

# OPTIMASI PENYEDIAAN ENERGI NASIONAL: KONSEP DAN APLIKASI MODEL MARKAL<sup>1</sup>

Agus Sugiyono - sugiyono@webmail.bppt.go.id  
Endang Suarna - e\_suarna1@yahoo.com

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi  
(BPPT)

## Abstract

An increase of energy demand should be supported by the reliable of energy supply to fulfill the demand. Taken into consideration depletion of energy resources and limitation of financial ability for energy sector, an integrated energy planning is needed. MARKAL model is one of representative tools to make the integrated energy planning. This model is a dynamic model to optimize the energy supply.

Conceptually, optimization in MARKAL model uses linear programming (LP) technique to allocate energy supply. Objective function of the model is minimizing total energy cost with technological and resource constraint to fulfill the demand. General Algebraic of Modelling System (GAMS) software used in the model to solve LP problem. In recent application, the MARKAL model is an integrated software using user interfaces called ANSWER. By using Windows based personal computer (PC), therefore the optimization process and result analysis becomes more interactive and relatively easy to performed.

Key words: optimization, LP, GAMS, energy supply, MARKAL

## 1. Pendahuluan

Peranan energi dalam pembangunan di Indonesia sangat besar. Energi mempunyai peran ganda, yaitu sebagai penghasil devisa melalui ekspor komoditas energi dan sebagai bahan bakar serta bahan baku untuk penggerak kegiatan perekonomian yang mendukung industrialisasi. Seiring dengan pertumbuhan ekonomi, diperkirakan permintaan energi akan terus meningkat. Karena adanya keterbatasan sumber daya energi maka perlu mengoptimalkan penggunaan energi melalui perencanaan energi terpadu.

Studi mengenai perencanaan energi sangat bervariasi. Kajian dapat dilakukan dari sistem perencanaan yang sederhana sampai sistem yang kompleks sehingga menghasilkan perencanaan energi terpadu. Alat yang digunakan untuk perencanaan energi dapat berupa model energi. Berbagai model energi telah dikembangkan untuk membantu perencanaan energi, model yang berdasarkan ekonometrika atau teknik statistika banyak digunakan untuk membuat proyeksi kebutuhan energi jangka panjang. Sedangkan untuk strategi penyediaan energi, banyak digunakan teknik optimasi dengan fungsi obyektif tertentu.

Pada era tahun 1980, perencanaan energi masih membutuhkan komputer *mainframe* yang memerlukan ruangan yang besar serta sistem pendingin khusus. Penggunaan komputer jenis ini memerlukan biaya investasi dan biaya operasi yang tinggi. Saat ini perencanaan energi sudah cenderung menggunakan personal komputer (PC) karena didukung oleh kemampuan prosesor yang semakin baik, waktu proses makin cepat, kapasitas memori dan kapasitas *hard-disk* yang semakin besar serta relatif murah harganya. Prosesor yang sekarang banyak digunakan yaitu Pentium IV dengan *hardisk* 40 GByte. Prosesor ini dapat melakukan proses pada kecepatan di atas 1.000 MHz dengan *memory* 128 MByte. Dengan PC yang tersedia saat ini maka kemampuannya sudah menyamai komputer *mainframe* pada era tahun 1980.

Sejalan dengan perbaikan kemampuan dari perangkat keras, perangkat lunak PC juga terus mengalami perbaikan. *Speed sheet* seperti EXCEL merupakan perangkat lunak yang telah banyak dipakai dalam perencanaan energi. Disamping itu perangkat lunak yang khusus didesain untuk perencanaan energi sudah banyak digunakan seperti MARKAL (*Market Allocation*), EFOM (*Energy Flow Optimisation Model*), LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning System*) dan ENPEP (*Energy and Power Evaluation Programme*). Masing-masing perangkat lunak mempunyai kelebihan dan kelemahan. Model MARKAL dan EFOM menggunakan teknik optimasi, sedangkan LEAP menggunakan teknik simulasi untuk mengevaluasi berbagai pilihan teknologi penyediaan energi. Model ENPEP menggunakan pendekatan keseimbangan antara permintaan dan penyediaan energi berdasarkan harga dan kuantitas energi. Model MARKAL merupakan

---

<sup>1</sup> Dipresentasikan pada Seminar Nasional Matematika, Statistika, dan Pendidikan Matematika, Jurusan Matematika, Universitas Padjajaran, Bandung, 22 April 2006

model yang sangat rinci dalam merepresentasikan teknologi dan sudah banyak digunakan baik di negara maju maupun negara berkembang. Model ini juga mampu untuk memodelkan permasalahan sistem energi yang sangat kompleks. Dalam makalah ini akan dibahas lebih lanjut konsep dan aplikasi dari model MARKAL untuk optimasi penyediaan energi.

## 2. Konsep Optimasi

Teknik optimasi saat ini sudah banyak digunakan untuk menyelesaikan persoalan yang kompleks baik di bidang ilmu teknik, *operation research*, maupun ilmu ekonomi. Teknik ini berkembang pesat khususnya setelah G. Danzig pada tahun 1947 memperkenalkan metode *simplex* untuk menyelesaikan *linear programming* (LP). LP merupakan alat yang sangat bermanfaat untuk menyelesaikan permasalahan alokasi sumber daya secara efisien. Sebelum itu, J. von Neumann dan O. Morgenstern memperkenalkan *game theory* yang erat hubungannya dengan LP diikuti oleh penemuan H.W. Kuhn dan A.W. Tucker yang memberikan landasan untuk menyelesaikan *nonlinear programming* (Fryer and Greenman, 1987; Cornuejols and Trick, 1998).

Secara umum optimasi dapat dibagi menjadi optimasi tanpa kendala dan optimasi dengan kendala. Untuk optimasi tanpa kendala, persamaan yang akan dioptimasi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_i) \quad (1)$$

Kondisi optimal (maksimum atau minimum) dicapai bila memenuhi kondisi berikut ini:

$$\frac{\partial g}{\partial X_i} = 0 \quad (2)$$

Sedangkan optimasi dengan kendala, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Maksimumkan (minimumkan):} \quad g(X) \quad (3)$$

$$\text{Kendala:} \quad h_j(X) = b_j \text{ dan } X \geq 0 \quad (4)$$

Persamaan (3) dan (4) dapat diselesaikan dengan menggunakan *Lagrangean multiplier* seperti dinyatakan dalam Persamaan (5):

$$L = g(X) - \sum \lambda_j [h_j(X) - b_j] \quad (5)$$

Kondisi optimal dicapai bila memenuhi kondisi berikut ini:

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = 0 \quad (7)$$

Bentuk khusus dari optimasi dengan kendala adalah LP.

### 2.1. Linear Programming (LP)

LP merupakan metode yang banyak digunakan diberbagai disiplin ilmu karena dapat menyelesaikan persamaan yang mempunyai orde besar dengan ribuan variabel dan kendala. Tidak seperti pada optimasi dengan kendala biasa, penyelesaian LP tidak menggunakan persamaan diferensial seperti pada Persamaan (6) dan (7). Secara umum persoalan dalam LP dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Maksimumkan (minimumkan):} \quad Y = \sum c_i X_i \quad (8)$$

$$\text{Kendala:} \quad \sum_i a_{ij} X_i \geq b_j \quad (9)$$

Metode *simplex* merupakan metode yang efisien digunakan untuk menyelesaikan persoalan LP. Berbagai paket program komputer telah dikembangkan untuk keperluan tersebut.

### 2.2. GAMS

*General Algebraic of Modelling System* (GAMS) merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan *mathematical programming*, termasuk LP. Persoalan *mathematical*

*programming* yang dapat diselesaikan menggunakan GAMS ditunjukkan pada Tabel 1. GAMS mempunyai beberapa modul *optimizer* atau *solver* yang digunakan untuk mengoptimasi. Satu *optimizer* sering dapat digunakan untuk menyelesaikan beberapa jenis persoalan dalam *mathematical programming*.

Tabel 1. Persoalan yang Dapat Diselesaikan Menggunakan GAMS

Persoalan	Keterangan	Optimizer/Solver						
		CONOPT	DECIS	DICOPT	NLPEC	OSL	PATH	XPRESS
LP	<i>Linear programming</i>	√				√		√
NLP	<i>Nonlinear programming</i>	√						
DNLP	<i>Nonlinear programming with discontinuous derivative</i>	√						
MIP	<i>Mixed integer programming</i>					√		√
RMIP	<i>Relaxed mixed integer programming</i>	√				√		√
MINLP	<i>Mixed integer nonlinear programming</i>			√				
RMINLP	<i>Relaxed mixed integer nonlinear programming</i>	√						
MPEC	<i>Mathematical program with equilibrium constraints</i>				√			
MCP	<i>Mixed complementary problem</i>				√		√	
CNS	<i>Constrained nonlinear system</i>	√					√	
Stoch.	<i>Stochastic problem</i>		√					

Keterangan: - Tanda √ menyatakan *solver* yang dapat digunakan.  
 - Masih ada beberapa *solver* alternatif yang tidak dicantumkan di sini.

### 3. Model MARKAL

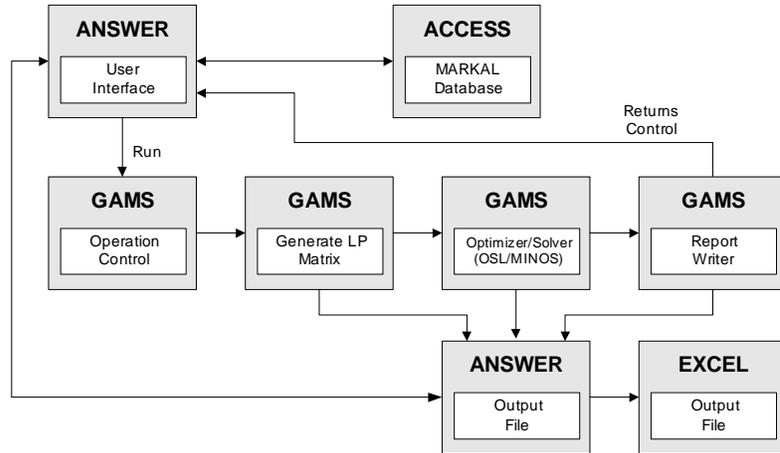
Model MARKAL merupakan model untuk optimasi penyediaan energi dengan menggunakan teknik LP. Model ini dikembangkan pertama kali pada tahun 1980 oleh KFA Jerman dan BNL Amerika Serikat. Kemudian digunakan oleh konsorsium yang disebut ETSAP (*Energy Technology System Analysis Programme*) yang disponsori oleh *International Energy Agency* (IEA). MARKAL sejak dikembangkan pada tahun 1980 hingga saat ini sudah banyak mengalami perkembangan.

Pada awalnya MARKAL dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman OMNI yang hanya dapat dioperasikan untuk komputer *mainframe*. Kemudian dibuat lebih interaktif dengan menggunakan *user interface* yang disebut MUSS (*MARKAL User Support System*) dan dapat dioperasikan menggunakan PC dengan *Disk Operating Sistem* (DOS). MUSS dikembangkan dengan menggunakan *C language programming*, sedangkan program MARKAL ditulis dalam bahasa pemrograman XPRESS. Pada tahun 1996 ABARE (*Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics*) mengembangkan *user interface* yang lebih baik dengan menggunakan PC yang berbasis Windows yang disebut ANSWER. ANSWER dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman Visual Basic dan memanfaatkan Access database sebagai media untuk penyimpanan data. Program MARKAL ditulis menggunakan GAMS yang mempunyai kemampuan lebih baik dalam optimasi karena mempunyai beberapa *solver* alternatif. Integrasi model ini sering disebut ANSWER-MARKAL dan secara garis besar sistem operasinya ditunjukkan pada Gambar 1.

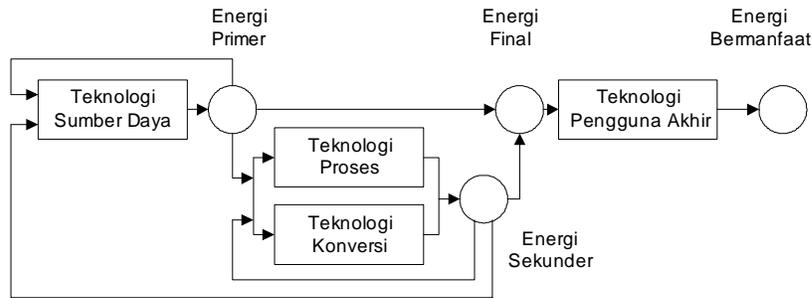
#### 3.1. Struktur

Langkah awal dalam pembuatan model menggunakan MARKAL adalah membuat *Reference Energy System* (RES). RES merepresentasikan keterkaitan antar keseluruhan sektor energi, yang meliputi: sumber daya energi, proses dan konversi energi, serta pengguna akhir (Gambar 2). Ada empat kategori teknologi dalam RES ini, yaitu:

- Teknologi sumber daya (*resource technology*), seperti: penambangan, impor dan ekspor.
- Teknologi proses yang mengubah dari satu bentuk energi menjadi bentuk energi lainnya, misalnya kilang minyak dan pencairan batubara.
- Teknologi konversi, yang mengubah energi primer menjadi tenaga listrik atau panas.
- Teknologi pengguna akhir (*end use*), yang mengubah satu bentuk energi final menjadi energi bermanfaat (*useful energy*), seperti penggunaan peralatan kompor untuk memasak, lampu penerangan, dan ketel uap. Setiap teknologi, mulai dari sumber (energi primer) hingga pengguna akhir dihubungkan dengan *energy carrier* yang merupakan energi sekunder.



Gambar 1. Sistem Operasi ANSWER-MARKAL



Gambar 2. Reference Energy System (diadaptasi dari Kleemann and Wilde, 1990)

Berdasarkan RES yang sudah dibuat dan data untuk masing-masing teknologi maka model akan membuat formulasi permasalahan dalam bentuk matriks LP yang dapat dioptimasi dengan menggunakan *solver* yang tersedia.

### 3.2. Persamaan

Persamaan yang digunakan model MARKAL cukup kompleks karena mempertimbangkan setiap operasi dari berbagai teknologi yang digunakan. Meskipun demikian secara sederhana berupa persamaan LP yang secara matematis ditunjukkan pada Persamaan 10, 11, dan 12.

$$Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (10)$$

Variabel Z adalah fungsi obyektif, yang dalam hal ini adalah meminimumkan total biaya penyediaan energi dengan suatu fungsi kendala seperti di bawah ini.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i \quad (11)$$

$$u_j \geq X_j \geq l_j \geq 0 \quad (12)$$

dengan :

- $i = 1, 2, \dots, m$  adalah indeks untuk menyatakan baris
- $j = 1, 2, \dots, n$  adalah indeks untuk menyatakan kolom
- $X_j$  adalah variabel yang juga disebut vektor di kolom j yang menyatakan penggunaan teknologi energi setiap tahun.

- $a_{ij}$ ,  $b_i$ , dan  $C_j$  masing-masing adalah koefisien yang dapat berupa efisiensi *thermal*, biaya investasi, biaya operasi dan perawatan, serta umur ekonomis dan lama waktu beroperasi setiap tahun untuk setiap teknologi energi.
- $u_j$  dan  $l_j$  adalah batas atas dan batas bawah bagi variabel  $X_j$ .

### 3.3. Pengembangan

Model MARKAL yang digunakan di Indonesia saat ini menggunakan ANSWER-MARKAL dan studi perencanaan energi yang telah dilakukan hanya menggunakan MARKAL standar. Masih banyak variasi yang ditawarkan oleh ANSWER-MARKAL untuk membuat model yang lebih mendekati dunia nyata. Beberapa variasi pengembangan model yang dapat dilakukan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Beberapa Variasi Pengembangan Model MARKAL

Variasi MARKAL	Persoalan	Keterangan
MARKAL-Standard	LP	Permintaan energi dianggap tetap dan merupakan variabel eksogen
MARKAL-MACRO	NLP	Menggabungkan model ekonomi makro dan permintaan energi merupakan variabel endogen
MARKAL-MICRO	NLP	Menggabungkan model ekonomi mikro dan permintaan energi merupakan variabel endogen dan dipengaruhi oleh perubahan harga
MARKAL elastic demand	LP	Seperti pada MARKAL-MICRO tetapi permintaan energi berupa fungsi <i>step-wise linear</i>
MARKAL with material flow	LP	Memasukkan material seperti dalam perhitungan energi
MARKAL with uncertainties	LP, Stoch.	<i>Stochastic programming</i>
MARKAL-ETL	MIP	Biaya akan menurun yang merupakan fungsi dari <i>learning curve</i>
MARKAL multi region	LP	<i>Multi region</i> yang dihubungkan dengan perdagangan energi

Keterangan: masih banyak variasi pengembangan dengan menggabungkan beberapa variasi di atas menjadi satu.

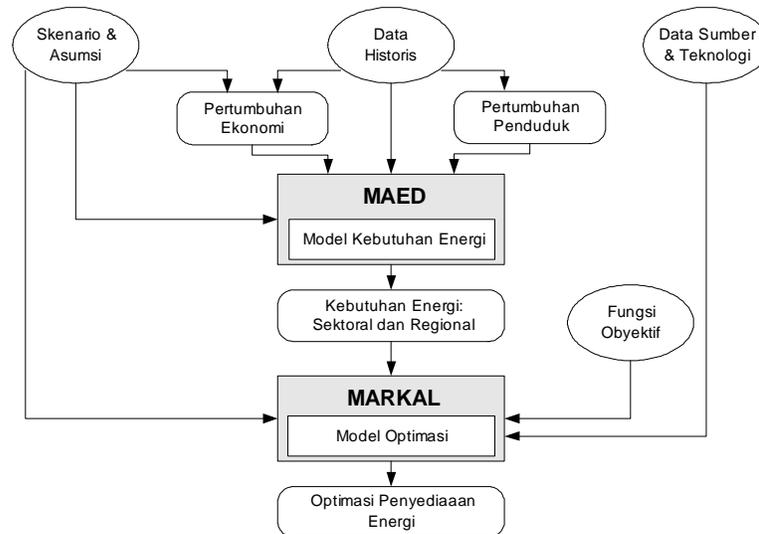
## 4. Aplikasi Model MARKAL

Aplikasi model MARKAL untuk optimasi penyediaan energi memerlukan data masukan kebutuhan energi, dan data sumber daya energi serta teknologi pemanfaatan energi yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut. Faktor utama yang menentukan tingkat permintaan energi adalah pertumbuhan ekonomi, jumlah penduduk, harga energi dan pola konsumsi energi di masa lampau. Berdasarkan proyeksi permintaan energi ini dibuat formulasi penyediaan energi dengan mempertimbangkan sumber daya yang tersedia, teknologi pemanfaatan energi dan kemampuan pemerintah maupun swasta melakukan investasi untuk pengembangan sektor energi. Hasil dari optimasi penyediaan energi adalah suatu strategi penyediaan energi yang optimal dimasa datang (Gambar 3). Strategi ini dapat menjadi masukan bagi formulasi kebijakan energi nasional.

### 4.1. Penggunaan MARKAL di Indonesia

Saat ini model MARKAL sudah dipergunakan baik di negara maju maupun di negara berkembang. Lebih dari 55 negara menggunakannya untuk perencanaan energi nasional. Di Indonesia saat ini ada empat institusi yang mempunyai lisensi untuk menggunakannya, yaitu: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), ASEAN Centre for Energy (ACE), Badan Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi (BP Migas), serta Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM).

Penggunaan model MARKAL di Indonesia telah dimulai sejak tahun 1980 dengan dibentuknya tim perencanaan energi antar institusi dengan BPPT sebagai koordinator dan bekerja sama dengan KFA Jerman. Pada awalnya digunakan komputer *mainframe* Pertamina untuk melakukan optimasi. Sejak tahun 1993, sudah digunakan MUSS-MARKAL yang menggunakan PC. Hasil studi yang sudah dilakukan diantaranya adalah perencanaan energi nasional dengan mempertimbangkan dampak lingkungan. Pada tahun 1997 BPPT bekerja sama dengan ABARE menggunakan ANSWER-MARKAL. Kemudian disusul penggunaan ANSWER-MARKAL oleh ACE bekerja sama dengan BPPT untuk membuat perencanaan energi terintegrasi di negara ASEAN pada tahun 2001. Pada tahun 2003, BP Migas bersama dengan BPPT menggunakan ANSWER-MARKAL untuk membuat optimasi penggunaan gas alam di Indonesia. DESDM bekerja sama dengan BPPT pada tahun 2006 mulai menggunakan ANSWER-MARKAL untuk membuat perencanaan energi sebagai masukan bagi pembuatan Kebijakan Energi Nasional (KEN).



Gambar 3. Diagram Alir Perencanaan Energi menggunakan Model MARKAL

#### 4.2. Optimasi Penyediaan Energi

Perencanaan energi dengan menggunakan model MARKAL di Indonesia sudah cukup banyak dilakukan (BPPT *Energy Planning Team* and Djojonegoro 2005). Dalam makalah akan dirangkumkan hasil studi BPPT menggunakan model MARKAL. Dalam studi ini Indonesia dibagi menjadi empat wilayah, yaitu: Jawa, Sumatera, Kalimantan, dan Pulau-pulau lain. Studi dimulai dengan tahun dasar 2000 dan dianalisis sampai tahun 2030. Asumsi yang digunakan adalah *discount rate* sebesar 10%, harga minyak bumi tahun 2000 – 2004 sebesar 28 US \$/barel dan mulai tahun 2005 sebesar 40 US\$/barel.

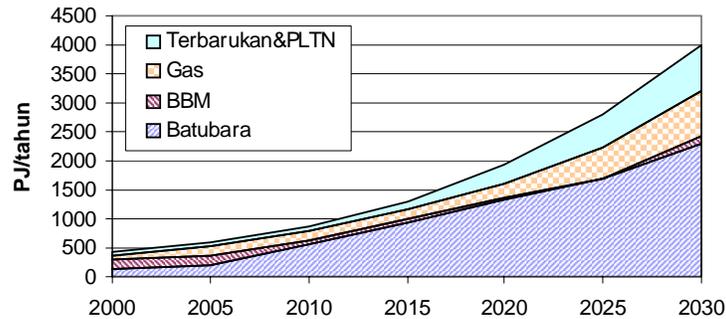
Database untuk Indonesia mempunyai lebih dari 280 teknologi dengan lebih dari 160 *energy carrier*. Matriks LP mempunyai lebih dari 22.000 variabel dan 22.000 persamaan. Keluaran model MARKAL dapat berupa kapasitas terpasang dan aktivitas untuk setiap jenis teknologi, konsumsi energi final, produksi energi primer, biaya produksi dan *shadow price* untuk setiap jenis energi. Hasil yang ditampilkan di sini hanya untuk pembangkit tenaga listrik pada kasus dasar yang menganggap bahwa perkembangan perekonomian sesuai dengan kondisi saat ini. Lebih dari 80 macam teknologi pembangkit tenaga listrik digunakan dalam model ini, baik yang sudah komersial saat ini maupun teknologi baru. Untuk lebih mempermudah analisis, teknologi pembangkit tenaga listrik digabung menjadi 4 macam sesuai dengan bahan bakarnya, yaitu:

- Batubara
- Bahan bakar minyak (BBM) termasuk di dalamnya minyak bakar dan minyak diesel
- Gas termasuk turbin gas dan turbin kombinasi gas-uap
- Energi terbarukan dan energi nuklir termasuk pembangkit listrik tenaga air, tenaga panas bumi, biomasa dan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN).

Hasil optimasi menunjukkan bahwa penyediaan tenaga listrik akan didominasi oleh pembangkit listrik batubara, diikuti oleh pembangkit listrik gas dan penggunaan energi terbarukan. Pembangkit tenaga listrik batubara mengalami pertumbuhan sebesar 9,7% per tahun. Pada akhir periode analisis, batubara merupakan bahan bakar terbanyak dengan pangsa sebesar 58%. Energi terbarukan mempunyai pangsa 20% dan pangsa penggunaan gas hanya sebesar 19%.

#### 5. Kesimpulan dan Saran

Model MARKAL merupakan salah satu alat yang dapat digunakan untuk perencanaan energi terpadu. Model ini merupakan model dinamik untuk optimasi penyediaan energi. Secara konsep, optimasi dalam model MARKAL menggunakan teknik LP untuk mengalokasikan penyediaan energi dengan fungsi obyektif meminimumkan total biaya penyediaan energi dan dengan kendala teknologi serta sumber daya energi untuk memenuhi kebutuhan energi. Dalam aplikasi, model MARKAL sudah merupakan perangkat lunak terintegrasi dengan user interface yang disebut ANSWER dan dapat dijalankan dengan menggunakan PC. Perangkat lunak GAMS merupakan salah satu modul ANSWER yang digunakan untuk optimasi. Dengan menggunakan PC yang berbasis Windows maka proses optimasi dan analisis menjadi lebih interaktif dan relatif mudah untuk dikerjakan.



Gambar 4. Proyeksi Penyediaan Energi Listrik

Model MARKAL terus mengalami evolusi dan makin mudah untuk digunakan. Saat ini telah dikembangkan model TIME yang merupakan penggabungan dua model yaitu MARKAL dengan EFOM. Dengan semakin banyak alternatif model yang digunakan maka dapat dibuat perencanaan energi yang lebih baik dan hasil perencanaan satu dengan yang lainnya dapat saling melengkapi. Sejalan dengan itu, di Indonesia studi menggunakan ANSWER-MARKAL perlu dikembangkan dengan menggunakan beberapa variasi dari MARKAL standar.

#### Daftar Pustaka

- BPPT *Energy Planning Team* and Djojonegoro, W. (2005) *Application of Markal Model in Indonesia*, Presented at National Seminar on Operations Research and Its Applications, Mathematics Department, University of Padjadjaran, Bandung, 27 August 2005.
- Brooke, A., D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman (1998) *GAMS: A User's Guide*, GAMS Development Corporation, USA.
- Cornuejols, G. and Trick, M. (1998) *Quantitative Methods for the Management Science*, Course Note No.45-760, Carnegie Mellon University.
- Fryer, M.J. and Greenman, J.V. (1987) *Optimisation Theory: Application in OR and Economics*, Edward Arnold. London.
- Haurie (2001) *MARKAL-LITE: An Energy/Environment Model to Assess Urban Sustainable Development Policy*, University of Geneva.
- Jacobs, B (1999) *ANSWER: MARKAL Energy Modelling for Windows*, ABARE, Canberra.
- Kleemann, M. and Wilde, D. (1990) Intertemporal Capacity Expansion Models, *Energy - The International Journal*, Vol.15, No.7/8, p.549-571, Pergamon Press, UK.
- Loulou, R., Goldstein, G., and Noble, K. (2004) *Documentation for the MARKAL Family of Models*, Energy Technology Systems Analysis Programme, October 2004.
- Sugiyono, A. (1995) Metodologi Studi Markal, Dipresentasikan pada *Workshop on Environmental Analysis Using Energy and Power Evaluation Programme (ENPEP)*, BATAN, Jakarta, September 1995.
- Sugiyono, A. (2005) Analisis Pengambilan Keputusan untuk Perencanaan Pembangkit Tenaga Listrik, dalam Nurdyastuti, N. dan Boedoyo, M.S. (Editor) *Strategi Penyediaan Listrik Nasional dalam Rangka Mengantisipasi Pemanfaatan PLTU Batubara Skala Kecil, PLTN, dan Pembangkit Energi Terbarukan*, hal. 101-110, P3TKKE, BPPT, Jakarta.