

PERKEMBANGAN DAN APLIKASI TEKNIK OPTIMASI UNTUK PERENCANAAN ENERGI

Agus Sugiyono

Bidang Perencanaan Energi
Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi, BPPT
Gedung BPPT II, Lantai 20
sugiyono@webmail.bppt.go.id

Abstrak

Krisis energi yang terjadi pada tahun 1973 telah membuat sektor energi menjadi perhatian dunia. Krisis ini menyebabkan Amerika Serikat dan Eropa Barat tidak mendapat pasokan minyak bumi yang mencukupi karena adanya embargo dari negara Arab sebagai penghasil utama minyak bumi. Hal ini menjadi titik awal berkembangnya model energi untuk perencanaan energi. Tujuan utama dari penggunaan model energi untuk perencanaan energi pada saat itu adalah mencari berbagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan minyak bumi yang harganya mahal serta mengevaluasi dampak dari berbagai kebijakan energi terhadap perekonomian.

Secara umum ada dua tipe model energi yang dapat digunakan untuk keperluan perencanaan energi. Yang pertama adalah model top-down yang berorientasi pada perekonomian secara keseluruhan dengan sektor energi sebagai sub-sektor. Model top-down sering disebut model keseimbangan umum yang dikembangkan berdasarkan teori ekonomi. Yang kedua adalah model bottom-up yang lebih berorientasi pada optimasi teknologi secara rinci untuk sektor energi. Pada awal perkembangannya, model bottom-up banyak digunakan. Brookhaven Energy System Optimization Model (BESOM) merupakan awal perkembangan model energi yang menggunakan optimasi untuk mengalokasikan sumber energi secara optimal. Nordaus pada tahun 1973 mengembangkan model energi yang menggunakan teknik program linear (linear programming). Diantara teknik optimasi yang ada, program linier mempunyai kelebihan karena mudah diaplikasikan untuk menyelesaikan persoalan yang kompleks dan hasil optimasi mengandung shadow price yang merepresentasikan biaya eksploitasi sumber energi yang optimal.

Sejalan dengan berkembangnya teknologi komputer, teori optimasi yang dalam aplikasinya semula hanya bisa diselesaikan secara analitik mulai digunakan program komputer untuk diselesaikan secara numerik. Saat ini penggunaan personal komputer (PC) untuk pembuatan model energi sudah berkembang sangat pesat. Salah satu model energi tersebut adalah Model MARKAL yang sudah banyak digunakan baik di negara-negara maju maupun di Indonesia. Makalah ini akan membahas perkembangan teknik optimasi yang diaplikasikan untuk pembuatan model energi serta perkembangan komputer baik perangkat lunak maupun perangkat keras untuk mendukung perencanaan energi. Dibahas juga berbagai aspek perencanaan energi menggunakan Model MARKAL yang meliputi struktur model, penggunaan perangkat lunak GAMS (General Algebraic Modeling System), user interface ANSWER, dan pengembangan model lebih lanjut dengan konsep penggabungan model bottom-up dengan top-down.

Katakunci: optimasi, *linear programming*, GAMS, perencanaan energi.

1. PENDAHULUAN

Krisis energi yang terjadi pada tahun 1973 telah membuat sektor energi menjadi perhatian dunia. Krisis ini menyebabkan Amerika Serikat dan Eropa Barat tidak mendapat pasokan minyak bumi yang mencukupi karena adanya embargo dari negara Arab sebagai penghasil utama

minyak bumi. Harga minyak meningkat sangat pesat dari sekitar 3 dolar Amerika per barel menjadi 10 dolar per barel. Hal ini menjadi titik awal berkembangnya model energi untuk perencanaan energi. Tujuan utama dari penggunaan model energi untuk perencanaan energi pada saat itu adalah mencari berbagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan

minyak bumi yang harganya mahal serta mengevaluasi dampak dari berbagai kebijakan energi terhadap perekonomian. Persoalan yang dihadapi merupakan persoalan untuk mengalokasikan sumber energi secara efisien. Berbagai sumber energi yang tersedia perlu dioptimasi untuk mendapatkan biaya yang minimal dalam memenuhi kebutuhan energi. Salah satu cara untuk menyelesaikan persoalan tersebut adalah dengan menggunakan teknik optimasi. Sejalan dengan dinamika pemikiran dan persoalan yang dihadapi dalam pengembangan energi maka berbagai model energi telah dikembangkan. Saat ini konsep pembangunan yang berkelanjutan merupakan aspek utama yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan energi di masa mendatang.

Secara umum ada dua tipe model energi yang dapat digunakan untuk keperluan perencanaan energi. Yang pertama adalah model *top-down* yang berorientasi pada perekonomian secara keseluruhan dengan sektor energi sebagai sub-sektor. Model *top-down* sering disebut model keseimbangan umum yang dikembangkan berdasarkan teori ekonomi. Yang kedua adalah model *bottom-up* yang lebih berorientasi pada optimasi teknologi secara rinci untuk sektor energi. Model *bottom-up* merupakan model keseimbangan parsial di sektor energi.

Pada awal perkembangannya, model *bottom-up* yang menggunakan teknik optimasi banyak digunakan. Diantara teknik optimasi yang ada, program linier (*linear programming*) mempunyai kelebihan karena mudah diaplikasikan untuk menyelesaikan persoalan yang kompleks dengan menggunakan personal komputer (PC). Hasil optimasi dengan menggunakan program linier mengandung *shadow price* yang merepresentasikan biaya eksploitasi sumber energi yang optimal.

Model Markal merupakan salah satu model *bottom-up* yang sudah banyak digunakan. Dalam makalah ini akan dibahas lebih lanjut perkembangan teknik optimasi dan aplikasi dari model MARKAL untuk perencanaan energi.

2. TEKNIK OPTIMASI DAN PERKEMBANGAN KOMPUTER

Pengembangan teknik optimasi dapat ditelusuri dari pengembangan yang dibuat oleh Newton, Lagrange dan Cauchy. Metode kalkulus diferensial yang ditemukan oleh Newton dan Leibnitz untuk menyelesaikan masalah optimasi merupakan kontribusi dalam mengembangkan *calculus of variation*. Dasar dari pengembangan *calculus of variation* sendiri dikembangkan oleh Bernoulli, Euler, Lagrange dan Weirstrass.

Penyelesaian masalah optimasi dengan kendala dengan menambahkan *multiplier* yang sekarang dikenal dengan nama *Lagrange multiplier* yang dinamai sesuai dengan penemunya yaitu Lagrange. *Lagrange multiplier* mempunyai interpretasi yang penting karena memberikan informasi tentang sensitivitas yang merepresentasikan besarnya perubahan solusi bila parameter persoalan diubah. Secara ilmu ekonomi *Lagrange multiplier* ini merupakan *shadow price*. Cauchy mengembangkan aplikasi untuk menyelesaikan persoalan optimasi tanpa kendala dengan menggunakan *steepest descent method*. Disamping pengembangan yang telah dibuat tersebut, hanya sedikit terobosan yang ditemukan sampai pertengahan abad dua puluh saat komputer digital diketemukan.

Pengembangan metode simplex oleh G. Danzig pada tahun 1947 untuk menyelesaikan program linier dan prinsip optimalitas oleh Bellman pada tahun 1957 untuk menyelesaikan program dinamik merupakan dasar untuk pengembangan metode penyelesaian optimasi dengan kendala. Penemuan H.W. Kuhn dan A.W. Tucker tentang *necessary* dan *sufficiency condition* untuk memperoleh solusi yang optimal memberikan landasan dalam pengembangan program non-linier. Sejalan dengan berkembangnya teknologi komputer, teori optimasi yang dalam aplikasinya semula hanya bisa diselesaikan secara analitik mulai digunakan program komputer untuk diselesaikan secara numerik. Perkembangan yang cukup pesat yaitu digunakannya metode numerik untuk menyelesaikan optimasi tanpa kendala pada tahun 1960 di Inggris.

Disamping itu, perkembangan teknik optimasi tidak dapat dilepaskan dari penemuan J. von Neumann dan O. Morgenstern yang memperkenalkan *game theory*. Teknik ini banyak digunakan untuk menyelesaikan persoalan dalam bidang militer maupun ekonomi.

2.1. Teknik Optimasi

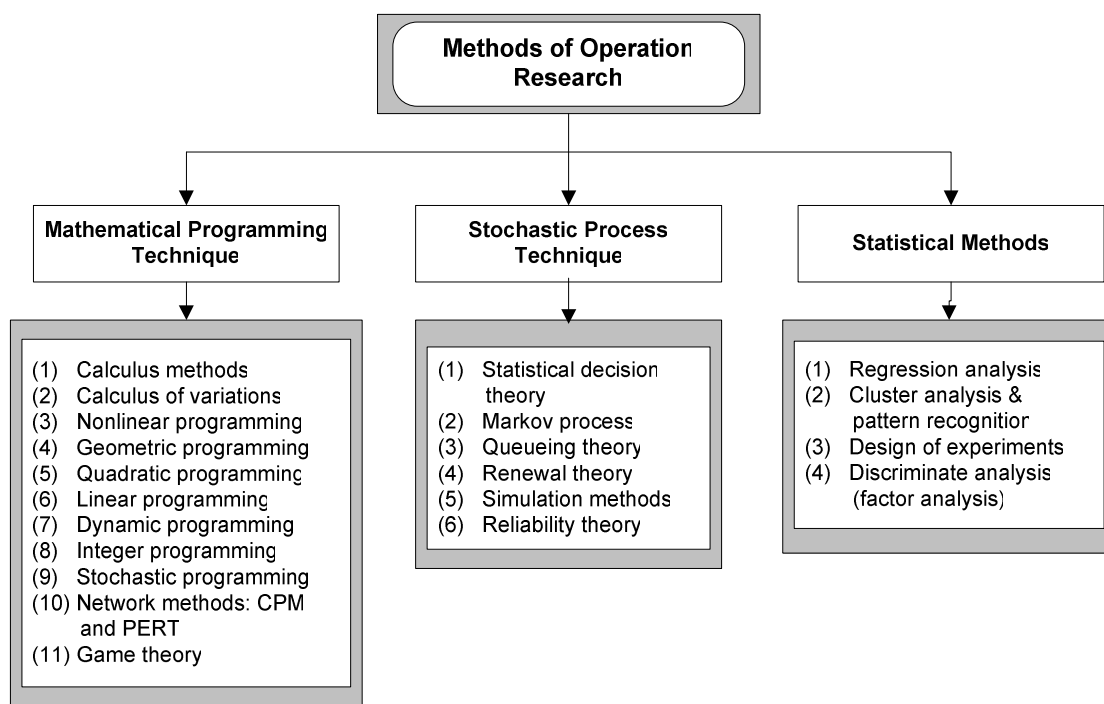
Optimasi merupakan aktivitas untuk mendapatkan hasil yang terbaik dari pilihan yang tersedia. Tujuan dari setiap keputusan adalah untuk meminimumkan usaha yang dilakukan atau memaksimumkan keuntungan yang diperoleh. Usaha atau keuntungan tersebut secara praktek dinyatakan sebagai fungsi dengan variabel keputusan yang akan dicari nilai optimumnya. Metode untuk mencari nilai optimum tersebut dikenal sebagai teknik program matematika (*mathematical programming technique*) yang merupakan bagian dari ilmu *operations research* (OR). OR merupakan cabang ilmu matematika yang membahas mengenai teknik dan metode ilmiah untuk membuat keputusan dalam

menyelesaikan masalah dengan membuat solusi yang paling baik atau optimum.

Pada Gambar 1 ditunjukkan berbagai metode yang digunakan dalam OR. Teknik program matematika digunakan untuk mencari fungsi yang optimum dengan berbagai fungsi kendala. Teknik proses stokastik (*stochastic process technique*) dapat digunakan untuk menganalisis persoalan yang dinyatakan dalam variabel rondon dengan distribusi probabilitas. Sedangkan metode statistika (*statistical methods*) digunakan untuk menganalisis data eksperimen dan membangun model empiris untuk memperoleh representasi tentang situasi yang dianalisis secara akurat.

komputer *mainframe* karena biaya investasi yang sangat mahal serta biaya operasi dan perawatan yang cukup tinggi.

Pada tahun 1971 Intel memperkenalkan mikroprosesor yang merupakan satu *chip* yang mengintegrasikan ratusan komponen elektronik. Mikroprosesor merupakan *central processing unit* dan merupakan titik awal berkembangnya PC. Mikroprosesor seri 4004 digunakan untuk kalkulator dan seri 8008 digunakan untuk personal komputer. Pada tahun 1974 diperkenalkan mikroprosesor generasi kedua yaitu seri 8080 yang merupakan mikroprosesor 8 bits. Dengan menggunakan prosesor ini telah dikembangkan PC dari IBM yaitu PC/XT



Gambar 1. Metode dalam *Operations Research* (Rao, 1979)

2.2. Perkembangan Komputer

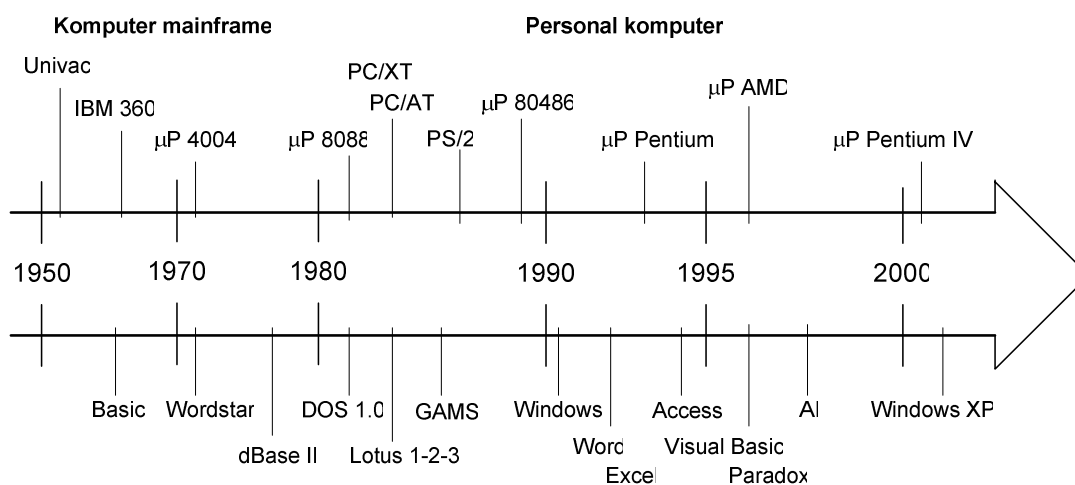
Perkembangan komputer merupakan revolusi perkembangan teknologi yang sangat dramatis. Perkembangan kemampuan perangkat keras (*hardware*) telah mendorong perkembangan perangkat lunak (*software*) yang dapat lebih mudah digunakan. Pada awal tahun 1960 komputer *mainframe* dibutuhkan untuk membantu dalam pembuatan model dan untuk menyelesaikan persoalan di bidang teknik maupun ekonomi. Komputer jenis ini memerlukan ruangan yang sangat besar dan sistem pendingin yang khusus serta tenaga khusus untuk mengoperasikannya. Tidak banyak institusi maupun perusahaan yang mampu untuk membeli

sedangkan Apple Computer mengembangkan PC dengan menggunakan mikroprosesor seri Z80. Pada tahun 1983 sudah tersedia mikroprosesor 16 bits yaitu 80286 yang merupakan mikroprosesor generasi kedua. Dengan mikroprosesor ini IBM meluncurkan PC dengan versi PC/AT. Perkembangan selanjutnya sangat cepat yaitu munculnya mikroprosesor 32 bits seri 80386 pada tahun 1987. IBM mengeluarkan komputer PS/2 dengan menggunakan mikroprosesor ini. Kemudian berkembang juga penggunaan *coprocessor* untuk mempercepat proses perhitungan (Buehring, 1990). Mikroprosesor Intel (dengan seri Pentium sampai dengan Pentium IV) dan mikroprosesor

AMD merupakan perkembangan selanjutnya yang menjadikan PC dapat meluas digunakan untuk keperluan rumah tangga.

Perangkat lunak juga terus mengalami perkembangan. Pada awal perkembangan PC, perangkat lunak VisiCalc digunakan sebagai *spreadsheet* sampai diperkenalkannya perangkat lunak Lotus 1-2-3 pada tahun 1982. Disamping itu berkembang juga perangkat lunak untuk mengolah kata yang disebut WordStar sedangkan untuk *database* digunakan dBase II. Kesemua perangkat lunak tersebut berjalan di bawah sistem operasi DOS. Sejak tahun 1990 diperkenalkan sistem operasi Windows dan mulai saat itu perkembangan perangkat lunak untuk

Brookhaven Energy System Optimization Model (BESOM) merupakan awal perkembangan model energi yang menggunakan optimasi untuk mengalokasikan sumber energi secara optimal. Nordaus pada tahun 1973 mengembangkan model energi yang menggunakan teknik program linier. Pada saat itu model dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman seperti Fortran atau Basic. Pada awal tahun 1980 KFA Jerman dan BNL Amerika Serikat mengembangkan model untuk perencanaan energi yang diberi nama MARKAL (**MARKet ALlocation**). Model ini menggunakan teknik program linier. Model ini kemudian berkembang pesat sejak digunakan oleh konsorsium yang



Sumber: Diadaptasi dari Buehring (1990)

Gambar 2. Perkembangan Komputer

aplikasi khusus sangat cepat. Untuk *spreadsheet* mulai dipakai Excel, untuk *database* digunakan Access dan Paradox, serta untuk pengolah kata digunakan Word. Secara garis besar perkembangan komputer ditunjukkan pada Gambar 2.

3. APLIKASI TEKNIK OPTIMASI

Saat ini penggunaan PC untuk pembuatan model energi sudah berkembang sangat pesat. Hal ini didukung oleh kemampuan mikroprosesor yang semakin baik, waktu proses makin cepat, kapasitas memori dan kapasitas *hard disk* yang semakin besar serta harga yang relatif murah. Mikroprosesor yang sekarang banyak digunakan yaitu Pentium IV dengan *hard disk* 40 GByte. Mikroprosesor ini dapat melakukan proses pada kecepatan di atas 1.000 MHz dengan memori 128 MByte.

disebut ETSAP (*Energy Technology System Analysis Programme*) yang disponsori oleh *International Energy Agency* (IEA). Model MARKAL ini sudah banyak digunakan baik di negara-negara maju maupun di Indonesia.

3.1. Metodologi Model MARKAL

Seperti telah disebutkan di atas, MARKAL menggunakan teknik program linier untuk mengalokasikan berbagai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan energi. Persamaan yang digunakan model MARKAL cukup kompleks karena mempertimbangkan setiap operasi dari berbagai teknologi yang digunakan. Meskipun demikian secara sederhana dapat dituliskan secara matematis pada Persamaan 1 dengan Z menyatakan fungsi obyektif, yang dalam hal ini adalah meminimumkan total biaya penyediaan energi. Persamaan 2 dan 3 merupakan fungsi kendala.

Tabel 1. Persoalan yang Dapat Diselesaikan Menggunakan GAMS

| | LP | NLP | DNLP | MIP | RMIP | MINLP | RMINLP | MPEC | MCP | CNS | Stoch. |
|--------|----|-----|------|-----|------|-------|--------|------|-----|-----|--------|
| AMPL | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | |
| CONOPT | √ | √ | √ | | √ | | √ | | | √ | |
| CPLEX | √ | | | √ | √ | | | | | | |
| DECIS | | | | | | | | | | | √ |
| DICOPT | | | | | | √ | | | | | |
| LINGO | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | | |
| MINOS | √ | √ | √ | | √ | | √ | | | | |
| NLPEC | | | | | | | | √ | √ | | |
| OSL | √ | | | √ | √ | | | | | | |
| PATH | | | | | | | | | √ | √ | |
| XPRESS | √ | | | √ | √ | | | | | | |

Keterangan: - LP - *Linear programming*
 - NLP - *Nonlinear programming*
 - DNLP- *Nonlinear programming with discontinuous derivative*
 - MIP - *Mixed integer programming*
 - RMIP - *Relaxed mixed integer programming*
 - MINLP - *Mixed integer nonlinear programming*
 - RMINLP - *Relaxed mixed integer nonlinear programming*
 - MPEC - *Mathematical program with equilibrium constraints*
 - MCP - *Mixed complementary problem*
 - CNS- *Constrained nonlinear system*
 - Stoch. - *Stochastic problem*
 - Tanda √ menyatakan *solver* yang dapat digunakan
 - Masih ada beberapa *solver* alternatif yang tidak dicantumkan di sini.

$$Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i \tag{2}$$

$$u_j \geq X_j \geq l_j \geq 0 \tag{3}$$

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 .

Persamaan di atas sesuai dengan keterkaitan antar keseluruhan sektor energi yang meliputi: sumber daya energi, proses dan konversi energi, serta pengguna akhir. Keterkaitan tersebut dinyatakan dalam *Reference*

Energy System (RES). 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.

3.2. Perangkat Lunak Model MARKAL

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

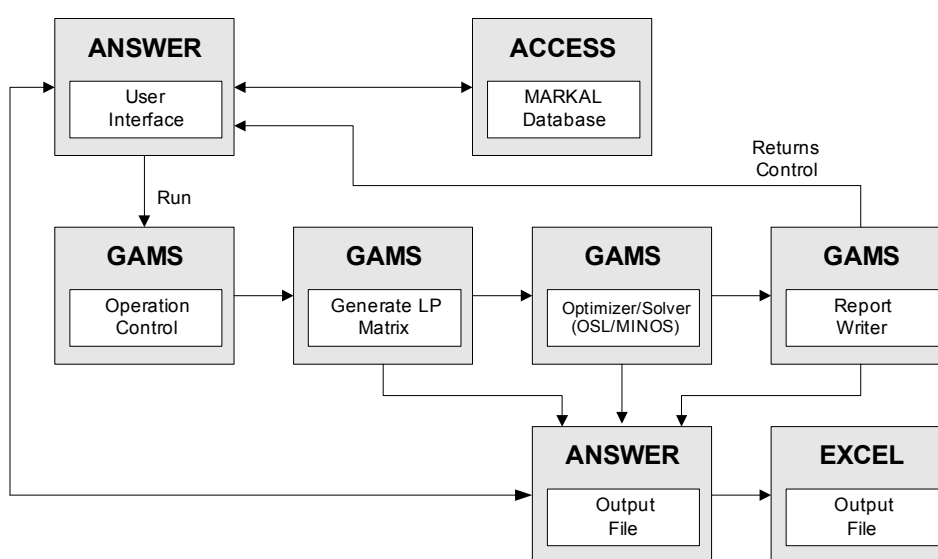
(MARKAL User Support System) dan dapat dioperasikan menggunakan PC dengan *Disk Operating Sistem* (DOS). MUSS dikembangkan dengan menggunakan bahasa pemrograman C, sedangkan program MARKAL ditulis dalam bahasa pemrograman XPRESS.

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-MARKAL. ANSWER-MARKAL dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman Visual Basic dan memanfaatkan Access *database* sebagai media untuk penyimpanan data.

yang dapat diselesaikan menggunakan GAMS ditunjukkan pada Tabel 1.

3.4. Aplikasi Model MARKAL di Indonesia

Penggunaan model MARKAL di Indonesia telah dimulai sejak tahun 1980 oleh BPPT. Kegiatan ini merupakan perencanaan energi nasional antar instansi dan bekerja sama dengan KFA Jerman. Pada awalnya digunakan komputer *mainframe* Pertamina untuk menjalankan model ini. Sejak tahun 1993, sudah digunakan MUSS-MARKAL yang beroperasi pada PC. Hasil studi yang sudah dilakukan diantaranya adalah perencanaan energi nasional dengan mempertimbangkan dampak lingkungan. Pada



Gambar 3. Sistem Operasi ANSWER-MARKAL

Program MARKAL ditulis menggunakan GAMS yang mempunyai kemampuan lebih baik dalam optimasi karena mempunyai beberapa solver alternatif seperti XPRESS, OSL dan MINOS. Secara garis besar sistem operasi ANSWER-MARKAL ditunjukkan pada Gambar 3.

3.3. Perangkat Lunak GAMS

General Algebraic of Modelling System (GAMS) merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan program matematika. GAMS digunakan oleh MARKAL sebagai alat untuk melakukan optimasi (*optimizer*). GAMS mempunyai beberapa modul *optimizer* atau *solver* yang digunakan untuk mengoptimasi. Satu *optimizer* sering dapat digunakan untuk menyelesaikan beberapa jenis persoalan dalam program matematika. Persoalan

tahun 1997 BPPT bekerja sama dengan ABARE menggunakan ANSWER-MARKAL. Kemudian disusul penggunaan ANSWER-MARKAL oleh ASEAN Centre for Energy (ACE) untuk membuat perencanaan energi terintegrasi di negara ASEAN pada tahun 2001. Pada tahun 2003, Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi (BP Migas) menggunakan ANSWER-MARKAL untuk membuat optimasi penggunaan gas alam di Indonesia. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral pada tahun 2006 juga mulai menggunakan ANSWER-MARKAL untuk membuat perencanaan energi sebagai masukan bagi pembuatan Kebijakan Energi Nasional.

3.5. Pengembangan Model MARKAL

Model MARKAL yang digunakan di Indonesia saat ini hanya menggunakan MARKAL standar. Masih banyak variasi yang ditawarkan

oleh ANSWER-MARKAL untuk membuat model yang lebih mendekati dunia nyata. Salah satu pengembangan yang penting adalah penggabungan model *bottom-up* dengan *top-down*. Pengembangan ini dalam ANSWER-MARKAL disebut Markal-MACRO. Selain itu masih banyak variasi pengembangan model yang dapat dilakukan seperti ditampilkan pada Tabel 2.

4 Jacobs, B. "ANSWER: MARKAL Energy Modelling for Windows", ABARE, Canberra, 1999.

5 Loulou, R., G.Goldstein and K. Noble, "Documentation for the MARKAL Family of Models", Energy Technology Systems Analysis Programme, October 2004.

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. PENUTUP

Teknik optimasi merupakan salah satu bagian dari program matematika yang sudah banyak diaplikasikan. Diantara program matematika tersebut, program linier mempunyai kelebihan karena mudah diaplikasikan untuk menyelesaikan persoalan yang kompleks. Oleh karena ini, program linear banyak digunakan untuk pembuatan model energi.

Model MARKAL merupakan salah satu model energi yang menggunakan teknik program linier dan telah banyak digunakan untuk perencanaan energi. Model ini menggunakan perangkat lunak GAMS sebagai *optimizer*. Dengan didukung oleh perkembangan PC baik dari sisi perangkat keras maupun perangkat lunak maka perencanaan energi menjadi lebih mudah.

DAFTAR PUSTAKA

1. Buehring, W.A. "Energy and Economic Modeling on the Microcomputer", Energy, Vol.15, No.7/8, pp.697-704, 1990.

2. Brooke, A., D. Kendrick, A. Meeraus and R. Raman "GAMS: A User's Guide, GAMS Development Corporation", USA, 1998.

3. Fryer, M.J. and J.V. Greenman "Optimisation Theory: Application in OR and Economics", Edward Arnold. London, 1987.

6 Nordhaus, W.D. "The Allocation of Energy Resources", Brookings Papers on Economic Activity, No.3, p.529-570, 1973.

7 Rao, S.S. "Optimization: Theory and Applications", Wiley Eastern Limited, 1979.

8 Sugiyono, A. "Metodologi Studi Markal", Dipresentasikan pada Workshop on Environmental Analysis Using Energy and Power Evaluation Programme (ENPEP), BATAN, Jakarta, September 1995.

9 Sugiyono, A. dan E. Suarna, "Optimasi Penyediaan Energi Nasional: Konsep dan Aplikasi Model Markal", Dipresentasikan pada Seminar Nasional Matematika, Statistika, dan Pendidikan Matematika, Jurusan Matematika, Universitas Padjajaran, Bandung, 22 April 2006.

RIWAYAT PENULIS

Agus Sugiyono lahir di Klaten pada 29-07-1963. Menamatkan pendidikan Magister di Science University of Tokyo dalam bidang Industrial Administration. Saat ini bekerja sebagai peneliti di Bidang Perencanaan Energi, BPPT, Jakarta.

