatan angin, iradiasi matahari, dan temperatur. 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

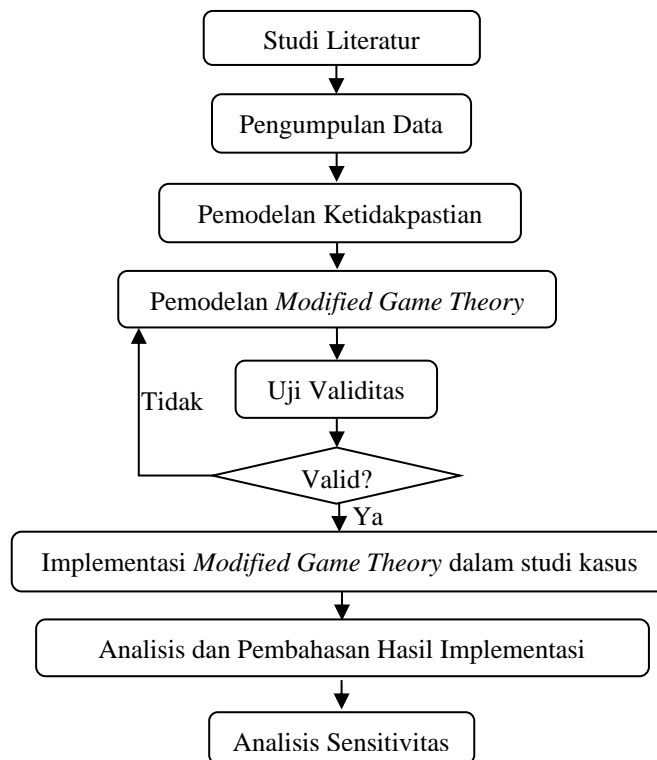
Penelitian ini berjenis penelitian eksperimen dengan tujuan untuk membuat sebuah metode optimasi *modified game theory*. Eksperimen dilakukan dengan cara simulasi menggunakan program Matlab. Gambar 20 menunjukkan *flowchart* penelitian secara global yang dilakukan. Pada beberapa bagian dalam *flowchart* global ini memerlukan penjabaran yang lebih detail sehingga pada bagian tersebut akan didetailkan dengan menggunakan *flowchart* detail per bagian.

Studi literatur diperlukan untuk mendapatkan metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini. Hasil dari studi literatur adalah metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *deregulated market*, *multi-objective function*, dan ketidakpastian. Berdasarkan studi

literatur yang telah dilakukan didapatkan bahwa permasalahan dalam penelitian ini dapat diselesaikan menggunakan *modified game theory* (metode *game theory* yang digabungkan dengan *four-level modelling*, *forward moving approach* and *block mechanism*, *metaheuristic*, *montecarlo simulation*, dan *brownian motion*). Proses selanjutnya 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 pemodelan ketidakpastian dan pemodelan *modified game theory*.

Pemodelan ketidakpastian terdiri dari pemodelan ketidakpastian pertumbuhan beban dan profil beban, pemodelan ketidakpastian biaya bahan bakar, investasi, dan O&M, pemodelan ketidakpastian pasokan bahan bakar, pemodelan ketidakpastian EBT, dan pemodelan ketidakpastian strategi IPP. Pemodelan setiap ketidakpastian tersebut membutuhkan penjelasan secara lebih detail dan akan dijelaskan lebih lanjut pada Sub-bab pemodelan ketidakpastian.



Gambar 20. Flowchart Penelitian secara Global

Pemodelan *modified game theory* bertujuan untuk mendapatkan sebuah model optimasi yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini. Pemodelan *modified game theory* akan dijelaskan lebih lanjut pada Sub-bab pemodelan *modified game theory*.

Uji validitas dilakukan terhadap model *modified game theory*. Uji validitas dilakukan dengan cara *benchmarking* hasil dengan penelitian [137] dan [121]. Model *modified game theory* yang telah dinyatakan valid tersebut kemudian digunakan untuk melakukan optimasi pada sistem Jawa-Bali. Pemilihan sistem Jawa-Bali sebagai studi kasus berdasarkan pertimbangan bahwa sistem Jawa-Bali merupakan sistem terbesar di Indonesia dan memegang peranan penting dalam pertumbuhan ekonomi Indonesia. Hasil optimasi sistem Jawa-Bali tersebut kemudian akan dianalisis dan dilakukan pembahasan.

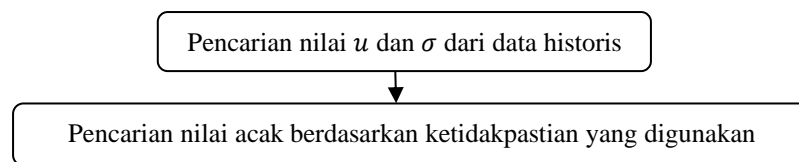
Hasil optimasi tersebut berupa komposisi pembangkit (jenis dan kapasitasnya) yang harus tersedia pada setiap tahun perencanaan. Hasil optimasi tersebut akan dianalisis kombinasi metode analisis trend dan analisis deskriptif. Analisis trend digunakan untuk menganalisis pola pertumbuhan kapasitas dan unit 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. Berdasarkan analisis dan pembahasan tersebut, maka dapat diketahui dampak ketidakpastian beban, biaya, pasokan energi, dan strategi IPP terhadap hasil optimasi. Selain itu untuk memperkuat validasi hasil optimasi, pada tahap ini dilakukan *benchmarking* hasil dengan data perencanaan yang ada pada rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL).

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui dampak perubahan nilai dari setiap ketidakpastian yang digunakan dalam penelitian ini. Analisis sensitivitas dilakukan dengan menaik turunkan sebesar 10% dari nilai hasil pemodelan ketidakpastian. Dampak perubahan tersebut akan menunjukkan signifikansi pengaruh setiap ketidakpastian yang digunakan.

3.2.1 Pemodelan Ketidakpastian

Sub-bab ini merupakan penjabaran dari bagian pemodelan ketidakpastian yang terdapat pada *flowchart* global. Ketidakpastian yang digunakan dalam penelitian ini secara garis besar dapat dibedakan menjadi 2 kelompok. Kelompok pertama terdiri dari ketidakpastian beban, biaya, dan pasokan energi. Kelompok kedua terdiri dari ketidakpastian strategi IPP saja.

Pemodelan ketidakpastian pada kelompok pertama ditunjukkan pada Gambar 21. Langkah pertama dimulai dengan pencarian nilai u (*mean*) dan σ (standar deviasi) berdasarkan data historis untuk setiap data ketidakpastian. Berdasarkan nilai u dan σ tersebut, dapat dilakukan pencarian nilai acak berdasarkan ketidakpastian yang digunakan dengan menggunakan persamaan (27) dan (28).

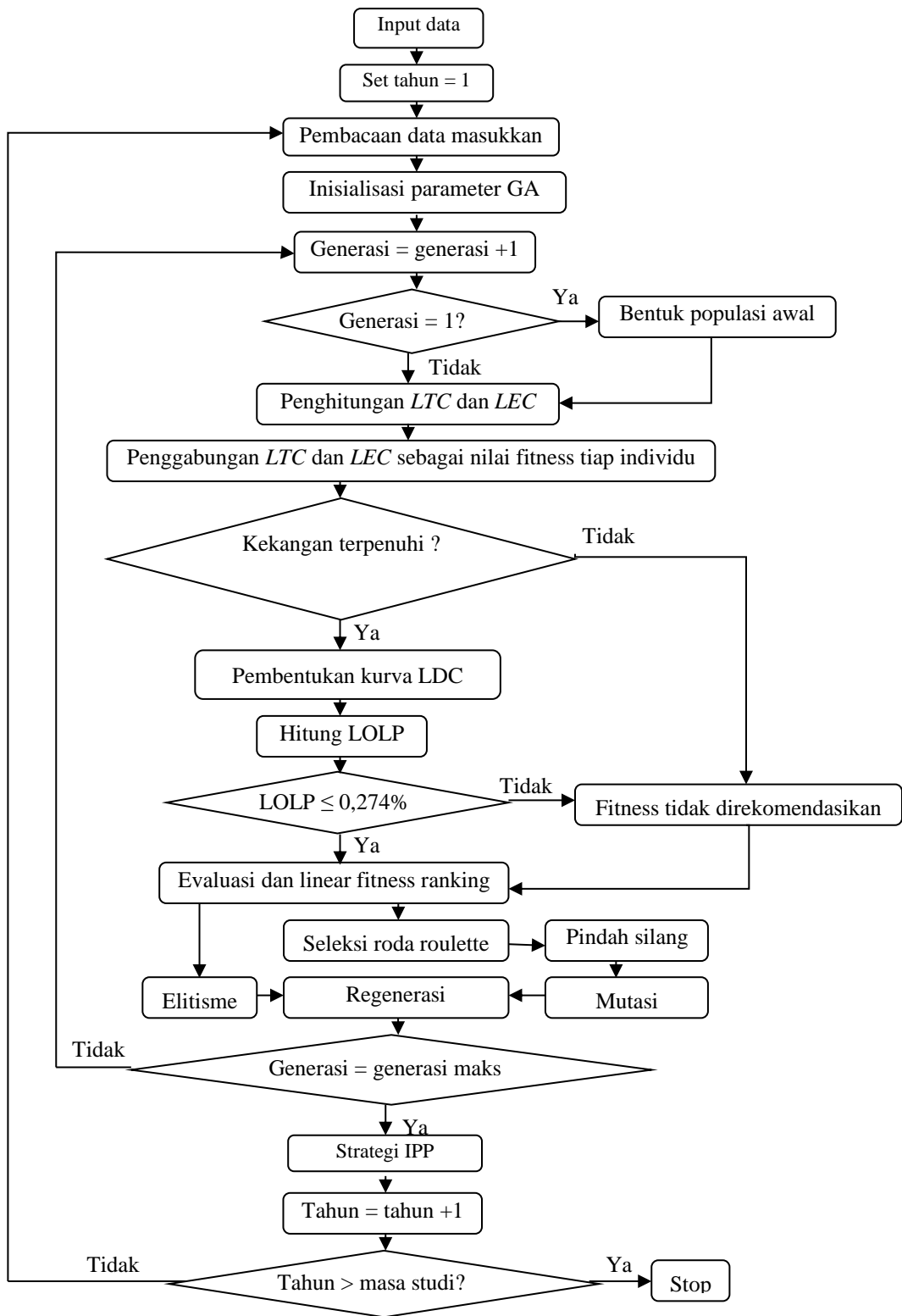


Gambar 21. Pemodelan ketidakpastian kelompok pertama (beban, biaya, dan pasokan energi)

Pencarian nilai acak tersebut akan disimulasikan 200 kali untuk menunjukkan *robustness* nya. *Robustness* tersebut dapat diketahui ketika penambahan jumlah simulasi tidak mengubah pdf nya. Hasil dari pencarian nilai acak ini berupa kumpulan nilai acak yang mempunyai pdf nya masing-masing.

Kumpulan nilai acak tersebut tidak dapat langsung digunakan untuk proses optimasi disebabkan oleh pertimbangan waktu komputasi. Oleh karena itu diperlukan sebuah nilai yang dapat merepresentasikan kumpulan nilai acak tersebut. Nilai tersebut diperoleh dengan menggunakan persamaan (30). Nilai bilangan acak tersebut akan digunakan dalam proses optimasi pada langkah selanjutnya.

Pemodelan ketidakpastian pada kelompok kedua dimodelkan dengan menggunakan algoritma genetik. Pemodelan tersebut ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Pemodelan ketidakpastian kelompok kedua (strategi IPP)

Data masukan yang digunakan adalah data pembangkit dan data beban. Proses inisialisasi parameter GA digunakan untuk menentukan nilai parameter yang digunakan. Parameter-parameter tersebut antara lain: jumlah kromosom, jumlah gen, probabilitas pindah silang, probabilitas mutasi, dan jumlah generasi maksimum.

Pada saat generasi = 1, dilakukan pembentukan populasi awal secara acak yang terdiri dari beberapa kromosom. Setiap kromosom terdiri dari beberapa gen yang mewakili ukuran kapasitas dari setiap pembangkit. Jumlah gen dalam kromosom sebanding dengan jumlah pembangkit yang digunakan dalam proses perencanaan pengembangan pembangkit.

Setelah populasi awal yang terdiri dari alternatif solusi (kromosom) terbentuk, dilakukan penghitungan nilai LTC dan LEC dari setiap kromosom dalam populasi dengan menggunakan persamaan (1) dan (2). LTC dan LEC tersebut akan digabungkan menjadi sebuah fungsi obyektif dengan menggunakan persamaan (11) untuk setiap kromosom. Fungsi obyektif tersebut akan menjadi nilai *fitness* setiap kromosom.

Langkah selanjutnya adalah pengecekan kekangan bahan bakar, kekangan keseimbangan pasokan dan beban, dan kekangan produksi energi listrik. Kromosom yang tidak memenuhi batasan kekangan tersebut, nilai *fitness* nya tidak akan direkomendasikan. Setelah dilakukan pengecekan kekangan, langkah selanjutnya adalah penilaian nilai *fitness* dengan menggunakan fungsi obyektif keandalan.

Fungsi obyektif keandalan diperoleh berdasarkan nilai LOLP yang dihitung dengan menggunakan *load duration curve* (LDC). Untuk kromosom yang tidak mampu memenuhi standar nilai LOLP yang ditentukan sebagai fungsi obyektif, maka nilai *fitness* nya tidak akan direkomendasikan.

Nilai *fitness* tersebut akan di evaluasi dan diurutkan nilai *fitness* nya dengan menggunakan *linear fitness ranking*. *Linear fitness ranking* adalah proses penskalaan nilai *fitness*. Nilai *fitness* yang sudah diskalakan kemudian diurutkan berdasarkan nilainya. *Linear fitness ranking* digunakan untuk menghindari terjadinya konvergensi yang disebabkan oleh nilai optimum lokal. Nilai optimum lokal disebabkan karena perbedaan nilai *fitness* yang sangat kecil. Dengan adanya *linear fitness ranking*, maka nilai *fitness* yang baru dapat diperoleh dengan persamaan (26).

Elitisme adalah proses pembuatan satu atau dua buah tiruan dari kromosom yang mempunyai nilai *fitness* tertinggi. Kromosom hasil *elitisme* akan ditempatkan pada variabel *tempv* yang menempati kromosom nomor 1 dan 2 pada generasi berikutnya. Untuk kromosom nomor selanjutnya akan diperoleh dari hasil seleksi, pindah silang dan mutasi.

Proses seleksi roda *roulette* dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Cari total *fitness* dari populasi dengan persamaan (34).

$$F_{total} = \sum_{i=1}^{jumlah\ kromosom} F(i) \quad (34)$$

- Hitung probabilitas seleksi p_i untuk setiap kromosom v_i ($i = 1, \dots, jumkrom$) dengan menggunakan persamaan (35).

$$p_i = \frac{F(i)}{F_{total}} \quad (35)$$

- Hitung probabilitas seleksi kumulatif k_i pada roda roulette yang akan ditempati masing-masing kromosom v_i berdasarkan persentase probabilitas seleksi p_i dengan menggunakan persamaan (36).

$$k_i = \sum_{kromosom=1}^i (100 \times p_{kromosom}) \quad (36)$$

- Lakukan proses seleksi berdasarkan perputaran roda roulette sebanyak (jumlah kromosom–2) kali. Proses seleksi dilakukan dengan cara: bangkitkan bilangan acak r dari range 0 sampai 1 dan dikalikan dengan 100%. Jika $k_{i-1} < r < k_i$, pilih kromosom v_i . Berdasarkan proses seleksi tersebut maka akan didapatkan kromosom induk sebanyak (jumlah kromosom–2).

Pada langkah selanjutnya, kromosom induk tersebut akan mengalami proses pindah silang dan mutasi. Peluang terjadinya pindah silang diantara dua induk tergantung dari parameter probabilitas *crossover* (p_{cross}). Titik pindah silang dipilih secara acak dan berada di antara gen pertama dan terakhir dari kromosom induk. Operasi *crossover* dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Bangkitkan bilangan acak r dengan nilai antara 0 sampai 1.
- Jika $r < p_{cross}$, pilih dua kromosom untuk operasi *crossover*.

- Pilih titik *crossover* secara acak dari 1 sampai *jumgen*.
- Potong kromosom dari dua induk pada titik *crossover* dan keduanya saling menukarkan kromosom bagian depan.

Sedangkan kemampuan untuk bermutasi dipengaruhi oleh probabilitas mutasi p_{mutasi} . Titik mutasi dipilih secara acak, sehingga perlu dibangkitkan bilangan acak p_{mutasi} sebanyak $jumkrom \times jumgen$. Proses mutasi dilakukan dengan cara sebagai berikut:

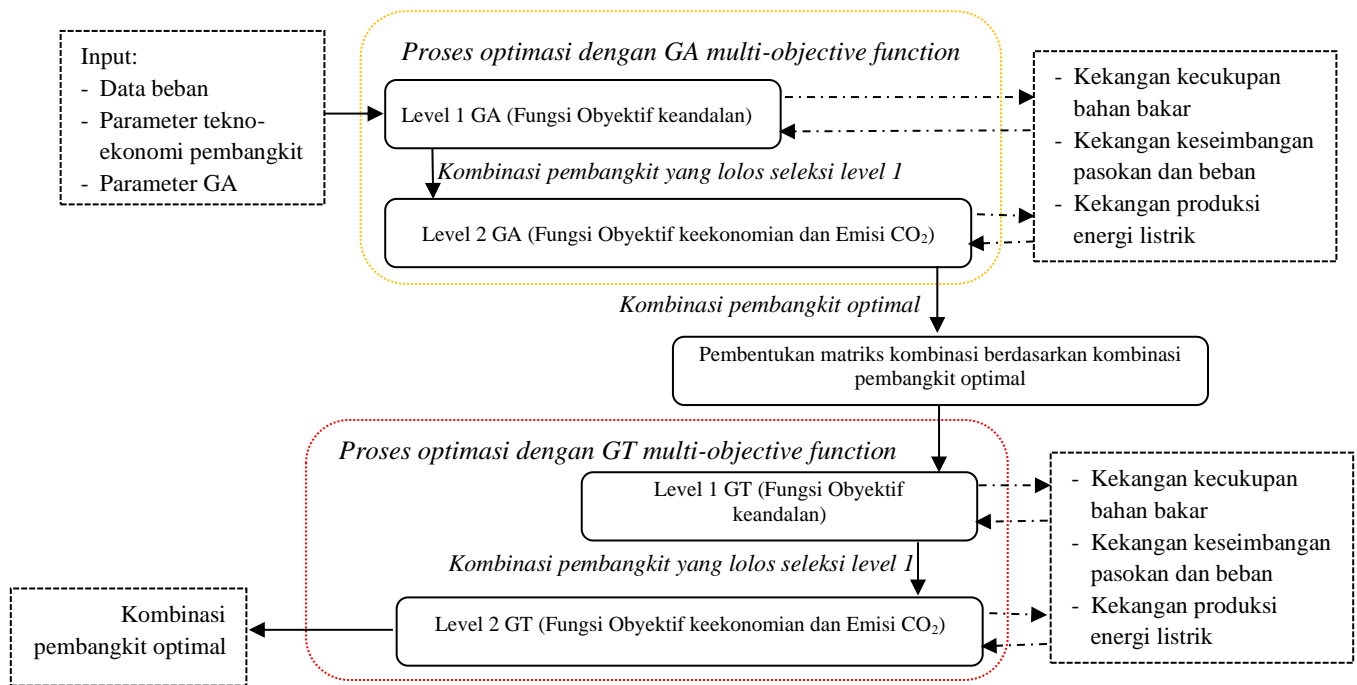
- Bangkitkan bilangan acak r dalam interval 0 sampai 1.
- Jika $r < p_m$, maka mutasi gen.
- Mutasi dilakukan dengan membangkitkan bilangan acak kembali sebagai nilai yang baru tetapi masih berada dalam rentang yang ditentukan.

Populasi kromosom induk yang telah mengalami pindah silang dan mutasi tersebut kemudian digabungkan dengan 2 kromosom yang telah disimpan dalam proses *elitisme* sehingga jumlah kromosom induk menjadi sebanyak jumlah kromosom awal kembali. Populasi kromosom tersebut akan digunakan pada generasi berikutnya. Siklus GA ini berlangsung sampai iterasi mencapai generasi maksimum yang ditentukan.

Setelah generasi mencapai nilai maksimal nya, solusi optimal dari GA tersebut akan di dijadikan sebagai strategi IPP yang akan di optimasi kembali dengan metode *game theory multi-objective function* pada tahap selanjutnya.

3.2.2 *Pemodelan Modified Game Theory*

Sub-bab ini merupakan penjabaran dari bagian pemodelan *modified game theory* yang terdapat pada *flowchart* global. Pemodelan *modified game theory* dilakukan dengan mempertimbangkan semua ketidakpastian yang dipertimbangkan dalam penelitian ini. Penggunaan metode algortima genetik untuk memodelkan ketidakpastian strategi IPP membuat metode optimasi pada penelitian ini menjadi *four-level optimization* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23. *Four-level optimization* terdiri dari 2 level pada optimisasi dengan GA dan 2 level pada optimisasi dengan GT. Hasil dari setiap level wajib memenuhi kekangan yang telah ditentukan, yaitu kekangan kecukupan bahan bakar, kekangan keseimbangan pasokan dan beban, dan kekangan kemampuan produksi energi listrik.



Gambar 23. Four-level optimization

Level 1 adalah optimasi dengan fungsi obyektif keandalan baik untuk GA maupun GT. Dan level 2 adalah optimasi dengan fungsi obyektif keekonomian dan emisi CO₂ baik untuk GA maupun GT. Input level 1 GA berupa data beban, parameter tekno-ekonomi pembangkit, dan parameter GA. Setelah melalui proses optimasi dengan fungsi obyektif keandalan pada level ini, maka akan didapatkan kombinasi-kombinasi pembangkit yang memenuhi fungsi obyektif tersebut. Data input pada level 1 GA dan kombinasi-kombinasi tersebut akan menjadi data input pada level 2 GA. Pada level 2 ini dilakukan perhitungan LTC sebagai fungsi obyektif keekonomian dan LEC sebagai fungsi obyektif emisi CO₂. Output level 2 GA ini akan menghasilkan kombinasi pembangkit optimal yang terdiri dari jenis pembangkit beserta ukurannya.

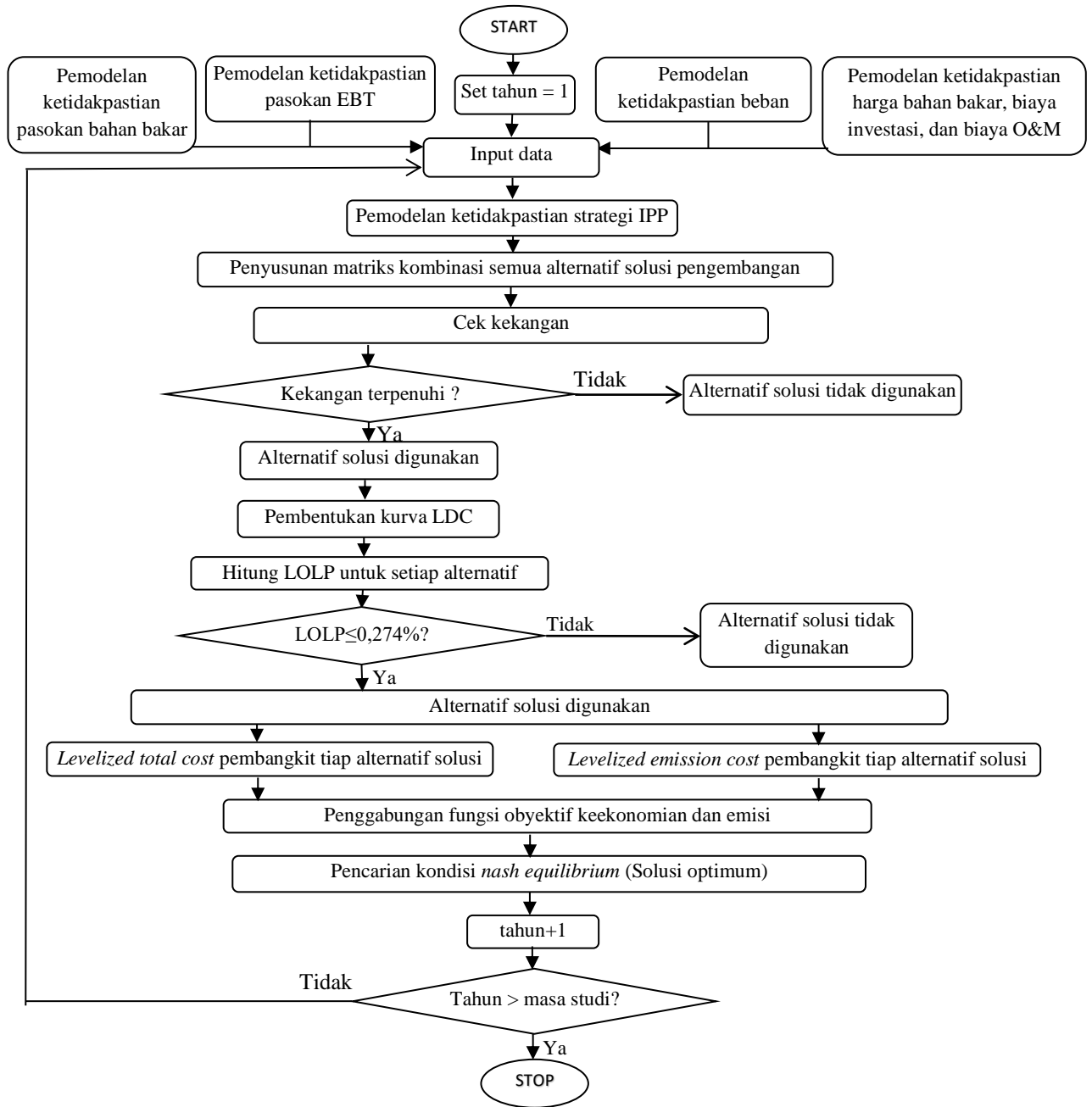
Proses optimasi dengan menggunakan GA ini merepresentasikan proses pengambilan keputusan tiap IPP secara internal tanpa memperhitungkan konflik kepentingan antar IPP. Dengan kata lain, proses optimasi pada level ini dilakukan dengan menggunakan sudut pandang *regulated*. Output yang berupa komposisi pembangkit yang optimal tersebut akan dijadikan sebagai input pada proses optimasi level 1 GT. Sebelum dapat digunakan sebagai inputan level 1 GT, kombinasi

pembangkit tersebut perlu diubah menjadi sebuah matriks kombinasi yang mungkin terbentuk. Matriks kombinasi tersebut akan menjadi input pada level 1 GT. Setelah melalui proses optimasi dengan fungsi obyektif keandalan pada level ini, maka akan didapatkan kombinasi-kombinasi pembangkit yang memenuhi fungsi obyektif tersebut. Kombinasi-kombinasi tersebut akan menjadi data input pada level 2 GT. Pada level 2 ini dilakukan perhitungan LTC sebagai fungsi obyektif keekonomian dan LEC sebagai fungsi obyektif emisi CO₂. Output level 2 GT ini akan menghasilkan kombinasi pembangkit optimal yang terdiri dari jenis pembangkit beserta ukurannya. Proses optimasi dengan menggunakan GT ini dilakukan dengan memperhitungkan faktor kepentingan antar IPP (sudut pandang *deregulated*).

Pemodelan *modified game theory* secara lebih rinci ditunjukkan pada Gambar 24. Set tahun =1 digunakan untuk mengatur tahun pertama dari optimasi perencanaan pengembangan pembangkit. Setelah tahun pertama diatur, maka dilakukan pembacaan data masukan. Data yang dibaca adalah parameter tekno-ekonomi pembangkit dan beban beserta ketidakpastian yang dipertimbangkan yaitu ketidakpastian pasokan bahan bakar, pasokan EBT, ketidakpastian beban (profil dan pertumbuhan beban), dan ketidakpastian biaya (harga bahan bakar, biaya investasi, dan biaya O&M).

Setelah itu dilakukan pemodelan ketidakpastian strategi IPP. Pemodelan strategi IPP dilakukan terpisah karena mempunyai metode pemodelan ketidakpastian yang berbeda. Pemodelan ketidakpastian strategi IPP dimodelkan dengan menggunakan algoritma genetik seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 3.2.1.

Pemodelan ketidakpastian strategi IPP tersebut menghasilkan strategi tiap IPP yang akan digunakan pada proses optimasi selanjutnya yang menggunakan metode *game theory*. Langkah pertama dari proses optimasi tersebut adalah penyusunan matriks kombinasi. Penyusunan matriks kombinasi semua alternatif solusi pengembangan dilakukan dengan proses kombinasi setiap alternatif unit pembangkit yang digunakan. Berdasarkan matriks kombinasi tersebut, dilakukan perhitungan pengecekan kekangan bahan bakar, kekangan keseimbangan pasokan dan beban, dan kekangan produksi energi listrik .



Gambar 24. Pemodelan *Modified Game Theory*

Jika batasan kekangan terpenuhi maka alternatif solusi akan digunakan untuk proses selanjutnya, sedangkan jika tidak maka alternatif solusi tidak akan digunakan. Langkah selanjutnya adalah pembentukan kurva LDC dan perhitungan indeks LOLP. Kurva LDC dibentuk berdasarkan kurva beban harian per jam. Setelah kurva LDC

terbentuk maka dilakukan perhitungan indeks LOLP dengan menggunakan persamaan (5). Perhitungan indeks LOLP dilakukan untuk setiap alternatif solusi.

Berdasarkan perhitungan indeks LOLP, dilakukan pengecekan indeks LOLP untuk setiap alternatif solusi. Jika nilai LOLP alternatif solusi melebihi standar maka alternatif solusi tidak digunakan. Jika nilai indeks LOLP kurang dari atau sama dengan standar, alternatif solusi digunakan untuk proses selanjutnya.

Langkah selanjutnya adalah perhitungan fungsi obyektif *total levelized cost* dan *total levelized CO₂ emission cost*. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) dan (2). Perhitungan fungsi obyektif dilakukan pada tiap unit pembangkit yang ada pada setiap alternatif solusi.

Penggabungan kedua fungsi obyektif dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh nilai *pay off* masing-masing unit pembangkit sehingga dapat dilakukan proses optimasi. Penggabungan kedua fungsi obyektif tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan (7).

Hasil dari penggabungan fungsi obyektif tersebut adalah sebuah matriks kombinasi alternatif solusi beserta nilai *pay off* nya. Dengan menggunakan matriks tersebut, maka dapat dicari solusi optimumnya berdasarkan kondisi *nash equilibrium*. Kondisi *nash equilibrium* dapat dicari dengan menggunakan *mixed strategy* maupun *majority of dominant strategy* seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.2.2.

Pada hasil optimasi tersebut akan diimplementasikan metode *forward moving approach and block mechanism* untuk mendapatkan fleksibilitas dalam proses optimasi. Perubahan perencanaan akibat adanya proses ketidakpastian hanya akan berlaku pada perencanaan di masa yang akan datang, sedangkan untuk perencanaan yang telah berlanjut (telah didapatkan hasil optimasinya) tidak terpengaruh oleh proses ketidakpastian yang terjadi.

4. JADWAL PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan mulai semester 1 tahun ajaran 2018/2019 hingga semester 8 tahun ajaran 2021/2022 dengan rincian waktu seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. 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.	Pemodelan ketidakpastian EBT dan uji validitas								
5.	Pemodelan ketidakpastian beban dan uji validitas								
6.	Pemodelan ketidakpastian pasokan bahan bakar dan uji validitas								
7.	Pemodelan ketidakpastian harga bahan bakar, biaya investasi, dan biaya O&M, serta uji validitas								
8.	Pemodelan ketidakpastian strategi IPP dan uji validitas								
9.	Penggabungan ketidakpastian EBT, beban, pasokan bahan bakar, harga bahan bakar, biaya investasi, biaya O&M, dan strategi IPP serta uji validitas								
10	Analisis dan pembahasan								
11	Penulisan laporan								

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Oree, S. Z. Sayed Hassen, and P. J. Fleming, “Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. December 2016, pp. 790–803, 2017.
- [2] B. F. Hobbs, “Optimization methods for electric utility resource planning,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 83, no. 1, pp. 1–20, 1995.
- [3] H. Sadeghi, M. Rashidinejad, and A. Abdollahi, “A comprehensive sequential review study through the generation expansion planning,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 1369–1394, 2017.
- [4] B. F. Hobbs, “Optimization methods for electric utility resource planning,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 83, no. 1, pp. 1–20, 1995.
- [5] A. G. Kagiannas, D. T. Askounis, and J. Psarras, “Power generation planning: A survey from monopoly to competition,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 26, no. 6, pp. 413–421, 2004.
- [6] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, and J. H. Zhao, “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278, 2009.
- [7] Q. Chen, C. Kang, Q. Xia, and J. Zhong, “Power generation expansion planning model towards low-carbon economy and its application in china,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1117–1125, 2010.
- [8] D. Anderson, “Models for Determining Least-Cost Investments in Electricity Supply,” *Bell J. Econ. Manag. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 267–299, 1972.
- [9] P. V. Schaeffer, “The inclusion of ‘ spinning reserves ’ in investment and simulation models for electricity generation,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 42, pp. 178–189, 1989.
- [10] G. A. Bakirtzis, P. N. Biskas, and V. Chatziathanasiou, “Generation expansion planning by MILP considering mid-term scheduling decisions,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 86, pp. 98–112, 2012.
- [11] R. R. Booth, “Optimal generation planning considering uncertainty,” *IEEE*

- Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-91, no. 1, pp. 70–77, 1972.
- [12] A. Shangvi and I. Shavel, “Investment Planning for Hydro-Thermal Power System Expansion: Stochastic Programming Employing the Dantzig-Wolfe Decomposition Principle,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 115–121, 1986.
 - [13] K. Nara, “State of the arts of the modern heuristics application to power systems,” in *2000 IEEE Power Engineering Society, Conference Proceedings*, 2000, pp. 1279–1283.
 - [14] S. Kannan, S. M. R. Slochanal, and N. P. Padhy, “Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 466–475, 2005.
 - [15] R. Hemmati, R.-A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, “Comprehensive review of generation and transmission expansion planning,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 9, pp. 955–964, 2013.
 - [16] T. R. R. Ballireddy and P. K. Modi, “Generation Expansion Planning Considering Reliability of the System: A Review on Various Optimization Techniques,” in *International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA) 2017*, 2017, pp. 137–142.
 - [17] O. H. Mohammed, Y. Amirat, M. Benbouzid, and T. Tang, “Hybrid Generation Systems Planning Expansion Forecast: A Critical State of the Art Review,” *Proceedings 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 1668–1673, 2013.
 - [18] R. F. S. Budi, Sarjiya, and Sasongko Pramono Hadi, “A review of potential method for optimization of power plant expansion planning in Jawa-Madura-Bali electricity system,” *Commun. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 29–36, 2017.
 - [19] L. Gacitua *et al.*, “A comprehensive review on expansion planning: Models and tools for energy policy analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, no. September, pp. 346–360, 2018.
 - [20] N. E. Koltsaklis and A. S. Dagoumas, “State-of-the-art generation expansion planning: A review,” *Appl. Energy*, vol. 230, pp. 563–589, 2018.
 - [21] A. Ahmed and M. Khalid, “A review on the selected applications of forecasting

- models in renewable power systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 100, no. September 2018, pp. 9–21, 2019.
- [22] A. Alqurashi, A. H. Etemadi, and A. Khodaei, “Treatment of uncertainty for next generation power systems: State-of-the-art in stochastic optimization,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 141, pp. 233–245, 2016.
 - [23] J. Sirikum, A. Techanitisawad, and V. Kachitvichyanukul, “A New Efficient GA-Benders’ Decomposition Method: For Power Generation Expansion Planning With Emission Controls,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 1092–1100, 2007.
 - [24] Q. Zhang, B. C. Mclellan, T. Tezuka, and K. N. Ishihara, “Economic and environmental analysis of power generation expansion in Japan considering Fukushima nuclear accident using a multi-objective optimization model,” *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 986–995, 2012.
 - [25] S. Kannan, S. M. R. Slochanal, S. Baskar, and P. Murugan, “Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning in the partially deregulated environment,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, pp. 111–118, 2007.
 - [26] PT. PLN, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2018-2027,” 2018.
 - [27] Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia, “Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2015-2034,” 2015.
 - [28] PCW, “Power in Indonesia: Investment and Taxation Guide,” 2017.
 - [29] PWC and APLSI, “Alternating Currents: Indonesian Power Industry Survey 2018,” 2018.
 - [30] Global Subsidies Initiative, “Indonesia’s Financially Sustainable Electricity Sector,” 2016.
 - [31] P. Tharakan, “Summary of Indonesia’s Energy Sector Assessment,” 2015.
 - [32] PT PLN, “35.000 MW untuk Indonesia,” *PT PLN (Persero)*, 2015. [Online]. Available: <http://www.pln.co.id/?p=12187>. [Accessed: 02-Sep-2016].
 - [33] “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Pesero) Tahun 2017-

2026.” 2017.

- [34] PT PLN, *Statistik PLN 2015*. Jakarta: PT. PLN, 2016.
- [35] Presiden Republik Indonesia, “Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 79/2014 tentang Kebijakan Energi Nasional,” *Kebijakan Energi Nasional*. 2014.
- [36] KESDM, “Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2015-2034,” 2015.
- [37] M. Chaudry, N. Jenkins, M. Qadrdan, and J. Wu, “Combined gas and electricity network expansion planning,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1171–1187, 2014.
- [38] F. Delgado, A. Ortiz, C. J. Renedo, S. Pérez, M. Mañana, and A. F. Zobaa, “The influence of nuclear generation on CO₂ emissions and on the cost of the Spanish system in long-term generation planning,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 673–683, 2011.
- [39] K. Q. Nguyen, “Internalizing externalities into capacity expansion planning: The case of electricity in Vietnam,” *Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 740–746, 2008.
- [40] H. Nemati, M. A. Latify, and G. R. Youse, “Electrical Power and Energy Systems Coordinated generation and transmission expansion planning for a power system under physical deliberate attacks,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 96, pp. 208–221, 2018.
- [41] A. Ghaderi, M. Parsa Moghaddam, and M. K. Sheikh-El-Eslami, “Energy efficiency resource modeling in generation expansion planning,” *Energy*, vol. 68, pp. 529–537, 2014.
- [42] N. Zhang, Z. Hu, B. Shen, G. He, and Y. Zheng, “An integrated source-grid-load planning model at the macro level: case study for China’s power sector,” *Energy*, vol. 126, pp. 231–246, 2017.
- [43] S. Jin, A. Botterud, and S. M. Ryan, “Temporal Versus Stochastic Granularity in Thermal Generation Capacity Planning With Wind Power,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2033–2041, 2014.
- [44] 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.
- [45] Y. Feng and S. M. Ryan, “Scenario construction and reduction applied to

- stochastic power generation expansion planning,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 9–23, 2013.
- [46] A. Botterud and M. Korpås, “A stochastic dynamic model for optimal timing of investments in new generation capacity in restructured power systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 163–174, 2007.
 - [47] A. Sheikhi Fini, M. Parsa Moghaddam, and M. K. Sheikh-El-Eslami, “A dynamic model for distributed energy resource expansion planning considering multi-resource support schemes,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 357–366, 2014.
 - [48] C. Li, P. J. Jap, and L. Streiffert, “Implementation of Network Flow Programming to the Hydrothermal Coordination in an Energy Management System,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 1045–1053, 1993.
 - [49] Q. Hu, G. Huang, Y. Cai, and Y. Huang, “Feasibility-based inexact fuzzy programming for electric power generation systems planning under dual uncertainties,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4642–4654, 2011.
 - [50] B. Alizadeh and S. Jadid, “A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 65, pp. 408–418, 2015.
 - [51] H. Park and R. Baldick, “Stochastic generation capacity expansion planning reducing greenhouse gas emissions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 1026–1034, 2015.
 - [52] 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.
 - [53] Y. Zhou, L. Wang, and J. D. McCalley, “Designing effective and efficient incentive policies for renewable energy in generation expansion planning,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 6, pp. 2201–2209, 2011.
 - [54] J. Aghaei, M. A. Akbari, A. Roosta, and A. Baharvandi, “Multiobjective generation expansion planning considering power system adequacy,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 102, pp. 8–19, 2013.

- [55] R. Bent, A. Berscheid, and G. L. Toole, "Generation and transmission expansion planning for renewable energy integration," *Power Syst. Comput. Conf.*, vol. 836, pp. 1–7, 2011.
- [56] H. Tekiner-Mogulkoc, D. W. Coit, and F. A. Felder, "Mean-risk stochastic electricity generation expansion planning problems with demand uncertainties considering conditional-value-at-risk and maximum regret as risk measures," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 73, pp. 309–317, 2015.
- [57] M. J. Piao, Y. P. Li, and G. H. Huang, "Development of a stochastic simulation-optimization model for planning electric power systems - A case study of Shanghai, China," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 111–124, 2014.
- [58] A. Motamedi *et al.*, "A Transmission Planning Framework Considering Future Generation Expansions in Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1987–1995, 2010.
- [59] F. D. Munoz and J. Watson, "A scalable solution framework for stochastic transmission and generation planning problems," *Comput Manag Sci*, vol. 12, pp. 491–518, 2015.
- [60] C. Batlle and P. Rodilla, "An Enhanced Screening Curves Method for Considering Thermal Cycling Operation Costs in Generation Expansion Planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3683–3691, 2013.
- [61] D. Thukaram and S. Surendra, "Identification of prospective locations for generation expansion with least augmentation of network," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 1, pp. 37–45, 2013.
- [62] P. Murugan, S. Kannan, and S. Baskar, "NSGA-II algorithm for multi-objective generation expansion planning problem," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 4, pp. 622–628, 2009.
- [63] A. Yoza, A. Yona, T. Senjyu, and T. Funabashi, "Optimal capacity and expansion planning methodology of PV and battery in smart house," *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 25–33, 2014.
- [64] M. Jadidoleslam and A. Ebrahimi, "Reliability constrained generation expansion planning by a modified shuffled frog leaping algorithm," *Int. J.*

Electr. Power Energy Syst., vol. 64, pp. 743–751, 2015.

- [65] A. R. Abbasi and A. Reza, “Simultaneous Integrated stochastic electrical and thermal energy expansion planning,” vol. 8, no. October 2013, pp. 1017–1027, 2014.
- [66] T. S. Zhan, S. J. Chen, M. T. Tsay, M. S. Kang, J. I. Tsai, and B. X. Liao, “Optimal generation expansion planning strategy for the utility with IPPs participation and considering green house gas mitigation,” *2009 4th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2009*, pp. 2880–2885, 2009.
- [67] J. L. C. Meza, M. B. Yildirim, and A. S. M. Masud, “A Multiobjective Evolutionary Programming Algorithm and Its Applications to Power Generation Expansion Planning,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. - Part A Syst. Humans*, vol. 39, no. 5, pp. 1086–1096, 2009.
- [68] S. A. Farghal, M. S. Kandil, and M. R. Abdel-Aziz, “Generation expansion planning: an expert system approach,” *Gener. Transm. Distrib. IEE Proc. C*, vol. 135, no. 4, pp. 261–267, 1988.
- [69] Jinxiang Zhu and Mo-yuen Chow, “A review of emerging techniques on generation expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 1722–1728, 1997.
- [70] M. Yildirim, K. Erkan, and S. Ozturk, “Power generation expansion planning with adaptive simulated annealing genetic algorithm,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 30, pp. 1188–1199, 2006.
- [71] S. L. Chen, T. S. Zhan, and M. T. Tsay, “Generation expansion planning of the utility with refined immune algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 4, pp. 251–258, 2006.
- [72] Ching-Tzong Su, G. Lii, and J. Chen, “Long-term Generation Expansion Planning Employing Dynamic Programming and Fuzzy Techniques,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 1095–1101, 1989.
- [73] A. K. David and Z. Rong-da, “Integrating expert systems with dynamic programming in generation expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 1095–1101, 1989.

- [74] R. L. P. dos Santos, L. P. Rosa, M. C. Arouca, and A. E. D. Ribeiro, "The importance of nuclear energy for the expansion of Brazil's electricity grid," *Energy Policy*, vol. 60, pp. 284–289, 2013.
- [75] A. J. C. Pereira and J. T. Saraiva, "Generation expansion planning (GEP) - A long-term approach using system dynamics and genetic algorithms (GAs)," *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5180–5199, 2011.
- [76] J. Aghaei, M. A. Akbari, A. Roosta, M. Gitizadeh, and T. Niknam, "Integrated renewable–conventional generation expansion planning using multiobjective framework," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 8, p. 773, 2012.
- [77] H. Mavalizadeh and A. Ahmadi, "Electrical Power and Energy Systems Hybrid expansion planning considering security and emission by augmented epsilon-constraint method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 90–100, 2014.
- [78] M. S. Javadi, H. R. Mashhadi, M. Saniei, and G. Gutiérrez-Alcaraz, "Multi-objective expansion planning approach: distant wind farms and limited energy resources integration," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 7, no. 6, pp. 652–668, 2013.
- [79] S. A. Farghal and M. R. A. Aziz, "Generation expansion planning including the renewable energy sources," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 816–822, 1988.
- [80] Y. M. Park, J. B. Park, and J. R. Won, "A hybrid genetic algorithm/dynamic programming approach to optimal long-term generation expansion planning," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 295–303, 1998.
- [81] M. Gitizadeh, M. Kaji, and J. Aghaei, "Risk based multiobjective generation expansion planning considering renewable energy sources," *Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 74–82, 2013.
- [82] Sarjiya, R. F. S. Budi, and S. P. Hadi, "Game theory for multi-objective and multi-period framework generation expansion planning in deregulated markets," *Energy*, vol. 174, pp. 323–330, 2019.
- [83] L. Baringo and A. J. Conejo, "Wind Power Investment: A Benders Decomposition Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 433–

441, 2012.

- [84] A. J. C. Pereira and J. T. Saraiva, "A decision support system for generation expansion planning in competitive electricity markets," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 7, pp. 778–787, 2010.
- [85] S. M. Moghddas-Tafreshi, H. A. Shayanfar, A. Saliminia Lahiji, A. Rabiee, and J. Aghaei, "Generation expansion planning in Pool market: A hybrid modified game theory and particle swarm optimization," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 2, pp. 1512–1519, 2011.
- [86] 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.
- [87] E. Alishahi, M. P. Moghaddam, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "A system dynamics approach for investigating impacts of incentive mechanisms on wind power investment," *Renew. Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 310–317, 2012.
- [88] E. Alishahi, M. P. Moghaddam, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "An investigation on the impacts of regulatory interventions on wind power expansion in generation planning," *Energy Policy*, vol. 39, no. 8, pp. 4614–4623, 2011.
- [89] A. Sheikhi Fini, M. Parsa Moghaddam, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "An investigation on the impacts of regulatory support schemes on distributed energy resource expansion planning," *Renew. Energy*, vol. 53, pp. 339–349, 2013.
- [90] R. Hemmati, R.-A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Reliability constrained generation expansion planning with consideration of wind farms uncertainties in deregulated electricity market," *Energy Convers. Manag. J.*, vol. 76, pp. 517–526, 2013.
- [91] S. Pineda, J. M. Morales, Y. Ding, and J. Stergaard, "Impact of equipment failures and wind correlation on generation expansion planning," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 116, pp. 451–458, 2014.
- [92] 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.

- [93] H. Sadeghi, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, “Evaluating the impact of FIT financial burden on social welfare in renewable expansion planning,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 199–209, 2015.
- [94] B. H. Ahn, “Multicriteria Generation-Expansion Planning with Global Environmental Considerations,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 40, no. 2, pp. 154–161, 1993.
- [95] A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi-Kian, “Promotion strategy of clean technologies in distributed generation expansion planning,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2765–2773, 2009.
- [96] Q. Zhang, B. C. Mclellan, T. Tezuka, and K. N. Ishihara, “An integrated model for long-term power generation planning toward future smart electricity systems,” *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 1424–1437, 2013.
- [97] D. Pozo, E. E. Sauma, and J. Contreras, “A three-level static MILP model for generation and transmission expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 202–210, 2013.
- [98] A. A. Amrutha, P. Balachandra, and M. Mathirajan, “Role of targeted policies in mainstreaming renewable energy in a resource constrained electricity system: A case study of Karnataka electricity system in India,” *Energy Policy*, vol. 106, no. December 2016, pp. 48–58, 2017.
- [99] S. Kamalinia and M. Shahidehpour, “Generation expansion planning in wind-thermal power systems,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 8, p. 940, 2010.
- [100] S. Kamalinia, M. Shahidehpour, and A. Khodaei, “Security-constrained expansion planning of fast-response units for wind integration,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 1, pp. 107–116, 2011.
- [101] J. Valinejad and T. Barforoushi, “Electrical Power and Energy Systems 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.
- [102] N. Neshat and M. R. Amin-Naseri, “Cleaner power generation through market-

- driven generation expansion planning : an agent-based hybrid framework of game theory and Particle Swarm Optimization,” *J. Clean. Prod.*, vol. 105, pp. 206–217, 2015.
- [103] A. M. zadeh Pandasi and G. R. Yousefi, “Generation Expansion Planning in a Pool Based Electricity Market , using Game Theory and Genetic Algorithm,” in *20th Iranian Conference on Electrical Engineering, (ICEE2012)*, 2012, pp. 529–534.
- [104] Y. Manabe, T. Funabashi, T. Kato, M. Kurimoto, and Y. Suzuoki, “Probabilistic Investment Strategy Modeling for Generation Expansion Planning,” in *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2016, pp. 1–8.
- [105] 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.
- [106] S. Kamalinia, M. Shahidehpour, and L. Wu, “Sustainable resource planning in energy markets,” *Appl. Energy*, vol. 133, pp. 112–120, 2014.
- [107] R. Hemmati, R. A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, “Coordinated generation and transmission expansion planning in deregulated electricity market considering wind farms,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 620–630, 2016.
- [108] E. Alishahi, S. Member, and M. P. Moghaddam, “A System Dynamics Approach for Evaluating the Optimum Value of Reliability-Based Incentive Mechanism for Wind Generation in GEP,” in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–8.
- [109] 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.
- [110] D. Apostolopoulou, Z. De Gr, and M. Mcculloch, “Robust Optimisation for Hydroelectric System Operation under Uncertainty,” *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–8, 2018.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] 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.
- [114] G. Locatelli and M. Mancini, “Small-medium sized nuclear coal and gas power plant: A probabilistic analysis of their financial performances and influence of CO₂cost,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 10, pp. 6360–6374, 2010.
- [115] M. Kozlova, “Real option valuation in renewable energy literature: Research focus, trends and design,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. May, pp. 180–196, 2017.
- [116] 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.
- [117] 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.
- [118] A. H. Seddighi and A. Ahmadi-javid, “Integrated multiperiod power generation and transmission expansion planning with sustainability aspects in a stochastic environment,” *Energy*, vol. 89, pp. 9–18, 2015.
- [119] J. Qiu, S. Member, Z. Y. Dong, S. Member, and J. H. Zhao, “Multi-Stage Flexible Expansion Co-Planning Under Uncertainties in a Combined Electricity and Gas Market,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 2119–2129, 2015.
- [120] M. Rasouli and D. Teneketzis, “A Methodology for Generation Expansion Planning for Renewable Energy Economies,” in *IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2016, pp. 1556–1563.
- [121] 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.

- [122] R. F. SB, D. H. Salimy, and E. S. Amitayani, “Peran PLTN untuk Menurunkan Emisi CO₂ dalam Perencanaan Pengembangan Sistem Kelistrikan,” in *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir V*, 2012, pp. 297–305.
- [123] UNDP, “Microturbine Cogeneration Technology Application Project (MCTAP),” 2007.
- [124] PT. Perusahaan Listrik Negara, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (PERSERO) 2019-2028,” 2018.
- [125] N. Güzel, “A proposal to the solution of multiobjective linear fractional programming problem,” *Abstr. Appl. Anal.*, vol. 2013, 2013.
- [126] T. L. Turocy, B. Von Stengel, and B. von Stengel, “Game Theory,” 2001.
- [127] N. Najjar, “Game Theory Portfolio : A Computational Exploration of the Nash Equilibrium,” 2009.
- [128] 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.
- [129] J. L. Morales, J. Nocedal, and Y. Wu, “A Sequential Quadratic Programming Algorithm with an Additional Equality Constrained Phase,” 2010.
- [130] L. Vandenberghe, “Quasi-Newton Methods,” 2016.
- [131] T. S. Ferguson, “Game Theory.”
- [132] A. Rubinstein, “Stability of Decision Systems under Majority Rule,” *J. Econ. Theory*, vol. 23, pp. 150–159, 1980.
- [133] R. F. S. Budi, “Studi Perbaikan Mutu Tegangan Saluran 20 KV GI Semanu dengan Pemasangan Kapasitor Daya menggunakan Metode Algoritma Genetik,” 2009.
- [134] 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.

- [135] K. Energy, “Probabilistic Analysis on Levelized Unit Electricity Cost (LUEC) Calculation of Small Medium Reactor Nuclear Power Plant (SMR NPP) In Indonesia,” vol. 2016, no. 2015, pp. 1–10, 2016.
- [136] Y. Liu, Z. Lu, and F. Yang, “The Investigation of Solar PV Models,” in *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2018, pp. 1–5.
- [137] J.-B. Park, Y.-M. Park, J.-R. Won, and K. Y. Lee, “An improved genetic algorithm for generation expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 916–22, 2000.