



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN KEBIJAKAN PEMANFAATAN BATUBARA
UNTUK PEMENUHAN TENAGA LISTRIK DENGAN
PEMODELAN SISTEM DINAMIK
(STUDI KASUS WILAYAH KALIMANTAN TIMUR)**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister

**GINANJAR YONI WARDoyo
0606004395**

**Kekhususan Bidang Ilmu Teknik
Program Studi Pasca Sarjana Teknik Industri
Fakultas Teknik
Universitas Indonesia
Depok, 2008**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul :

**PERANCANGAN KEBIJAKAN PEMANFAATAN BATUBARA
UNTUK PEMENUHAN TENAGA LISTRIK DENGAN
PEMODELAN SISTEM DINAMIK
(STUDI KASUS WILAYAH KALIMANTAN TIMUR)**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Teknik Industri, Program Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 8 Juli 2008

Ginanjari Yoni Wardoyo
NPM 0606004395

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Ginanjar Yoni Wardoyo
NPM : 0606004395
Program Studi : Teknik Industri
Judul Tesis : Perancangan Kebijakan Pemanfaatan Batubara Untuk Pemenuhan Tenaga Listrik Dengan Pemodelan Sistem Dinamik (Studi Kasus Wilayah Kalimantan Timur).

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Pasca Sarjana Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Ir. Sri Bintang Pamungkas, MSISES, Ph.D

Pembimbing II : Armand Omar Moeis, ST, MSc

Penguji : Dr.Ir. T. Yuri M. Zagloel, MengSc

Penguji : Ir. M. Dachyar, MSc

Penguji : Ir. Boy Nurtjahyo M, MSIE

Penguji : Ir. Akhmad Hidayatno, MBT

Depok, 8 Juli 2008

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penyusunan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Studi Teknik Industri pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, baik dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Sri Bintang Pamungkas, MSISES, Ph.D selaku dosen pembimbing satu, dan Bapak Armand Omar Moeis, ST, M.Sc sebagai pembimbing dua yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran didalam mengarahkan penulis dalam penyusunan tesis ini.
2. Seluruh Dosen di Departemen Teknik Industri.
3. Pihak Ditjen Tenaga Listrik dan Ditjen Batubara yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang diperlukan penulis.
4. Bapakku, Ibuku dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan materiil maupun moril.
5. Sahabat yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan saudara-saudara semua. Dan semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 8 Juli 2008
Penulis

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ginanjar Yoni Wardoyo
NPM/NIP : 0606004395
Program Studi : Pasca Sarjana Teknik Industri
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non- Eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :
Perancangan Kebijakan Pemanfaatan Batubara Untuk Pemenuhan Tenaga Listrik Dengan Pemodelan Sistem Dinamik (Studi Kasus Wilayah Kalimantan Timur)

beserta perangkat yang ada (bila diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di Internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah ini menjadi tanggungjawab saya pribadi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 8 Juli 2008
Yang menyatakan

(Ginanjar Yoni Wardoyo)

ABSTRAK

Nama : Ginanjar Yoni Wardoyo
Program studi : Pasca Sarjana Teknik Industri
Judul : Perancangan Kebijakan Pemanfaatan Batubara Untuk Pemenuhan Tenaga Listrik Dengan Pemodelan Sistem Dinamik (Studi Kasus Wilayah Kalimantan Timur)

Dari total kapasitas pembangkit tenaga listrik Kalimantan Timur, hingga tahun 2000 baru 36 % yang menggunakan batubara sebagai energi primernya, padahal batubara sebagai sumber daya alam, merupakan salah satu cadangan energi non fosil dan tersebar di beberapa wilayah Kalimantan Timur dengan total cadangan sebesar 10,2 miliar ton. Sementara pembangkit tenaga listrik lainnya sebagian besar bahan bakarnya berasal dari minyak dan gas, yang semakin hari cadangannya semakin berkurang. Kondisi ini akan menempatkan batubara sebagai bahan bakar alternatif dan strategis untuk pembangkit tenaga listrik.

Diperkirakan pada masa mendatang kebutuhan energi listrik akan meningkat dua kali lipat atau lebih, sebagai dampak pertumbuhan ekonomi/industri serta penduduk. Oleh karena itu diperlukan kesiapan pembangkit-pembangkit tenaga listrik untuk dapat memenuhi kebutuhan tersebut.

Dengan pemodelan perancangan sistem dinamis dapat dilakukan optimasi penggunaan batubara pada sektor tenaga listrik secara terintegrasi. Pemodelan yang dilakukan memperhitungkan aspek dinamis dan kompleksitas sistem baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Karakteristik dari setiap aspek-aspek dinamis disusun dan disaring dengan berdasarkan pada prinsip-prinsip teori umpan-balik. Kemudian dengan bantuan simulasi komputer dilakukan analisis berdasarkan asumsi-asumsi yang telah dibangun.

Hasil dari pemodelan perancangan tersebut berupa data-data kebutuhan batubara untuk sektor tenaga listrik dalam kaitannya dengan kebutuhan energi listrik dari tahun 2000 sampai dengan tahun 2020.

Kata kunci :

Kebutuhan dan produksi listrik, batubara untuk listrik, pemodelan sistem dinamik

ABSTRACT

Name : Ginanjar Yoni Wardoyo
Study Program: Magister Program of Industrial Engineering
Title : Policy Of Design Coal Usage In Fulfilling Electricity With Dynamic System Modelling (Study Case In East Kalimantan Region)

From the total capacity of power plant in East Kalimantan until year 2000, only 36 % of them are using coal as their primary energy source. Where coal as a natural resource, is one of non-fossil energy reserve and widely spread in several areas in East Kalimantan with total reserve of 10.2 billion tons. While other power plants mostly have their resources from oil and gas, which is getting smaller and smaller in amount by each day. This condition puts coal as a strategic alternative resource for power plant.

It is predicted in the future, the electricity consumption will increase by double or more, as a result of economic/industrial and inhabitant growth. Therefore, power plants' readiness is needed to fulfill the needs.

With dynamic system plan modeling, the use of coal on integrated electrical power sector can be optimized. Modeling is conducted by calculating dynamic and complexity aspects of the system qualitatively and quantitatively. Characteristic of each dynamic aspect is arranged and refined based on Feedback Theory principles. Analysis is done by the help of computer simulation based on assumptions built.

Results from the planning modeling are the data of coal necessities for electrical power sector in connection to electricity necessity from year 2000 until 2020.

Key words:

Consumption and production of electricity, coal usage for electricity, dynamic system modelling.

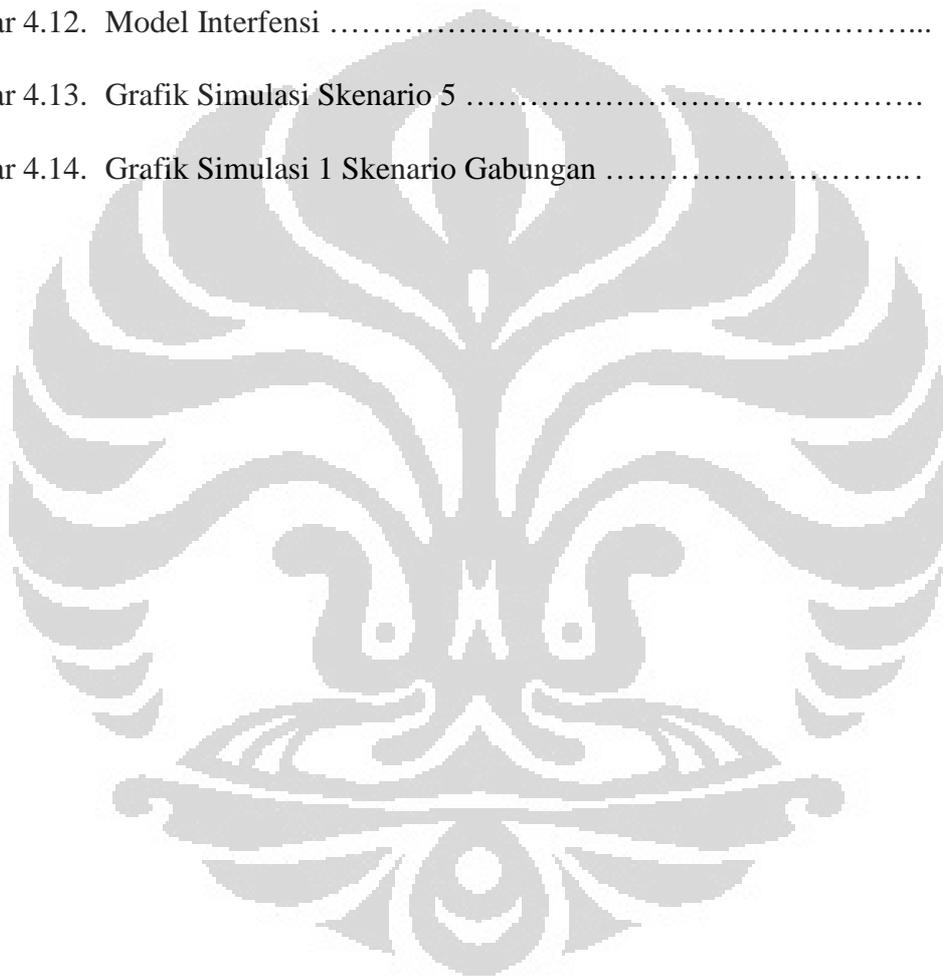
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Keterkaitan Masalah	4
1.3. Rumusan Masalah	5
1.4. tujuan Penelitian	5
1.5. Batasan Masalah	6
1.6. Metodologi Penelitian	6
1.7 Sistematika Penulisan	10
2. DASAR TEORI DAN PEMODELAN MENGGUNAKAN POWERSIM	12
2.1. Latar Belakang Pemodelan	12
2.2. Pemodelan Sistem Dinamik	12
2.2.1. Pemodelan	12
2.2.2. Metodologi Sistem Dinamis	13
2.2.3. Tahapan Pemodelan	18
2.3. Perangkat Lunak Powersim Untuk Simulasi	19
2.3.1. Fungsi – Fungsi Penting Dalam Powersim	21
2.3.2. Alat-Alat Untuk Sistem Dinamik Pada Powersim	24
3. PENGUMPULAN DATA DAN PEMODELAN BATUBARA UNTUK TENAGA LISTRIK	34
3.1. Konsep Dasar Model Batubara Untuk Tenaga Listrik	34
3.2. Struktur Model	36
3.2.1. Sub Sistem Kebutuhan Listrik	36
3.2.2. Sub Sistem Produksi Listrik	39
3.2.3. Sub Sistem Batubara	42
3.3. Konseptualisasi Sistem	45
4. APLIKASI MODEL BATUBARA UNTUK LISTRIK DENGAN SIMULASI POWERSIM	49
4.1. Representasi Model	49
4.1.1. Formulasi Model	49
4.1.2. Simulasi Model	58
4.2. Validasi Model	64
4.3. Analisa Perilaku Model	66
4.3.1. Unique Solution	67
4.3.2. Skenario Terhadap Variabel Eksogen	70
4.3.3. Penentuan Kebijakan	92
5. KESIMPULAN	96
DAFTAR REFERENSI	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Diagram Keterkaitan Masalah	4
Gambar 1.2	Diagram Alir Metodologi Penelitian	9
Gambar 2.1	Struktur Ide Dalam Metodologi Sistem Dinamis	14
Gambar 2.2	Diagram Alir Sistem Dinamis	22
Gambar 2.3.	Bentuk Perilaku Yang Umum	20
Gambar 2.4.	Hasil Simulasi Energy Resources	23
Gambar 2.5.	Cara Penulisan Causal Loop Diagram	25
Gambar 2.6.	Polaritas Hubungan	26
Gambar 2.7.	Cara Penulisan Diagram Alir	29
Gambar 2.8.	Empat Representasi Struktur Diagram Alir	31
Gambar 2.9.	Model Aliran Hidrolik	32
Gambar 2.10.	Hasil Simulasi Model Hidrolik	32
Gambar 3.1.	Konsep Dasar Model Batubara Untuk Listrik	35
Gambar 3.2.	Diagram Keterkaitan Antar Variabel	46
Gambar 3.3.	Causal Loop Model	47
Gambar 4.1.	Model Sub Sistem Kebutuhan Listrik	50
Gambar 4.2.	Model Sub Sistem Produksi Listrik	54
Gambar 4.3.	Model Sub Sistem Batubara	57
Gambar 4.4.	Grafik Validasi Sub Sistem Kebutuhan Listrik	65
Gambar 4.5.	Grafik Validasi Sub Sistem Produksi Listrik	65
Gambar 4.6.	Grafik Validasi Sub Sistem Batubara	65
Gambar 4.7.	Sistem Diagram	70

Gambar 4.8. Grafik Simulasi Skenario 1	72
Gambar 4.9. Grafik Hasil Simulasi 2 Skenario 1	72
Gambar 4.10. Grafik Hasil Simulasi Skenario 2	73
Gambar 4.11. Grafik Simulasi Skenario Batubara	75
Gambar 4.12. Model Interfensi	77
Gambar 4.13. Grafik Simulasi Skenario 5	89
Gambar 4.14. Grafik Simulasi 1 Skenario Gabungan	90



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Perkembangan Jumlah Pelanggan Menurut Sektor Dan Ratio Elektrifikasi	37
Tabel 3.2.	Perkembangan Konsumsi Tenaga Listrik Dan PLN Per Kapita Dan Per Pelanggan	38
Tabel 3.3.	Perkembangan Pemakaian Energi Listrik Pelanggan	39
Tabel 3.4.	Perkembangan Produksi Dan Penjualan Listrik PLN	39
Tabel 3.5.	Perkembangan Produksi Listrik PLN Berdasarkan Jenis Bahan Bakar Yang Digunakan	40
Tabel 3.6.	Cadangan Batubara	43
Tabel 3.7.	Cadangan Terbukti, Produksi, Dan Rasio Cadangan Terbukti ..	44
Tabel 3.8.	Produksi Dan Konsumsi Batubara di Kaltim	45
Tabel 4.1.	Hasil Simulasi Sub Sistem Kebutuhan Listrik	51
Tabel 4.2.	Hasil Simulasi Sub Sistem Produksi Listrik	56
Tabel 4.3.	Hasil Simulasi Sub Sistem Batubara	58
Tabel 4.4.	Hasil Simulasi Konsumsi dan Produksi Listrik	59
Tabel 4.5.	Hasil Simulasi Produksi Listrik Per Jenis Pembangkit	60
Tabel 4.6.	Hasil Simulasi Produksi Listrik Pembangkit Tenaga Gas	61
Tabel 4.7.	Hasil Simulasi Produksi Listrik Pembangkit Tenaga Minyak	62
Tabel 4.8.	Hasil Simulasi Produksi Listrik Pembangkit Tenaga Batubara ...	62
Tabel 4.9.	Hasil Simulasi Produksi Listrik Non Fosil	63
Tabel 4.10.	Hasil Simulasi Produksi Batubara	63
Tabel 4.11.	Hasil Simulasi Skenario 1	71
Tabel 4.12.	Hasil Simulasi Skenario 2	73

Tabel 4.13.	Hasil Simulasi Skenario 3	75
Tabel 4.14.	Hasil Simulasi Model Interfensi Skenario 4	80
Tabel 4.15.	Hasil Simulasi Produksi PLT Gas Skenario 4	81
Tabel 4.16.	Hasil Simulasi Produksi PLT Minyak Skenario 4	81
Tabel 4.17.	Hasil Simulasi Produksi PLT Batubara Skenario 4	82
Tabel 4.18.	Hasil Simulasi Produksi PLT Non Fosil Skenario 4	82
Tabel 4.19.	Hasil Simulasi Kebutuhan Batubara Untuk Listrik	84
Tabel 4.20.	Hasil Simulasi Skenario D	85
Tabel 4.21.	Hasil Simulasi Skenario E	76
Tabel 4.22.	Hasil Simulasi Skenario 5	88
Tabel 4.23.	Hasil Simulasi Skenario Gabungan	90
Tabel 4.24.	Hasil Simulasi Alternatif Kebijakan	94

BAB I

PENDAHULUAN

I. 1 Latar Belakang

Energi merupakan salah satu faktor yang penting dalam meningkatkan kegiatan ekonomi. Dengan tersedianya energi, peluang untuk melakukan kegiatan produktif dengan memanfaatkan potensi/sumber daya dalam suatu negara cukup banyak. Di Negara Indonesia tentang pengelolaan energi dituangkan pada pasal 2 Undang – Undang Energi tahun 2007,yaitu “Energi dikelola berdasarkan azas kemanfaatan, rasionalitas, efisiensi, berkeadilan, peningkatan nilai tambah, berkelanjutan, kesejahteraan masyarakat, pelestarian fungsi lingkungan hidup, ketahanan nasional, dan keterpaduan dengan mengutamakan kemampuan nasional”.

Berkenaan dengan peran utama dari energi, listrik merupakan salah satu elemen utama dalam proses pertumbuhan ekonomi. Kebutuhan listrik semakin meningkat seiring dengan perkembangan dan kompleksitas aktivitas manusia. Peranan energi listrik menjadi sangat vital sebagai kebutuhan primer yang menggerakkan laju pertumbuhan industri sekaligus sebagai motor penggerak ekonomi masyarakat. Sehingga untuk jangka waktu ke depan konsumsi energi listrik akan semakin meningkat.

Dalam upaya pemenuhan konsumsi energi listrik tersebut, pemerintah melalui PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) selaku Pemegang Kuasa Usaha Ketenagalistrikan (PKUK) sesuai undang undang berkewajiban untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik di seluruh Indonesia dengan mutu dan keandalan yang baik. Untuk melaksanakan kewajiban ini, PLN memiliki Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) sebagai pedoman dan dasar strategi kebijakan.

Pemerintah melalui PT. PLN terus mengembangkan kebijakan dan langkah-langkah strategis untuk mengatasi permasalahan ketenagalistrikan yang semakin kompleks. Wilayah-wilayah yang masih mengalami kekurangan energi listrik menjadi konsentrasi utama terkait usaha pemenuhan penyediaan tenaga listrik.

Kalimantan Timur adalah salah satu wilayah yang masih mengalami kekurangan kapasitas tenaga listrik. Dengan jumlah dan aktivitas penduduk yang semakin pesat, tuntutan terhadap kebutuhan energi listrik di Kalimantan Timur semakin besar. Laju perekonomian dan industri daerah serta peranannya sebagai daerah penghasil sumber daya alam terbesar yang memiliki pengaruh besar terhadap penyediaan energi di Indonesia, sudah selayaknya apabila usaha pemenuhan energi listrik di Kalimantan Timur menjadi prioritas utama dan mendesak.

Untuk memenuhi kekurangan energi listrik tersebut, maka Pemerintah (PT. PLN) Wilayah Kaltim telah membangun beberapa pembangkit tenaga listrik dengan memanfaatkan sumber – sumber daya energi yang tersedia. Selain itu pembangunan pembangkit tenaga listrik diarahkan pada penganekaragaman energi, khususnya kepada sumber energi yang relatif murah, cukup tersedia dan mudah didapat.

Pada umumnya, pembangkit tenaga listrik yang dimiliki saat ini sebagian besar sumber energi primernya berasal dari minyak dan gas. Bila dilihat dari pertumbuhan kebutuhan energi listrik di wilayah Kalimantan Timur yang setiap tahunnya kian meningkat, maka diperkirakan pada masa – masa mendatang Indonesia akan mengimpor minyak dalam jumlah yang besar. Oleh karena itu sudah selayaknya jika dari sekarang disiapkan energi alternatif pengganti minyak dan gas untuk memenuhi kebutuhan listrik di wilayah Kalimantan Timur, seperti batubara.

Batubara saat ini merupakan salah satu bentuk sumber energi yang cukup banyak tersedia dan dimiliki Kalimantan Timur. Cadangan batubara Kalimantan Timur merupakan terbesar di Indonesia. Karena itu batubara cukup potensial untuk dikembangkan secara serius untuk menunjang pembangunan dengan tetap memperhatikan dampak pencemaran lingkungan yang ditimbulkan khususnya oleh akibat sisa hasil pemanfaatannya. Dengan demikian peranan batubara di Kalimantan Timur sebagai pengganti minyak dan gas sebagai energi primer penghasil energi listrik pada masa mendatang akan sangat penting.

Batubara merupakan sumber energi yang dapat membangkitkan tenaga listrik melalui mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), maka strategi penyediaannya menjadi sangat penting. Yang dimaksud dengan strategi penyediaan

disini adalah mencakup : cadangan batubara, produksi batubara, dan konsumsi batubara khususnya untuk keperluan pembangkit tenaga listrik.

Untuk memenuhi kebutuhan dan ketersediaan tenaga listrik, sebagaimana dimaksud, energi listrik disuplai dari berbagai sumber pembangkit seperti PLTA, PLTG, PLTGU, PLTD, PLTU, dan pembangkit lainnya secara terpadu dan teru – menerus. Agar suplai energi listrik dari masing – masing pembangkit menghasilkan suatu sistem tenaga listrik yang stabil, maka salah satu yang harus dipenuhi adalah tersedianya bahan bakar dalam jumlah yang mencukupi, karena masing – masing pembangkit tersebut sangat bergantung pada bahan bakar atau sumber daya penggerakannya maupun faktor – faktor yang mempengaruhi sumber daya dimaksud, seperti cuaca dan musim.

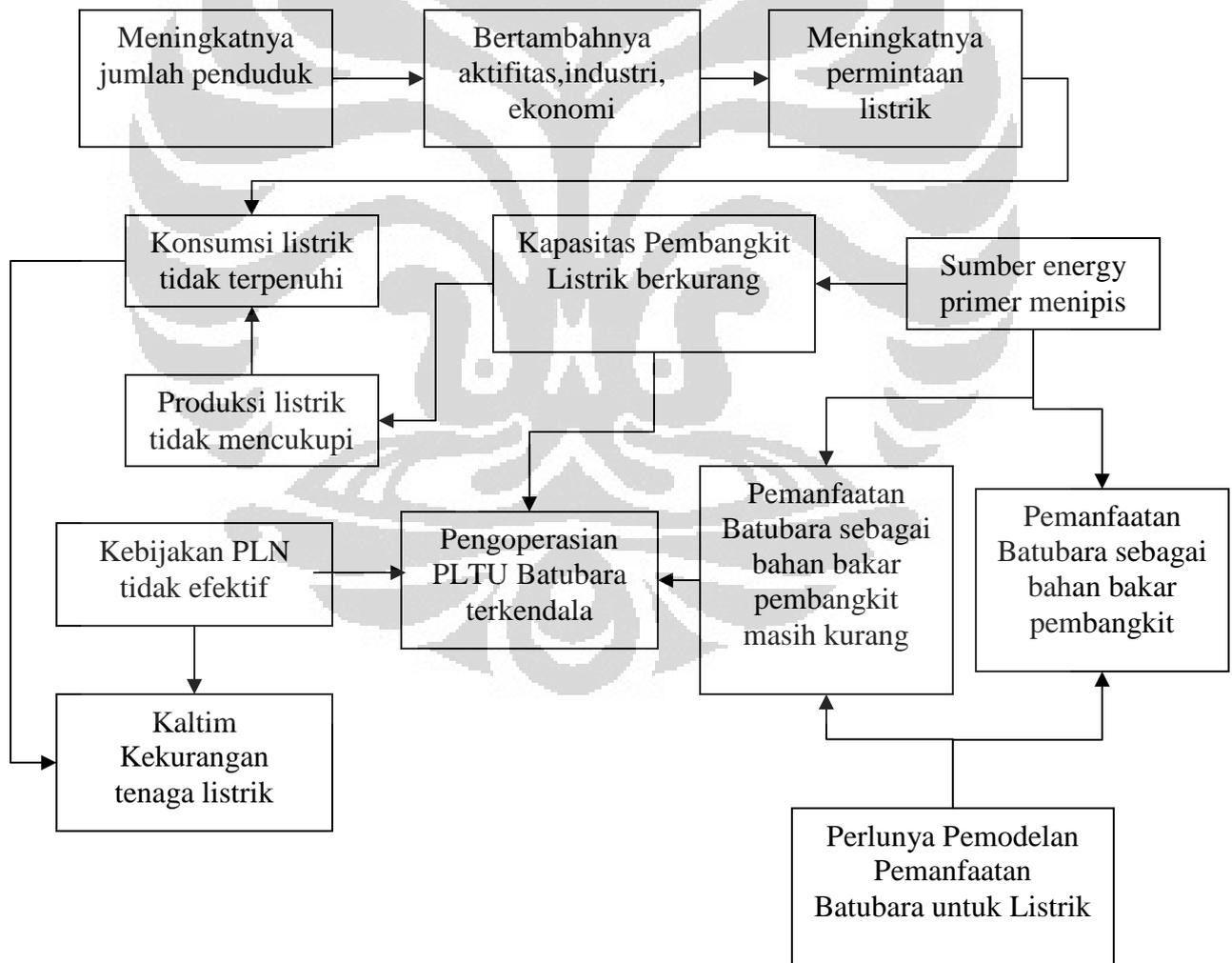
Kondisi ini menunjukkan bahwa, ketergantungan kepada sumber daya khususnya batubara serta faktor – faktor yang mempengaruhi sumber daya itu sendiri disatu sisi dan pada sisi yang lain adanya kebutuhan energi listrik, dapat dipandang sebagai suatu sistem yang memiliki karakter dinamis, yaitu sistem yang saling berinteraksi dalam suatu struktur umpan balik.

Oleh karena itu perlu kiranya sebuah perancangan yang mampu merepresentasikan dan dapat digunakan untuk mempelajari sistem optimasi pemakaian batubara dalam pemenuhan energi listrik secara utuh. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan dalam perancangan ini adalah pemodelan dengan sistem dinamis. Dengan model tersebut akan didapatkan variabel – variabel yang mempengaruhi kebijakan.

Pada pemodelan sistem dinamis, segala aspek dinamis dan kompleks dari suatu sistem dapat terepresentasikan. Perancangannya dapat menggunakan mental model. Dengan model ini mampu dilakukan simulasi yang bisa digunakan untuk mempelajari perilaku yang terjadi dalam sistem tersebut. Sehingga dapat dianalisis berdasarkan asumsi dan persepsi yang telah dibangun. Yang selanjutnya dapat dibuat beberapa skenario sebagai alternatif dalam pengambilan kebijakan.

I. 2 Keterkaitan Masalah

Untuk memiliki cara pandang secara menyeluruh terhadap konteks topik dan permasalahan yang akan dilakukan proses penelitian, dalam penulisan tesis ini dibuat diagram keterkaitan masalah. Diagram ini sebagai suatu tools yang menggambarkan keterkaitan dan hubungan sebab akibat dari permasalahan. Diagram ini menjadi sebuah konsep sistem berpikir dalam proses analisa setiap aspek pada topik. Sehingga akan memberikan rumusan masalah yang fokus, detail, dan terarah dari kompleksitas yang ada. Diagram keterkaitan masalah tentang topik penelitian ini tertera pada gambar 1.1 berikut ini :



Gambar 1.1 Diagram Keterkaitan Masalah

I. 3 Rumusan Masalah

Rencana pemakaian batubara untuk pemenuhan kebutuhan listrik di Kalimantan Timur yang mengalami krisis energi listrik senantiasa terhambat oleh variabel-variabel yang kurang terintegrasi. Kalimantan Timur yang merupakan penghasil sumber energi pembangkit terbesar listrik, khususnya batubara justru kekurangan kapasitas listrik sebagai akibat dari kebijakan yang tidak didasarkan pada kajian dengan metode yang tepat dan terukur.

Dari total kapasitas pembangkit tenaga listrik Kalimantan Timur, hingga tahun 2000 baru 23,3 % yang menggunakan batubara sebagai energi primernya. Prosentase tersebut sangat kecil jika dibandingkan dengan total cadangan batubara yang dimiliki Kalimantan Timur. Sementara disisi lain kebutuhan akan energi listrik terus meningkat sebagai dampak pertumbuhan ekonomi/industri serta penduduk.

Dengan mencermati realitas tersebut, rumusan masalah yang akan diselesaikan dalam penelitian ini adalah perancangan yang dapat memberikan perilaku optimal pemanfaatan batubara di Kalimantan Timur untuk mengasihkan landasan sebagai perangkat dalam merancang suatu kebijakan yang tepat guna pemenuhan kebutuhan energi listrik.

I. 4 Tujuan Penelitian

Tujuan penulisan tesis ini adalah :

1. Mendapatkan variabel-variabel yang mempengaruhi perilaku kebutuhan batubara untuk sektor tenaga listrik.
2. Mendapatkan model yang dapat dijadikan kerangka acuan dalam menyusun kebijakan batubara untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik.
3. Menghasilkan beberapa skenario sebagai alternatif pemanfaatan batubara.

I. 5 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan arah studi penelitian agar mencapai tujuan yang diinginkan, maka penulis memberikan batasan permasalahan pada :

1. Perancangan model diarahkan pada sistem pemanfaatan batubara terkait pemenuhan kebutuhan tenaga listrik.
2. Periode analisis simulasi model dibatasi dalam waktu 20 tahun, yaitu dari tahun 2000 sampai tahun 2020. Dipakainya tahun 2000 sebagai batas awal tahun simulasi adalah berdasarkan acuan data yang diterbitkan Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi. Sedangkan batas akhir tahun simulasi sampai tahun 2020 merupakan tahun yang dipilih untuk melihat kondisi batubara untuk beberapa tahun yang akan datang.
3. Lingkup penelitian dibatasi untuk pemanfaatan batubara di pemerintah propinsi Kalimantan Timur dengan indikator terpenuhinya kebutuhan tenaga listrik.

I. 6 Metodologi Penelitian

Untuk mencapai maksud dan tujuan penelitian sebagaimana yang telah ditetapkan pada BAB I, maka disusunlah langkah-langkah penelitian sebagai berikut :

1. Konseptualisasi Masalah

Sebelum melakukan pemodelan, maka langkah awal yang harus dilakukan adalah merumuskan permasalahan yang terdapat dalam pemanfaatan batubara pada sektor tenaga listrik, yaitu diperlukannya perancangan pembangkit tenaga listrik yang menggunakan batubara sebagai energi primernya.

Kemudian dilakukan inventarisasi terhadap variabel-variabel yang mempengaruhi dan dipengaruhi oleh masalah tersebut.

2. Studi Pustaka

Yaitu berupa kajian terhadap berbagai literatur yang relevan dan terkait dengan penelitian ini, seperti : kondisi batubara, cadangan dan produksi batubara, kapasitas PLTU Batubara, konsep *system thinking*, pemodelan, metode *system dynamic*, hasil-hasil penelitian serta gambaran pengoperasian perangkat lunak *Powersim Constructur* yang akan digunakan sebagai alat simulasi model.

3. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan berupa data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber antara lain, Ditjen Listrik dan Pemanfaatan energi, Ditjen Batubara dan Sumber Daya Mineral, dan hasil-hasil penelitian yang sejenis.

Data sekunder yang diambil meliputi data cadangan dan produksi batubara, kapasitas dan kemampuan setiap pembangkit yang dimiliki oleh PLN, konsumsi dan produksi listrik, serta data terkait lainnya.

4. Pengembangan Model

Setelah konseptualisasi masalah dilakukan, maka sebagai langkah awal pemodelan adalah membuat mekanisme proses sistem dinamik berdasarkan sistem nyata dalam bentuk *Casual Loop Diagram* (CLD) atau Diagram Hubungan Kausal. Setelah itu dibuat diagram alir atau *Stock Flow Diagram* (SFD). Seluruh data, nilai konstanta, grafik, dimensi/ukuran dimasukkan pada pembuatan SFD, sehingga dapat terdefinisi.

5. Simulasi Model

Simulasi model dapat dilakukan setelah diagram alir dituangkan dalam bentuk persamaan dalam bentuk matematis dalam *POWERSIM*. Output dari hasil simulasi ini berupa grafik dan tabel.

6. Validasi Model

Setelah simulasi model dilakukan pada perangkat *POWERSIM*, maka dilakukan validasi atas struktur, karakteristik dan nilai output. Dalam penelitian ini terdapat empat validasi yang akan dilakukan, yaitu validasi struktur model yang terdiri atas validasi teoritis dan validasi kestabilan struktur serta validasi kinerja/Output yang terdiri dari konsistensi dimensi dan validitas konsistensi output.

7. Uji Sensitivitas Model

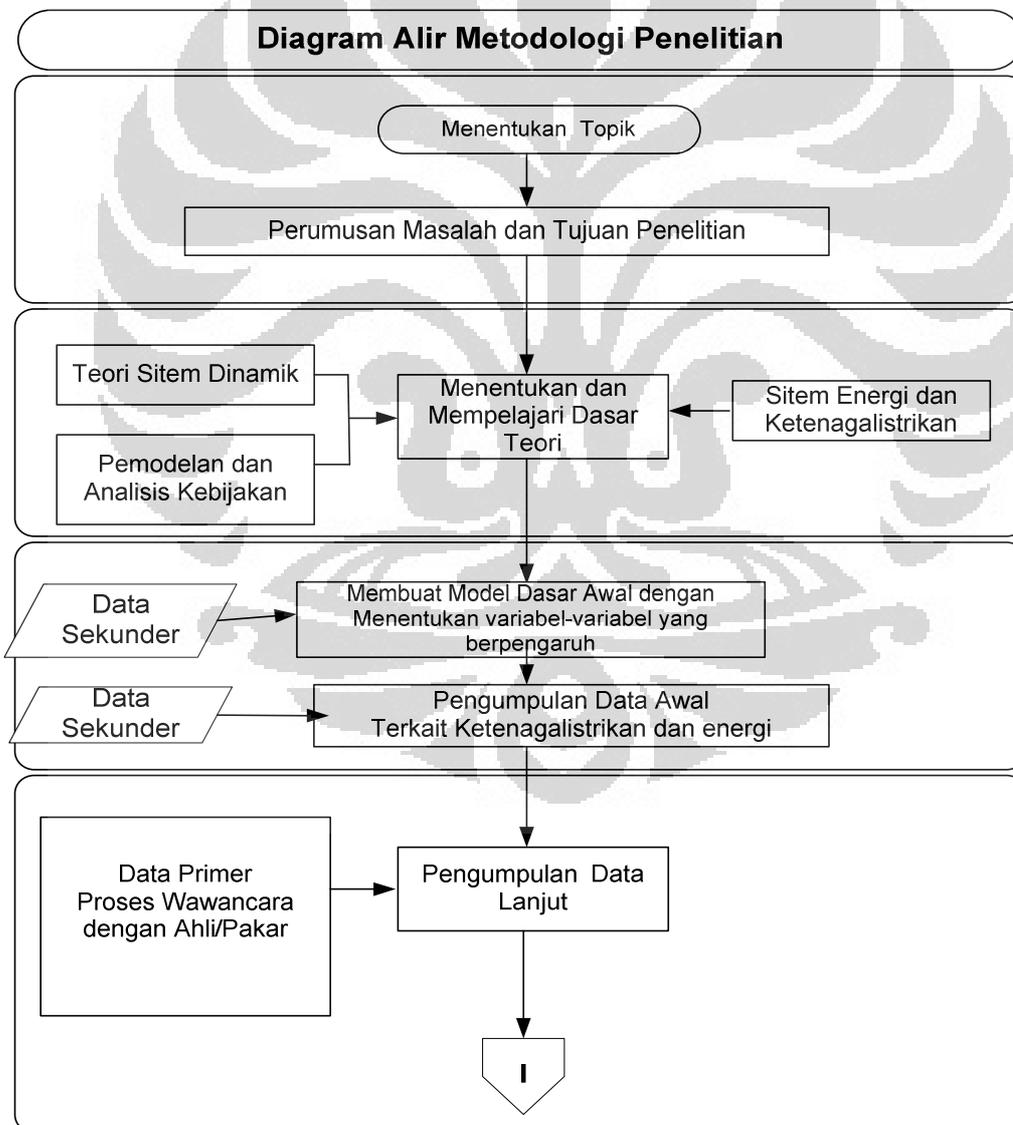
Uji sensitivitas dilakukan untuk mengetahui respon terhadap suatu stimulus. Respon ditunjukkan dengan perubahan perilaku atau kinerja model. Stimulus diberikan pada unsur atau struktur model dengan tujuan menjelaskan sensitivitas parameter, variabel, dan hubungan variabel dalam model mengoptimalkan perkiraan kebutuhan

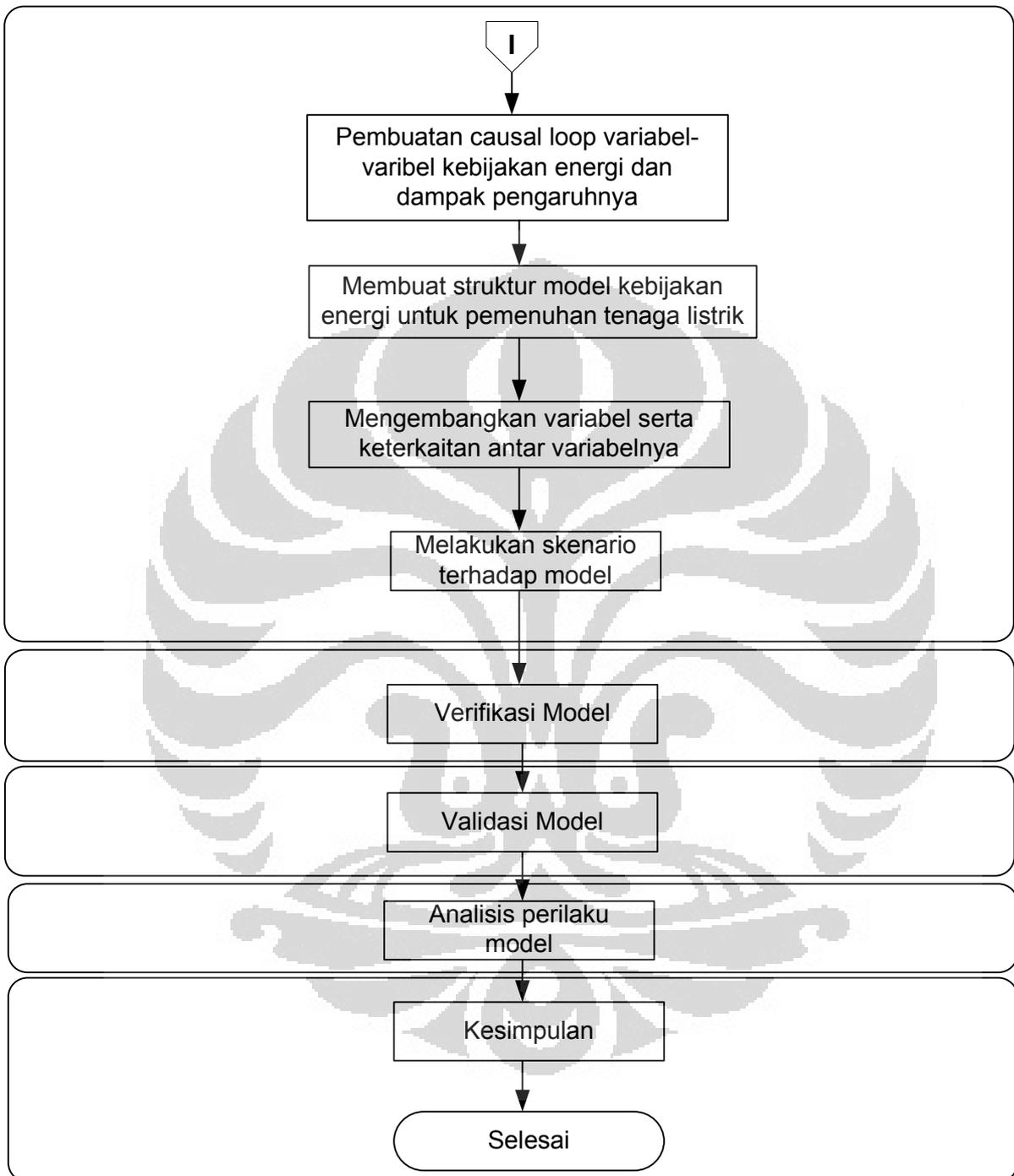
listrik, disusun berdasarkan data-data masa lalu (data historis), sehingga dapat menghasilkan yang lebih akurat dan lebih dipercaya.

8. Analisis Hasil Simulasi

Analisis terhadap hasil simulasi adalah untuk mendalami output model sebagai performa system nyata.

Agar melakukan penelitian ini mendapatkan model yang baik dan representatif, disusunlah tahapan-tahapan sebagai metodologi untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Sistematika dari metodologi tersebut adalah sebagai berikut :





I. 7 Sistematika Penulisan

Penulisan dalam penelitian tesis ini terdiri dari enam bab. Sistematika dan penjelasan dari tiap-tiap bab adalah sebagai berikut :

BAB I Merupakan bagian pendahuluan sebagai pengantar dari ringkasan singkat perihal apa yang dikerjakan dalam penyusunan tesis ini. Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang dari topik tesis, rumusan permasalahan, tujuan yang ingin dicapai dari penelitian, pembatasan terhadap masalah, metodologi penelitian yang menjabarkan runtutan tahap-tahap yang akan dikerjakan dalam proses penelitian dalam bentuk diagram alir sehingga dalam penyelesaian masalah serta pengerjaan penelitian dapat lebih terencana, terarah dan sistematis. Dalam bab ini juga dituliskan sistematika penulisan tesis.

BAB II Menguraikan dasar dan landasan teori yang mendukung penyusunan model kebijakan energi untuk pemenuhan tenaga listrik. Aspek-aspek dalam dasar teori ini adalah berkenaan dengan teori sistem dinamik, teori pemodelan dan analisis kebijakan serta teori yang berkaitan dengan tenaga listrik dan sistem energi berikut pengelolaannya. Bagian ini berisikan segala cakupan konsep sebagai landasan kelayakan dan kekuatan untuk mencapai tujuan penelitian.

BAB III Pembuatan model awal berdasarkan variabel-variabel yang telah ditentukan berdasarkan persepsi awal dan data sekunder. Dalam bab ini menyajikan data-data hasil pencarian dari data sekunder berupa table, grafik tingkat perkembangan kebutuhan dan produksi listrik, hasil pengelolaan energi, energi mix, pembangkit listrik beserta sistem distribusinya, dan data investasi terkait energi dan ketenagalistrikan.

Selain itu juga berisi pengumpulan data primer yang menjabarkan data-data dari hasil wawancara terhadap ahli sistem energi dan ketenagalistrikan. Pada bab ini juga berisikan pengolahan data dengan uraian rinci pembahasan masalah berupa causal loop diagram secara keseluruhan, yang kemudian

disusun model flow diagram yang akan dilakukan simulasi dengan bantuan komputer menggunakan program Powersim.

BAB IV Menyajikan pengembangan model lebih jauh. Berisikan intervensi untuk kemudian dilakukan skenario pada model, penjelasan hasil simulasi, verifikasi, dan validasi pada model. Bagian ini menjabarkan analisis dari simulasi yang menghasilkan pembelajaran terhadap perilaku sistem, kebijakan-kebijakan terkait yang memberikan efek dan stimulus.

BAB V Merupakan bagian penutup yang terdiri dari kesimpulan yang didapatkan dari penelitian berupa jawaban dan implikasi hasil terhadap tujuan penelitian yang ingin dicapai. Bab ini juga memuat saran yang bisa diterapkan oleh pengambil kebijakan terkait pemenuhan kebutuhan tenaga listrik di wilayah Kalimantan Timur.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 BATUBARA DAN PLTU KALIMANTAN TIMUR

Dari seluruh kapasitas terpasang di wilayah Kalimantan Timur sebagaimana disebutkan diatas, sumber daya batubara saat ini baru digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap PLN. Sekitar 23,3 % (83,97 MW) dari kapasitas terpasang PLN merupakan kapasitas terpasang PLTU Batubara. Di Kabupaten Sangata terdapat juga PLTU batubara yang penggunaannya khusus hanya untuk mensuplai listrik yang diperlukan oleh tambang batubara KPC.

Dari perhitungan kapasitas terpasang PLTU batubara, telah dibuat perkiraan berapa banyak batubara yang akan diperlukan pembangkit listrik. Perhitungan tersebut dibuat dengan mempertimbangkan hal-hal berikut ini :

- a. Nilai kalor batubara digunakan
- b. Efisiensi panas PLTU batubara (proses konversi batubara ke listrik)
- c. Faktor kapasitas tahunan PLTU batubara

Ketiga faktor tersebut diatas sangat erat hubungannya dengan penentuan banyaknya listrik yang digunakan.

2.2. PEMODELAN DENGAN PENDEKATAN SISTEM DINAMIK

2.2.1. Pemodelan

Penggunaan model sebagai alat bantu dalam proses pengambilan keputusan sudah sejak lama dikenal dan berkembang dengan pesat. Oleh Ockoff,et al (1962) pengertian model dapat dipandang dari ketiga jenis kata. Sebagai kata benda, Model berarti representasi (gambaran atau perlambangan). Model sebagai kata sifat berarti ideal (idaman) dan model sebagai kata kerja berarti memperagakan (demonstrasi). Ketiga arti model ini dipakai dalam proses pemodelan. Dalam pemodelan, model dirancang sebagai penggambaran operasi dari suatu sistem nyata secara ideal guna menjelaskan atau menunjukkan hubungan-hubungan penting yang terlibat/terkait. Sedangkan sistem nyata, adalah sistem yang sedang berlangsung dalam kehidupan.

Sistem yang dijadikan titik perhatian dan permasalahan. Dengan demikian, permodelan adalah proses membangun atau membentuk sebuah model dari suatu sistem nyata dalam bahasa formal tertentu.

Permodelan merupakan cara yang sederhana untuk memandang suatu masalah. Untuk memudahkan pemikiran tentang karakteristik-karakteristik model yang dibuat, maka harus dipahami masalah dan sistem nyatanya, faktor apa saja yang mempengaruhi perilaku dari sistem tersebut. Dengan demikian dapat ditentukan variabel-variabel apa saja yang menentukan performansi dari sistem yang diamati serta bagaimana variabel tersebut dapat dikendalikan dan diatur. Sehingga akan diperoleh suatu performansi sistem yang dikehendaki.

Beberapa criteria yang harus dipenuhi dalam memodelkan suatu system nyata antara lain :

- model yang dibuat harus mewakili (merepresentasikan) system nyata.
- Model merupakan penyederhanaan dari kompleksnya system.

Pemodelan tidak hanya digunakan untuk menggambarkan dan memahami sekumpulan karakteristik – karakteristik, tetapi juga digunakan untuk mengevaluasi, mengoptimasi serta meramalkan kelakuan system. Sehingga akan didapatkan perancangan terbaik tanpa melakukan atau merekonstruksi seluruh kenyataan alamiahnya.

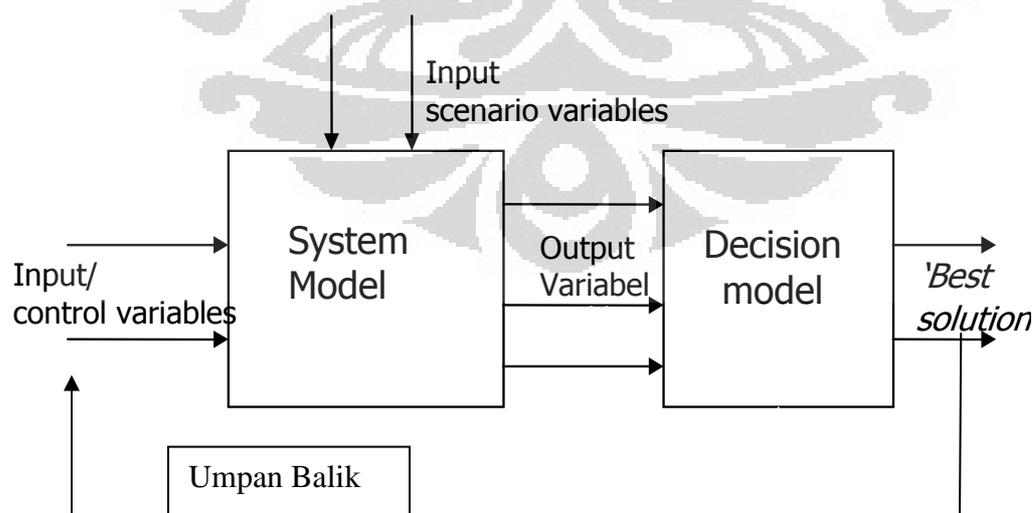
2.2.2 Metodologi Sistem Dinamis

Salah satu pendekatan pemodelan adalah dengan metodologi System Dynamics. Metodologi System Dynamics telah dan sedang berkembang sejak diperkenalkan pertama kali oleh Jay W. Forrester pada decade lima puluhan yang lalu dan berpusat di MIT Amerika. Sesuai dengan namanya, metode ini erat berhubungan dengan pertanyaan-pertanyaan tentang tendensi-tendensi dinamik sistem-sistem yang kompleks yaitu pola-pola tingkah laku yang dibangkitkan oleh sistem itu dengan bertambahnya waktu. Penggunaan metodologi *system dynamics* lebih ditekankan kepada tujuan-tujuan peningkatan pemahaman kita tentang bagaimana tingkah laku muncul dari struktur kebijakan sistem itu. Pemahaman ini sangat penting dalam perancangan kebijakan yang efektif.

Asumsi utama dalam paradigma *system dynamics* adalah bahwa struktur fenomena proses pembuatan keputusan merupakan suatu kumpulan (*assembly*) dari struktur-struktur kausal yang melingkar dan tertutup (*causal loop structure*). Keberadaan struktur ini sebagai suatu konsekuensi logis dari adanya kendala-kendala fisik dan tujuan-tujuan sosial, penghargaan (pujian) dan tekanan yang menyebabkan manusia bertingkah laku dan membangkitkan secara komulatif tendensi-tendensi dynamics diklasifikasi ke dalam model matematik kausal (*theory-like*).

Pengungkapan hubungan kausal model *system dynamics* dalam bentuk ekspresi matematik didasari oleh dalil hubungan-hubungan kausal (*postulated causal relations*) yang terdapat dalam fenomena yang diteliti. Dengan demikian pengertian dinamik yang dimaksud disini adalah dinamika perubahan sebagai akibat perubahan input – input kebijakan dari variabel skenario.

Ide-ide (konsep-konsep) yang menjadi dasar dalam metodologi *system dynamics* diperoleh dari teknik pengendalian (*control engineering, the concepts of feedback and system self-regulation*), saibernetika (*cybernetics, the nature of information and its role in control systems*), dan teori organisasi (*organizational theory the structure of human organizational and the forms of human decision making*). Adapun konsep dalam pemodelan dengan metodologi *system dynamics* dilukiskan dalam gambar berikut :



Gambar 2.1. Struktur ide dalam metodologi sistem dinamik

Struktur ide dalam metodologi system dinamik tersebut di atas dapat dijelaskan sebagai berikut : input dalam bentuk variable menjadi masukan atau materi dalam system model.pada prosesnya mendapat masukan juga dari variable scenario yang mana sudah ada interfensi pada system tersebut. Dari prose situ menghasilkan keluaran/output berupa variable juga. Dengan output tersebut dapat dipelajari untuk menentukan model yang mampu memberikan solusi optimal. Teori umpan balik beserta saibernetika (*feedback theory and cybernetics*) memberikan prinsip-prinsip untuk memilih informasi yang relevan dan menyingkirkan informasi yang tidak mempunyai hubungan dengan dinamika-dinamika persoalan. Informasi-informasi yang terpilih kemudian diintegrasikan secara bersama mengikuti suatu kumpulan aturan yang spesifik. Sekali suatu model dapat diformulasikan, perilaku dinamisnya dapat dipelajari menggunakan simulasi dengan komputer. Simulasi ini sangat membantu dalam upaya kita untuk membandingkan struktur model beserta perilakunya dengan struktur dan perilaku sistem yang sebenarnya, yang pada gilirannya akan meningkatkan keyakinan kitaterhadap kesahihan model. Bila kesahihan model telah dapat dicapai simulasi selanjutnya dapat digunakan untuk merancang kebijakan-kebijakan yang efektif. Dengan demikian pengertian dinamik yang dimaksud disini adalah dinamika perubahan sebagai akibat perubahan input – input kebijakan dari variabel skenario.

Pada mulanya Forrester menerapkan metodologi (*system dynamics*) untuk memecahkan persoalan-persoalan yang terdapat dalam industri (perusahaan). Model-model *system dynamics* pertama kali ditujukan kepada permasalahan manajemen yang umum seperti fluktuasi inventori, ketidakstabilan tenaga kerja, dan penurunan pangsa pasar suatu perusahaan. Perkembangannya terus meningkat semenjak pemanfaatannya dalam persoalan sistem-sistem sosial yang sangat beragam. Beberapa contoh aplikasinya antara lain dibidang-bidang bisnis, keuangan, ekonomi, industri, pemerintahan, energi, pendidikan, medis (kesehatan) dan lingkungan hidup.

Pentahapan pembuatan suatu model menggunakan metodologi *system dynamics* menurut Saeed (1981) terdiri atas :

- a. Identifikasi suatu pola tingkah laku yang spesifik (pola referensi).
 - Dalam langkah ini diidentifikasi pola histories atau pola hipotesis yang menggambarkan perilaku persoalan (*problem behavior*). Pola historis atau

Pola hipotesis ini merupakan pola referensi yang akan diwakili oleh pola perilaku dari suatu kumpulan variabel-variabel yang mencakup beberapa aspek yang berhubungan dengan perilaku persoalan. Pola-pola tersebut diintegrasikan kedalam suatu susunan (fabrikasi) sedemikian rupa sehingga dapat merepresentasikan tendensi-tendensi internal yang ada didalam sistem.

- Penggambaran pola referensi tersebut sebagai tendensi internal sistem adalah sangat penting, karena tendensi itu ditimbulkan oleh suatu kumpulan struktur umpan-balik yang terbentuk didalam sistem dan mempunyai implikasi-implikasi terpenting untuk analisis kebijakan.

b. Pengembangan suatu hipotesis dinamik.

Setelah pola referensi dapat didefinisikan, suatu hipotesis awal tentang interaksi-interaksi perilaku yang mendasari pola referensi perlu diajukan. Pada langkah ini, hipotesis dinamik yang diajukan mungkin belum tepat sekali, beberapa interaksi dan formulasi perbandingan dengan bukti-bukti empiris dan reformulasi akan ditempuh untuk sampai kepada suatu hipotesis yang logis dan sah secara empiris.

c. Pembuatan batas model.

Dalam langkah ini batas model didefinisikan terlebih dahulu dengan jelas sebelum suatu model dibentuk. Batas model ini memisahkan proses-proses yang menyebabkan adanya tendensi internal yang diungkapkan dalam pola referensi dari proses-proses yang merepresentasikan pengaruh-pengaruh eksogenus. Batas model ini akan menggambarkan cakupan analisis tersebut dan akan meliputi semua interaksi sebab-akibat yang berhubungan dengan isu itu.

d. Pembuatan model (struktur umpan-balik).

- Setelah batas model dapat didefinisikan, suatu struktur linkar-lingkar umpan-balik (feedback loops) yang berinteraksi barulah dapat dibentuk. Struktur umpan balik ini merupakan blok pembentukan model yang diungkapkan melalui lingkaran-lingkaran tertutup. Lingkaran umpan balik tersebut menyatakan hubungan sebab-akibat variabel-variabel yang berputar, bukan

menyatakan hubungan karena adanya korelasi-korelasi statistik. Hubungan sebab-akibat antar sepasang variabel harus dipandang bila hubungan variabel tersebut dengan variabel lainnya didalam sistem dianggap tidak ada. Sedangkan suatu korelasi statistik antara sepasang variabel diturunkan dari data yang ada dalam keadaan variabel tersebut berhubungan dengan variabel lainnya, didalam sistem dan kesemuanya berubah secara simultan.

- Ada dua macam lingkaran umpan-balik yang mungkin terdapat dalam suatu model, yaitu lingkaran umpan-balik positif dan lingkaran umpan-balik negatif. Lingkaran umpan-balik positif akan menghasilkan pola pertumbuhan eksponensial atau peluruhan (decay), sedangkan lingkaran umpan-balik negatif akan menghasilkan pola-pola pencapaian tujuan sejenis ataupun kombinasinya akan menghasilkan bermacam pola perilaku.
 - Dalam merepresentasikan aktivitas dalam suatu lingkaran umpan-balik digunakan dua jenis variabel yang disebut level dan rate. Level menyatakan kondisi sistem pada setiap saat. Dalam rekayasa (engineering) level sistem lebih dikenal sebagai state variabel sistem. Level merupakan hasil akumulasi didalam sistem, sedangkan rate menyatakan aktivitas sistem. Persamaan suatu variabel rate merupakan suatu struktur kebijakan yang menjelaskan mengapa dan bagaimana suatu keputusan dibuat berdasarkan kepada informasi yang tersedia didalam sistem. Rate inilah satu-satunya variabel dalam model yang dapat mempengaruhi level.
- e. Pengujian model untuk validitasnya dan pemahaman terhadap perilakunya.
- Setelah model eksplisit suatu persoalan dapat diformulasikan pada langkah ini suatu kumpulan pengujian terhadap model perlu dilakukan untuk menegakkan keyakinan terhadap kesesuaian model dan sekaligus pula mendapatkan pemahaman terhadap tendensi-tendensi internal sistem. Hal ini diperlukan dalam upaya untuk membandingkannya dengan pola referensi dan secara terus-menerus memodifikasi dan memperbaiki struktur model.
 - Menurut Forrester dan Senge (1980), pengujian yang memadai suatu model system dynamics akan mencakup 17 macam pengujian yang dibagi dalam 3 kelompok besar. Kelompok pertama merupakan pengujian – pengujian yang

berhubungan dengan struktur model, yaitu verifikasi struktur, verifikasi parameter, kondisi ekstrem, kecukupan batas dan konsistensi dimensi. Kelompok kedua berhubungan erat dengan perilaku model yang terdiri atas reproduksi perilaku, prediksi perilaku, anomaly perilaku, family member, surprise behaviour, kebijakan ekstrim, dan sensitivitas perilaku. Sedangkan kelompok ketiga terdiri atas perbaikan system, changed behaviour prediction, kecukupan batas dan sensitivitas kebijakan, yang kesemuanya berhubungan erat dengan implikasi – implikasi kebijakan.

f. Analisis kebijakan

Bila suatu korespondensi antara model mental system, model eksplisitnya dan pengetahuan empiric tentang system telah diperoleh, model yang dibuat dapat diterima sebagai suatu representasi persoalan yang sah dan dapat digunakan untuk analisis kebijakan.

2.2.3 Tahapan Pemodelan

Model dibangun berdasarkan kenyataan – kenyataan empiris dari suatu sistem yang nyata. Model yang sudah diformalkan akan diuji kesahihannya dengan sistem nyata secara alamiah. Metode ilmiah dalam pemodelan sistem dinamik diwujudkan dalam bentuk tahapan pemodelan yang meliputi :

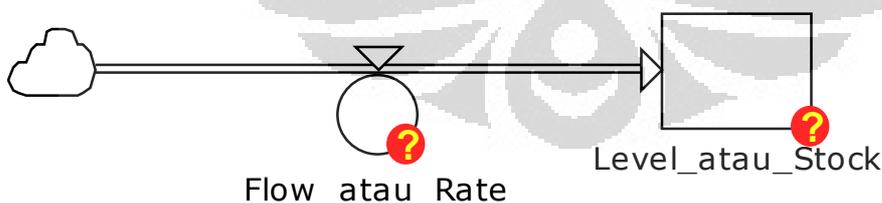
1. konseptualisasi masalah
2. konseptualisasi sistem
3. aplikasi model,
4. perilaku model
5. validasi model

Tahapan membangun model sistem dinamik (1 dan 2) serta tahapan simulasi (3 – 5), terhadap model tersebut dapat dilakukan dengan DINAMO, VENSIM, PRO – MODEL, STELLA (ITHINK) dan POWERSIM.

2.3. Perangkat Lunak Powersim untuk Simulasi

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah POWERSIM. POWERSIM digunakan untuk membangun dan melakukan simulasi suatu model dinamik, yaitu model yang terdiri dari variable – variable yang saling mempengaruhi antara satu dengan lainnya dalam satu kurun waktu..

Powersim digunakan untuk membangun dan melakukan simulasi suatu model dinamik. Suatu model dinamik adalah kumpulan dari variabel-variabel yang saling mempengaruhi antara satu dengan lainnya dalam suatu kurun waktu. Setiap variabel berkorespondensi dengan suatu besaran yang nyata atau besaran yang dibuat sendiri. Semua variabel tersebut memiliki nilai numerik dan sudah merupakan bagian dari dirinya. Pada waktu mensimulasikan model, variabel-variabel akan saling dihubungkan membenruk suatu sistem yang dapat menirukan kondisi sebenarnya. Pada perangkat lunak powersim, suatu sistem yang menggambarkan hubungan antara variabel-variabel itu dinamakan diagram alir (*flow diagram*). Variabel-variabel tersebut akan digambarkan dengan beberapa simbol, yang utama adalah simbol aliran (*flow symbol*) yang selalu dihubungkan dengan simbol level (*level symbol*) melalui panah tebal untuk proses aliran. Aliran benda yang dapat mengalir disini adalah barang, uang, orang, dan lain-lain, yang dapat diamati, dan diukur penambahannya dan pengurangannya dalam level. Dalam pemodelan level mewakili pokok persoalan yang menajdi perhatian. Penjelasan tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :



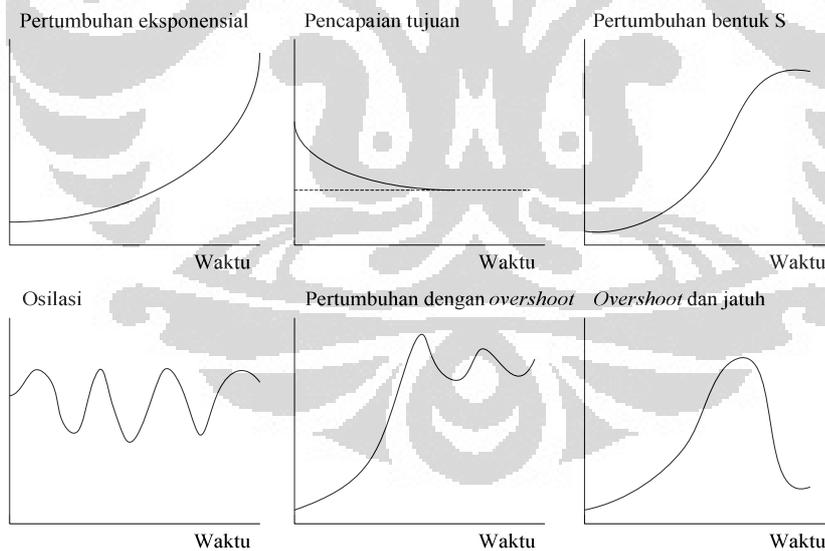
Gambar 2.2. Diagram Alir Sistem Dinamik (Causal Loop Diagram)

Selanjutnya panah halus (*information link*) yang menghubungkan antara level dengan aliran adalah proses umpan balik. Diagram alir menggambarkan sruktur dari model, sedangkan hasil simulasi berupa gambar atau grafik menggambarkan prilaku

(*behavior*) dari sistem. Model yang dibangun dengan menggunakan powersim berbentuk simbol-simbol dan simulasinya mengikuti suatu metode yang dinamakan dinamika sistem (*system dinamik*).

Perilaku dari suatu sistem timbul dari struktur yang membanggunya. Struktur itu terdiri dari loop-loop umpan balik (*feedback*), *stock* and *flows* dan *non linear* yang diciptakan oleh interaksi struktur fisik dan institusional dari sistem dengan agen-agen proses *decision-making* yang terjadi di dalam sistem tersebut.

Bentuk yang paling mendasar dari perilaku dinamik adalah *exponensial growth*, *goal seeking* dan *oscillation*. Setiap dari perilaku dasar dinamik tersebut dihasilkan oleh struktur *feedback* yang sederhana: *growth* dibangun untuk *feedback* positif, *goal seeking* dibangun untuk *feedback* negatif dan *oscillation* dibangun untuk *feedback* negatif dengan waktu tunda (*time delays*) dalam *loop*. Bentuk lainnya termasuk *S-shaped growth*, *S-shaped growth* dengan *overshoot* dan *oscillation*, dan *overshoot* dan *collapse*, dibangun untuk hubungan nonlinear dari struktur-struktur dasar *feedback*.



Gambar 2.3. Bentuk perilaku yang umum

(Sumber : John D. Sterman, 2000, hal. 108)

2.3.1. Fungsi – Fungsi Penting Dalam Powersim

Informasi tentang suatu keadaan dan proses yang khas ataupun tindakan tertentu dalam model, dapat dinyatakan secara sederhana dengan logika fungsi matematis. Berikut ini akan dijelaskan penggunaan fungsi – fungsi penting tersebut dalam simulasi model pada Powersim.

Fungsi GRAPH

Fungsi GRAPH digunakan bila data berupa tabel atau data menunjukkan hubungan yang non-linier. Cara penulisan GRAPH dalam Powersim adalah sebagai berikut :

$$\text{Auxilliary GRAPH} = \text{GRAPH} (X, X1, dx, Y(n)),$$

Dimana :

X = variabel bebas (nilainya bebas, merupakan sumbu X, disebut pula input)

$X1$ = nilai pertama dari X (variabel bebas)

dx = pertambahan nilai (increment) dari X (variabel bebas). Nilainya selalu positif

$Y(N)$ = vektor (sumbu Y, disebut pula Output)

Fungsi GRAPH tidak selalu tergantung pada waktu dan tidak selalu bersifat linier, bahkan kebanyakan dari fungsi ini digunakan untuk memperlihatkan hubungan bersifat non-linier. Selain itu fungsi GRAPH akan sangat berguna bagi kita pada saat kita tidak mengetahui rumus matematika dari suatu fungsi, atau jika kita menggunakan data statistik atau data empiris (historical data) untuk memperlihatkan hubungan antara dua variabel.

Fungsi IF

Fungsi IF menggambarkan suatu kondisi dan digunakan untuk banyak kepentingan, antara lain untuk menguji variabel – variabel lain. Menampilkan fungsi IF dari suatu variabel dilakukan pada saat mendefinisikan variabel tersebut. Pada program Powersim perumusan/cara penulisan fungsi IF adalah :

$$\text{Auxilliary IF} = \text{IF} (\text{Condition}, \text{Value 1}, \text{Value 2})$$

Dimana :

Condition = suatu logical value (True or False)

Value 1 = angka sembarang (computational parameter)

Value 2 = angka sembarang (computational parameter)

Fungsi DELAY

Dalam sistem yang riil di alam sering terjadi delay atau kelambatan (waktu), misalnya dalam pengambilan keputusan, dalam hal transportasi, informasi, dan lain – lain. Secara umum fungsi DELAY dalam Powersim dibagi menjadi 3 yaitu :

1. DELAY Material (DELAYMTR)
2. DELAY Informasi (DELAYINF)
3. DELAY Pipeline (DELAYPPL).

Fungsi STEP

Fungsi STEP digunakan pada suatu kondisi dengan data yang mengalami penambahan secara kontinyu.

Fungsi PULSE

Fungsi ini sebenarnya sama dengan fungsi STEP, perbedaannya pada fungsi PULSE penambahan nilai dilakukan secara periodik (berkala). Jadi PULSE = STEP yang periodik (berkala).

Fungsi TIMECYCLE

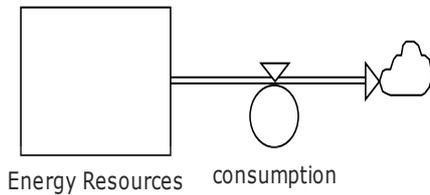
Fungsi TIMECYCLE digunakan untuk menguji siklus waktu atau interval waktu. Secara umum dalam Powersim fungsi TIMECYCLE dapat dituliskan :
Auxilliary TIMECYCLE = TIMECYCLE (First, Interval)

Dimana :

First = waktu pertama untuk pengecekan

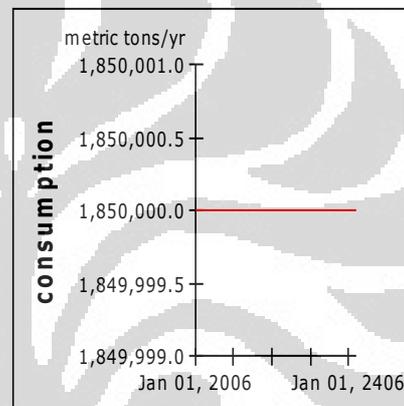
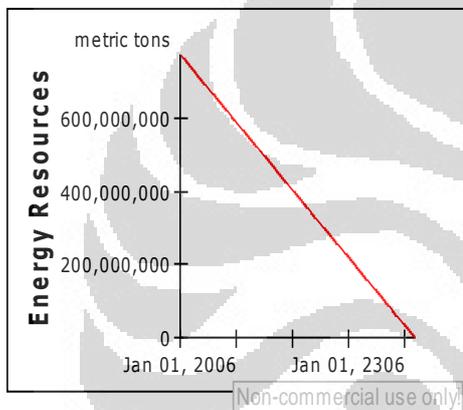
Interval = waktu diantara pengecekan yang satu ke pengecekan berikutnya.

Berikut ini adalah contoh simulasi model dinamik pemakaian energi menggunakan Powersim :



Time	gy Resources (metric t
Jan 01, 2006	775,000,000.00
Jan 01, 2007	773,150,000.00
Jan 01, 2008	771,300,000.00
Jan 01, 2009	769,450,000.00
Jan 01, 2010	767,600,000.00
Jan 01, 2011	765,750,000.00
Jan 01, 2012	763,900,000.00

Non-commercial use only!



Gambar 2.4. Contoh Pemodelan Energy Resources

Pada model di atas dapat ditulis persamaan Powersim sebagai berikut :

$$\text{Flow Energy Resources} = \text{Energy Resources} - dt * \text{consumption}$$

Pada simulasi terhadap model pada gambar 2.4 di atas yang menjadi pokok persoalan atau level adalah Energy Resources, dengan aliran dari level Energy Resources tersebut adalah Consumption dari energi yang ada. Dengan menggunakan persamaan matematika, model di atas dapat ditulis dengan :

$$Y = a + bx$$

Dimana :

$$Y = \text{Energy Resources}$$

$$a = \text{Energy Resources pada kondisi awal}$$

$$b = \text{Consumption}$$

x = Fungsi waktu

Berdasarkan data yang ada diketahui bahwa energy resources pada kondisi awal tahun 2006 sebesar 775.000.000 metrics ton, dengan consumption sebesar 1.850.000 per tahun maka dengan melakukan simulasi pada powersim, dapat diketahui jumlah perubahan pada energy resources dari tahun ke tahun hingga habis pada tahun 2306. Hasil keluaran dari simulasi tersebut berupa tabel dan grafik berdasarkan fungsi waktu.

2.3.2. Alat-alat (*tools*) Untuk Sistem Dinamik Pada Powersim

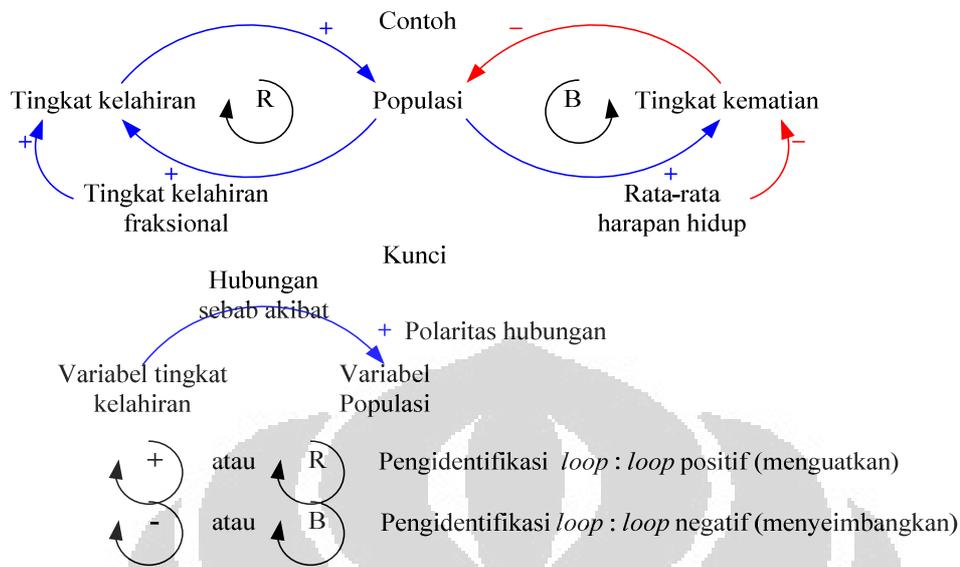
Alat-alat dasar yang biasa digunakan untuk sistem dinamik pada Powersim adalah berupa diagram-diagram loop sebab akibat (*Causal Loop Diagrams/CLDs*) dan *stocks and flows*.

2.3.1.1 Causal Loop Diagram (CLD)

CLD adalah alat yang penting untuk merepresentasikan struktur umpan balik dari sistem. CLD baik sekali digunakan untuk :

1. Menangkap secara cepat hipotesis mengenai penyebab dinamika.
2. Mendapatkan dan menangkap mental model dari individu atau tim.
3. Mengkomunikasikan umpan balik yang penting yang diyakini bertanggung jawab terhadap suatu masalah.

CLD terdiri dari variabel-variabel yang dihubungkan oleh tanda panah yang menunjukkan pengaruh sebab akibat di antara variabel-variabel tersebut. *Loop* umpan balik juga diidentifikasi di dalam diagram. Gambar 2.4 menunjukkan contoh dan kunci cara penulisan.



Gambar 2.5. Cara penulisan *causal loop diagram*

(Sumber : John D. Sterman, 2000, hal. 138)

Variabel-variabel dihubungkan oleh CLD, seperti yang ditunjukkan oleh tanda panah. Dalam contoh di atas, tingkat kelahiran ditentukan oleh populasi dan tingkat kelahiran fraksional. Setiap hubungan sebab akibat ditentukan oleh polaritas, baik positif (+) maupun negatif (-) untuk mengindikasikan bagaimana variabel yang bergantung dengan yang lain berubah ketika variabel yang tidak bergantung berubah. *Loop-loop* di dalam diagram diidentifikasi oleh pengidentifikasi *loop* yang menunjukkan apakah *loop* tersebut umpan balik positif (menguatkan) atau negatif (menyeimbangkan). Dapat kita perhatikan bahwa pengidentifikasi *loop* berputar dalam arah yang sama dengan *loop* yang sesuai dengannya. Dalam contoh di atas, umpan balik positif yang berhubungan dengan kelahiran dan populasi adalah searah jarum jam dan begitu juga dengan pengidentifikasi *loop*-nya. Sedangkan umpan balik negatif yang berhubungan dengan tingkat kematian dan populasi adalah berlawanan arah jarum jam sesuai dengan pengidentifikasi *loop*-nya. Gambar 2.5 menunjukkan rangkuman definisi dari polaritas hubungan.

Simbol	Interpretasi	Persamaan matematika	Contoh
	<p>Jika X meningkat (menurun), maka Y akan meningkat (menurun). Jika terjadi akumulasi, X menambah Y.</p>	<p>$\partial Y / \partial X > 0$ Jika terjadi akumulasi, $Y = \int_{t_0}^t (X + \dots) ds + Y_{t_0}$</p>	<p>Kualitas produk  Penjualan Usaha  Hasil Kelahiran  Populasi</p>
	<p>Jika X meningkat (menurun), maka Y akan menurun (meningkat). Jika terjadi akumulasi, X mengurangi Y.</p>	<p>$\partial Y / \partial X < 0$ Jika terjadi akumulasi, $Y = \int_{t_0}^t (-X + \dots) ds + Y_{t_0}$</p>	<p>Harga produk  Penjualan Frustrasi  Hasil Kematian  Populasi</p>

Gambar 2.6. Polaritas hubungan: definisi dan contoh

(Sumber : John D. Sterman, 2000, hal. 139)

Hubungan positif memiliki arti bahwa jika suatu penyebab meningkat, maka akibat juga akan meningkat, dan jika penyebabnya menurun, akibatnya juga akan menurun. Pada contoh dalam gambar 2.4, peningkatan pada tingkat kelahiran fraksional akan menyebabkan peningkatan pada tingkat kelahiran, dan penurunan pada tingkat kelahiran fraksional akan menyebabkan penurunan pada pada tingkat kelahiran.

Hubungan negatif memiliki arti bahwa jika suatu penyebab meningkat, maka akibatnya akan menurun, dan jika penyebabnya menurun, maka akibatnya akan meningkat. Pada contoh dalam gambar 2.4, peningkatan harapan hidup rata-rata akan menyebabkan tingkat kematian menurun, dan penurunan harapan hidup rata-rata akan meningkatkan tingkat kematian.

Polaritas hubungan menggambarkan struktur dari sistem. Polaritas tersebut tidak menggambarkan perilaku dari variabel-variabel. Polaritas hubungan ini hanya menggambarkan kemungkinan apa yang akan terjadi jika terdapat sebuah perubahan. Polaritas hubungan ini tidak menggambarkan apa yang benar-benar terjadi.

Peningkatan dari sebuah variabel penyebab tidak harus berarti bahwa akibatnya akan benar-benar meningkat. Ada dua alasan. Pertama, sebuah variabel seringkali memiliki lebih dari satu input. Untuk menentukan apa yang benar-benar terjadi, kita harus mengetahui bagaimana semua input berubah. Pada contoh populasi di atas, tingkat kelahiran tergantung pada tingkat kelahiran fraksional dan ukuran dari populasi (tingkat kelahiran = tingkat kelahiran fraksional * populasi). Kita tidak dapat mengatakan apakah peningkatan pada tingkat kelahiran fraksional akan benar-benar menyebabkan

peningkatan pada tingkat kelahiran. Kita juga perlu mengetahui apakah populasi sedang naik atau turun. Penurunan yang cukup besar pada populasi dapat menyebabkan tingkat kelahiran menjadi turun walaupun tingkat kelahiran fraksional mengalami peningkatan.

Kedua, diagram *loop* sebab akibat tidak membedakan antara stok (*stock*) yang merupakan akumulasi dari sumber daya-sumber daya dalam sebuah sistem dan aliran (*flow*) yang merupakan tingkat perubahan yang mengubah sumber daya-sumber daya tersebut. Di dalam contoh populasi, populasi merupakan stok, yang mengakumulasi tingkat kelahiran yang dikurangi tingkat kematian. Peningkatan pada tingkat kelahiran akan meningkatkan populasi, tetapi penurunan pada tingkat kelahiran tidak akan mengurangi populasi. Kelahiran hanya dapat meningkatkan populasi dan tidak pernah menguranginya. Kedua alasan ini juga berlaku pada polaritas negatif.

Ada dua metode untuk menentukan apakah sebuah *loop* positif atau negatif, yaitu cara cepat dan cara yang benar.

1. Cara cepat : menghitung jumlah dari penghubung negatif

Cara cepat untuk menentukan apakah sebuah *loop* adalah positif atau negatif adalah dengan menghitung jumlah dari penghubung negatif. Jika jumlah dari penghubungnya genap, *loop* tersebut adalah positif. Jika jumlah dari penghubungnya ganjil, *loop* tersebut adalah negatif. Namun cara ini dapat menimbulkan kesalahan. Dalam diagram yang kompleks, akan sangat mudah untuk terjadi kesalahan dalam menghitung jumlah hubungan negatif di dalam sebuah *loop*. Selain itu, kesalahan dalam memberi polaritas dari hubungan-hubungan yang ada ketika kita untuk pertama kalinya menggambar diagram juga akan sangat mudah terjadi. Penghitungan jumlah tanda negatif tidak mungkin dapat menampakkan kesalahan-kesalahan tersebut.

2. Cara yang benar : menyelidiki efek dari sebuah perubahan di sekeliling *loop*

Cara yang benar untuk menentukan polaritas dari sebuah *loop* adalah dengan menyelidiki efek dari sebuah perubahan yang kecil terhadap salah satu variabel ketika variabel tersebut menyebar di sekeliling *loop*. Jika efek dari umpan balik tersebut menguatkan perubahan awal, maka *loop* tersebut adalah positif. Jika efek umpan balik tersebut berlawanan dengan perubahan awal, maka *loop* tersebut adalah negatif. Kita dapat mulai dari variabel yang mana saja dan hasilnya harus sama.

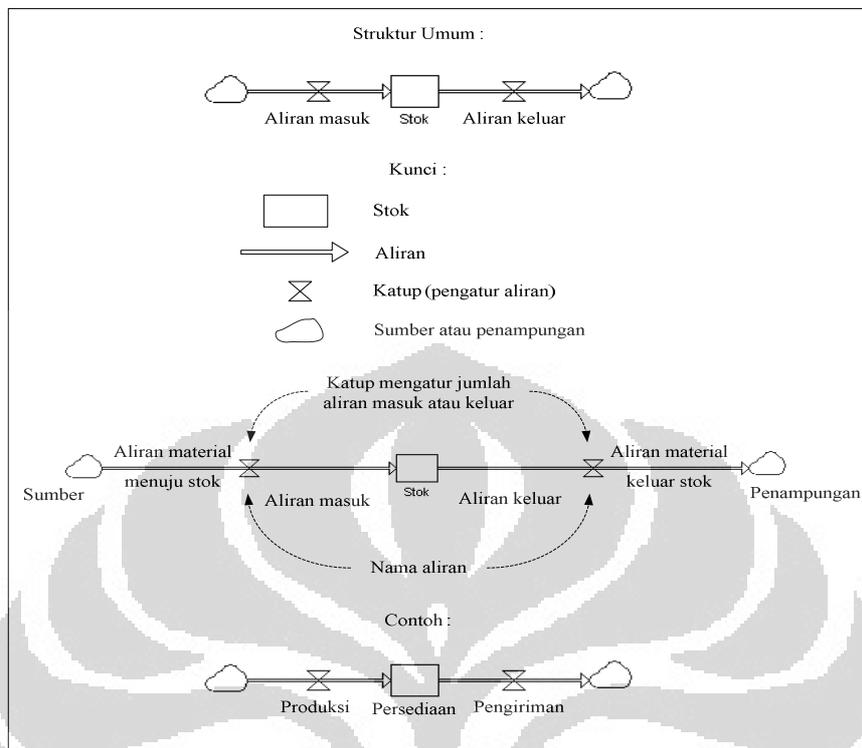
2.3.1.2 Auxilliary

Auxilliary adalah variabel yang merujuk kepada informasi yang melekat pada suatu obyek, jadi bukan obyek itu sendiri. Kuantitas dan atau kualitas informasi tersebut nilainya diproses sendiri oleh model atau dapat diciptakan dengan suatu konstanta.

2.3.1.2 *Stock dan Flow*¹

Diagram *loop sebab akibat* memiliki beberapa keterbatasan dan dengan mudah dapat disalahgunakan. Salah satu keterbatasan yang paling penting dari diagram sebab akibat adalah ketidakmampuannya untuk menangkap struktur stok dan aliran (*stock and flow*) dari sistem. Stok dan aliran, bersama dengan umpan balik, adalah dua konsep utama dari teori sistem dinamik.

Stok adalah akumulasi. Stok menggolongkan keadaan sistem dan membentuk informasi pada keputusan dan tindakan. Stok memberi sistem kekuatan untuk bergerak dan melengkapinya dengan memori. Stok menciptakan penundaan dengan mengakumulasikan perbedaan antara aliran masuk menuju proses dan aliran keluarannya. Dengan memisahkan tingkat aliran, stok merupakan sumber ketidakseimbangan dalam sistem.



Gambar 2.7. Cara penulisan diagram alir
(Sumber : John D. Sterman, 2000, hal. 193)

Dalam pembuatan diagram alir, sistem dinamik menggunakan cara-cara penulisan berikut (gambar 2.7).

1. Stok diwakili oleh persegi empat.
2. Aliran masuk diwakili oleh pipa (tanda panah) yang mengarah pada (menambah) stok. Aliran keluar diwakili oleh pipa yang mengarah keluar (mengurangi) stok.
3. Katup mengendalikan aliran.
4. Awan mewakili sumber-sumber dan penampungan untuk aliran. Sumber menggambarkan darimana stok berasal dimana aliran yang mula-mula berada diluar batasan model muncul ; penampungan menggambarkan kemana stok menuju dimana aliran yang meninggalkan batasan model keluar. Sumber dan penampungan diasumsikan memiliki kapasitas yang tidak terbatas dan tidak pernah dapat membatasi aliran.

Struktur dari diagram alir disusun dari elemen-elemen berikut. Contoh di dalam gambar 2.6 menunjukkan persediaan adalah stok yang mengakumulasikan aliran masuk dari produksi dan dikurangi oleh aliran keluar dari pengiriman. Awan mengindikasikan bahwa stok dari bahan mentah tidak pernah

menyebabkan tingkat produksi kekurangan dan stok produk yang dikirim ke pelanggan tidak pernah terlalu tinggi yang dapat menghambat tingkat pengiriman.

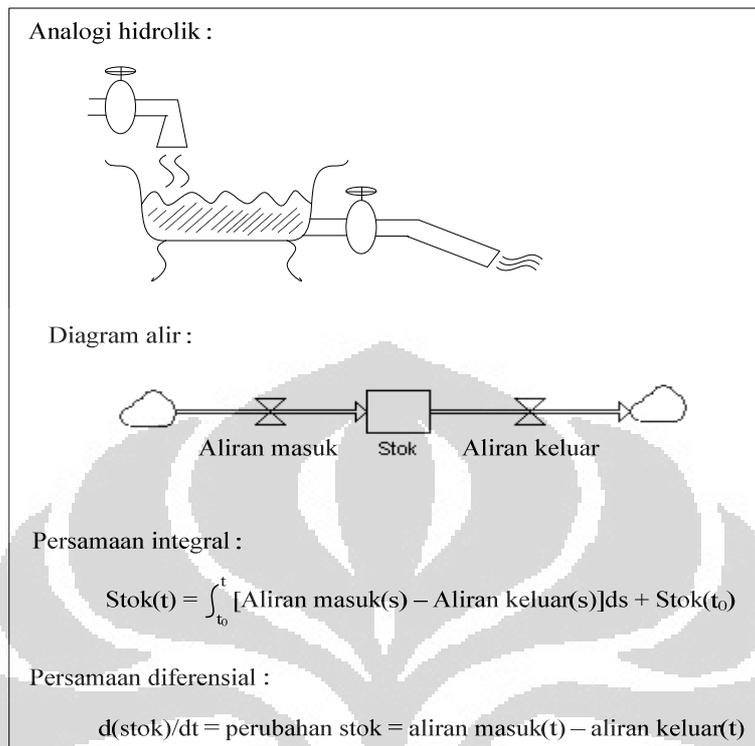
Kaidah diagram alir didasari oleh analogi hidrolik, yang merupakan aliran air menuju dan keluar tempat penampungan air. Memang sangat membantu untuk memikirkan stok sebagai bak air. Kuantitas air di dalam bak pada suatu waktu adalah akumulasi dari air yang mengalir masuk melalui keran dikurangi air yang mengalir keluar melalui saluran pipa (dengan asumsi tidak ada percikan dan penguapan). Melalui cara yang sama, kuantitas material dalam stok apapun merupakan akumulasi dari aliran material yang masuk dikurangi aliran material yang keluar. Analogi ini memiliki pengertian matematis yang tepat dan tidak ambigu. Stok mengakumulasikan atau mengintegrasikan alirannya ; aliran menuju stok adalah tingkat perubahan dari stok. Oleh karena itu, struktur yang digambarkan dalam gambar 2.7 di atas sesuai dengan persamaan integral berikut ini :

$$Stok(t) = \int_{t_0}^t [Aliranmasuk(s) - Alirankeluar(s)] ds + Stok(t_0) \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana aliran masuk(s) mewakili nilai dari aliran masuk pada waktu s antara waktu awal t_0 dan waktu sekarang t. Dengan persamaan yang sama, tingkat perubahan stok adalah aliran masuk dikurangi aliran keluar, yang didefinisikan dengan persamaan diferensial

$$d(stok)/dt = aliran\ masuk(t) - aliran\ keluar(t) \dots\dots\dots(2-2)$$

Secara umum, aliran akan menjadi fungsi dari stok serta variabel-variabel dan parameter-parameter kondisi yang lain. Gambar 2.6. menunjukkan empat representasi yang sama dari diagram alir secara umum. Dari suatu sistem persamaan integral dan diferensial kita dapat membuat peta stok dan aliran yang sesuai ; dari suatu peta stok dan aliran kita dapat membuat sistem persamaan integral dan diferensial yang sesuai.



Gambar 2.8. Empat Representasi Struktur Diagram Alir

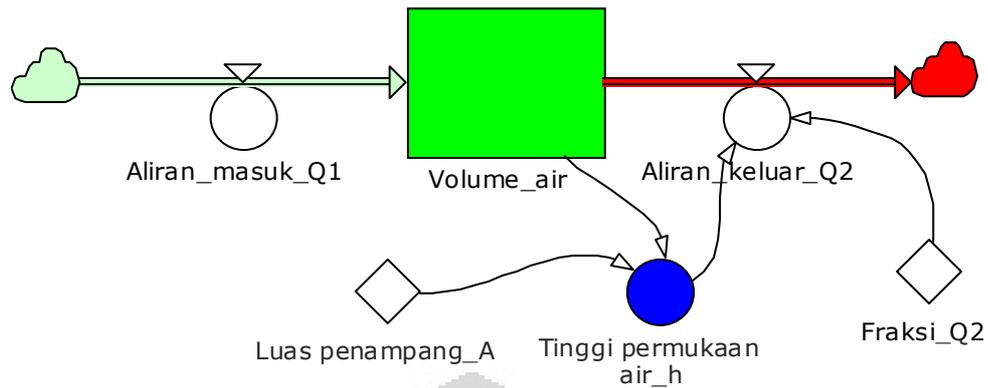
(Sumber : John D. Sterman, 2000, hal. 194)

Berdasarkan penjelasan dengan analogi tersebut di atas, di bawah ini dicontohkan aplikasi proses persamaan dalam simulasi model menggunakan Powersim :

Diketahui ;

- sebuah bejana air dengan luas penampang $A = 2 \text{ m}^2$
- air yang mengalir masuk bejana $Q_1 = 14 \text{ m}^3/\text{s}$
- tinggi permukaan air dalam bejana $h = \text{volume air}/A$
- penurunan air akibat air yang keluar dari bejana $= 0,4$
- air yang mengalir keluar dari bejana $= h \times 0,4$

Fenomena di atas merupakan suatu kondisi dinamis, yang mana jumlah volume air dalam bejana, tinggi permukaan air, dan juga air yang mengalir keluar bejana bisa berubah seiring dengan waktu. Peristiwa ini merupakan sebuah sistem nyata yang dapat dimodelkan sebagai berikut :



Gambar 2.9. Model Aliran Hidrolik

Berdasarkan diagram alir, sistem pada model di atas dapat diterjemahkan ke dalam simbol matematika pada Program Powersim. Korespondensi antara masing – masing diagram alir dengan simbol program Powersim adalah sebagai berikut :

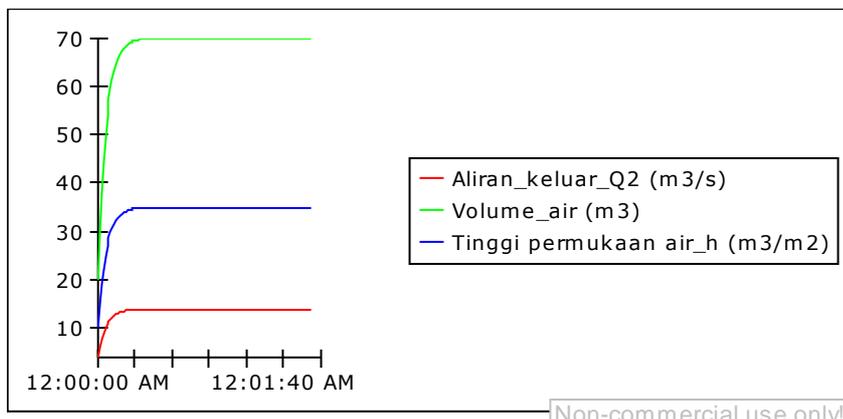
$$\text{Flow Volume_air} = dt * \text{Aliran_masuk_Q1} - dt * \text{Aliran_keluar_Q2}$$

$$\text{Aux Aliran_keluar_Q2} = \text{Fraksi_Q2} * \text{Tinggi permukaan air_h}$$

$$\text{Aux Tinggi permukaan air_h} = \text{Volume_air} / \text{Luas penampang_A}$$

Hasil simulasi dari model di atas dengan menggunakan Program Powersim adalah sebagai berikut :

Time	Aliran_keluar_Q2 (m3/s)	Tinggi permukaan air_h (m)	Volume_air (m3)
12:00:00 AM	4.00	10.00	20.00
12:00:20 AM	13.88	34.71	69.44
12:00:40 AM	14.00	35.00	69.99
12:01:00 AM	14.00	35.00	70.00
12:01:20 AM	14.00	35.00	70.00
12:01:40 AM	14.00	35.00	70.00
12:02:00 AM			



Gambar 2.10. Hasil Simulasi Model Hidrolik

2.3. Kelebihan Dan Kekurangan Program Powersim

Beberapa kelebihan dari POWERSIM antara lain :

- Lebih mudah melihat struktur model dan perilaku model dalam satu lembar kerja yang sama.
- Memberikan kemudahan dalam mendeteksi variabel mana yang belum terdefinisi.
- Memberikan lebih banyak fasilitas untuk editing penampilan
- Program Powersim mampu melakukan Auto Regresi secara linear

Namun demikian dari sekian operasional simulasi dengan Powersim sebagaimana dijelaskan di atas, perangkat lunak ini juga masih memiliki kekurangan, diantara kelemahan Powersim adalah :

1. Rumit dalam penyusunan struktur modelnya, meskipun mudah dalam melakukan proses simulasinya.
2. Membutuhkan pemahaman yang meluas bahkan antar disiplin ilmu dalam menentukan variabel – variabel modelnya dan mengkaitkannya.
3. Untuk analisis antar disiplin kadangkala berhadapan dengan resistensi dari tradisi analisis uni disiplin yang sudah mapan.

BAB III

PENGUMPULAN DATA DAN PEMODELAN BATUBARA UNTUK TENAGA LISTRIK

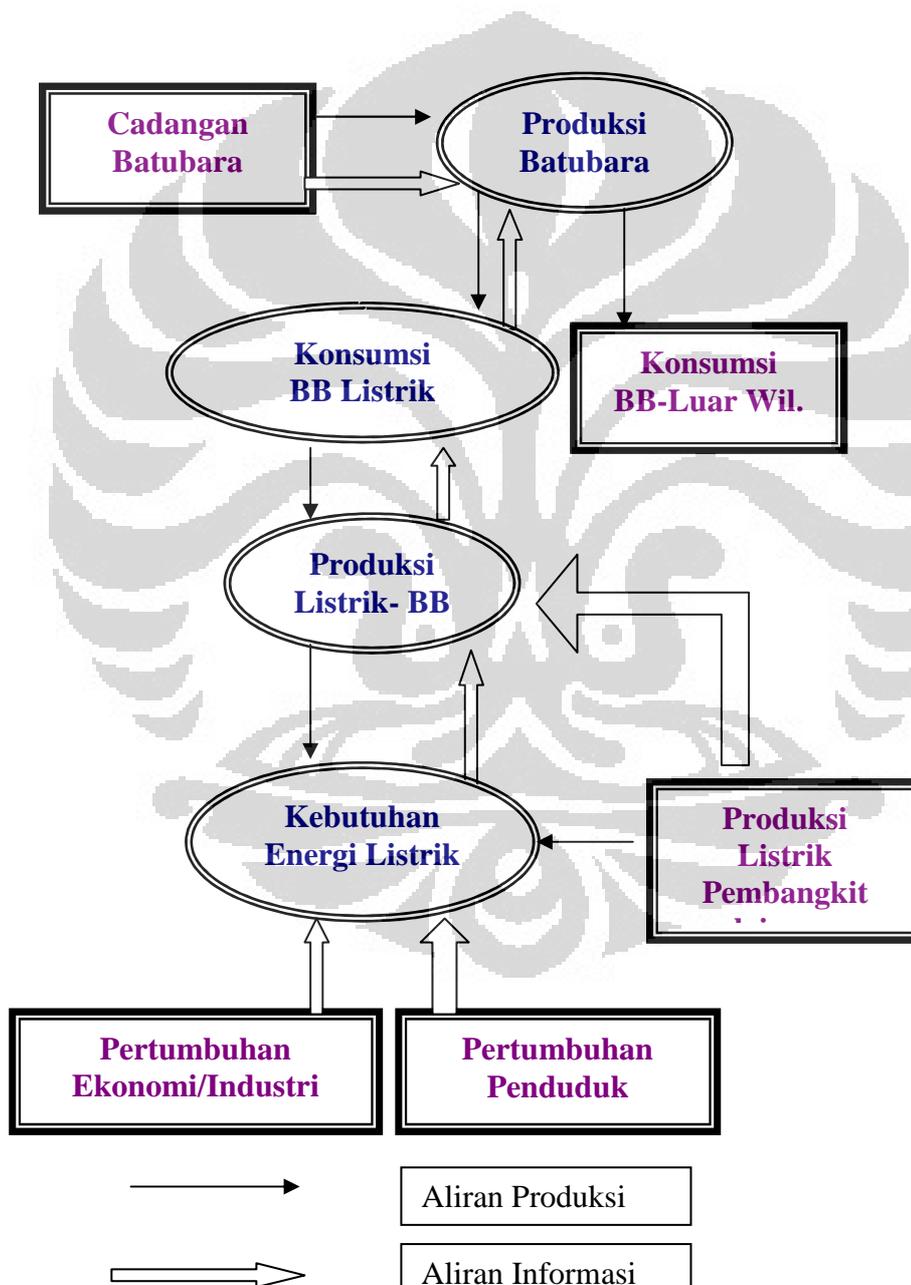
Dengan mempertimbangkan sistem penyediaan sumber daya energi yang optimal dan dampak pemakain sumber daya energi terhadap lingkungan yang minimal, maka dilakukan pengembangan model dinamika sistem. Pengembangan model dimaksudkan untuk memperoleh model yang akan merepresentasikan pemakaian batubara pada sektor tenaga listrik. Hasil dari model dinamika sistem yang berhubungan dengan sektor tenaga listrik adalah jenis pembangkit dan kapasitas pembangkit listrik yang memberikan dampak positif bagi pertumbuhan ekonomi/industri, memberikan kesinambungan suplai energi jangka panjang, dan mendorong penggunaan batubara.

3.1. Konsep Dasar Model Batubara Untuk Tenaga Listrik

Terkait dengan upaya untuk memenuhi kebutuhan energi listrik wilayah Kalimantan Timur, maka diperlukan suatu konsep yang terintegrasi yang menyatukan berbagai faktor yang menunjang usaha pemenuhan kebutuhan energi listrik. Konsep model ini berangkat dari konsumsi listrik perkapita yang pada tahun 1990/1991 mencapai 157 KWh per kapita dan masih tergolong rendah jika dibandingkan dengan konsumsi listrik per kapita rata-rata Popinsi lainnya seperti Jawa – Bali (1.607 KWh) dan Sumatera (414KWh) pada tahun yang sama. Walaupun masih rendah, tetapi kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan peningkatan pendapatan masyarakat, perkembangan penduduk dan peningkatan pertumbuhan ekonomi/industri.

Selama ini untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, Perusahaan Listrik Negara (PLN), selain memproduksi sendiri melalui pembangkit-pembangkit yanh ada, juga membeli listrik dari pihak swasta. Pada tahun 2001 dari total produksi listrik Kalimantan Timur sebesar 1.095.730 MWh, $\pm 40\%$ (438.292 MWh) di suplay dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan dari jumlah tersebut $\pm 75\%$ (328.719 MWh) berasal dari PLTU berbahan bakar batubara.

Selain itu, batubara juga banyak digunakan sebagai bahan bakar untuk industri metalurgi, semen, bahkan rumah tangga. Disamping itu batubara juga dijadikan sebagai komoditi luar yaitu kebutuhan nasional dan ekspor untuk menghasilkan pendapatan daerah. Berdasarkan pembahasan tersebut di atas, maka model kebutuhan batubara untuk pembangkit listrik dapat digambarkan dari diagram konsep model berikut ini :



Gambar 3.1. Konsep Dasar Model Batubara untuk Listrik

Diagram tersebut di atas membedakan beberapa variabel menjadi variabel endogen dan eksogen (Pamungkas, 1984). Variabel endogen adalah variabel *dependent* yang harus dicari nilainya. Sedang variabel eksogen adalah variabel *independent* yang ditetapkan nilainya. Variabel – variabel endogen dan eksogen tersebut dapat diterangkan dalam sebuah sistem persamaan simultan, yang akan dibahas pada bagian analisa perilaku model pada bab empat.

Pada gambar 3.1 di atas pertumbuhan ekonomi/industri dan pertumbuhan penduduk menjadi faktor eksogen yang menentukan kebutuhan akan energi listrik. Kebutuhan listrik ini dipenuhi oleh produksi listrik PLTU yang berbahan bakar batubara dan juga produksi listrik dari pembangkit lainnya yaitu PLT minyak, gas dan non fosil. Dari realitas tersebut diatas, berarti kebutuhan batubara khususnya sebagai bahan bakar untuk membangkitkan energi listrik menjadi sangat penting. Oleh karena itu diperlukan suatu analisis yang memperhitungkan faktor-faktor tersebut. Yang mana cadangan batubara merupakan variabel eksogen yang mempengaruhi produksi batubara untuk memenuhi konsumsi batubara khususnya sebagai energi primer pada PLTU yang menjadi fokus perhatian dalam pemodelan ini.

3.2. STRUKTUR MODEL

Untuk melakukan pemodelan skenario penggunaan batubara pada sektor tenaga listrik, maka model yang dibangun harus menyajikan suatu struktur umpan balik (Forrester), yang menyatakan hubungan sebab akibat.

Dalam pemodelan ini terdapat dua sub sistem yang saling berkaitan yaitu sub sistem batubara dan sub sitem kebutuhan energi listrik.

3.2.1. Sub Sistem Pemodelan Kebutuhan Listrik

Pada pemodelan ini, kebutuhan energi listrik di Indonesia dipengaruhi oleh beberapa kegiatan :

- 1) Pertumbuhan penduduk atau konsumen dengan indikator konsumsi listrik (KWh per kapita) yang menyatakan tingkat industrialisasi yang telah dicapai.
- 2) Terpenuhinya kebutuhan listrik sangat tergantung pada kemampuan dan kapasitas masing-masing pembangkit tenaga listrik yang tersedia. Kemampuan

dan kapasitas pembangkitpun dipengaruhi oleh ketersediaan bahan baker/sumber energi penggerak.

Pada pemodelan kebutuha energi listrik, yang menjadi output akhir adalah seberapa besar kemampuan unuit-unit pembangkit tenaga listrik yang ada mampu memasok kebutuhan tersebut.

Secara garis besar, pemakai energi listrik dapat dikelompokkan menjadi empat (4) sektor, yaitu :

- a. Sektor Rumah Tangga
- b. Sektor Industri
- c. Sektor Komersial
- d. Sektor Umum/Sosial

Oleh karena itu, perkiraan kebutuhan tenaga listrik berkaitan dengan kecenderungan (tata laku) pemakaian energi listrik maka untuk mengoptimalkan perkiraan kebutuhan listrik, disusun model berdasarkan data – data masa lalu (data histories), sehingga dapat menghasilkan hasil yang lebih akurat dan dapat dipercaya.

Tabel 3.1 Perkembangan Pelanggan Menurut Sektor dan Ratio Elektrifikasi

Tahun	Pelanggan				Jumlah Pelanggan	Jumlah RT	Ratio elektrifikasi (%)
	Industri	R.Tangga	Komersial	Umum			
1990/1991	238	135.355	8.408	3652	147.653	486545	28.703
1991/1992	250	140.374	9.102	3978	153.704	493.789	30.584
1992/1993	256	159.227	9.838	4420	173.741	503.172	32.649
1993/1994	286	179.175	10.708	4987	195.156	516.386	35.799
1995	360	230.930	12.926	6206	250.422	543.397	43.172
1996	383	260.772	14.579	6958	282.692	560.534	47.999
1997	429	286.846	16.523	7854	311.652	562.440	51,00
1998	242	309.952	17.548	8341	336.083	650.800	47,63
1999	226	318.758	20.410	8361	347.755	689.100	46,26
2000	266	332.279	22.503	8850	363.898	692.658	48.741
2001	326	351.359	24.382	9410	385.477	695.541	49.120

Sumber: Statistik ketenagalistrikan dan energi tahun 2001

Tabel 3.2 Perkembangan Konsumsi Tenaga Listrik dan

PLN Per Kapita dan Per Pelanggan

Tahun	Jumlah Penduduk	Jumlah Pelanggan	Penjualan Tenaga Listrik (MWh)	Konsumsi Tenaga Listrik Per Kapita (MWh)	Konsumsi Tenaga Listrik Pelanggan (MWh)
1990/1991	1.876.663	240.212	304.984	0.157	1,270
1991/1992	1.956.233	250.397	340.010	0.172	1,358
1992/1993	2.039.177	265.093	377.265	0.189	1,423
1993/1994	2.159.094	276.364	421.815	0.208	1,526
1995	2.251.501	288.192	536.061	0.260	1,860
1996	2.340.282	299.556	621.492	0.274	2.074
1997	2.441.017	311.652	710.160	0.281	2.279
1998	2.536.000	336.083	767.910	0.291	2.284
1999	2.644.200	347.755	822.810	0.31	2.366
2000	2.760.554	358.872	877.414	0.339	2.444
2001	2.882.141	374.678	942.290	0.355	2.514

Sumber : Statistik ketenagalistrikan dan energi tahun 2001

Dari tabel 3.1 dan 3.2 diatas terlihat bahwa perkembangan pemakain energi listrik sepanjang tahun 1991 sampai dengan 2001 mengalami peningkatan baik dari jumlah pelanggan maupun dari konsumsi energi listrik, dengan ratio elektrifikasi rata-rata 4,5 % per tahun. Walaupun terjadi peningkatan konsumsi energi listrik, namun disisi lain konsumsi energi listrik per kapita relatif masih kecil dimana pada tahun 2000 baru mencapai 0,339 MWh.

Besarnya laju pertumbuhan pemakain energi listrik tersebut seiring dengan semakin membaiknya perekonomian Indonesia yang pada tahun 2000 mengalami pertumbuhan sebesar 4,77 %, jauh lebih besar jika dibanding dengan pada saat Indonesia mengalami krisis ekonomi pada tahun 1998 yang pertumbuhannya 13,13%. Jika asumsi pertumbuhan ekonomi tahun 2000 digunakan sebagai acuan, maka dapat diperkirakan bahwa kebutuhan energi listrik akan terus mengalami peningkatan yang cukup besar.

Tabel 3.3 Perkembangan Pemakaian Energi Listrik Pelanggan

Tahun	Produksi Listrik PLN (MWh)	Penjualan/Pelanggan			
		Industri (MWh)	Rumah Tangga (MWh)	Komersial (MWh)	Umum (MWh)
1990/1991	425.146	87.257	136.486	37.525	43.716
1991/1992	463.672	96.155	154.886	45.316	43.653
1992/1993	511.255	106.528	175.068	50.967	44.702
1993/1994	568,357	117.069	197.780	60.340	46.626
1995	711.743	148.336	271.780	81.450	34.495
1996	788.124	167.693	293.264	99.611	60.924
1997	872.500	193.670	334.380	113.730	68.380
1998	870.770	173.990	376.420	144.560	72.940
1999	770.470	189.030	404.860	155.780	73.140
2000	985.343	204.079	427.888	169.216	76.231
2001	1.095.730	213.560	466.757	182.325	79.648

Sumber : Statistik Ketenagalistrikan dan Energi Tahun 2001

Dari tabel 3.3, konsumsi listrik terbesar masih didominasi oleh sektor industri dimana pada tahun 2001, mengkonsumsi sekitar 42,11 % dari total pemakaian energi listrik, kemudian sektor rumah tangga (39,44 %), komersial (13,4%) dan umum (4,96%) sebagaimana terlihat pada gambar 4.4 diatas.

3.2.2. Sub Sistem Pemodelan Produksi Listrik

Untuk memenuhi kebutuhan konsumsi energi listrik tersebut, maka PLN telah memproduksi energi listrik sebagaimana tabel 3.4 dibawah ini.

Tabel 3.4 Perkembangan Produksi dan Penjualan Listrik PLN

Tahun	Jumlah Penduduk	Produksi Listrik PLN (MWh)	Penjualan Tenaga Listrik (MWh)
-------	-----------------	----------------------------	--------------------------------

1990/1991	1.876.663	425.146	304.984
1991/1992	1.956.233	463.672	340.010
1992/1993	2.039.177	511.255	377.265
1993/1994	2.159.094	568,357	421.815
1995	2.251.501	711.743	536.061
1996	2.340.282	788.124	621.492
1997	2.441.017	872.500	710.160
1998	2.536.000	870.770	767.910
1999	2.644.200	770.470	822.810
2000	2.760.554	985.343	877.414
2001	2.882.141	1.095.730	942.290

Sumber : Statistik Ketenagalistrikan dan Energi Tahun 2001

Sampai dengan 2001 kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik wilayah Kalimantan Timur sebesar 254,47 MW yang terdiri atas kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik PLN sebesar 210,48 MW dan listrik swasta sebesar 43.95 MW dengan kapasitas produksi PLN sebesar 1.095.730 MWh.

Dalam memenuhi konsumsi tenaga listrik, selama ini PLN selain memproduksi sendiri melalui pembangkit-pembangkit yang ada juga melakukan pembelian dari hak swasta dan penyewaan hasil pembangkit.

Berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan, maka pembangkit tenaga listrik yang dimiliki oleh PLN dibedakan menjadi dua :

1. Pembangkit tenaga listrik berbahan bakar fosil yaitu digunakan untuk : PLTD, PLTU (M), PLTU (BB), PLTG (M), PLTG (G).
2. Pembangkit tenaga listrik berbahan bakar non fosil yaitu digunakan untuk : PLTA dan PLTP.

Tabel 3.5 Perkembangan Produksi Listrik PLN Berdasarkan Jenis Bahan Bakar yang digunakan.

Tahun	PLT non Fosil (MWh)	PLT Fosil (MWh)	Jumlah total (MWh)
1990/1991	46.766	378.380	425.146

1991/1992	51.004	412.668	463.672
1992/1993	56.238	455.017	511.255
1993/1994	62.519	505.838	568,357
1995	78.292	633.451	711.743
1996	86.694	701.430	788.124
1997	95.975	776.525	872.500
1998	95.777	774.923	870.700
1999	84.752	685.718	770.470
2000	108.388	876.955	985.343
2001	120.530	975.200	1.095.730

Sumber : Statistik Ketenagalistrikan dan Energi Tahun 2001

Dari tabel 3.5, produksi listrik yang dihasilkan oleh unit-unit pembangkit masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar fosil sebesar 85% dari total produksi, sedangkan pembangkit non fosil masih sekitar 15%. Fenomena ini menandakan bahwa bahan bakar fosil memiliki peranan yang sangat besar dalam memenuhi kebutuhan listrik konsumen.

Oleh karena itu memenuhi penyediaan/produksi listrik sangat ditentukan oleh kemampuan pembangkit dalam mensuplay kebutuhan energi listrik, maka ketersediaan bahan bakarpun sebagai sumber energi penggerak menjadi sangat penting. Selama ini bahan bakar fosil yang digunakan pada pembangkit tenaga listrik adalah :

a. Minyak bumi

Sampai saat ini bahan bakar minyak masih digunakan sebagai sumber daya energi utama pada sistem pembangkit tenaga listrik, terutama sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap, gas dan diesel.

Ketergantungan pada bahan bakar minyak untuk pembangkit listrik terutama disebabkan oleh struktur geografis Kalimantan Timur yang terdiri dari banyak sungai besar, sehingga lebih memungkinkan untuk mengembangkan PLTD.

Pembangkit listrik PLN yang digunakan bahan bakar minyak sebagai energi penggeraknya adalah PLTU, PLTD, PLTG, PLTGU. Kontribusinya untuk produksi listrik Kalimantan Timur pada tahun 2001 sebesar 28 %.

b. Gas

Potensi gas alam Kalimantan Timur sekitar 38,2 triliun CF dan terbukti sekitar 63,6 triliun CF. Jenis bahan bakar ini sebenarnya dapat berperan lebih besar, namun dibatasi oleh ketidakmampuan tersedianya gas alam. Pembangkit listrik PLN yang menggunakan bahan bakar gas alam sebagai energi penggerak adalah : PLTU, PLTG, PLTGU. Kontribusinya untuk energi listrik Kalimantan Timur pada tahun 2001 sebesar 25%.

c. Batubara

Dengan adanya kebijakan diversifikasi energi, maka bahan bakar ini semakin potensial untuk terus dikembangkan pemanfaatannya pada sektor tenaga listrik, apalagi batubara Kalimantan Timur memiliki kadar air yang cukup tinggi sehingga polusi yang dihasilkan akibat pembakaran masih dalam kelayakan lingkungan.

Pembangkit listrik PLN yang menggunakan bahan bakar batubara sebagai energi penggerak adalah PLTU. Kontribusinya untuk produksi listrik Kalimantan Timur pada tahun 2001 sebesar 36 %.

Dari ketiga jenis bahan bakar fosil tersebut diatas telah menghasilkan energi listrik sebesar 89 % dari produksi nasional, sedangkan sisanya 11 % dihasilkan oleh bahan bakar non fosil diantaranya PLTA.

3.2.3. Sub Sistem Pemodelan Batubara

Model pengolahan batubara di Kalimantan Timur dipengaruhi oleh beberapa kegiatan :

- 1) Kegiatan eksplorasi batubara akan mengurangi cadangan potensial dan menambah cadangan terbukti batubara. Produksi batubara akan mengurangi cadangan terbukti.
- 2) Besarnya produksi batubara sangat tergantung pada permintaan batubara untuk konsumsi ekspor (luar negeri) dan dalam negeri (sektor lain dan sektor listrik) serta ratio cadangan terbukti terhadap cadangan terbukti yang ditetapkan sebagai kebijakan pengelolaan batubara.

Pada pemodelan kebutuhan batubara, yang menjadi output akhir adalah seberapa besar kemampuan produksi batubara dalam kaitannya dengan kebutuhan pembangkit tenaga listrik.

Sedangkan parameter yang digunakan dalam pemodelan ini adalah :

1. Cadangan batubara

Sampai akhir tahun 2000 potensi sumber daya batubara di Kalimantan Timur adalah 12,4 milyar ton dimana 1,7 milyar ton diantaranya merupakan cadangan terukur (terbukti). Cadangan tersebut terdiri dari batubara lignit 58,6 %, sub-bituminous 14,4 % dan sisanya antrasit. Penambangan batubara di Indonesia dilakukan oleh PT. Bukit asam, Kontraktor, Perusahaan Otorita Tambang dan Unit-unit koperasi PT. BA dan Kontraktor memproduksi lebih dari 75 % dari produksi, yang diperkirakan akan lebih meningkat lagi pada tahun-tahun mendatang. Kemampuan memproduksi dan mengkonsumsi yang didukung oleh fasilitas transportasi merupakan mata rantai tidak terputuskan.

Data cadangan dari tahun 1982 sampai dengan tahun 2000 dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 3.6 Cadangan Batubara (x 1000 Ton)

Tahun	CADANGAN BATUBARA				
	Terukur	Terunjuk	Tereka	Hipotek	Total
1982	553.749	2.110.589		5.340.640	8.004.978
1985		2.218.560			
1986		2.218.560			
1987	644.762	2.246.466		5.089.560	7.980.788
1988		3.244.000			
1989		4.555.680			
1990		7.528.960			
1991		5.656.402			
1992	1.518.438	6.004.654		3.394.459	10.917.551
1993	1.531.878	4.089.600	1.945.486	4.030.139	11.597.103
1995	1.614.027	4.003.616	1.905.566	4.143.000	11.666.209
1996	1.720.513	3.844.416	1.904.410	4.143.000	11.612.339
2000		3.701.994	8.737.972		12.439.966

Sumber : Direktorat Batubara

2. Tingkat Produksi Batubara

Secara ideal besarnya produksi batubara sesuai dengan permintaan pasar batubara. Akan tetapi karena adanya kendala fisik berupa besarnya cadangan terbukti yang bisa diproduksi maka permintaan pasar dibatasi oleh tingkat produksi maksimal batubara yang diperbolehkan. Besarnya produksi maksimal batubara pemodelan ini ditetapkan untuk rasio cadangan/produksi adalah 20 tahun.

Tabel 3.7 Cadangan Terbukti, Produksi dan Rasio Cadangan Terbukti/Produksi

Tahun	Cadangan Terukur <1000 Ton>	Cadangan Terunjuk <1000 Ton>	Cadangan Tereka <1000 Ton>	Produksi Batubara	Rasio Cadangan Terbukti/Produksi <Tahun>
1982	553.749		2.110.589	189.156	2,927
1987	644.762		2.246.466	1.113.202	0,579
1992	1.518.438		6.004.654	7.398.549	0,205
1993	1.531.878	4.089.600	1.945.486	8.833.123	0,173
1995	1.614.027	4.003.616	1.905.566	14.029.310	0,115
1996	1.720.513	3.844.416	1.904.410	16.110.799	0,106

Sumber : Direktorat Batubara, 1997

Tabel diatas menunjukkan besarnya cadangan terbukti dan rasio cadangan terbukti/produksi.

3. Permintaan Batubara

Permintaan batubara laju konsumsi batubara dalam negeri dan ekspor sebagaimana data pada tabel dibawah ini. Laju konsumsi batubara dalam negeri tahun 1987 sampai dengan tahun 2000 besarnya sekitarnya 13 %.

Tabel 3.8 Produksi dan Konsumsi Batubara di Kalimantan Timur

Tahun	Produksi		Konsumsi	
	Dalam Negeri	Impor	Dalam Negeri	Ekspor
1983	648.309		231.584	563.598
1984	1.628.935		496.247	830.722
1985	2.071.474	699.048	751.715	1.017.762
1986	2.750.303	1.490.202	1.373.807	974.591
1987	3.478.756	1.281.609	2.201.091	994.168
1988	5.175.674	1.241.207	3.657.315	1.536.930
1989	9.478.106	884.350	5.278.431	2.692.309
1990	10.616.409	1.162.824	5.958.125	4.283.324
1991	13.931.664	969.244	5.990.827	6.658.623
1992	23.120.466	779.294	7.098.766	16.298.506
1993	27.603.510	1.237.605	7.903.295	18.232.264
1994	31.841.593	1.010.000	8.030.154	23.845.858
1995	43.841.593		9.206.306	31.318.783
1996	50.346.246		11.254.545	36.382.092
1997	60.000.000			
1998	71.000.000		32.000.000	39.000.000
1999	73.777.373		19.980.000	
2000	76.672.439		22.350.000	

Sumber : Direktorat Batubara

3.3. KONSEPTUALISASI SISTEM

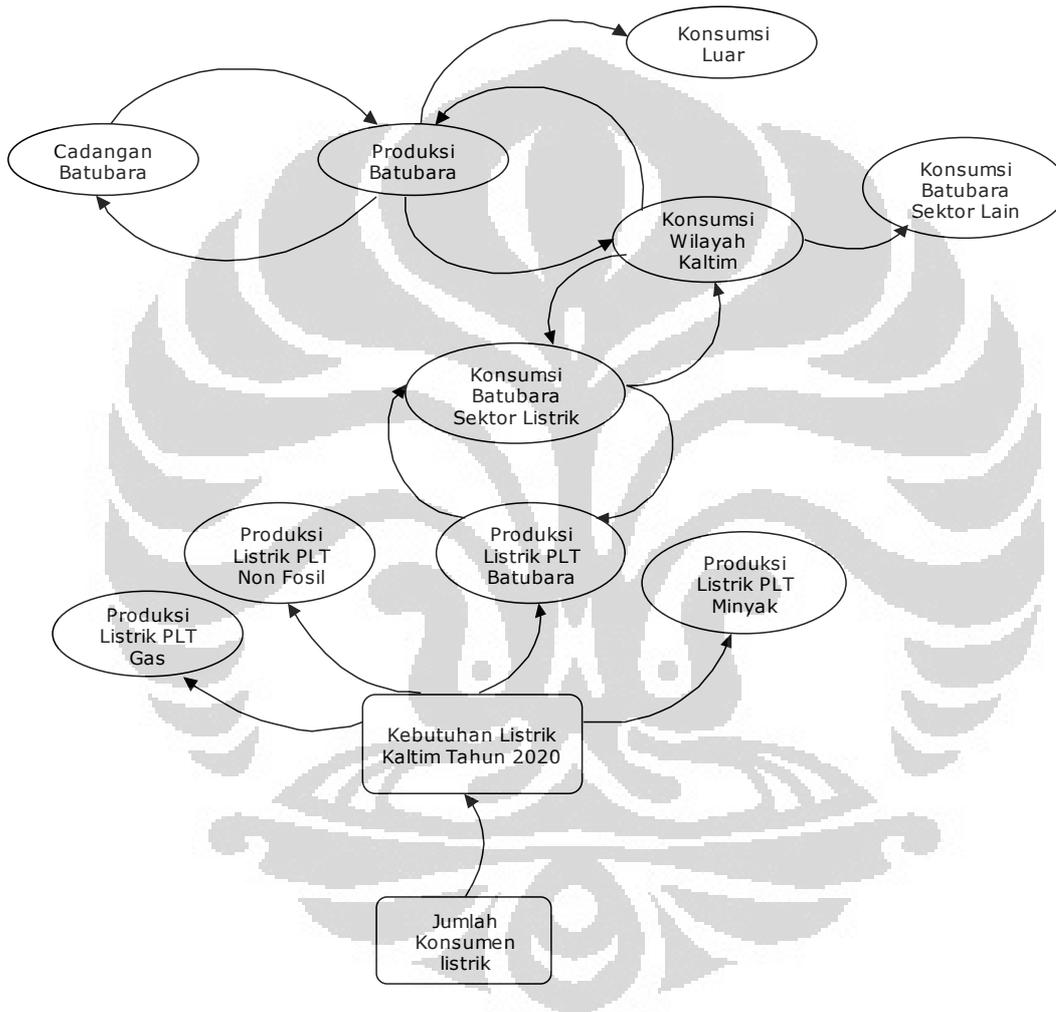
Berdasarkan konsep model yang telah dibuat, selanjutnya dibuat konseptualisasi sistem dalam bentuk diagram alir sebab akibat atau umpan-balik (*Causal Loop Diagram*), yang meliputi penentuan faktor – faktor penting atau variabel yang sangat berpengaruh dan diyakini dapat berperan dalam sebuah sistem. Sebelum itu dibuat diagram keterkaitan antar variabel yang sangat berpengaruh tersebut sebagai berikut :

V A R I A B E L	J M L H P E N D U D U K	L I S T R I K P K P I T A	K O N S U L I S T R I K	P R O D L I S T R I K	P L T B B	P L T M I N Y A K	P L T G A S	P L T N O N F O S I L	C A D B B	P R T U M B E K O N O M I	P R O D U K B B	K E B B B
Exogen: Jumlah/Pertumb. Penduduk	X	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X
Endogen: Listrik Per kapita	0	X	0	0	X	X	X	X	X	0	X	X
Endogen: Konsumsi Listrik	0	0	X	0	0	0	0	0	X	0	X	0
Exogen: Produksi Listrik	0	0	0	X	0	0	0	0	X	0	0	0
Exogen: a)PLT BB	X	X	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0
Exogen: b)PLT Minyak	X	X	0	0	0	X	0	0	X	X	X	X
Exogen: c) PLT Gas	X	X	0	0	0	0	X	0	X	X	X	X
Exogen: d)PLT N-Fosil	X	X	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X
Exogen: Cadangan BB	X	X	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0
Exogen: Prtum.Ekonomi	X	0	0	0	X	X	X	X	0	X	0	0
Endogen: Produksi BB	X	X	X	0	0	X	X	X	0	0	X	0
Endogen: Keb. BB	X	X	0	0	0	X	X	X	0	0	0	X
??: Konsumsi BB di luar Kaltim	X	X	X	X	0	X	X	X	0	X	0	0

Keterangan → x : Tidak ada hubungan 0 : Saling Berhubungan

Gambar 3.2. Diagram Keterkaitan Antar Variabel

Struktur umpan balik merupakan blok pembentuk model yang diungkapkan melalui lingkaran – lingkaran tertutup. Lingkaran umpan balik tersebut menyatakan hubungan sebab akibat variabel – variabel yang melingkar, sebagaimana pada gambar causal loop sistem kebutuhan batubara untuk pemenuhan tenaga listrik di bawah ini:



Gambar 3.3. Causal Loop Sistem Kebutuhan Batubara untuk Pemenuhan Tenaga Listrik

Dari gambar 3.3 di atas menjelaskan bahwa, hubungan antar variabel itu dimulai dari kebutuhan energi listrik sampai dengan tahun 2020 yang ditentukan oleh besarnya permintaan konsumen listrik di wilayah Kalimantan Timur. Kemudian kebutuhan energi listrik tersebut menentukan kapasitas energi listrik yang harus di produksi oleh setiap unit – unit pembangkit berdasarkan jenis energi primer pembangkitnya yaitu PLT

minyak, PLT batubara, PLT non fosil dan PLT gas. Sedangkan kemampuan unit – unit pembangkit dalam memproduksi energi listrik ditentukan oleh ketersediaan energi primer atau bahan bakar, baik fosil maupun non fosil.

Kemudian batubara merupakan salah satu bahan bakar fosil yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik pada PLT batubara, oleh karena itu konsumsi batubara untuk sector listrik tersebut berpengaruh terhadap konsumsi batubara di wilayah Kaltim. Sehingga ketersediaan batubara untuk sektor listrik memiliki keterkaitan dengan variabel lainnya seperti kemampuan memproduksi dan cadangan batubara yang tersedia.

3.4 Asumsi – Asumsi Terhadap Model

Dalam pemodelan pemanfaatan batubara untuk tenaga listrik ini, digunakan asumsi – asumsi guna mengurangi kerumitan seperti pada sistem nyatanya, namun masih memperhatikan keakuratan antara model dengan sistem nyatanya. Asumsi – asumsi yang dipakai adalah sebagai berikut :

- Pada pemodelan ini diarahkan pada kebutuhan batubara untuk tenaga listrik, sehingga konsumsi batubara untuk sektor lain tidak dijadikan fokus pembahasan
- Pada pemodelan ini, yang dijadikan arahan output adalah jumlah kebutuhan batubara untuk sektor listrik, sehingga tidak memasukkan faktor harga batubara dan listrik.

BAB IV

APLIKASI MODEL BATUBARA UNTUK LISTRIK DENGAN SIMULASI POWERSIM

4.1. Representasi Model

Sebelum melakukan simulasi, maka harus dibuat representasi model ke dalam bentuk Stock Flow Diagram (SFD), yang akan menunjukkan mekanisme kerja dari model secara keseluruhan. SFD merupakan diagram alir yang menjelaskan mengenai mekanisme kerja model ketika dioperasikan dalam bahasa Powersim (gambar SFD sebagaimana pada lampiran A)

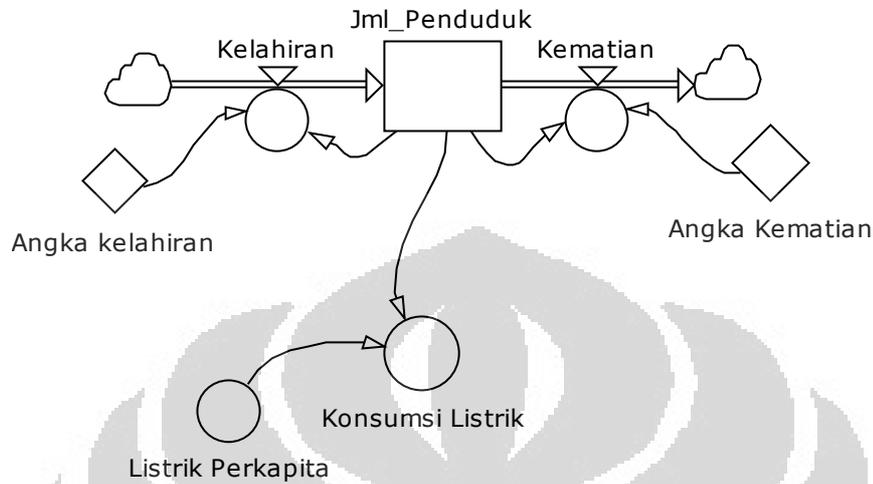
4.1.1. Formulasi Model

Langkah selanjutnya dalam pengembangan model system dinamik adalah mengkonversikan konstruksi logis yang ditunjukkan Stock Flow Diagram (SFD) ke dalam konstruksi matematis untuk kemudian dilakukan simulasi dengan computer. Dalam penelitian ini persamaan model system dinamis dikonversikan kedalam bahasa Powersim. Bahasa powersim adalah bahasa standart untuk menuliskan simulasi dinamika system, dimana dengan bahasa ini konversi dari konstruksi logis kedalam konstruksi matematis akan lebih mudah dipahami dan lebih sederhana.

A. Sub Sistem Kebutuhan Listrik

Pada umumnya perkiraan kebutuhan tenaga listrik dilakukan dengan memperhatikan kecenderungan-kecenderungan yang ada pada masa lalu, sebagai dasar untuk menganalisis besarnya energi listrik yang dibutuhkan, sehingga pada akhirnya akan dapat dibuat rencana yang menyeluruh dan terpadu dengan mempertimbangkan situasi dan kondisi pada masa yang akan datang. Dalam representasi model kebutuhan listrik, besarnya kebutuhan tersebut ditentukan oleh konsumen dengan indikator listrik perkapita.

Representasi model yang dibuat kedalam Stock Flow Diagram sebagaimana gambar di bawah ini :



Gambar 4.1. Model Sub Sistem Kebutuhan Listrik.

Persamaan powersim model di atas adalah sebagai berikut :

$$\text{Flow Jml_Penduduk} = dt * \text{Kelahiran} - dt * \text{kematian}$$

$$\text{Aux Kelahiran} = \text{Jml_Penduduk} * \text{Angka kelahiran}$$

$$\text{Aux kematian} = \text{Jml_Penduduk} * \text{Angka kematian}$$

$$\text{Aux Listrik Perkapita} =$$

$$\text{GRAPH}(\text{TIME}, 1991 \langle \langle @yr \rangle \rangle, 1 \langle \langle yr \rangle \rangle, \{0.157, 0.172, 0.189, 0.208, 0.26, 0.294, 0.321, 0.319, 0.344, 0.389 // \text{Min}:0.1; \text{Max}:1 // \})$$

$$\text{Aux Konsumsi Listrik} = \text{Jml_Penduduk} * \text{Listrik Perkapita}$$

Dari tabel 4.2 dan 4.3 diketahui jumlah penduduk Kalimantan Timur hingga pada tahun 2001 sebanyak 2.882.141 jiwa dengan laju pertumbuhan rata-rata 4,33 % pertahun serta besarnya produksi listrik oleh PLN mulai tahun 1990/1991 sampai dengan tahun 2001 sebesar 1.095.730 MWh. Sedangkan besarnya energi listrik yang terjual atau digunakan oleh konsumen sebesar 942.290 MWh, sehingga besarnya konsumsi listrik perkapita pada tahun 2001 sebesar 0,355 MWh. Dan untuk fungsi Graph pada persamaan model gambar 4.1 di atas adalah data listrik perkapita yang dimasukkan pada program Powersim dimulai pada tahun 1991, dengan penambahan

nilai berupa waktu setiap satu tahun. Dimana nilai minimal adalah nol dan nilai maksimalnya satu.

Berdasarkan data-data pada tabel 3.2 dilakukan simulasi terhadap model sebagaimana gambar 4.1 sehingga menghasilkan tabel di bawah ini :

Tabel 4.1. Hasil Simulasi Sub Sistem Kebutuhan Listrik

Time	Jml_Pendud	Konsumsi
Jan 01, 1991	1,876,663.00	294,636.09
Jan 01, 1992	1,951,541.85	335,665.20
Jan 01, 1993	2,029,408.37	383,558.18
Jan 01, 1994	2,110,381.77	438,959.41
Jan 01, 1995	2,194,586.00	570,592.36
Jan 01, 1996	2,282,149.98	625,309.09
Jan 01, 1997	2,373,207.77	666,871.38
Jan 01, 1998	2,467,898.76	718,158.54
Jan 01, 1999	2,566,367.92	795,574.05
Jan 01, 2000	2,668,766.00	904,711.67
Jan 01, 2001	2,775,249.76	985,213.66
Jan 01, 2002	2,885,982.22	1,024,523.69
Jan 01, 2003	3,001,132.92	1,065,402.18
Jan 01, 2004	3,120,878.12	1,107,911.73
Jan 01, 2005	3,245,401.16	1,152,117.41
Jan 01, 2006	3,374,892.66	1,198,086.89
Jan 01, 2007	3,509,550.88	1,245,890.56
Jan 01, 2008	3,649,581.96	1,295,601.60

Pada simulasi di atas, tahun dasar yang digunakan adalah tahun 1991 dengan jumlah penduduk pada saat itu sebesar 1.876.663 jiwa dengan angka kelahiran yang digunakan adalah nilai pertumbuhan penduduk 4,33 % dan angka kematian pada tahun dasar sebesar 0,34 %

Jml Penduduk = Penduduk + (DT) (Kelahiran-Kematian)

Penduduk = 1.876.663

Penduduk = Penduduk tahun awal simulasi (1991)

Angka Kelahiran = Laju kelahiran (orang/tahun)

Angka Kematian = Laju kematian (orang/tahun)

DT = Delta Time

Konsumsi Listrik = Jumlah Penduduk x Listrik Perkapita

Fraksi Konsumsi = Nilai konstanta(10,23 %), merupakan nilai prosentase

Jika dibandingkan hasil simulasi pada tabel 4.1 dan gambar 4.1 dengan data referensi pada table 4.4 dan gambar 4.5, memiliki nilai output yang sedikit berbeda. Perbedaan tersebut dapat dicari dengan menggunakan persamaan Absolut Mean Error (AME) :

$$(X_S - X_R) / X_R \times 100$$

X_S = Rata-rata simulasi

X_R = Rata-rata referensi

Dengan menggunakan persamaan tersebut, nilai penyimpangan untuk konsumsi listrik sebesar 0,2 %. Hal itu berarti model yang dirancang adalah sah, karena nilai penyimpangannya lebih kecil dari 10 % (mengenai penyimpangan ini akan dijelaskan pada bagian 4.2 Validasi Model).

B. Sub Sistem Produksi Listrik

Nilai fraksi produksi listrik diasumsikan konstan dengan mengambil nilai rata-rata pertumbuhan penyediaan/produksi listrik oleh PLN sepanjang tahun 1991 sampai dengan tahun 2000 sebesar 20,23 %. Produksi masing – masing pembangkit tenaga listrik, menurut jenis bahan bakarnya terdiri atas pembangkit bahan bakar gas, minyak, batubara dan non fosil yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

- PLT Gas = PLTG (G) + PLTU (G) + PLTGU (G)
- PLT Minyak = PLTU (M) + PLTD + PLTG (M) + PLTGU (M)
- PLT Batubara = PLT Batubara
- PLT Non Fosil = PLTA + PLTP

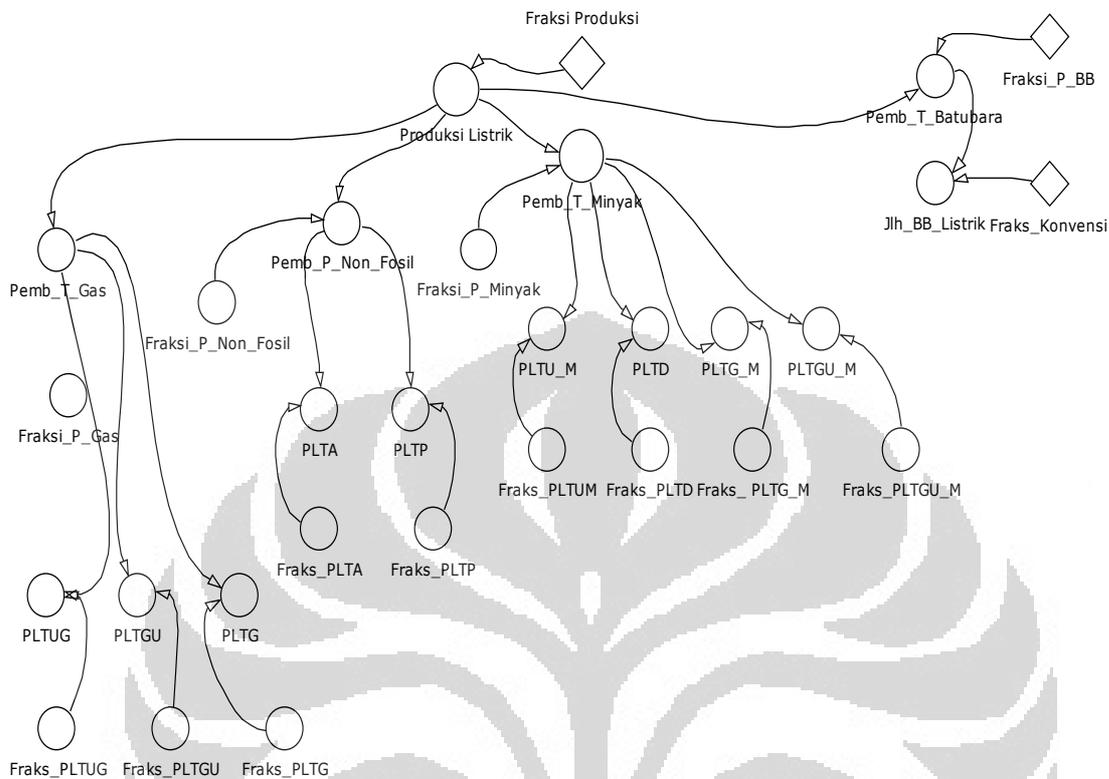
Keterangan :

Pada Pembangkit – pembangkit listrik di atas, energi primer berupa minyak dan gas dapat dijadikan bahan bakar PLTG, PLTU dan PLTGU. Pada PLTG bahan bakarnya bisa minyak maupun gas. Untuk bahan bakar gas, prinsip kerjanya gas bisa langsung dicampur dengan udara untuk dibakar, tapi jika menggunakan minyak harus dilakukan pengabutan dahulu pada burner baru dicampur udara dan dibakar. Sedangkan

udara tersebut pada mulanya dimasukkan dalam kompresor kemudian tekanan udara dinaikkan lalu dialirkan ke ruang bakar bersama bahan bakar. Pembakaran bahan bakar dan udara ini akan menghasilkan gas bersuhu dan bertekanan tinggi yang berenergi (enthalpy). Gas ini lalu disemprotkan ke turbin, hingga enthalpy gas diubah oleh turbin menjadi energi gerak yang memutar generator untuk menghasilkan listrik. Setelah melalui turbin, sisa gas panas tersebut dibuang melalui cerobong.

Pada PLTU bahan bakarnya dapat berupa minyak, gas dan batubara. PLTU menggunakan siklus uap dan air dalam pembangkitannya. Mula – mula air dipompakan ke dalam pipa air yang mengelilingi ruang bakar ketel. Lalu bahan bakar dan udara yang sudah tercampur disemprotkan ke dalam ruang bakar dan dinyalakan, sehingga terjadi pembakaran yang mengubah bahan bakar menjadi energi panas/kalor. Udara untuk pembakaran yang dihasilkan kipas tekan/force draft fan akan dipanasi dahulu oleh pemanas udara. Setelah itu, energi panas akan dialirkan ke dalam air pada pipa melalui proses radiasi, konduksi dan konveksi, sehingga air berubah menjadi uap bertekanan tinggi. Drum ketel akan berisi air pada bagian bawah dan uap pada bagian atasnya. Dari drum ketel, uap akan dialirkan menuju turbin uap setelah melalui pemanas lanjut. Uap dengan tekanan tinggi ini dialirkan ke dalam turbin tekanan menengah dan langsung dialirkan kembali ke turbin tekanan rendah. Energi gerak yang dihasilkan turbin tekanan tinggi, menengah dan rendah inilah yang akan diubah wujudnya dalam generator menjadi listrik.

Sedang pada PLTGU, merupakan kombinasi antara PLTG dan PLTU. Gas buang PLTG bersuhu tinggi akan dimanfaatkan kembali sebagai pemanas uap di ketel penghasil uap bertekanan tinggi. Ketel uap PLTU yang memanfaatkan gas buang PLTG dikenal dengan sebutan Heat Recovery Steam Generator (HRSG). Secara umum HRSG ini adalah pengganti boiler pada PLTU, yang bekerja untuk menghasilkan uap. Setelah uap dalam ketel cukup banyak, uap tersebut akan dialirkan ke turbin uap dan memutar generator untuk menghasilkan daya listrik. Umumnya 1 blok PLTGU terdiri dari 3 unit HRSG dan 1 unit PLTU. Daya listrik yang dihasilkan unit PLTU sebesar 50% dari daya unit PLTG, karena daya turbin uap unit PLTU tergantung dari banyaknya gas buang unit PLTG. Dalam pengoperasian PLTGU, daya PLTG yang diatur dan daya PLTU akan mengikuti saja.



Gambar 4.2. Model Sub Sistem Kebutuhan Listrik

Persamaan Powersim Model di atas adalah sebagai berikut :

$$Produksi_Listrik = ('Fraksi\ Produksi' * 'Konsumsi\ Listrik') + 'Konsumsi\ Listrik'$$

$$PLT_Gas = Fraksi_P_Gas * 'Produksi\ Listrik'$$

$$PLT_Non_Fosil = Fraksi_P_Non_Fosil * 'Produksi\ Listrik'$$

$$PLT_Minyak = Fraksi_P_Minyak * 'Produksi\ Listrik'$$

$$PLT_Batubara = Fraksi_P_BB * 'Produksi\ Listrik'$$

$$Jml_BB_Listrik = Fraks_Konvensi * Pemb_T_Batubara$$

$$PLTUG = Fraks_PLTUG * Pemb_T_Gas$$

$$PLTGU = Fraks_PLTUG * Pemb_T_Gas$$

$$PLTG = Fraks_PLTG * Pemb_T_Gas$$

$$PLTA = Fraks_PLTA * Pemb_P_Non_Fosil$$

$$PLTP = Fraks_PLTP * Pemb_P_Non_Fosil$$

$$PLTU_M = Fraks_PLTUM * Pemb_T_Minyak$$

$$PLTD = Fraks_PLTD * Pemb_T_Minyak$$

$$PLTG_M = 'Fraks_PLTG_M' * Pemb_T_Minyak$$

$PLTGU_M = Fraks_PLTGU_M * Pemb_T_Minyak$

$Fraksi_P_Gas =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.0285, 0.0277, 0.0263, 0.1051, 0.3751, 0.4545, 0.373, 0.3458, 0.3475, 0.3042 // Min: 0; Max: 1 // \})$

$Fraksi_P_Non_Fosil =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.1999, 0.2019, 0.2414, 0.1968, 0.1685, 0.1057, 0.1062, 0.1648, 0.1512, 0.1408 // Min: 0; Max: 1 // \})$

$Fraksi_P_Minyak =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.4508, 0.4638, 0.4689, 0.4596, 0.2075, 0.1775, 0.2355, 0.1878, 0.1843, 0.2103 // Min: 0; Max: 1 // \})$

$Fraksi_PLTUG =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.2423, 0.1717, 0.1088, 0.0554, 0.2178, 0.1751, 0.1467, 0.1506, 0.1506, 0.1416 // Min: 0.04; Max: 0.5 // \})$

$Fraksi_PLTGU =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0, 0, 0.1685, 0.8716, 0.7444, 0.7795, 0.8328, 0.8368, 0.8476, 0.8559 // Min: 0; Max: 1 // \})$

$Fraksi_PLTG =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.7577, 0.8283, 0.7227, 0.073, 0.0377, 0.0453, 0.0205, 0.0126, 0.0018, 0.0024 // Min: 0.001; Max: 1 // \})$

$Fraksi_PLTA =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.8345, 0.8628, 0.8902, 0.8782, 0.7728, 0.6515, 0.662, 0.7867, 0.7745, 0.7747 // Min: 0; Max: 1 // \})$

$Fraksi_PLTP =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.1655, 0.1372, 0.1098, 0.1218, 0.2272, 0.3485, 0.338, 0.2133, 0.2255, 0.2253 // Min: 0; Max: 0.5 // \})$

$Fraksi_BB =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.0803, 0.125, 0.129, 0.151, 0.177, 0.192, 0.195, 0.198, 0.197, 0.199 // Min: 0.1; Max: 1 // \})$

$Fraksi_PLTUM =$

$GRAPH(TIME, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.67, 0.69, 0.62, 0.51, 0.3, 0.33, 0.34, 0.3, 0.3, 0.34 // Min: 0; Max: 1 // \})$

Fraksi_PLTD =

GRAPH(TIME,1991<<@yr>>,1<<yr>>,{0.2353,0.2141,0.2085,0.2073,0.4108,0.4789,0.3721,0.3796,0.3611,0.3228//Min:0;Max:1//})

Fraksi_PLTG_M =

GRAPH(TIME,1991<<@yr>>,1<<yr>>,{0.094,0.1007,0.0912,0.0586,0.0548,0.0764,0.0674,0.0767,0.102,0.0678//Min:0.05;Max:0.203//})

Fraksi_PLTGU_M =

GRAPH(TIME,1991<<@yr>>,1<<yr>>,{0,0,0.0831,0.2232,0.2298,0.1117,0.2231,0.2433,0.2355,0.2647//Min:0;Max:0,5//})

Berdasarkan data-data pada tabel 3.3 dilakukan simulasi terhadap model sebagaimana gambar 4.2 sehingga menghasilkan tabel di bawah ini :

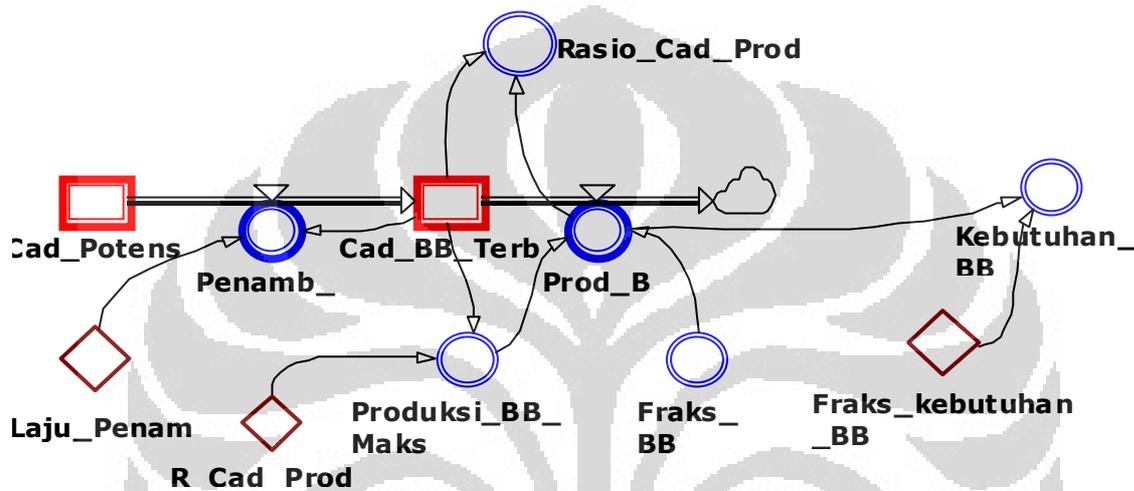
Tabel 4.2. Hasil Simulasi Sub Sistem Produksi Listrik

Time	Produksi
Jan 01, 1991	354,240.97
Jan 01, 1992	403,570.27
Jan 01, 1993	461,152.00
Jan 01, 1994	527,760.90
Jan 01, 1995	686,023.19
Jan 01, 1996	751,809.12
Jan 01, 1997	801,779.46
Jan 01, 1998	863,442.01
Jan 01, 1999	956,518.69
Jan 01, 2000	1,087,734.84
Jan 01, 2001	1,184,522.39
Jan 01, 2002	1,231,784.83
Jan 01, 2003	1,280,933.05
Jan 01, 2004	1,332,042.28
Jan 01, 2005	1,385,190.76
Jan 01, 2006	1,440,459.87
Jan 01, 2007	1,497,934.22
Jan 01, 2008	1,557,701.80

C. Sub Sistem Batubara

Perubahan cadangan potensi batubara terjadi jika dilakukan eksplorasi batubara, sehingga akan menambah cadangan terbukti batubara. Dalam representasi model batubara, besarnya kebutuhan sangat tergantung dari permintaan konsumen khususnya untuk bahan bakar disektor tenaga listrik.

Representasi model yang dirancang kedalam Stock Flow Diagram sebagaimana gambar di bawah ini :



Gambar 4.3. Model Sub Sistem Batubara

Persamaan Powersim model di atas adalah sebagai berikut :

$$Produksi_BB = Fraks_BB * Produksi_BB_Maks$$

$$Kebutuhan_BB = Prod_BB * Fraks_kebutuhan_BB$$

$$Produksi_BB_Maks = Cad_BB_Terbukti / R_Cad_Produksi$$

$$Penambangan_BB = Cad_BB_Terbukti * Laju_Penamb$$

$$Rasio_Cadangan_Terbukti = Cad_BB_Terbukti / Prod_BB$$

$$Fraksi_BB =$$

GRAPH(TIME,1991<<@yr>>,1<<yr>>,{0.0803,0.125,0.129,0.151,0.177,0.192,0.195,0.198,0.197,0.199//Min:0.1;Max:1//})

Berdasarkan data – data pada table 3.6 dan 3.8 dilakukan simulasi terhadap model sebagaimana gambar 5.3 sehingga menghasilkan table di bawah ini :

Tabel 4.3. Hasil Simulasi Sub Sistem Batubara

Time	Cad_BB_Terbukti	Kebutuhan_BB	Prod_BB
Jan 01,	1,831,211,000	2,940,924.	2,940,924.
Jan 01,	2,084,639,615	5,211,599.	5,211,599.
Jan 01,	2,371,277,562	6,117,896.	6,117,896.
Jan 01,	2,697,138,524	8,145,358.	8,145,358.
Jan 01,	3,066,592,559	10,855,737.	10,855,737.
Jan 01,	3,485,059,780	13,382,629.	13,382,629.
Jan 01,	3,959,585,520	15,442,383.	15,442,383.
Jan 01,	4,498,485,109	17,814,001.	17,814,001.
Jan 01,	5,110,459,024	20,135,208.	20,135,208.
Jan 01,	5,805,788,078	23,107,036.	23,107,036.
Jan 01,	6,595,491,373	26,250,055.	26,250,055.
Jan 01,	7,492,610,109	29,820,588.	29,820,588.
Jan 01,	8,511,754,937	33,876,784.	33,876,784.

Tahun dasar yang digunakan pada simulasi ini adalah tahun 1991 dengan cadangan potensial 12,4 Milyar ton dengan rasio cadangan produksi diasumsikan 50 tahun.

Penambangan batubara = Cadangan potensial x laju penemuan

Cadangan Potensial = 12,4 Milyar ton

Produksi batubara max = Cad. terbukti/Rasio cad. terbukti (ton/thn)

Rasio Cadangan produksi = 50 tahun

Jika dibandingkan hasil simulasi pada tabel 4.3 dengan data referensi pada tabel 3.6 dan 3.8 terjadi perbedaan pada nilai output produksi batubara, dimana dengan menggunakan persamaan Absolut Mean Error (AME), nilai penyimpangannya sebesar 3,04 %, namun dengan penyimpangan tersebut model sub sistem batubara masih tetap dapat digunakan sebagai model yang sah.

4.1.2. Simulasi Model

Dengan justifikasi nilai penyimpangan yang relative kecil pada dua sub sistem pemodelan di atas, maka dilakukan simulasi sistem dinamik. Ada dua simulasi yang dilakukan, yaitu :

- Basic Run, merupakan simulasi dengan berdasarkan pada data – data asli selama periode data.
- Trial Run, merupakan simulasi yang dilakukan dimana telah dilakukan interfensi pada model.

A. Perkiraan Konsumsi dan Produksi Listrik

Dengan asumsi pertumbuhan ekonomi Kalimantan Timur selama periode 2003 – 2010 diperkirakan akan tumbuh rata – rata 4,5 % - 5 % pertahun dan pertumbuhan penduduk selama periode tersebut sebesar 4,33 % pertahun (sebagaimana rencana penyediaan listrik PLN Kaltim) dan tingkat kematian konstan, maka dengan simulasi sebagaimana gambar 4.1 dan 4.2 di atas besarnya konsumsi dan produksi listrik adalah :

Tabel 4.4. Hasil Simulasi Konsumsi dan Produksi Listrik

Time	Konsumsi Listrik	Produksi Listrik
Jan 01, 2000	904,711.67	1,087,734.84
Jan 01, 2001	985,213.66	1,184,522.39
Jan 01, 2002	1,024,523.69	1,231,784.83
Jan 01, 2003	1,065,402.18	1,280,933.05
Jan 01, 2004	1,107,911.73	1,332,042.28
Jan 01, 2005	1,152,117.41	1,385,190.76
Jan 01, 2006	1,198,086.89	1,440,459.87
Jan 01, 2007	1,245,890.56	1,497,934.22
Jan 01, 2008	1,295,601.60	1,557,701.80
Jan 01, 2009	1,347,296.10	1,619,854.10
Jan 01, 2010	1,401,053.21	1,684,486.28
Jan 01, 2011	1,456,955.24	1,751,697.28
Jan 01, 2012	1,515,087.75	1,821,590.00
Jan 01, 2013	1,575,539.75	1,894,271.44
Jan 01, 2014	1,638,403.79	1,969,852.87
Jan 01, 2015	1,703,776.10	2,048,450.00
Jan 01, 2016	1,771,756.77	2,130,183.16
Jan 01, 2017	1,842,449.86	2,215,177.47
Jan 01, 2018	1,915,963.61	2,303,563.05
Jan 01, 2019	1,992,410.56	2,395,475.21
Jan 01, 2020	2,071,907.74	2,491,054.67

Non-commercial use only!

Berdasarkan hasil simulasi di atas, maka selama periode tahun 2000 – 2010 konsumsi listrik diperkirakan akan mengalami pertumbuhan rata – rata sebesar 6,43 % pertahun atau terjadi peningkatan dari 904.711,67 MWh pada tahun 2000 menjadi 1.401.053,21 MWh pada tahun 2010 atau meningkat sebesar 64,57 %, sedangkan selama periode tahun 2010 – 2020 konsumsi listrik mengalami peningkatan sebesar 67,62 % yang diakibatkan oleh meningkatnya listrik perkapita pada periode tersebut.

Jika dilihat dari komponen konsumsi energi listrik dan dengan mengacu pada pertumbuhan pemakaian energi listrik pada table 3.3, maka pola konsumsi energi listrik tidak banyak mengalami perubahan dan masih didominasi oleh sektor industri, kemudian rumah tangga, komersial dan umum.

Kemudian untuk memenuhi kebutuhan konsumsi listrik, maka dioperasikan pembangkit – pembangkit listrik, baik yang berbahan bakar fosil (batubara minyak dan gas) maupun yang berbahan bakar non fosil (air dan PLTP Geothermal) dan menghasilkan :

Tabel 4.5. Hasil Simulasi Produksi Listrik per Jenis Pembangkit

Time	Pemb_T_Batubara	Pemb_T_Minyal	Pemb_T_Gas	Pemb_P_Non_Fo
Jan 01, 2000	374,942.20	228,750.64	330,888.94	153,153.07
Jan 01, 2001	408,304.87	249,105.06	360,331.71	166,780.75
Jan 01, 2002	424,596.23	259,044.35	374,708.95	173,435.30
Jan 01, 2003	441,537.62	269,380.22	389,659.83	180,355.37
Jan 01, 2004	459,154.97	280,128.49	405,207.26	187,551.55
Jan 01, 2005	477,475.26	291,305.62	421,375.03	195,034.86
Jan 01, 2006	496,526.52	302,928.71	438,187.89	202,816.75
Jan 01, 2007	516,337.93	315,015.57	455,671.59	210,909.14
Jan 01, 2008	536,939.81	327,584.69	473,852.89	219,324.41
Jan 01, 2009	558,363.71	340,655.32	492,759.62	228,075.46
Jan 01, 2010	580,642.42	354,247.46	512,420.73	237,175.67
Jan 01, 2011	603,810.05	368,381.94	532,866.31	246,638.98
Jan 01, 2012	627,902.07	383,080.38	554,127.68	256,479.87
Jan 01, 2013	652,955.37	398,365.28	576,237.37	266,713.42
Jan 01, 2014	679,008.29	414,260.06	599,229.24	277,355.28
Jan 01, 2015	706,100.72	430,789.04	623,138.49	288,421.76
Jan 01, 2016	734,274.13	447,977.52	648,001.72	299,929.79
Jan 01, 2017	763,571.67	465,851.82	673,856.99	311,896.99
Jan 01, 2018	794,038.18	484,439.31	700,743.88	324,341.68
Jan 01, 2019	825,720.31	503,768.44	728,703.56	337,282.91
Jan 01, 2020	858,666.55	523,868.80	757,778.83	350,740.50

Non-commercial use only

Pada tabel 4.5 di atas, menunjukkan bahwa kontribusi pembangkit listrik berbahan bakar batubara sebesar 36,47 %, gas sebesar 28,42 %, minyak sebesar 25,03 %, dan non fosil 10,08 % dari total produksi tenaga listrik selama periode 2000 – 2020.

Produksi masing – masing pembangkit tenaga listrik, menurut jenis bahan bakarnya terdiri atas pembangkit bahan bakar gas, minyak, batubara dan non fosil yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

- PLT Gas = PLTG (G) + PLTU (G) + PLTGU (G)
- PLT Minyak = PLTU (M) + PLTD + PLTG (M) + PLTGU (M)
- PLT Batubara = PLTU (BB)
- PLT Non Fosil = PLTA + PLTP

Sedangkan besarnya nilai fraksi dan setiap jenis bahan bakar maupun jenis pembangkit merupakan suatu nilai prosentase. Sebagai contoh pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar minyak :

$$\% \text{ PLTD} = \frac{\text{PLTD}}{\text{PLT (M)}} \times 100 \%$$

Berdasarkan klasifikasi tersebut dan setelah dilakukan simulasi per jenis bahan bakar dihasilkan :

a. PLT Gas

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar gas yang terdiri atas PLTU, PLTG, dan PLTGU :

Tabel 4.6. Hasil Simulasi Produksi Listrik Pembangkit Tenaga Gas

Time	Pemb_T_Gas
Jan 01, 2000	330,888.94
Jan 01, 2001	360,331.71
Jan 01, 2002	374,708.95
Jan 01, 2003	389,659.83
Jan 01, 2004	405,207.26
Jan 01, 2005	421,375.03
Jan 01, 2006	438,187.89
Jan 01, 2007	455,671.59
Jan 01, 2008	473,852.89
Jan 01, 2009	492,759.62
Jan 01, 2010	512,420.73
Jan 01, 2011	532,866.21

Non-commercial use only

b. PLT Minyak

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar minyak yang terdiri atas PLTU, PLTD, PLTG, dan PLTGU :

Tabel 4.7. Hasil Simulasi Produksi Listrik Pembangkit Tenaga Minyak

Time	Pemb_T_Minyak
Jan 01, 2000	228,750.64
Jan 01, 2001	249,105.06
Jan 01, 2002	259,044.35
Jan 01, 2003	269,380.22
Jan 01, 2004	280,128.49
Jan 01, 2005	291,305.62
Jan 01, 2006	302,928.71
Jan 01, 2007	315,015.57
Jan 01, 2008	327,584.69
Jan 01, 2009	340,655.32
Jan 01, 2010	354,247.46
Jan 01, 2011	368,381.94

Non-commercial use only!

c. PLT Batubara

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar batubara yang terdiri atas PLTU :

Tabel 4.8. Hasil Simulasi Produksi Listrik Pembangkit Tenaga Batubara

Time	Pemb_T_Batubara
Jan 01, 2000	374,942.20
Jan 01, 2001	408,304.87
Jan 01, 2002	424,596.23
Jan 01, 2003	441,537.62
Jan 01, 2004	459,154.97
Jan 01, 2005	477,475.26
Jan 01, 2006	496,526.52
Jan 01, 2007	516,337.93
Jan 01, 2008	536,939.81
Jan 01, 2009	558,363.71
Jan 01, 2010	580,642.42
Jan 01, 2011	603,810.05
Jan 01, 2012	627,902.07

Non-commercial use only!

d. PLT Non Fosil

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar non fosil yang terdiri atas PLTA dan PLTP

Tabel 4.9. Hasil Simulasi Produksi Listrik Pembangkit Tenaga Non Fosil

Time	Pemb_P_Non_Fosil
Jan 01, 2000	153,153.07
Jan 01, 2001	166,780.75
Jan 01, 2002	173,435.30
Jan 01, 2003	180,355.37
Jan 01, 2004	187,551.55
Jan 01, 2005	195,034.86
Jan 01, 2006	202,816.75
Jan 01, 2007	210,909.14
Jan 01, 2008	219,324.41
Jan 01, 2009	228,075.46
Jan 01, 2010	237,175.67
Jan 01, 2011	246,638.98
Jan 01, 2012	256,479.87
Jan 01, 2013	266,712.42

B. Perkiraan Produksi Batubara

Sedangkan produksi batubara selama periode 2000 – 2020 dihitung berdasarkan model yang telah dibuat sebagaimana gambar 5.3 :

Tabel 4.10. Hasil Simulasi Produksi Batubara

(ton/yr)

Time	Prod_BB	Kebutuhan_BB
Jan 01, 1991	2,368,922.27	1,895,137.82
Jan 01, 1992	3,829,194.69	3,063,355.76
Jan 01, 1993	4,099,918.76	3,279,935.01
Jan 01, 1994	4,978,713.14	3,982,970.52
Jan 01, 1995	6,051,789.37	4,841,431.49
Jan 01, 1996	6,804,000.12	5,443,200.09
Jan 01, 1997	7,160,189.52	5,728,151.62
Jan 01, 1998	7,532,805.78	6,026,244.63
Jan 01, 1999	7,764,872.51	6,211,898.01
Jan 01, 2000	8,126,547.66	6,501,238.13
Jan 01, 2001	8,419,265.90	6,735,412.72
Jan 01, 2002	8,722,527.86	6,978,022.29
Jan 01, 2003	9,036,713.31	7,229,370.65
Jan 01, 2004	9,362,215.73	7,489,772.58
Jan 01, 2005	9,699,442.74	7,759,554.19

4.2. Validasi Model

Keserupaan model dengan system nyata ditunjukkan dengan sejauhmana data simulasi dapat menirukan data statistic dan informasi actual. Oleh karena itu dilakukan validasi terhadap model yang telah dibangun, yang dapat dilakukan antara lain dengan metode uji validitas kinerja/ output model.

Validitas kinerja bertujuan untuk memperoleh keyakinan sejauh mana kinerja model sesuai (compatible) dengan kinerja system nyata, sehingga memenuhi syarat sebagai model ilmiah yang taat fakta. Validasi ini dilakukan dengan cara membandingkan data empiris dengan hasil simulasi, untuk melihat sejauhmana perilaku output model sesuai dengan perilaku data empirik.

Untu uji tersebut digunakan AME (Absolute Means Error) yang mengukur penyimpangan antara nilai rata – rata simulasi terhadap data actual. Batas penyimpangan yang dapat diterima adalah antara 5 – 10 %.

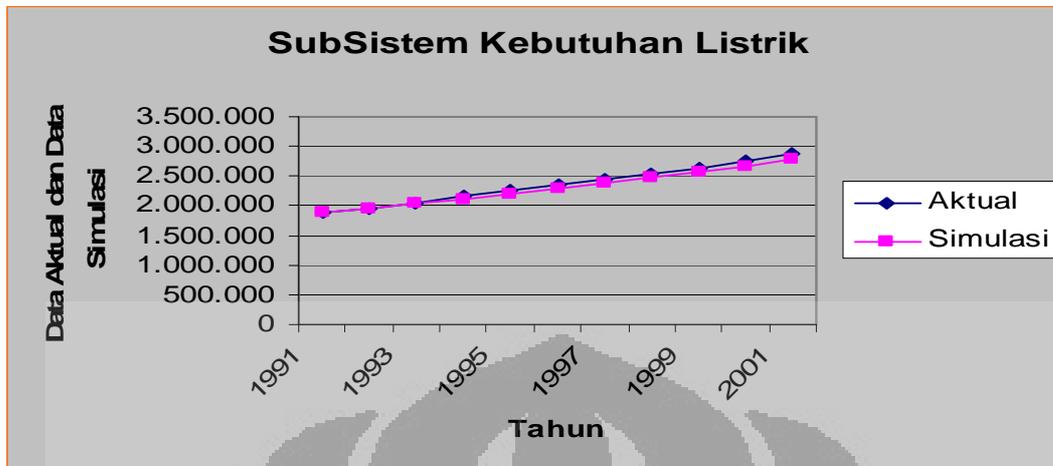
$$(\bar{X}_S - \bar{X}_R) / \bar{X}_R \times 100 \dots\dots\dots(4.1)$$

\bar{X}_S = Rata – rata simulasi

\bar{X}_R = Rata – rata referensi

Berdasarkan hal tersebut, maka baik struktur model kebutuhan listrik, produksi listrik, maupun struktur model batubara telah diuji penyimpangannya yang masing – masing dibawah 10 %, sehingga dapat digunakan sebagai model yang valid.

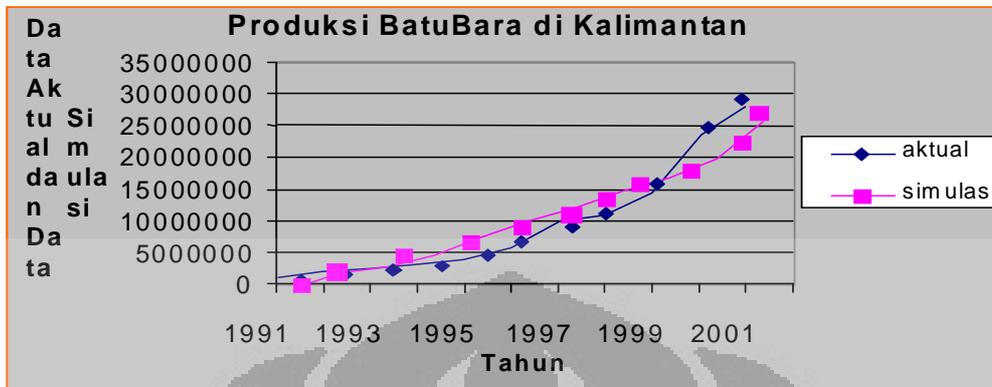
Berikut ini adalah grafik perbandingan antara data aktual dengan hasil simulasi :



Gambar 4.4. Validasi Sub Sistem Kebutuhan Listrik



Gambar 4.5. Validasi Sub Sistem Produksi Listrik



Gambar 4.6. Validasi Sub Sistem Batubara

4.3. Analisa Perilaku Model

Dari hasil simulasi tersebut di atas, menunjukkan bahwa semua jenis pembangkit mengalami peningkatan jumlah produksi setiap tahun, sehingga mengakibatkan peningkatan pada konsumsi batubara untuk pembangkit tenaga listrik.

Kenaikan rata – rata produksi pada setiap jenis pembangkit sebesar 6,1 % pertahun dari total produksi masing – masing jenis pembangkit, yang mana dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Pembangkit tenaga listrik berbahan bakar gas kenaikannya rata – rata 17.601 MWh (periode tahun 2000 – 2010) dan 23.955 MWh (periode 2011 – 2020).
- Pembangkit tenaga listrik berbahan bakar minyak kenaikannya rata – rata 12.022 MWh (periode tahun 2000 – 2010) dan 14.698 MWh (periode 2011 – 2020).
- Pembangkit tenaga listrik berbahan bakar batubara kenaikannya rata – rata 19.551 MWh (periode tahun 2000 – 2010) dan 23.610 MWh (periode 2011 – 2020).
- Pembangkit tenaga listrik berbahan bakar non fosil kenaikannya rata – rata 6.155 MWh (periode tahun 2000 – 2010) dan 9.067 MWh (periode 2011 – 2020).

Sedangkan untuk produksi dan konsumsi batubara berdasarkan hasil simulasi memiliki laju peningkatan sebesar 3,6 % pertahun, yang semuanya dipengaruhi oleh

permintaan batubara dari sektor tenaga listrik (dalam model simulasi ini kebutuhan batubara untuk ekspor dan sektor lainnya tidak diperhitungkan).

Besarnya laju kebutuhan batubara pada sektor tenaga listrik rata – rata 6,11 % pertahun atau 1.158.751 ton pertahun, dimana untuk periode 2000 – 2010 rata – rata sebesar 905.511 ton (5,47 %) dan 1.527.316 ton (6,8 %) untuk periode 2011 – 2020.

Dengan hasil dari simulasi tersebut menunjukkan bahwa setiap variabel memiliki perilaku yang sama, bahwa akan terjadi kenaikan atau peningkatan produksi, konsumsi dan kebutuhan pada satu variabel jika variabel lainnya mengalami kenaikan atau peningkatan.

4.3.1 Unique Solution

Pada model dengan sub sistem kebutuhan listrik, sub sistem produksi listrik dan sub sistem batubara pada pembahasan sebelumnya, mendapatkan bebabagai macam persamaan sebagaimana tersebut di atas. Persamaan – persamaan yang dihasilkan oleh program Powersim tersebut pada hakikatnya bisa disederhanakan dengan melakukan substitusi satu sama lain sehingga jumlah persamaan menjadi jauh lebih sedikit. Dalam model di atas jumlah persamaan dapat disederhanakan menjadi empat persamaan saja yaitu sama dengan jumlah variabel endogen. Dengan demikian unique solution akan didapatkan (lihat Pamungkas, 1991). Penyederhanaan lewat substitusi tersebut akan didapatkan persamaan simultan sebagai berikut :

$$X1 = F (X1, X2, X3, X4 , P1, P2, P3, P4, E) \quad (4.2)$$

$$X2 = F (X1, X2, X3, X4 , P1, P2, P3, P4, E) \quad (4.3)$$

$$X3 = F (X1, X2, X3, X4 , P1, P2, P3, P4, E) \quad (4.4)$$

$$X4 = F (X1, X2, X3, X4 , P1, P2, P3, P4, E) \quad (4.5)$$

Dimana X1, X2, X3, X4, X5 adalah variabel endogen, yaitu :

$X1 = \text{Aux. Konsumsi listrik}$

$X2 = \text{Aux. Produksi listrik batubara}$

$X3 = \text{Aux. Konsumsi batubara untuk listrik}$

$X4 = \text{Aux. Produksi batubara}$

Sedangkan P1, P2, P3, P4 merupakan variabel kebijakan (policy variable) yang merupakan variable eksogen, yaitu :

$P1 = \text{Jumlah/pertumbuhan penduduk}$

$P2 = \text{Pertumbuhan ekonomi}$

$P3 = \text{Produksi Listrik Pembangkit gas, minyak, non fosil}$

$P4 = \text{Cadangan batubara}$

$E = \text{Konsumsi batubara luar Kaltim}$

Variabel E di atas adalah variabel eksogen yang merupakan kondisi eksternal yang tidak bisa dikendalikan.

Adapun hasil dari substitusi berbagai persamaan – persamaan model pada pembahasan sebelumnya, sehingga menjadi empat persamaan yang sama dengan jumlah variabel endogen, dapat di tulis sebagai berikut :

1. $\text{Aux Konsumsi Listrik} = \{ dt * \text{Kelahiran} - dt * \text{kematian} \} * \text{Aux Listrik Perkapita}$

Dimana :

$dt * \text{Kelahiran} - dt * \text{kematian} = \text{Flow Jml_Penduduk}$

$\text{Aux Kelahiran} = \text{Jml_Penduduk} * \text{Angka kelahiran}$

$\text{Aux kematian} = \text{Jml_Penduduk} * \text{Angka kematian}$

$\text{Aux Listrik Perkapita} =$

$\text{GRAPH}(\text{TIME}, 1991 \langle \langle @\text{yr} \rangle \rangle, 1 \langle \langle \text{yr} \rangle \rangle, \{0.157, 0.172, 0.189, 0.208, 0.26, 0.294, 0.321, 0.319, 0.344, 0.389\} // \text{Min}: 0.1; \text{Max}: 1 // \}$

Maka :

$\text{Aux Konsumsi Listrik} = \text{Flow Jml_Penduduk} * \text{Aux Listrik_Perkapita}$

$$2. \text{Jml_BB_Listrik} = \text{Fraksi_Konversi} * \{ \text{Fraksi_P_BB} * [(\text{Fraksi_Produksi} * \text{Flow Jml_Penduduk} * \text{Aux Listrik_Perkapita})] + (\text{Flow Jml_Penduduk} * \text{Aux Listrik_Perkapita}) \}$$

Dimana :

$$\text{Aux Konsumsi Listrik} = \text{Flow Jml_Penduduk} * \text{Aux Listrik_Perkapita}$$

$$(\text{Fraksi_Produksi} * \text{Aux Konsumsi Listrik}) + \text{Konsumsi Listrik} = \text{Produksi Listrik}$$

$$\text{Fraksi_P_BB} * \text{Produksi Listrik} = \text{Pemb_T_Batubara}$$

Maka :

$$\text{Jml_BB_Listrik} = \text{Fraksi_Konversi} * \{ \text{Fraksi_P_BB} * (\text{Fraksi_Produksi} * \text{Aux Konsumsi Listrik}) + \text{Aux Konsumsi Listrik} \}$$

$$\text{Jml_BB_Listrik} = \text{Fraksi_Konversi} * (\text{Fraksi_P_BB} * \text{Produksi Listrik})$$

$$\text{Jml_BB_Listrik} = \text{Fraksi_Konversi} * \text{Pemb_T_Batubara}$$

$$3. \text{Pemb_T_Batubara} = \text{Fraksi_P_BB} * \{ (\text{Fraksi_Produksi} * (\text{Flow Jml_Penduduk} * \text{Aux Listrik_Perkapita}) + (\text{Flow Jml_Penduduk} * \text{Aux Listrik_Perkapita}) \}$$

Dimana :

$$\text{Aux Konsumsi Listrik} = \text{Flow Jml_Penduduk} * \text{Aux Listrik_Perkapita}$$

$$(\text{Fraksi_Produksi} * \text{Aux Konsumsi Listrik}) + \text{Konsumsi Listrik} = \text{Produksi Listrik}$$

Maka :

$$\text{Pemb_T_BB} = \text{Fraksi_P_BB} * \text{Produksi Listrik}$$

$$4. \text{Produksi_BB} = \text{Fraksi_BB} * (\text{Cadangan_BB_Terbukti} / \text{R_Cad_Produksi})$$

Dimana :

$$\text{Cadangan_BB_Terbukti} / \text{R_Cad_Produksi} = \text{Produksi_BB_Maks}$$

$$\text{Fraksi_BB} =$$

$$\text{GRAPH}(\text{TIME}, 1991 << @yr >>, 1 << yr >>, \{ 0.0803, 0.125, 0.129, 0.151, 0.177, 0.192, 0.195, 0.198, 0.197, 0.199 // \text{Min}: 0.1; \text{Max}: 1 // \})$$

Maka :

diperoleh unique solution untuk X1 – X 4. Dalam hal ini program Powersim melakukan sendiri (self-contained) proses iterasi dengan menetapkan nilai input awal sampai mencapai unique solution secara konvergen. Selanjutnya berbagai skenario tentang besarnya P1 – P4 dan E, serta gabungannya dapat dirancang dalam bentuk simulasi.

4.3.2 Skenario Terhadap Variabel Exogen

Skenario yang disusun dengan melihat perubahan – perubahan yang terjadi pada variabel exogen sebagai sebuah sebab, sedangkan variabel endogen merupakan variabel – variabel penting yang harus dicari nilainya. Berdasarkan pembahasan sebelumnya yang tertera pada gambar 3.1 dan gambar 3.2 maka variabel – variabel eksogen yang akan dilakukan skenario adalah sebagai berikut :

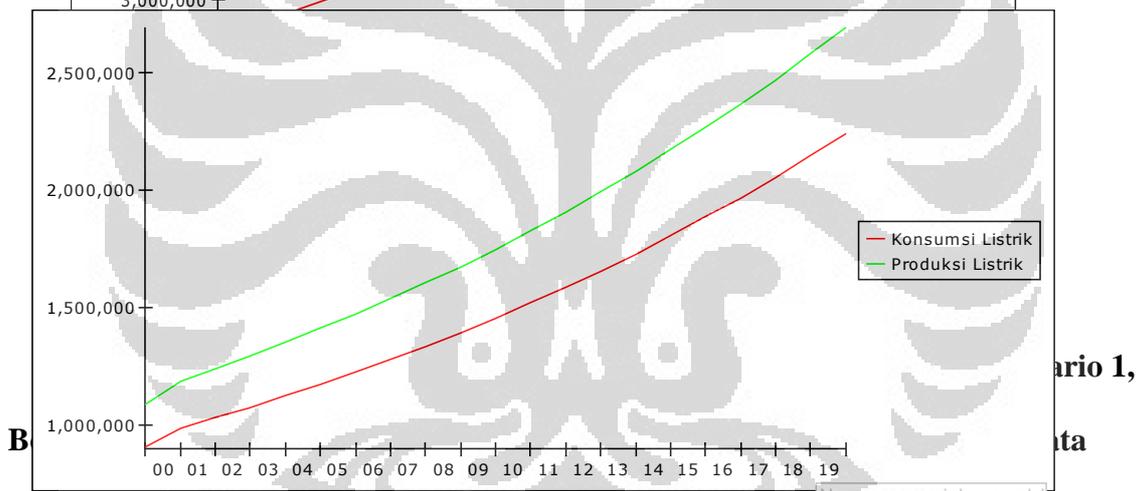
- Pertumbuhan penduduk
- Pertumbuhan ekonomi
- Cadangan Batubara
- Produksi Listrik dari Pembangkit
 - a. Pembangkit listrik berbahan bakar minyak
 - b. Pembangkit listrik berbahan bakar gas
 - c. Pembangkit listrik berbahan bakar non fosil
- Konsumsi batubara luar wilayah Kaltim

4.3.1.1. Skenario Pertumbuhan penduduk

Berdasarkan model pada gambar 4.1, sesuai data riil, konsumsi listrik yang dihasilkan dari simulasi Powersim adalah menggunakan pertumbuhan jumlah penduduk dengan angka kelahiran 4,33% dan angka kematian 0,34%. Pada skenario kali ini digunakan angka kelahiran meningkat tajam menjadi 4,7% dan angka kematian turun menjadi 0,3% dengan asumsi tingkat kesehatan dan kesejahteraan penduduk Kaltim yang semakin meningkat. Maka akan dihasilkan data hasil simulasi Powersim sebagai berikut :

Tabel 4.11. Hasil simulasi skenario 1 (Pertumbuhan penduduk)

Time	Jml_Penduduk	Konsumsi Listrik	Produksi Listrik	Jlh_BB_Listrik
Jan 01, 2001	2,786,191.70	989,098.05	1,189,192.59	1,080,453.13
Jan 01, 2002	2,908,784.14	1,032,618.37	1,241,517.07	1,127,993.07
Jan 01, 2003	3,036,770.64	1,078,053.58	1,296,143.82	1,177,624.76
Jan 01, 2004	3,170,388.55	1,125,487.94	1,353,174.14	1,229,440.25
Jan 01, 2005	3,309,885.65	1,175,009.40	1,412,713.81	1,283,535.62
Jan 01, 2006	3,455,520.61	1,226,709.82	1,474,873.21	1,340,011.19
Jan 01, 2007	3,607,563.52	1,280,685.05	1,539,767.64	1,398,971.68
Jan 01, 2008	3,766,296.32	1,337,035.19	1,607,517.41	1,460,526.44
Jan 01, 2009	3,932,013.35	1,395,864.74	1,678,248.18	1,524,789.60
Jan 01, 2010	4,105,021.94	1,457,282.79	1,752,091.10	1,591,880.34
Jan 01, 2011	4,285,642.91	1,521,403.23	1,829,183.11	1,661,923.08
Jan 01, 2012	4,474,208.69	1,596,707.47	1,910,707.47	1,741,208.69
Jan 01, 2013	4,671,076.49	1,658,232.15	1,993,692.52	1,811,389.79



mengakibatkan perubahan pula pada variabel endogen yaitu konsumsi listrik, yang mana implikasinya adalah konsumsi listrik mengalami peningkatan rata – rata 12,3 % setiap tahunnya. Karena itu untuk mencukupi kebutuhan listrik yang meningkat ini, produksi listrik harus dinaikkan, yang mana produksi listrik meningkat 10,7 % jika dibandingkan produksi listrik sebelum skenario. Dan implikasi pada jumlah batubara yang dibutuhkan untuk pembangkit meningkat 9,9 % dibanding sebelum dilakukan skenario. Karenanya, langkah yang mungkin diambil agar tidak terjadi lonjakan drastis pada nilai variabel – variabel endogen di atas adalah dengan menekan angka kelahiran sehingga pertumbuhan penduduk tidak meningkat tajam.

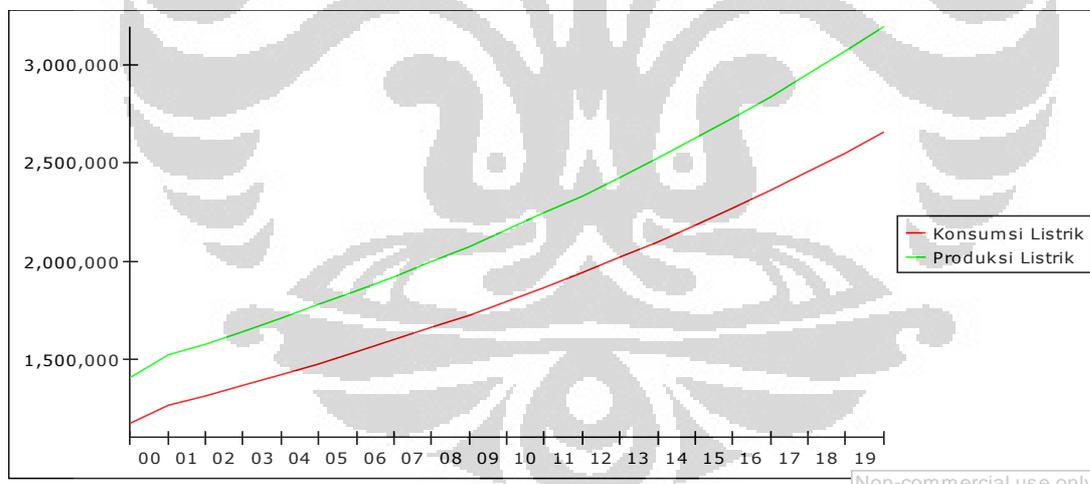
4.3.1.2.Skenario Pertumbuhan Ekonomi

Pertumbuhan ekonomi ini berpengaruh pada listrik perkapita, semakin tinggi pertumbuhan ekonomi, asumsinya semakin meningkat listrik perkapita. Pada skenario ini, digunakan asumsi pertumbuhan ekonomi Kalimantan Timur sebesar 8 % mengingat semakin banyak munculnya kegiatan perekonomian dan

kekayaan sumber daya alam. Hasil simulasi dari skenario 2 ini adalah sebagai berikut :

Tabel 4.12. Hasil Skenario Pertumbuhan Ekonomi 8 %

Time	Jml_Penduduk	Konsumsi Listrik	Produksi Listrik	Jlh_BB_Listrik
Jan 01, 2002	2,885,982.23	1,313,121.91	1,578,766.48	1,434,404.48
Jan 01, 2003	3,001,132.92	1,365,515.48	1,641,759.26	1,491,637.22
Jan 01, 2004	3,120,878.12	1,419,999.55	1,707,265.45	1,551,153.55
Jan 01, 2005	3,245,401.16	1,476,657.53	1,775,385.35	1,613,044.57
Jan 01, 2006	3,374,892.67	1,535,576.16	1,846,223.22	1,677,405.05
Jan 01, 2007	3,509,550.88	1,596,845.65	1,919,887.53	1,744,333.51
Jan 01, 2008	3,649,581.96	1,660,559.79	1,996,491.04	1,813,932.42
Jan 01, 2009	3,795,200.28	1,726,816.13	2,076,151.03	1,886,308.32
Jan 01, 2010	3,946,628.78	1,795,716.09	2,158,989.46	1,961,572.02
Jan 01, 2011	4,104,099.26	1,867,365.17	2,245,133.14	2,039,838.75
Jan 01, 2012	4,267,852.83	1,941,873.04	2,334,713.95	2,121,228.31
Jan 01, 2013	4,438,140.15	2,019,353.77	2,427,869.04	2,205,865.32
Jan 01, 2014	4,615,221.94	2,099,925.98	2,524,741.01	2,293,879.35
Jan 01, 2015	4,799,369.30	2,183,713.03	2,625,478.18	2,385,405.14
Jan 01, 2016	4,990,864.14	2,270,843.18	2,730,234.76	2,480,582.80
Jan 01, 2017	5,189,999.61	2,361,449.82	2,839,171.12	2,579,558.05
Jan 01, 2018	5,397,080.60	2,455,671.67	2,952,454.05	2,682,482.42
Jan 01, 2019	5,612,424.12	2,553,652.97	3,070,256.97	2,789,513.47
Jan 01, 2020	5,836,359.84	2,655,543.73	3,192,760.22	2,900,815.06



Gambar 4.10. Grafik Simulasi Skenario Pertumbuhan Ekonomi 8%

Berdasarkan hasil simulasi di atas, jumlah penduduk sama seperti sebelum skenario karena yang berubah pada skenario kali ini adalah listrik perkapita. implikasi yang muncul pada variabel indikatornya adalah, pada konsumsi listrik meningkat rata – rata 28,1 % tiap tahunnya dibandingkan sebelum skenario, dan untuk produksi listrik akan berimplikasi peningkatan produksi untuk memenuhi kebutuhan listrik tersebut sebesar 28,1 % juga setiap tahunnya. Sedangkan pengaruh pada kebutuhan batubara untuk listrik mengalami peningkatan 21,4 % tiap tahunnya jika dibandingkan hasil

sebelum skenario. Perilaku ini menunjukkan bahwa listrik perkapita memberikan dampak yang begitu besar pada variabel endogen tersebut di atas jika dibandingkan dengan dampak dari pertumbuhan jumlah penduduk. Karena itu langkah penghematan penggunaan listrik menjadi solusi efektif untuk menekan laju peningkatan konsumsi listrik secara besar – besaran.

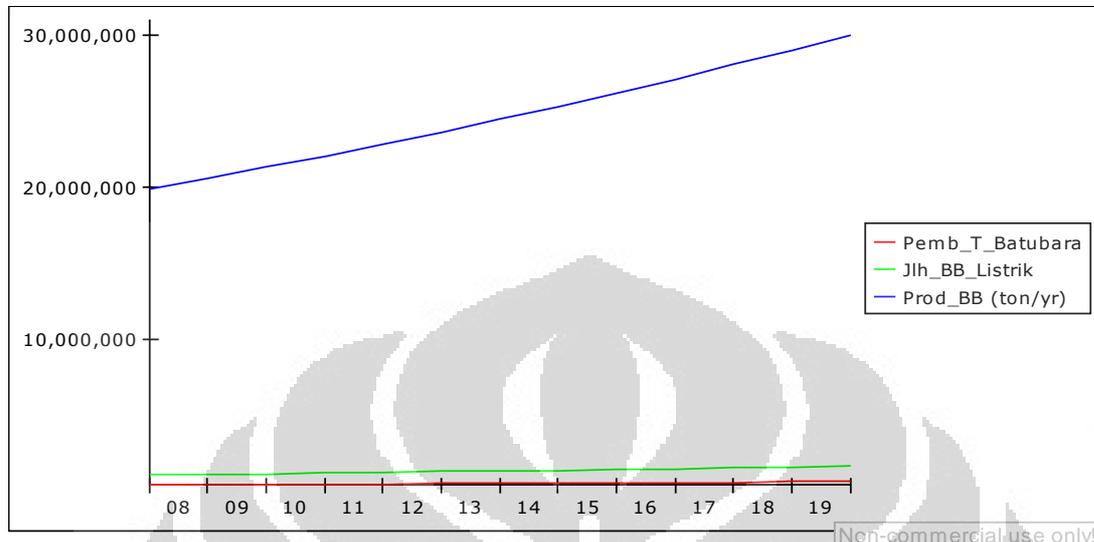
4.3.1.3.Skenario Cadangan Batubara

Pada simulasi awal data cadangan batubara adalah dimulai pada tahun 1991 sebesar 1.831.211.000 ton, dimana cadangan batubara ini meningkat terus setiap tahun seiring dengan terus dilakukan penelitian dan penemuan – penemuan lokasi cadangan baru. Pada skenario 3 ini diasumsikan penelitian dan penemuan batubara semakin digiatkan dan ditingkatkan karena pengaruh harga minyak yang melambung tinggi, sehingga batubara menjadi pilihan mengingat secara hipotetik Kalimantan Timur masih memiliki potensi yang besar dan harga yang lebih murah dibanding harga minyak. Sehingga asumsinya tahun 2008 ditemukan cadangan batubara yang meningkat tajam sebesar 4 milyar ton (jika menganut perkiraan data riil sebelum skenario sejumlah 2.709.992.753 ton), maka hasil simulasi dengan mengacu cadangan potensial di Kaltim sebesar 10.112.640.000 adalah sebagai berikut :

Tabel 4.13. Hasil Simulasi Skenario 3 (cadangan batubara)

Time	Pemb_T_Batubara	Jlh_BB_Listrik	Prod_BB (ton/yr)
Jan 01, 2008	392,638.59	1,034,916.79	19,900,000.00
Jan 01, 2009	408,304.87	1,076,209.97	20,596,997.50
Jan 01, 2010	424,596.23	1,119,150.75	21,318,407.34
Jan 01, 2011	441,537.62	1,163,804.86	22,065,084.55
Jan 01, 2012	459,154.97	1,210,240.68	22,837,914.14
Jan 01, 2013	477,475.26	1,258,529.28	23,637,812.08
Jan 01, 2014	496,526.52	1,308,744.60	24,465,726.45
Jan 01, 2015	516,337.93	1,360,963.51	25,322,638.52
Jan 01, 2016	536,939.81	1,415,265.95	26,209,563.94
Jan 01, 2017	558,363.71	1,471,735.06	27,127,553.91
Jan 01, 2018	580,642.42	1,530,457.29	28,077,696.49
Jan 01, 2019	603,810.05	1,591,522.54	29,061,117.81
Jan 01, 2020	627,902.07	1,655,024.29	30,078,983.46

Non-commercial use only



Gambar 4.11. Grafik Simulasi Skenario 3 (Cadangan Batubara)

Berdasarkan hasil simulasi di atas cadangan batubara yang ditemukan mengalami peningkatan yang sangat signifikan, dimana cadangan sebelum dilakukan skenario pada tahun 2020 nanti masih mencapai 5,1 milyar ton, sedangkan setelah skenario tersebut cadangan batubara terbukti pada tahun 2020 sudah mencapai 6,1 milyar. Artinya jika dihubungkan dengan cadangan potensial batubara batubara Kaltim yang sebesar 10,1 milyar ton maka dengan skenario ini akan lebih cepat waktu hingga mencapai titik habisnya cadangan potensial. Implikasi dari skenario 3 ini pada variabel – variabel endogen adalah meningkatnya produksi batubara rata – rata 18,9 % setiap tahunnya, dan dengan kenaikan ini pula membawa akibat pada meningkatnya pula pada konsumsi batubara termasuk pada sektor listrik sebesar 18 %. Dengan kondisi ini maka kebutuhan batubara untuk sektor listrik akan mampu mencukupi kebutuhan produksi listrik dengan menghentikan pembangkit listrik berbahan bakar minyak, termasuk dengan skenario 1 dan 2, dan bahkan sangat memungkinkan untuk di jual ke luar wilayah Kaltim. Namun demikian yang perlu diantisipasi adalah life time dari cadangan batubara ini juga akan cepat habis, yang mana berdasarkan simulasi ini sekitar tahun 2040.

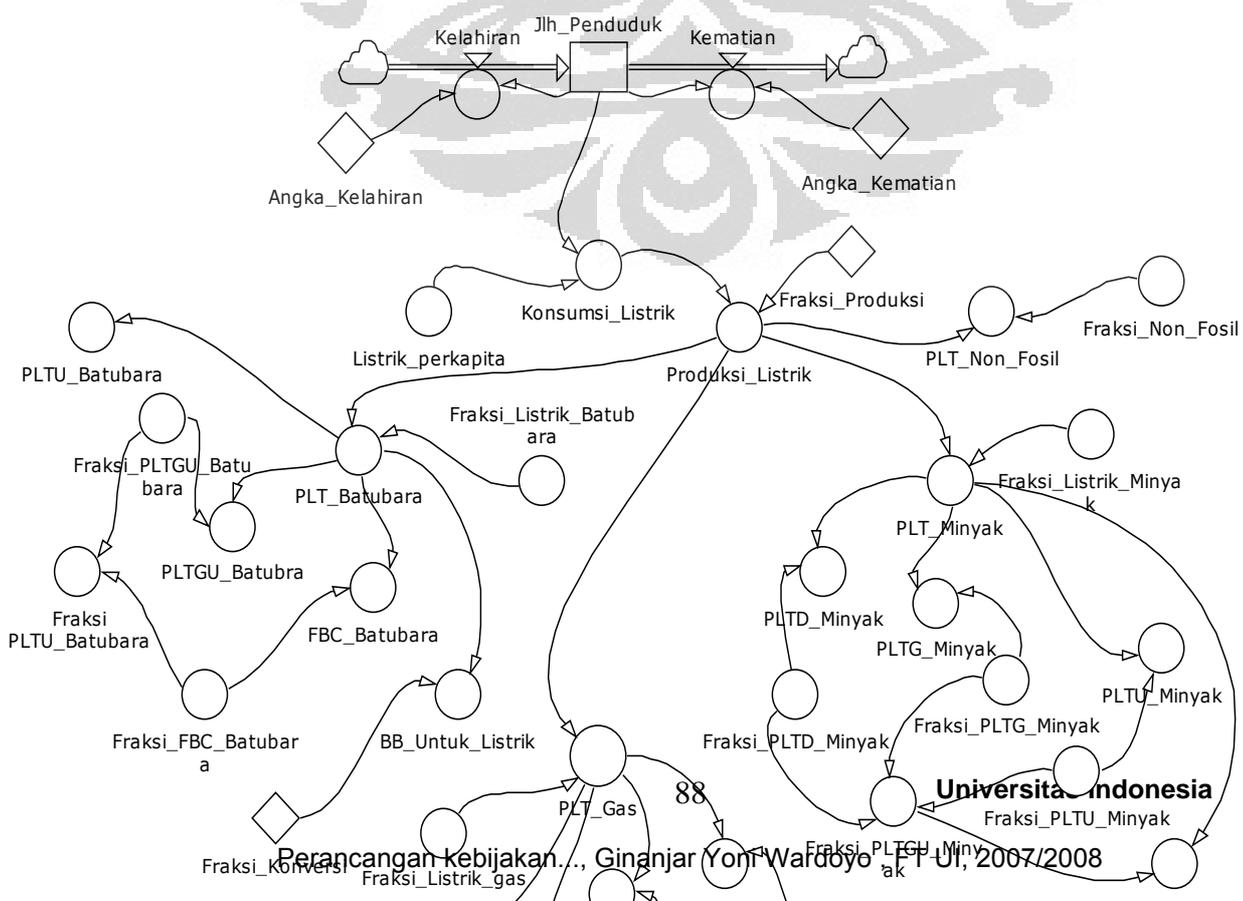
4.3.1.4.Skenario Produksi Listrik Dari Pembangkit

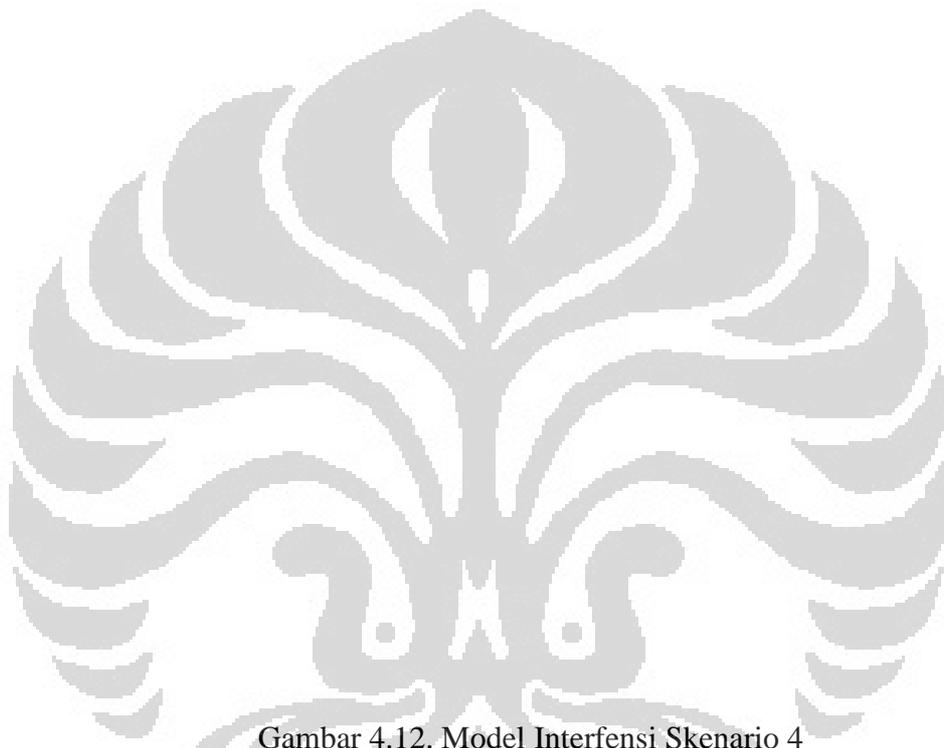
Jika dilihat dari kebijakan pemerintah (PLN) yang akan mengurangi peran bahan bakar minyak sebagai sumber energi dalam pembangkitan tenaga listrik (kecuali pusat – pusat beban yang kecil dan terisolasi) dan upaya untuk mengembangkan pembangkit – pembangkit baru yang bersih lingkungan, serta disisi lain diperkirakan beberapa jenis pembangkitan kehabisan lifetimenya, maka pada model ini dilakukan interfensi sebagai suatu skenario (gambar model sebagaimana Lampiran B), agar beberapa pembangkit dapat menyesuaikan dengan sistem nyatanya.

Interfensi yang dilakukan berdasarkan Skenario 4 yang terdiri dari :

- A** Pemanfaatan pembangkit listrik bersih lingkungan seperti PFBC (Pulverized Fluidized Bed Combustion) pada tahun 2010 dan Fuel Cell pada tahun 2015.
- B.** Pengoperasian PLTU dan PLTG berbahan bakar minyak hanya sampai pada tahun 2010 dan PLTU gas tahun 2015.
- C.** Pengoperasian PLTGU berbahan bakar batubara pada tahun 2020

Dengan interfensi berdasarkan skenario tersebut, kemudian dirancang model sebagaimana gambar 4.6 Berikut, yang untuk selanjutnya disimulasikan.





Gambar 4.12. Model Interfensi Skenario 4

Persamaan Powersim pada model interfensi di atas adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 & \text{Listrik_Perkapita} = \\
 & \text{GRAPH}(\text{TIME}, 2000 \llcorner \llcorner @\text{yr} \gg, 1 \llcorner \llcorner \text{yr} \gg, \{0.389, 0.405, 0.423, 0.441, 0.46, 0.481, 0.503, 0.526, 0.549, 0.574, 0.6, 0.627, 0.655, 0.694, 0.736, 0.78, 0.827, 0.876, \\
 & \quad 0.929, 0.985, 1.044 // \text{Min}: 0.1; \text{Max}: 1 // \}) \\
 & \text{Produksi_Listrik} = \\
 & \quad (\text{Konsumsi_Listrik} * \text{Fraksi_Produksi}) + \text{Konsumsi_Listrik} \\
 & \text{PLT_Batubara} = \text{Produksi_Listrik} * \text{Fraksi_Listrik_Batubara} \\
 & \text{PLTU_Batubara} = \text{'Fraksi PLTU_Batubara'} * \text{PLT_Batubara} \\
 & \text{PLTGU_Batubara} = \text{Fraksi_PLTGU_Batubara} * \text{PLT_Batubara} \\
 & \text{FBC_Batubara} = \text{Fraksi_FBC_Batubara} * \text{PLT_Batubara} \\
 & \text{BB_Untuk listrik} = \text{PLT_Batubara} / \text{Fraksi_Konversi}
 \end{aligned}$$

Fraksi_Listrik_Batubara =

GRAPH(TIME,2000<<@yr>>,1<<yr>>,{0,277231186,0.318302938,0.360995029,0.403264566,0.444850403,0.478462812,0.511253398,0.543589016,0.575383878,0.606614812,0.605598235,0.604381654,0.603929029,0.603361481,0.602670066,0.599222804,0.596593307,0.592071019,0.588319228,0.585216673,0.580007716})

Fraksi_PLTU_Batubara = 1-(Fraksi_FBC_Batubara+Fraksi_PLTGU_Batubara)

Fraksi_PLTGU_Batubara = IF(TIME>=2020<<@yr>>,0.15,0)

Fraksi_FBC_Batubara =

IF(TIME<2010<<@yr>>,0,GRAPH(TIME,2010<<@yr>>,5<<yr>>,{0.25,0.3,0.35}))

*PLT_Gas = Produksi_Listrik*Fraksi_Listrik_gas*

*PLTG_Gas = Fraksi_PLTG_Gas*PLT_Gas*

*PLTU_Gas = Fraksi_PLTU_Gas*PLT_Gas*

*PLTGU_Gas = Fraksi_PLTGU_Gas*PLT_Gas*

*PL_Fuel_Cell = Fraksi_Fuel_Cell*PLT_Gas*

Fraksi_Listrik_Gas =

GRAPH(TIME,2000<<@yr>>,1<<yr>>,{0.244871398,0.231037636,0.219176298,0.207447617,0.195735233,0.171774569,0.147954824,0.124437705,0.101199993,0.078249256,0.076981821,0.075708185,0.074540916,0.073375081,0.072209251,0.068695736,0.065311566,0.061764542,0.058345506,0.054865116,0.050817775})

Fraksi_PLTG_Gas =

GRAPH(TIME,2000<<@yr>>,5<<yr>>,{0.007,0.004,0.0035,0.0024,0.001})

Fraksi_PLTU_Gas = GRAPH(TIME,2000<<@yr>>,5<<yr>>,{0.138,0.1,0})

Fraksi_PLTGU_Gas = 1-(Fraksi_Fuel_Cell+Fraksi_PLTG_Gas+Fraksi_PLTU_Gas)

Fraksi_PL_Fuel_Cell =

IF(TIME<2015<<@yr>>,0,GRAPH(TIME,2015<<@yr>>,5<<yr>>,{0.01,0.05}))

*PLT_Minyak = Produksi_Listrik*Fraksi_Listrik_Minyak*

*PLTD_Minyak = Fraksi_PLTD_Minyak*PLT_Minyak*

*PLTG_Minyak = Fraksi_PLTG_Minyak*PLT_Minyak*

$PLTU_Minyak = Fraksi_PLTU_Minyak * PLT_Minyak$
 $PLTGU_Minyak = Fraksi_PLTGU_Minyak * PLT_Minyak$
 $Fraksi_Listrik_Minyak =$
 $GRAPH(TIME, 2000 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.241207701, 0.204211802, 0.169404004, 0.13497084, 0.100833168, 0.086992864, 0.073246647, 0.059671478, 0.046260506, 0.033022444, 0.030221343, 0.027451397, 0.024753424, 0.022082555, 0.019440585, 0.021794293, 0.024149652, 0.026392681, 0.028633441, 0.03077717, 0.034321373 // Min: 0; Max: 0.5 // \})$
 $Fraksi_PLTD_Minyak = GRAPH(TIME, 2001 << @yr >>, 5 << yr >>, \{0.3, 0.33, 0.33 \})$
 $Fraksi_PLTG_Minyak =$
 $IF(TIME > 2010 << @yr >>, 0, GRAPH(TIME, 2001 << @yr >>, 5 << yr >>, \{0.07, 0.04, 0 \}))$
 $Fraksi_PLTU_Minyak =$
 $IF(TIME > 2010 << @yr >>, 0, GRAPH(TIME, 2001 << @yr >>, 4 << yr >>, \{0.34, 0.1, 0.03 \}))$
 $)$
 $Fraksi_PLTGU_Minyak = 1 -$
 $(Fraksi_PLTD_Minyak + Fraksi_PLTG_Minyak + Fraksi_PLTU_Minyak)$
 $PLT_Non_Fosil = Produksi_Listrik * Fraksi_Non_Fosil$
 $Fraksi_Non_Fosil =$
 $GRAPH(TIME, 2000 << @yr >>, 1 << yr >>, \{0.236689715, 0.246447625, 0.250424669, 0.254316977, 0.258581195, 0.262769755, 0.267545132, 0.272301801, 0.277155623, 0.282113488, 0.2871986, 0.292458764, 0.296776631, 0.301180883, 0.305680098, 0.310287167, 0.313945475, 0.319771758, 0.324701825, 0.329141041, 0.334853136 // Min: 0.1; Max: 0.5 // \})$

Dengan asumsi pertumbuhan ekonomi Kalimantan Timur yang sama, yaitu selama periode 2003 – 2010 diperkirakan akan tumbuh rata – rata 4,5 % - 5 % pertahun dan pertumbuhan penduduk selama periode tersebut sebesar 4,33 % pertahun, maka jumlah penduduk, konsumsi listrik, dan produksi listrik yang dihasilkan adalah sebagaimana pada table 4.14 berikut :

Tabel 4.14. Hasil Simulasi Model Interfensi

Time	Jlh_Penduduk	Konsumsi_Listrik	Produksi_Listrik
Jan 01, 2000	2,760,554.00	1,073,855.51	1,291,096.47
Jan 01, 2001	2,870,700.10	1,162,633.54	1,397,834.31
Jan 01, 2002	2,985,241.04	1,262,756.96	1,518,212.69
Jan 01, 2003	3,104,352.16	1,369,019.30	1,645,971.91
Jan 01, 2004	3,228,215.81	1,484,979.27	1,785,390.58
Jan 01, 2005	3,357,021.62	1,614,727.40	1,941,386.75
Jan 01, 2006	3,490,966.78	1,755,956.29	2,111,186.25
Jan 01, 2007	3,630,256.36	1,909,514.84	2,295,899.70
Jan 01, 2008	3,775,103.58	2,072,531.87	2,491,805.06

Untuk memenuhi konsumsi tersebut, maka unit pembangkit yang akan memproduksi energi, dimodelkan sebagai berikut :

a. PLT Gas

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar gas yang terdiri atas PLTU, PLTG, dan PLTGU :

Tabel 4.15. Hasil Simulasi Produksi PLT Gas Model Interfensi

Time	PLT_Gas
Jan 01, 2000	316,152.60
Jan 01, 2001	322,952.33
Jan 01, 2002	332,756.24
Jan 01, 2003	341,452.95
Jan 01, 2004	349,463.84
Jan 01, 2005	333,480.87
Jan 01, 2006	312,360.19
Jan 01, 2007	285,685.29
Jan 01, 2008	252,170.66
Jan 01, 2009	211,994.90
Jan 01, 2010	226,706.67
Jan 01, 2011	242,285.17
Jan 01, 2012	259,145.73
Jan 01, 2013	281,065.59
Jan 01, 2014	305,043.55
Jan 01, 2015	319,821.13
Jan 01, 2016	335,250.90
Jan 01, 2017	349,228.16
Jan 01, 2018	363,815.02
Jan 01, 2019	377,208.62
Jan 01, 2020	385,085.18

Non-commercial use only

b. PLT Minyak

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar minyak yang terdiri atas PLTU, PLTD, PLTG, dan PLTGU :

Tabel 4.16. Hasil Simulasi Produksi PLT Minyak Model Interfensi

Time	PLT_Minyak
Jan 01, 2000	311,422.41
Jan 01, 2001	285,454.26
Jan 01, 2002	257,191.31
Jan 01, 2003	222,158.21
Jan 01, 2004	180,026.59
Jan 01, 2005	168,886.79
Jan 01, 2006	154,637.31
Jan 01, 2007	136,994.36
Jan 01, 2008	115,272.16
Jan 01, 2009	89,465.25
Jan 01, 2010	88,999.98
Jan 01, 2011	87,851.35
Jan 01, 2012	86,056.69
Jan 01, 2013	84,587.93
Jan 01, 2014	82,125.56
Jan 01, 2015	101,465.91
Jan 01, 2016	123,962.62
Jan 01, 2017	149,229.11
Jan 01, 2018	178,544.62
Jan 01, 2019	211,599.19
Jan 01, 2020	260,079.31

c. PLT Batubara

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar batubara yang terdiri atas PLTU :

Tabel 4.17. Hasil Simulasi Produksi PLT Batubara Model Interfensi

Time	PLT_Batubara
Jan 01, 2000	0.00
Jan 01, 2001	3.88e14
Jan 01, 2002	483,251.56
Jan 01, 2003	594,187.68
Jan 01, 2004	719,984.76
Jan 01, 2005	863,626.68
Jan 01, 2006	1,010,124.11
Jan 01, 2007	1,173,740.51
Jan 01, 2008	1,354,517.86
Jan 01, 2009	1,558,844.80
Jan 01, 2010	1,786,442.89
Jan 01, 2011	1,938,066.15
Jan 01, 2012	2,101,167.16
Jan 01, 2013	2,313,369.40
Jan 01, 2014	2,548,863.54
Jan 01, 2015	2,805,801.81
Jan 01, 2016	3,075,871.50
Jan 01, 2017	3,373,249.05
Jan 01, 2018	3,691,875.26
Jan 01, 2019	4,044,812.12
Jan 01, 2020	4,434,634.67

d. PLT Non Fosil

Hasil simulasi pada pembangkit tenaga listrik berbahan bakar non fosil yang terdiri atas PLTA dan PLTP :

Tabel 4.18. Hasil Simulasi Produksi PLT Non Fosil Model Interfensi

Time	PLT_Non_Fosil
Jan 01, 2000	305,589.26
Jan 01, 2001	344,492.95
Jan 01, 2002	380,197.91
Jan 01, 2003	418,598.60
Jan 01, 2004	461,668.43
Jan 01, 2005	510,137.72
Jan 01, 2006	564,837.60
Jan 01, 2007	625,153.11
Jan 01, 2008	690,617.78
Jan 01, 2009	764,309.12
Jan 01, 2010	845,782.01
Jan 01, 2011	935,941.35
Jan 01, 2012	1,031,760.82
Jan 01, 2013	1,153,682.97
Jan 01, 2014	1,291,326.81
Jan 01, 2015	1,444,578.62
Jan 01, 2016	1,611,514.00
Jan 01, 2017	1,808,048.74
Jan 01, 2018	2,024,687.24
Jan 01, 2019	2,262,910.35
Jan 01, 2020	2,537,439.51

Produksi listrik PLT batubara meningkat lebih dari tujuh kali lipat selama periode simulasi, dengan laju pertumbuhan rata – rata 10,2 % pertahun. Tingginya produksi PLT batubara diantaranya disebabkan oleh adanya kebijakan Pemerintah dibidang deversifikasi energi untuk memanfaatkan bahan bakar batubara yang cadangannya melimpah sebagai bahan bakar pembangkit tenaga listrik. Selain itu biaya pembangkitan PLT batubara relatif dapat bersaing dengan pembangkit listrik minyak dan gas.

Pada Tabel 4.17 menunjukkan dengan semakin meningkatnya produksi PLT batubara, penggunaan minyak dan gas sebagai bahan bakar PLTD dan PLTU semakin lama semakin menurun. Pada Tabel 4.15 produksi PLT gas mulai tahun 2000 – 2011 terus mengalami penurunan demikian halnya dengan PLT minyak sebagaimana pada Tabel 4.16. Penurunan ini salah satunya diakibatkan oleh semakin terbatasnya cadangan minyak dan gas bumi. Oleh karena itu diperkirakan penggunaan pembangkit listrik

berbahan bakar minyak dan gas khususnya PLTD dan PLTU yang ditujukan pada daerah terisolasi atau yang belum memiliki jaringan dengan sistem interkoneksi.

Selain itu yang perlu terus dioptimalkan pemanfaatannya dalam memproduksi listrik adalah jenis PLTGU karena pembangkit ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibanding dengan PLTG.

Sedangkan pembangkit listrik non fosil seperti PLTA dan PLTP berdasarkan hasil simulasi, produksinya akan terus meningkat dengan laju pertumbuhan selama periode 2000 – 2020 rata – rata 7,9 % pertahun. Besarnya peningkatan pada PLTA selain karena lebih murah, juga karena PLTA merupakan jenis pembangkit listrik yang tidak menghasilkan bahan – bahan polutan.

Dalam interfensi model ini juga, telah diperkirakan untuk memanfaatkan pembangkit listrik bersih lingkungan seperti PFBC (Pulverized Fluidzed Bed Combustion) dan Fuel Cell serta PLTGU batubara. Namun yang perlu menjadi pertimbangan adalah biaya pembangkitan dari PFBC dan Fuel Cell yang relative cukup besar.

Berdasarkan hasil simulasi, sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.19 berikut :

Tabel 4.19. Hasil Simulasi Kebutuhan Batubara Untuk Listrik

Time	PLT_Batubara	BB_Untuk_Listrik
Jan 01, 2003	594,187.68	225,429.73
Jan 01, 2004	719,984.76	273,156.07
Jan 01, 2005	863,626.68	327,652.58
Jan 01, 2006	1,010,124.11	383,232.46
Jan 01, 2007	1,173,740.51	445,307.12
Jan 01, 2008	1,354,517.86	513,892.50
Jan 01, 2009	1,558,844.80	591,412.40
Jan 01, 2010	1,786,442.89	677,761.17
Jan 01, 2011	1,938,066.15	735,285.74
Jan 01, 2012	2,101,167.16	797,164.87
Jan 01, 2013	2,313,369.40	877,672.58
Jan 01, 2014	2,548,863.54	967,017.05
Jan 01, 2015	2,805,801.81	1,064,497.23
Jan 01, 2016	3,075,871.50	1,166,959.37
Jan 01, 2017	3,373,249.05	1,279,781.87
Jan 01, 2018	3,691,875.26	1,400,665.93
Jan 01, 2019	4,044,812.12	1,534,567.16
Jan 01, 2020	4,434,634.67	1,682,462.50

[Non-commercial use only]

Konsumsi batubara untuk keperluan pembangkit tenaga listrik mengalami laju pertumbuhan yang cukup pesat rata – rata 10,21 % pertahun dengan volume 80.727 ton, jika dibandingkan dengan penggunaan batubara sebelum interfensi (table 4.8). Hal tersebut antara lain disebabkan karena pengurangan penggunaan bahan bakar minyak untuk pembangkit tenaga listrik akibat cadangan minyak bumi yang sudah semakin terbatas.

Pada awal periode simulasi pasokan batubara untuk pembangkit tenaga listrik hanya mencapai 183.341,51 ton, sedangkan pada akhir simulasi pasokan batubara meningkat lebih dari dua kali lipat sebesar 1.682.462,50 ton.

Peningkatan penggunaan batubara sebagai bahan bakar pembangkit tenaga listrik dimulai pada tahun 2003, dimana produksi energi listrik dari pembangkit berbahan bakar batubara mencapai 594.187,68 MWh (table 4.17) dengan kebutuhan batubara 225.429,65 ton dibandingkan dengan tahun yang sama sebelum interfensi dilakukan (table 4.8). Hal ini disebabkan antara lain karena menurunnya produksi energi listrik dari pembangkit listrik berbahan bakar minyak dan gas akibat akan habisnya lifetime PLTU minyak, selain pembangun PLTU minyak baru tidak dilakukan sejalan dengan kebijakan Pemerintah tentang diversifikasi energi, meskipun constrain lingkungan telah dipertimbangkan.

Dengan menggunakan model interfensi tersebut, dilakukan simulasi kebutuhan batubara pada sektor tenaga listrik, simulasi tersebut dilakukan berdasarkan :

Skenario D :

Pertumbuhan kebutuhan batubara rendah, yang memakai asumsi meningkatnya produksi listrik dari pembangkit non fosil rata – rata sebesar 43 % per tahun sebagai akibat dari kebijakan diversifikasi energi dengan mengutamakan pemanfaatan sumber energi terbarukan dan kelestarian fungsi lingkungan hidup sebagai faktor constrainnya, sebagaimana yang diamanahkan dalam Undang – Undang nomor 20 tahun 2002 tentang ketenagalistrikan.

Skenario E :

Pertumbuhan kebutuhan batubara tinggi yang memakai asumsi pertumbuhan listrik per kapita setiap tahun mengalami peningkatan sebesar 15 % sebagai

akibat pertumbuhan ekonomi, dimana pada tahun 2020 diasumsikan listrik per kapita masyarakat Kalimantan Timur sebesar 1.200 KWh per tahun.

Tabel 4.20. Hasil Simulasi Skenario D

Time	PLT_Batubara	BB_Untuk_Listrik
Jan 01, 2003	594,187.68	185,683.65
Jan 01, 2004	719,984.76	224,995.24
Jan 01, 2005	863,626.68	269,883.34
Jan 01, 2006	1,010,124.11	315,663.78
Jan 01, 2007	1,173,740.51	366,793.91
Jan 01, 2008	1,354,517.86	423,286.83
Jan 01, 2009	1,558,844.80	487,139.00
Jan 01, 2010	1,786,442.89	558,263.40
Jan 01, 2011	1,938,066.15	605,645.67
Jan 01, 2012	2,101,167.16	656,614.74
Jan 01, 2013	2,313,369.40	722,927.94
Jan 01, 2014	2,548,863.54	796,519.85
Jan 01, 2015	2,805,801.81	876,813.07
Jan 01, 2016	3,075,871.50	961,209.84
Jan 01, 2017	3,373,249.05	1,054,140.33
Jan 01, 2018	3,691,875.26	1,153,711.02
Jan 01, 2019	4,044,812.12	1,264,003.79
Jan 01, 2020	4,434,634.67	1,385,823.33

Dari hasil simulasi skenario D sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.20 di atas :

- Konsumsi batubara untuk keperluan pembangkit tenaga listrik laju pertumbuhannya sebesar 8,6 % per tahun, dengan volume pertumbuhan rata – rata per tahun sampai dengan tahun 2020 sebesar 71.127 ribu ton atau kurang lebih 32 % lebih kecil dari skenario interfensi sebagaimana table 4.19 (skenario dasar)
- Produksi listrik dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara mengalami penurunan rata – rata kurang lebih 20 %, jika dibandingkan dengan penggunaan batubara pada skenario dasar interfensi (table 4.19).

Tabel 4.21. Hasil Simulasi Skenario E

Time	PLT_Batubara	BB_Untuk_Listrik
Jan 01, 2003	594,187.68	312,730.36
Jan 01, 2004	719,984.76	378,939.35
Jan 01, 2005	863,626.68	454,540.36
Jan 01, 2006	1,010,124.11	531,644.27
Jan 01, 2007	1,173,740.51	617,758.16
Jan 01, 2008	1,354,517.86	712,904.14
Jan 01, 2009	1,558,844.80	820,444.63
Jan 01, 2010	1,786,442.89	940,233.10
Jan 01, 2011	1,938,066.15	1,070,340.97
Jan 01, 2012	2,101,167.16	1,105,877.46

Tabel 4.16. Hasil Simulasi Skenario 5

Dari hasil simulasi skenario E sebagaimana ditunjukkan pada table 4.21 di atas :

- Konsumsi batubara untuk keperluan pembangkit tenaga listrik laju pertumbuhannya sebesar 10,84 % per tahun, dengan volume pertumbuhan rata – rata per tahun sampai dengan tahun 2020 sebesar 119.988 ton atau kurang lebih 15 % lebih besar dari skenario interfensi sebagaimana tabel 4.19 (skenario dasar).
- Sedangkan produksi listrik dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara mengalami peningkatan rata – rata kurang lebih 15 %, jika dibandingkan dengan penggunaan batubara setelah interfensi skenario dasar (table 4.19).

Dari interfensi berdasar skenario tersebut di atas, besarnya produksi batubara pada tahun awal simulasi mencapai 8.126.547,65 ton dan pada tahun 2020 meningkat menjadi 16.491.830,94 ton atau tumbuh dengan tingkat pertumbuhan rata – rata sebesar 6,6 % per tahun. Sebagian besar produksi batubara tersebut untuk di ekspor, memenuhi keperluan domestik (industri semen dan industri kecil lainnya) yang dalam penelitian ini tidak diperhitungkan.

Namun demikian yang perlu menjadi perhatian adalah besarnya konsumsi batubara untuk pembangkit tenaga listrik yang setiap tahun mengalami peningkatan rata – rata sebesar 10,21 % per tahun untuk skenario dasar, 8,6 % untuk skenario rendah dan

10,84 untuk skenario tinggi, sedangkan disisi lain kemampuan produksi batubara hanyalah 3,6 % per tahun, sehingga jika hal tersebut terus berlangsung hingga pada tahun 2020, maka produksi batubara sebagaimana pada table 4.8 sebagian besar digunakan untuk pembangkit tenaga listrik (50,5 % - 77,5 %). Oleh karena itu perlu adanya suatu stimulus untuk meningkatkan kapasitas produksi batubara, agar kebutuhan disektor lainnya dapat terpenuhi.

4.3.1.5. Skenario Konsumsi Batubara Luar Wilayah Kaltim

Pada skenario ke 5 yang akan dirancang ini adalah melihat peluang produksi batubara Kaltim untuk dijual ke luar wilayah Kaltim, dalam hal ini bisa diekspor maupun untuk keperluan domestik. Mengingat pemanfaatan batubara untuk sektor listrik selama ini hanya sekitar 11 %, sementara prioritas adalah untuk dijual ke luar.

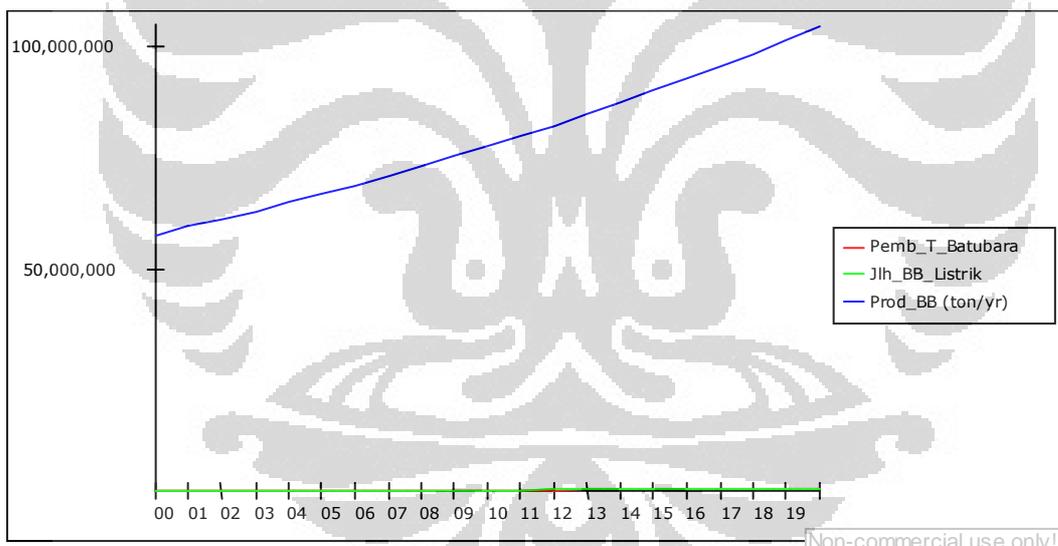
Dalam model ini, variabel konsumsi batubara luar wilayah Kaltim dianggap indogen, yaitu bahwa kebutuhan untuk sektor diluar kebutuhan listrik, khususnya ekspor dianggap sebagai sisa dari kebutuhan batubara untuk pemenuhan tenaga listrik. Namun demikian sangat mungkin bahwasanya konsumsi batubara untuk luar wilayah Kaltim menjadi unsur eksogen karena ada kenaikan harga ekspor dan unsur – unsur lainnya semisal menambah pendapatan daerah Kaltim, dan juga unsur – unsur dalam negeri yang tidak mampu mencegahnya.

Berdasarkan model pada gambar 4.6 dan melihat hasil simulasi akan produksi listrik dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara, dan kebutuhan batubara untuk listrik dan produksi batubara sebagaimana tabel 4.19 bahwasanya kebutuhan batubara untuk sektor listrik mencapai 37 %. Sehingga konsumsi batubara untuk sektor lain sebesar 63 %. Namun pada tahun 2020 kebutuhan batubara untuk listrik mencapai 57,1% dan akan terus meningkat seiring bertambahnya waktu.

Pada skenario 5 kali ini, untuk menjaga kebutuhan batubara untuk sektor lain tetap tersedia, diasumsikan kebutuhan untuk sektor lain konstan sejumlah 60 %, maka dengan variabel kebutuhan batubara untuk sektor lain menjadi eksogen akan menghasilkan hasil simulasi sebagai berikut :

Tabel 4.22. Hasil Simulasi Skenario 5

Time	Pemb_T_Batubara	Jlh_BB_Listrik	Prod_BB (ton/yr)
Jan 01, 2009	558,363.71	578,353.13	75,579,493.12
Jan 01, 2010	580,642.42	601,429.42	77,848,767.40
Jan 01, 2011	603,810.05	625,426.45	80,186,176.64
Jan 01, 2012	627,902.07	650,380.97	82,593,766.59
Jan 01, 2013	652,955.37	676,331.17	85,073,644.43
Jan 01, 2014	679,008.29	703,316.78	87,627,980.61
Jan 01, 2015	706,122.72	731,270.12	90,259,210.72



Gambar 4.13. Grafik Hasil Skenario Jika 60% Konsumsi Batubara Lusr Kaltim

Berdasarkan hasil simulasi di atas bahwa pada tahun 2015 kebutuhan batubara untuk listrik yang seharusnya sejumlah 7.395.532,41 ton (pada tabel 4.19) untuk bisa memenuhi sebagai bahan bakar pembangkit listrik batubara, pada simulasi di atas karena skenario ini kebutuhan batubara untuk listrik hanya sebesar 2.958.156,85 ton. Sehingga implikasi pada kebutuhan batubara untuk listrik sebagai variabel endogen adalah tidak terpenuhinya jumlah batubara untuk listrik. Dan bisa dipastikan

pembangkit listrik batubara tidak akan memproduksi listrik sejumlah kebutuhan listrik yang ada.

Karena itu tindakan antisipasi yang mungkin adalah dengan terus mencari temuan cadangan – cadangan terbukti batubara, atau yang lebih efektif adalah mengusahakan pembangkit listrik non fosil dan mengurangi presentase kebutuhan batubara untuk sektor di luar listrik.

4.3.1.5.Skenario Secara Keseluruhan/Gabungan

Pada skenario secara keseluruhan ini merupakan gabungan dari skenario pada variabel eksogen dari skenario satu sampai dengan lima, dengan catatan presentase konsumsi batubara untuk sektor luar adalah 40%. Dengan menggunakan simulasi Program Powersim hasil dari simulasi skenario gabungan adalah sebagai berikut :

Tabel 4.23. Hasil Simulasi Skenario Gabungan

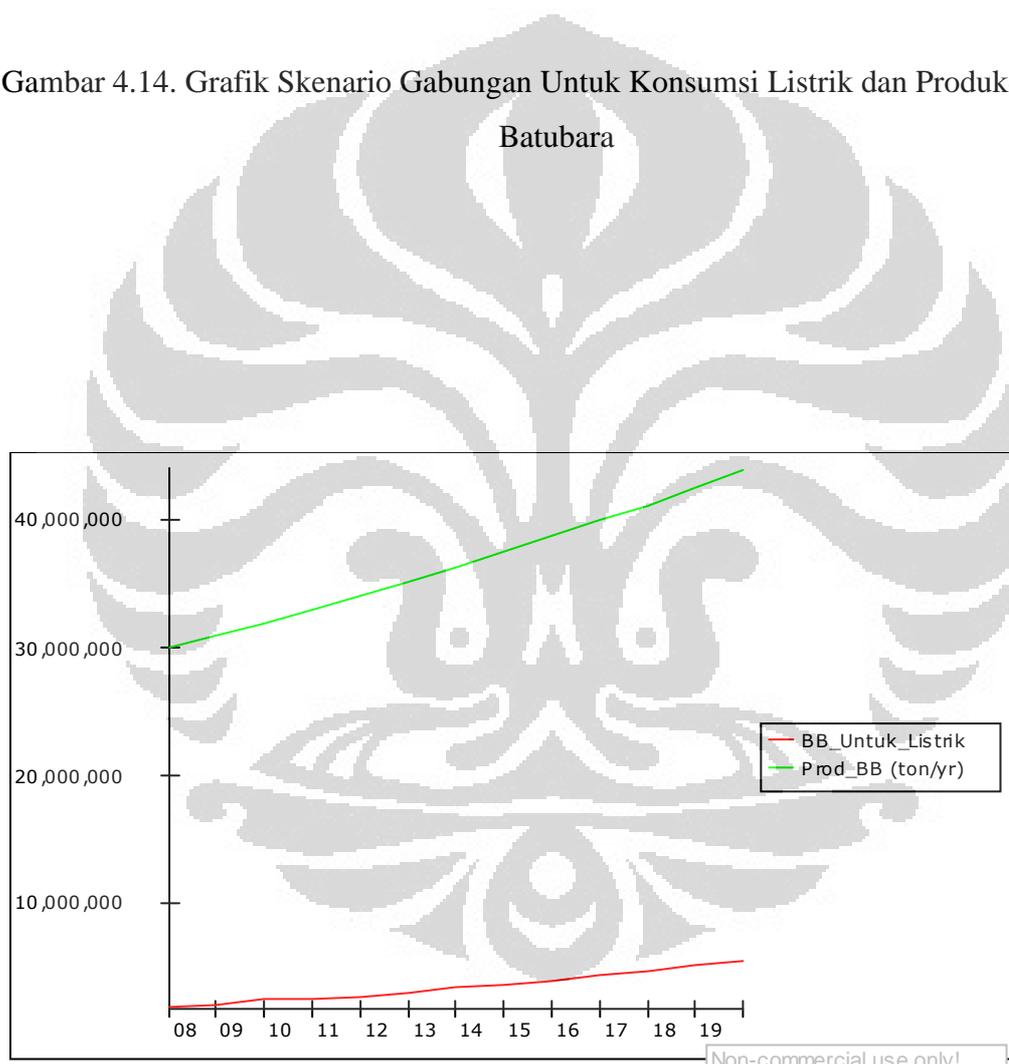
Time	Jlh_Penduduk	Konsumsi_Listrik	Produksi_Listrik	BB_Untuk_Listrik
Jan 01, 2002	3,023,832.34	1,581,464.31	1,901,394.55	796,347.7
Jan 01, 2003	3,164,742.93	1,712,125.92	2,058,489.00	977,776.6
Jan 01, 2004	3,312,219.95	1,854,843.17	2,230,077.95	1,183,313.9
Jan 01, 2005	3,466,569.40	2,014,076.82	2,421,524.56	1,417,401.0
Jan 01, 2006	3,628,111.53	2,187,751.25	2,630,333.33	1,655,956.2
Jan 01, 2007	3,797,181.53	2,377,035.64	2,857,909.95	1,922,536.6
Jan 01, 2008	3,974,130.19	2,579,210.49	3,100,984.78	2,217,993.0
Jan 01, 2009	4,159,324.66	2,803,384.82	3,370,509.57	2,551,779.4
Jan 01, 2010	4,353,149.19	3,047,204.43	3,663,653.89	2,924,269.0
Jan 01, 2011	4,556,005.94	3,312,216.32	3,982,277.68	3,173,262.6
Jan 01, 2012	4,768,315.81	3,600,078.44	4,328,374.31	3,442,119.6
Jan 01, 2013	4,990,519.33	3,962,472.35	4,764,080.50	3,785,775.7
Jan 01, 2014	5,223,077.53	4,366,492.82	5,249,834.31	4,167,859.4
Jan 01, 2015	5,466,472.94	4,810,496.19	5,783,659.57	4,586,403.1
Jan 01, 2016	5,721,210.58	5,303,562.21	6,376,472.85	5,027,576.9
Jan 01, 2017	5,987,819.00	5,844,111.34	7,026,375.07	5,515,686.6
Jan 01, 2018	6,266,851.36	6,448,590.05	7,753,139.82	6,040,060.6
Jan 01, 2019	6,558,886.64	7,116,392.00	8,556,038.10	6,623,318.4
Jan 01, 2020	6,864,530.75	7,166,570.11	8,616,367.24	6,634,844.8

Non-commercial use only



onesia

Gambar 4.14. Grafik Skenario Gabungan Untuk Konsumsi Listrik dan Produksi PLT



Gambar 4.15. Grafik Skenario Gabungan untuk BB Listrik dan Produksi BB

Implikasi dari skenario yang dilakukan pada variabel eksogen terhadap variabel endogen berdasarkan hasil simulasi di atas adalah sebagai berikut :

A. Implikasi pada variabel jumlah penduduk

Dengan menggunakan angka kelahiran meningkat tajam menjadi 5% dan angka kematian turun menjadi 0,3% dengan asumsi tingkat kesehatan dan kesejahteraan penduduk Kaltim yang semakin meningkat, maka pada hasil simulasi pertumbuhan penduduk meningkat rata – rata 4,9 % setiap tahunnya, sehingga jumlah penduduk meningkat pesat. Dan jika dibandingkan dengan jumlah penduduk sebelum skenario, peningkatannya sebesar 9.9 %.

B. Implikasi pada variabel konsumsi listrik

Pada konsumsi listrik mengalami peningkatan rata – rata 7,8 % setiap tahunnya, dan jika dibandingkan sebelum dilakukan skenario peningkatannya rata – rata lebih besar 28,1 %.

C. Implikasi pada variabel PLT batubara

Dengan skenario gabungan ini, juga berimplikasi pada jumlah produksi listrik batubara, yang mana bila dibandingkan dengan sebelum dilakukan skenario mengalami peningkatan rata – rata 78 %. Hal ini dikarenakan skenario yang dilakukan diarahkan pada pengurangan produksi listrik dari PLT minyak dan Gas.

D. Implikasi pada variabel kebutuhan batubara untuk listrik

Akibat dari skenario gabungan ini juga berimplikasi pada jumlah batubara untuk listrik yang semakin meningkat dari tahun ke tahun rata – rata 7,1 % setiap tahun. Dan yang perlu dicatat dari hasil simulasi ini, semakin lama seiring bertambahnya waktu kebutuhan batubara untuk listrik akan terhambat oleh variabel eksogen konsumsi batubara untuk luar wilayah Kaltim yang diasumsikan 40 %, sedangkan kebutuhan untuk listrik semakin besar.

E. Implikasi pada variabel produksi batubara

Dengan skenario gabungan ini, produksi batubara meningkat rata – rata 3,6 % setiap tahunnya. Produksi batubara sebagai variabel endogen disini akan dipengaruhi oleh variabel eksogen seperti cadangan batubara yang lambat laun juga akan berkurang, sementara kebutuhan batubara akan terus semakin meningkat baik untuk kebutuhan listrik juga kebutuhan sektor lain.

4.3.2. Penentuan Kebijakan Terbaik

Pembahasan selanjutnya pada bagian ini adalah penentuan kebijakan yang paling baik (best solution) yang memungkinkan untuk dilakukan. Penentuan kebijakan disini berdasarkan pada berbagai unique solution hasil dari skenario terhadap variabel eksogen dan variabel external yang tidak dapat dikontrol. Dalam penentuan kebijakan disini melibatkan beberapa *actor analysis* yang memiliki kewenangan dalam hal penentuan kebijakan. *Actor analysis* yang berperan dalam penentuan kebijakan disini adalah sebagai berikut :

1. Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur, yang memiliki kebijakan dalam hal jumlah penduduk melalui program pengendalian pertumbuhan penduduk. Selain itu juga memiliki kebijakan dalam hal pengendalian cadangan batubara dan konsumsi batubara untuk luar wilayah Kalimantan Timur.
2. PLN Wilayah Kalimantan Timur, yang memiliki kebijakan dalam hal produksi pembangkit tenaga listrik.

Berdasarkan variabel – variabel yang telah ditentukan sebelumnya dan keterkaitannya pada gambar 3.2 terdahulu, variabel eksogen pada model batubara untuk listrik ini adalah :

1. jumlah penduduk
2. pertumbuhan ekonomi
3. cadangan batubara
4. produksi listrik dari pembangkit bahan bakar gas, minyak dan non fosil.
5. konsumsi batubara untuk luar Kaltim

Dengan mengacu pada hasil simulasi setelah dilakukan berbagai skenario pada pembahasan sebelumnya, yang merupakan kondisi yang tidak terprediksi (external shocks) adalah melonjaknya harga minyak dunia yang diikuti oleh meningkatnya harga batubara juga, sehingga dimungkinkan pemerintah daerah melakukan penjualan batubara ke luar Kaltim untuk menambah pendapatan daerah.

Sedangkan untuk variabel kebijakan pada variabel eksogen yang bisa dimainkan adalah :

1. Kebijakan untuk jumlah penduduk , dalam hal ini adalah pada nilai angka kelahiran, setelah melalui beberapa trial and error, ditentukan angka kelahiran adalah sebesar 3 % per tahun.

2. Untuk pertumbuhan ekonomi memang tidak bisa ditentukan atau dirancang secara pasti, dan juga tidak bisa menekannya meskipun semakin tinggi pertumbuhan ekonomi juga menunjukkan tingkat konsumsi yang semakin tinggi pula, namun yang bisa dilakukan kebijakan adalah pada penghematan pemakaian listrik yang kaitannya adalah pada listrik perkapita dan bisa dilakukan kebijakan untuk menekan listrik perkapita secara konstan menjadi 0, 27 MWh dan juga dengan tingginya laju perekonomian dioptimalkan melakukan penghematan pemakaian listrik melalui penggunaan alat – alat listrik yang hemat terhadap energi listrik, yang mana dalam pemodelan ini tidak diperhitungkan.
3. Kebijakan yang dapat dilakukan pada cadangan batubara adalah pada jumlah temuan – temuan cadangan terbukti yang berkaitan dengan potensi batubara yang ada, sedangkan proses pembentukan potensi batubara merupakan kondisi yang tidak dapat terkendali.
4. Pada produksi listrik pembangkit gas, minyak, dan non fosil dapat dilakukan kebijakan melalui trial and error pada model sehingga menemukan nilai yang paling baik dan memungkinkan berkaitan dengan produksi pada pembangkit batubara, dan nilai yang optimum adalah untuk pembangkit minyak hanya mencapai 5 % yang dibutuhkan untuk PLTD pada daerah – daerah yang secara geografis jauh terpencil, sedang untuk pembangkit gas dikurangi hingga mencapai 12 % dan untuk pembangkit non fosil diupayakan meningkat menjadi 40 %.
5. Dan pada variabel konsumsi batubara ke luar Kaltim, setelah dilakukan trial and error ditentukan nilai terbaik yang memungkinkan adalah 35 %.

Dengan berdasar pada kebijakan – kebijakan tersebut di atas, yang merupakan unique solution, dilakukanlah simulasi dan menghasilkan nilai pada variabel endogen sebagai berikut :

Tabel 4.24. Tabel Hasil Simulasi Berdasarkan variabel Kebijakan dan External Shocks

Time	Jlh_Penduduk	Konsumsi_Listrik	PLT_Batubara	BB_Untuk_Listrik	Prod_BB (ton/yr)
Jan 01, 2008	3,775,103.00	2,450,041.85	1,601,242.18	3,522,732.80	17,940,000.00
Jan 01, 2009	3,875,520.74	2,612,100.98	1,807,009.76	3,975,421.47	18,550,318.80
Jan 01, 2010	3,978,609.59	2,785,026.71	2,031,211.86	4,468,666.08	19,181,400.65
Jan 01, 2011	4,084,440.61	2,969,388.32	2,162,043.58	4,756,495.88	19,833,951.90
Jan 01, 2012	4,193,086.73	3,165,780.48	2,300,408.25	5,060,898.15	20,508,702.94
Jan 01, 2013	4,304,622.83	3,417,870.53	2,481,729.02	5,459,803.85	21,206,409.01
Jan 01, 2014	4,419,125.80	3,694,389.17	2,679,989.36	5,895,976.60	21,927,851.05
Jan 01, 2015	4,536,674.55	3,992,273.60	2,892,762.41	6,364,077.30	22,673,836.54
Jan 01, 2016	4,657,350.09	4,317,363.53	3,110,425.46	6,842,936.02	23,445,200.46
Jan 01, 2017	4,781,235.60	4,666,485.95	3,347,196.33	7,363,831.92	24,242,806.18
Jan 01, 2018	4,908,416.47	5,050,760.55	3,595,368.67	7,909,811.08	25,067,546.45
Jan 01, 2019	5,038,980.35	5,467,293.68	3,867,214.78	8,507,872.51	25,920,344.38
Jan 01, 2020	5,173,017.23	5,400,629.98	3,799,915.69	8,359,814.52	26,802,154.49

dengan nilai awal variabel – variabel endogen tersebut, maka yang didapatkan dari berbagai unique solution hasil dari skenario akan lebih memberikan keadaan yang terbaik terkait dengan kebijakan pemanfaatan batubara untuk pemenuhan tenaga listrik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Karakteristik dinamis yang mempengaruhi penggunaan batubara pada sektor tenaga listrik adalah : cadangan batubara, produksi listrik pembangkit lain, pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi yang menjadi faktor penentu kebutuhan listrik serta konsumsi batubara untuk luar Kaltim .
2. Model simulasi yang telah dibangun yaitu terdiri dari model sub sistem kebutuhan listrik, sub sistem produksi listrik dan sub sistem batubara memiliki penyimpangan yang diukur dengan AME (Absolute Mean Error) di bawah 5%.
3. Penggunaan batubara untuk pemenuhan tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh besarnya permintaan konsumen akan energi listrik. Dari hasil simulasi diketahui bahwa selama periode tahun 2000 – 2010 kebutuhan listrik diperkirakan akan mengalami pertumbuhan rata – rata sebesar 6,43% per tahun, atau terjadi peningkatan dari 904.711,67 MWh pada tahun 2000 menjadi 1.401.053,21 MWh pada tahun 2010 atau meningkat sebesar 64,57%, dan selama periode tahun 2010 – 2020 kebutuhan listrik mengalami peningkatan sebesar 67,62%. Dengan kondisi tersebut laju kebutuhan batubara untuk tenaga listrik rata – rata 6,11% per tahun atau 68.168 ton per tahun, dimana untuk periode 2000 – 2010 rata – rata sebesar 59.589 ton (5,47%) dan 74.927 ton (6,8%) untuk periode 2011 – 2020.
4. Implikasi dari skenario yang dilakukan pada variabel eksogen terhadap variabel endogen berdasarkan hasil simulasi di atas adalah sebagai berikut :
 - a. Implikasi pada variabel jumlah penduduk
Dengan menggunakan angka kelahiran meningkat tajam menjadi 5% dan angka kematian turun menjadi 0,3% dengan asumsi tingkat kesehatan dan kesejahteraan penduduk Kaltim yang semakin meningkat, maka pada hasil simulasi pertambahan penduduk meningkat rata – rata 4,9% setiap tahunnya, sehingga jumlah penduduk meningkat pesat. Dan jika dibandingkan dengan jumlah penduduk sebelum skenario, peningkatannya sebesar 9.9%.
 - b. Implikasi pada variabel konsumsi listrik

Pada konsumsi listrik mengalami peningkatan rata – rata 7,8% setiap tahunnya, dan jika dibandingkan sebelum dilakukan skenario peningkatannya rata – rata lebih besar 28,1%.

c. Implikasi pada variabel PLT batubara

Dengan skenario gabungan ini, juga berimplikasi pada jumlah produksi listrik batubara, yang mana bila dibandingkan dengan sebelum dilakukan skenario mengalami peningkatan rata – rata 78%. Hal ini dikarenakan skenario yang dilakukan diarahkan pada pengurangan produksi listrik dari PLT minyak dan Gas.

d. Implikasi pada variabel kebutuhan batubara untuk listrik

Akibat dari skenario gabungan ini juga berimplikasi pada jumlah batubara untuk listrik yang semakin meningkat dari tahun ke tahun rata – rata 7,1% setiap tahun. Dan yang perlu dicatat dari hasil simulasi ini, semakin lama seiring bertambahnya waktu kebutuhan batubara untuk listrik akan terhambat oleh variabel eksogen konsumsi batubara untuk luar wilayah Kaltim yang diasumsikan 40%, sedangkan kebutuhan untuk listrik semakin besar.

e. Implikasi pada variabel produksi batubara

Dengan skenario gabungan ini, produksi batubara meningkat rata – rata 3,6% setiap tahunnya. Produksi batubara sebagai variabel endogen disini akan dipengaruhi oleh variabel eksogen seperti cadangan batubara yang lambat laun juga akan berkurang, sementara kebutuhan batubara akan terus semakin meningkat baik untuk kebutuhan listrik juga kebutuhan sektor lain.

5. Kebijakan terbaik yang dapat dilakukan berdasarkan dari unique solution yang memberikan nilai pada variabel endogen paling baik dan memungkinkan adalah dengan mempertahankan angka kelahiran penduduk Kaltim sebesar 3% per tahun, konsumsi listrik perkapita penduduk sebesar 0,27 MWh, melakukan penelitian secara terus – menerus pada potensi batubara dan cadangan batubara dan mengontrol laju penambangan pada nilai konstanta 0,24 %/tahun.
6. Produksi listrik dari pembangkit minyak ditekan menjadi 5% dari produksi listrik secara keseluruhan, pembangkit gas sebesar 12%, dan untuk pembangkit non fosil diupayakan mencapai 40%.

Pada bagian bab terakhir ini, penulis dapat memberikan saran – saran untuk upaya penelitian – penelitian di bidang pemodelan sehingga dapat memberikan hasil yang lebih baik untuk perkembangan ilmu dan teknologi, saran – saran yang dapat disampaikan adalah sebagai berikut :

1. Mengingat bahwa penelitian ini dibatasi oleh banyak anggapan/asumsi, antara lain pentingnya batubara sebagai bahan bakar pembangkit listrik serta beberapa asumsi lain, maka dalam penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengurangi atau menghilangkan asumsi – asumsi tersebut di atas atau menggantinya dengan asumsi – asumsi lain.
2. Penelitian ini dibatasi dengan menyajikan beberapa variabel saja dengan persamaan yang sederhana dan jumlahnya tidak banyak. Padahal untuk model yang lebih lengkap dibutuhkan banyak variabel serta jumlah persamaan yang lebih banyak. Karena itu disarankan agar penelitian selanjutnya untuk menggunakan model yang lebih lengkap.
3. Mengingat bahwa program Powersim mampu pula untuk melakukan regresi atas persamaan – persamaan yang sifatnya non-linear, maka disarankan pula untuk melakukan penelitian yang menggunakan Powersim tanpa anggapan linearisasi.
4. Dari penelitian ini juga dapat disimpulkan bahwa model sistem dinamik dengan simulasi yang menggunakan program Powersim dapat diaplikasikan untuk banyak ragam pemodelan seperti model – model pada bidang sosial, ekonomi, dan teknik yang lain, tanpa mengurangi perhatian terhadap berbagai kelemahan powersim dibanding dengan peralatan simulasi yang lain (Pamungkas, 1984)

DAFTAR REFERENSI

John D. Sterman (2000) *“Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Mc Graw-Hill

J. W. Forrester, *“ Dynamics Systems Method “* , MIT Amerika

Muhammadi, Erman Aminullah, Budhi Soesilo (2001) *“Analisis Sistem Dinamis”* UMJ Press, Jakarta

Muhammad Tasrif, *“Systems Thinking and Dynamic Modeling “* Pusat penelitian Energi Institut Teknologi Bandung

Pamungkas, Sri Bintang (1984), *“A Medium – Term Multi – Sectoral Dynamic Simulation Model Of The Indonesian Economy“* , Ames : Iowa State University.

Pamungkas, Sri Bintang (1991) *“Teknik Numerik”*, Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta

“Powersim The Complete Software Tool for Dynamic Simulation”, User’s Guide and Reference

Robert L. Woods, Kent L. Lawrence (1997), *“Modeling And Simulation Of Dynamics Systems”*, Prentice-Hall, Inc, University of Texas at Arlington

“Statistik Batubara dan Sumber Daya Mineral”, Departemen Energi dan Sumber daya Mineral, Jakarta 2002

“Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2001”, Ditjen Listrik dan pengembangan Energi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta 2002

Undang – Undang Republik Indonesia No.20 tahun 2002 tentang Ketenagalistrikan

Zuhal, (1995) *“Ketenagalistrikan Indonesia”* PT.Ganeca Prima, jakarta