

Metodologi Studi MARKAL¹

oleh :

Agus Sugiyono

Peneliti BPPT

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan pertumbuhan penduduk. Untuk memenuhi kebutuhan ini tersedia beragam jenis sumber energi dan teknologi, yang pemilihannya perlu ditentukan berdasarkan nilai ekonomis dan strategis dalam bentuk perencanaan energi.

Perencanaan energi mulai mendapat perhatian serius sejak terjadinya krisis minyak bumi pada awal tahun tujuh puluhan. Pada awalnya perencanaan energi terbatas pada tingkat sektoral, seperti sektor listrik dan minyak bumi. Saat ini telah berkembang sistem perencanaan energi terpadu guna mendapatkan suatu penyelesaian masalah energi nasional jangka panjang yang optimal. Pemerintah Indonesia bekerja sama dengan Pemerintah Jerman juga telah dan sedang melakukan studi perencanaan energi terpadu yang sering disebut sebagai studi MARKAL. Pihak Indonesia dipimpin oleh BPP Teknologi dengan melibatkan peneliti-peneliti dari berbagai instansi pemerintah lainnya. Studi MARKAL ini telah dimulai sejak tahun 1983 dalam beberapa tahap.

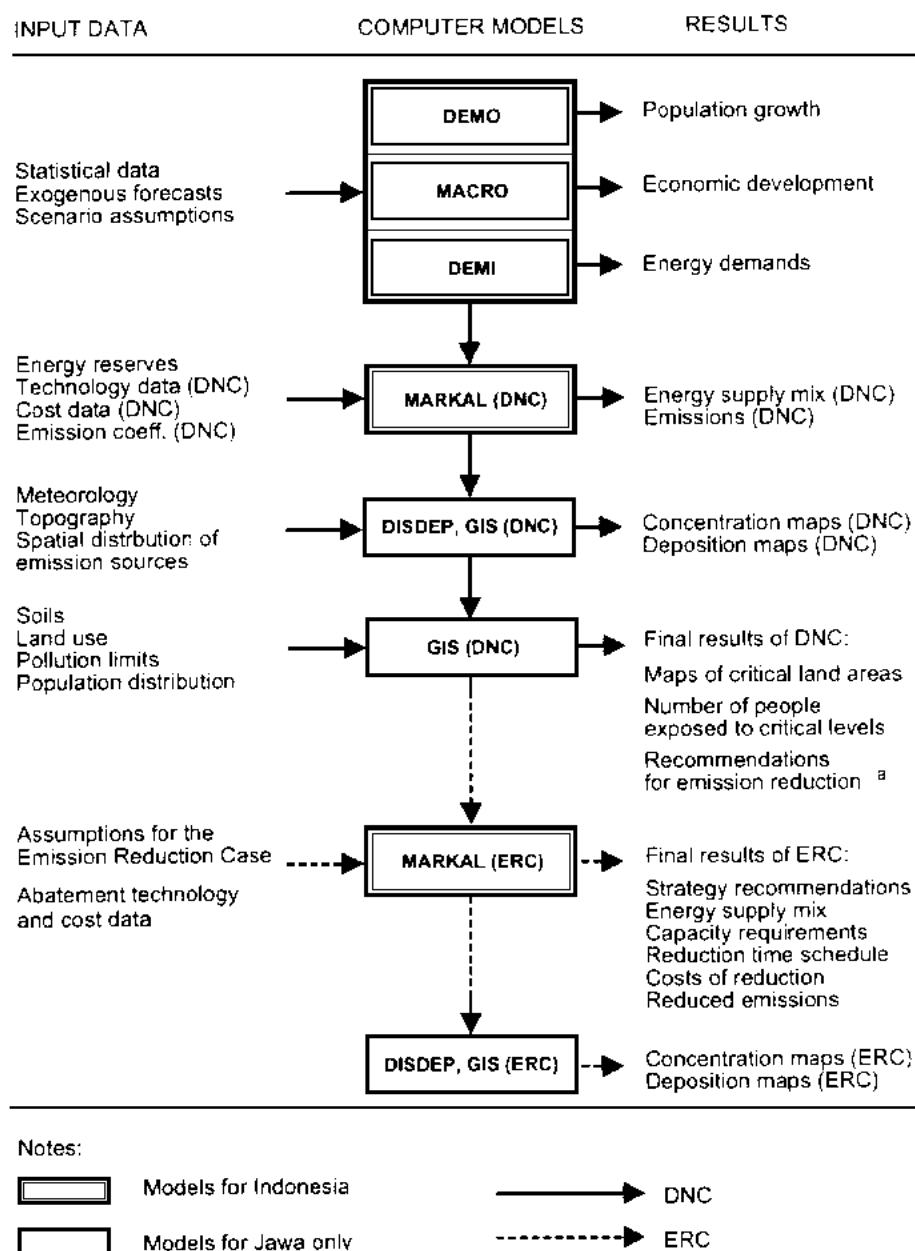
- Tahap pertama, pihak Jerman diwakili oleh KFA dan telah selesai pada tahun 1988 dengan menghasilkan laporan berjudul *Energy Strategies, Energy R+D Strategies and Technology Assessment for Indonesia*.
- Tahap kedua, pihak Jerman diwakili oleh KFA dengan judul *Environmental Impacts of Energy Strategies for Indonesia* dan telah selesai pada tahun 1993.
- Tahap ketiga, pihak Jerman diwakili oleh GTZ dengan judul *Technology Assessment for Energy Related CO₂ Reduction Strategies for Indonesia* yang sedang dalam tahap pelaksanaan.

Dalam studi MARKAL, Indonesia dibagi menjadi empat wilayah, yaitu : Jawa, Sumatera, Kalimantan, dan Pulau-pulau lain. Untuk masing-masing wilayah dibuat model sistem energi secara terpisah dan dihubungkan satu sama lain dengan teknologi transportasi. Garis besar studi MARKAL ditunjukkan pada Gambar 1 yang dapat dikelompokkan menjadi 3 bagian yaitu proyeksi kebutuhan energi, optimasi penyediaan energi dan perhitungan dampak lingkungan.

Kebutuhan energi sebagai input bagi penyusunan strategi penyediaan energi terlebih dahulu ditentukan berdasarkan tingkat pertumbuhan ekonomi dan penduduk untuk beberapa skenario dengan menggunakan model MACRO, DEMO, dan DEMI. Penyediaan energi yang optimal ditentukan dengan mempergunakan model MARKAL berdasarkan teknik *linear*

¹ Dipresentasikan pada Workshop on Environmental Analysis Using Energy and Power Evaluation Programme (ENPEP), BATAN, Jakarta, 11-21 September 1995

programming dengan mempertimbangkan pilihan sumber daya energi dan teknologi energi yang ada sehingga kebutuhan energi terpenuhi. Berdasarkan hasil yang optimum, jumlah emisi dari pemakaian dan konversi energi dapat dihitung dengan memakai data koefisien emisi dari masing-masing teknologi dengan model DISDEP dan GIS (*Doing Nothing Case / DNC*). Dari hasil perhitungan ini dapat disusun pedoman pengurangan emisi dengan memasukkan teknologi bersih lingkungan ke model MARKAL untuk mendapatkan susunan jenis energi dan teknologi yang optimum dari segi ekonomi (*Emission Reduction Case / ERC*). Model-model ini akan dibahas lebih lanjut dalam bab-bab berikutnya.



^a Based on additional field investigations, sample measurements and risk assessments

Gambar 1. Susunan model dalam studi MARKAL [4]

2. Kebutuhan Energi

Proyeksi kebutuhan energi merupakan dasar bagi penyusunan strategi penyediaan energi. Faktor utama yang menentukan tingkat kebutuhan energi adalah pertumbuhan ekonomi, jumlah penduduk, harga energi dan pola pemakaian energi di masa lampau. Dalam studi MARKAL untuk memproyeksikan kebutuhan energi digunakan model-model berikut ini.

2.1 Model DEMO

Model DEMO digunakan untuk membuat proyeksi tahunan jumlah penduduk untuk setiap wilayah menurut daerah perkotaan (*urban*) dan pedesaan (*rural*) sampai tahun 2023. Perhitungan model ini berdasarkan data statistik dan menggunakan rumus pendekatan sebagai berikut :

- tingkat pertumbuhan penduduk setiap tahun dinyatakan dengan rumus :

$$g(t) = a + b \times (t - 1991) \quad (t = 1991, \dots, 2025) \quad (1)$$

- pangsa jumlah penduduk untuk daerah perkotaan dinyatakan dengan rumus :

$$u(t) = x + y \times (t - 1981) + z \times (t - 1981)^2 \quad (t = 1978, \dots, 2023) \quad (2)$$

dengan a, b, x, y, z suatu konstanta.

2.2 Model MACRO

Model MACRO digunakan untuk membuat proyeksi pertumbuhan ekonomi secara menyeluruh dan proyeksi perkembangan 21 sektor industri sampai tahun 2023. Model ini menggunakan tabel input-output Indonesia tahun 1985 dan menggunakan dua skenario, yaitu skenario tinggi dan skenario rendah. Skenario tinggi menggambarkan perkiraan pertumbuhan ekonomi yang optimis sedangkan skenario rendah lebih konservatif.

Tabel input-output dapat dikelompokkan menjadi permintaan antara ($A_{ij} * Y_j$), konsumsi rumah tangga (PC) termasuk di dalamnya institusi nonprofit, konsumsi pemerintah (GC) termasuk untuk pertahanan dan keamanan, nilai investasi (IN), nilai ekspor (EX), nilai import (IM) dan nilai produksi (Y). Dalam model ini metode yang dipergunakan diperlihatkan pada Gambar 2.

A_{ij} adalah koefisien input-output yang menyatakan nilai rupiah yang diperlukan oleh sektor j dari sektor i untuk memproduksi satu rupiah di sektor j . Dari tabel input-output dapat dibuat perkiraan produksi dengan menggunakan rumus :

$$Y = (I - A)^{-1} (F + EX - IM) \quad (3)$$

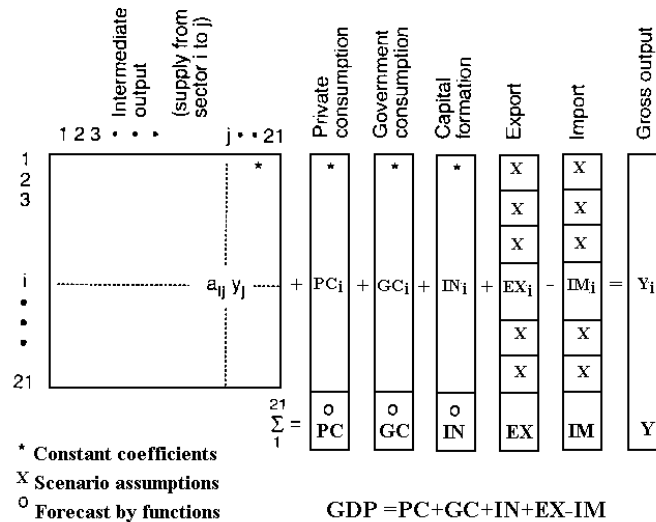
dengan :

$$F = PC + GC + IN$$

$$I = \text{matriks identitas}$$

Model MACRO ini dibandingkan dengan model input-output tradisional berbeda dalam dua hal, yaitu :

- nilai import merupakan variabel endogeneous dengan mendefinisikan rasio permintaan domestik. Rasio ini menunjukkan banyaknya perubahan nilai import (IM) per unit produksi untuk pasar domestik ($Y - EX$).
- dalam model ini harga ekspor minyak bumi, LNG dan *energy carrier* lainnya dapat berubah dengan laju yang berbeda dengan laju inflasi yang terjadi.



Gambar 2. Metode perhitungan berdasarkan tabel input-output [4]

2.3 Model DEMI (Demand Energy Model for Indonesia)

Berdasarkan hasil dari model DEMO dan MACRO, proyeksi kebutuhan energi disusun dengan memakai model DEMI dalam bentuk *useful* atau *final energy*. Model ini menghitung semua energi yang dipakai oleh *end-use technology* tetapi tidak mencakup energi yang dipakai untuk penambangan, konversi energi, *autogeneration* serta rugi-rugi dari penggunaan energi. Pada dasarnya energi yang dipakai adalah dalam bentuk *useful energy*. Apabila *useful energy* tidak dapat diterapkan pada bagian tertentu maka dipakai *final energy*, seperti :

- Dalam sektor transportasi untuk kendaraan bermotor yang mempunyai berbagai pilihan bahan bakar (kendaraan penumpang jarak jauh dan dekat, truk kecil serta bis kecil) maka sebagai pengganti *useful energy* dipakai jumlah kendaraan yang dinaiki untuk jarak tertentu setiap tahun. Jumlah kebutuhan energi kemudian dihitung berdasarkan perkalian jumlah jenis kendaraan yang memenuhi kebutuhan transportasi tersebut dengan kebutuhan bahan bakarnya untuk jarak tempuh yang diperkirakan.
- Pemakaian jenis energi ditentukan dengan peraturan atau undang-undang, misalnya semua pabrik semen harus menggunakan batubara.
- Substitusi dengan menggunakan jenis energi yang lain tidak ekonomis, misalnya penggunaan gas alam sebagai bahan baku untuk produksi urea.

Dalam konsep *useful energy*, maka harga energi tidak diperhitungkan. Hal ini disebabkan karena *useful energy* tidak tergantung pada jenis *final energy* yang dihasilkan.

Model DEMI terdiri atas empat submodel, yaitu :

- RESID, untuk menghitung kebutuhan energi di sektor rumah tangga (*residential*).
- TRAFF, untuk sektor transportasi (*traffic*).
- AIC, untuk sektor pertanian (*agriculture*), industri (*industry*), dan komersial (*commerce*). Untuk submodel AIC, kebutuhan energi dihitung berdasarkan intensitas energi yang diperoleh dari data historis produksi dan pemakaian energi menggunakan submodel ANALYS.
- GOVERN, untuk sektor pemerintahan (*government*).

3. Penyediaan Energi

Setelah diperoleh proyeksi kebutuhan energi maka optimasi penyediaan energi dilakukan dengan menggunakan model MARKAL (*Market Allocation*). Model MARKAL adalah suatu model yang memakai teknik *linear programming* (LP). Persoalan LP dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut :

$$Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (4)$$

dan variabel Z , sebagai fungsi obyektif yang dapat dicari suatu kondisi maksimum atau minimum dengan suatu fungsi kendala :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i \quad (5)$$

$$u_j \geq X_j \geq l_j \geq 0 \quad (6)$$

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

a_{ij} , b_i , dan C_j masing-masing adalah koefisien

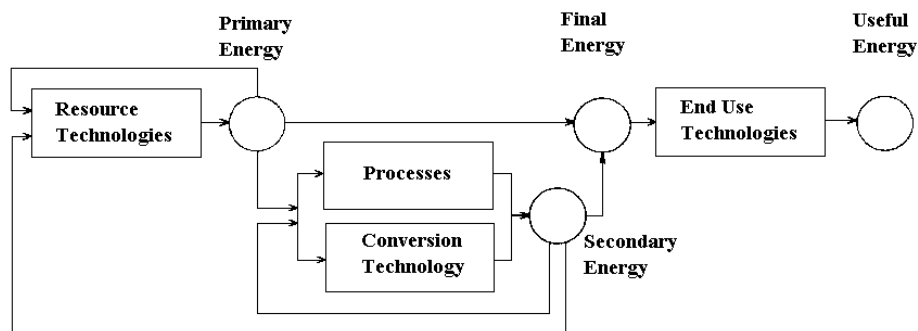
u_j dan l_j adalah batas atas dan batas bawah bagi variabel X_j .

Dalam model MARKAL fungsi obyektif antara lain dapat berupa : meminimumkan biaya penyediaan energi, meminimumkan dampak negatif terhadap lingkungan, meminimumkan penggunaan energi fosil, dan memaksimalkan penggunaan energi terbarukan.

Sebelum melakukan optimasi LP, harus diformulasikan dulu hubungan antara sumber energi dan kemungkinan penggunaannya melalui teknologi yang tersedia. Oleh karena itu disusun suatu jaringan sistem energi seperti pada Gambar 2. Gambar 2 memperlihatkan jaringan sistem energi secara umum yang terbagi menjadi beberapa kategori teknologi, yaitu :

- *resource technology*, seperti penambangan, import dan ekspor.
- proses, yang mengubah satu bentuk *energy carrier* ke bentuk *energy carrier* lainnya.
- teknologi konversi, yang menghasilkan listrik atau panas.
- *end-use technology*, yang mengubah satu bentuk *final energy* menjadi *useful energy* dengan menggunakan *demand device* (DMD) seperti kompor untuk memasak, lampu penerangan, dan ketel uap.

Berdasarkan jaringan energi sistem ini dapat disusun suatu matriks dalam bentuk LP seperti telah dijelaskan sebelumnya.



Gambar 3. Jaringan sistem energi[3]

Input data untuk masukan model MARKAL secara umum dapat disebutkan sebagai berikut :

- Proyeksi kebutuhan *final* atau *useful energy* untuk setiap sektor.
- Data teknis dan ekonomis setiap teknologi energi seperti : bahan bakar, efisiensi, biaya investasi, operasi dan perawatan, serta umur dan waktu operasi setiap tahun.
- Data teknis dan ekonomis dari sumber energi.
- Parameter umum lainnya seperti : *discount factor* dan periode studi.

4. Dampak Lingkungan

Pemakaian energi di semua sektor akan menimbulkan emisi polutan yang dihasilkan dari proses pembakaran atau konversi. Polutan yang dapat berupa SO_2 , NO_2 , VHC (*Volatile Hydrocarbon*) dan SPM (*Suspended Particulate Matter*) akan tersebar dari sumbernya melalui proses dispersi dan deposisi yang dapat menurunkan kualitas udara, tanah, dan air di sekitarnya. Distribusi dan konsentrasi polutan dipermukaan tanah dan deposisinya ke tanah dihitung dengan model DISDEP (*Dispersion and Deposition*) sebagai fungsi dari besar sumber emisi, keadaan meteorologi dan topografi dengan asumsi bahwa perubahan kimiawi polutan tidak diperhitungkan.

Dalam model ini sumber emisi dikelompokkan menjadi tiga macam yaitu :

- *point source*, yaitu untuk emisi yang berasal dari pembangkit listrik dan industri yang berskala besar.
- *line source*, untuk emisi dari transportasi jalan raya antar kota.
- *area source*, untuk emisi rumah tangga, industri kecil serta transportasi di dalam kota.

Untuk menentukan besarnya dispersi dan deposisi dari masing-masing sumber emisi digunakan model-model berikut ini :

- Model *Extended Gaussian Plume*, untuk *point source*. Model ini dibuat berdasarkan kenyataan bahwa distribusi konsentrasi polutan ke arah vertikal dan horisontal sesuai dengan distribusi normal. Dalam model ini penyebaran polutan dianggap mengikuti asumsi :

- sumber emisi mengeluarkan material secara kontinu.
- medan angin homogen baik ke arah vertikal maupun horisontal.
- permukaan dianggap datar.
- perubahan bentuk polutan secara fisik dan kimiawi selama di udara tidak diperhitungkan.
- semua variabel dianggap stasioner.

Proses deposisi polutan dapat dikategorikan menjadi :

- deposisi kering, yang hanya diakibatkan oleh gaya gravitasi bumi dan
 - deposisi basah, yang diakibatkan oleh air.
- Model *Box*, untuk *area source*. Emisi dari cerobong yang rendah tidak akan tersebar terlalu jauh dari sumbernya. Untuk dispersi jenis ini tidak dapat menggunakan model Gauss sehingga digunakan model Box. Dalam model ini atmosfer dianggap sebagai kotak dengan panjang, lebar, dan tinggi tertentu. Udara dalam kotak tercampur secara merata dan turbulensi dari difusi polutan tidak diperhitungkan serta tidak ada partikel yang keluar-masuk dalam kotak. Perubahan konsentrasi polutan yang mungkin terjadi adalah karena reaksi kimia dan deposisi dalam bentuk basah maupun kering.
- Model *fading function*, untuk *line source*. Emisi dari kendaraan bermotor antar kota mempunyai karakteristik yang lain karena sumber polutan bergerak dan polutan tersebar hanya di sekitar sumbernya. Model *fading function* dibuat berdasarkan teori bahwa polutan akan berkurang bila jarak dari jalan raya makin jauh. Berkurangnya polutan ini dinyatakan dalam bentuk fungsi peluruhan eksponensial. Perhitungan model ini berdasarkan data empiris serta menggunakan fungsi regresi.

Dalam studi MARKAL tahap kedua hanya wilayah Jawa yang diperhitungkan karena hampir semua industri besar, pembangkit listrik, dan transportasi terkonsentrasi di Jawa yang wilayahnya relatif kecil serta tingkat kepadatan penduduknya yang tinggi. Untuk mendapatkan gambaran terhadap hasil penyebaran polusi dalam bentuk peta digunakan model GIS (*Geographical Information System*). Dalam peta ini wilayah Jawa dibagi menjadi kisi-kisi berukuran $5 \times 5 \text{ km}^2$ yang keseluruhannya berjumlah 80×220 kisi. Berdasarkan peta ini dapat dilakukan analisis dampak lingkungan terhadap tanah, tanaman, ekosistem air, dan kesehatan manusia akibat adanya polutan.

5. Perangkat Keras dan Lunak

Secara umum perangkat keras minimum yang dapat digunakan untuk studi MARKAL adalah :

- *Personal computer* dengan Intel 386 dan *coprocessor* 80387 dengan kecepatan 33 MHz
- RAM 8 MByte
- 80 Mbyte *hard disk* dengan waktu akses 17 ms
- Monitor VGA Color
- Printer laser jet

sedangkan perangkat lunak yang digunakan adalah :

- DOS 3.3 atau yang lebih tinggi, sebagai *operating system*.

- Fortran *Compiler*, untuk menjalankan model DEMO, MACRO, DEMI, dan DISDEP serta suprogram pendukungnya.
- OMNI yang merupakan bahasa pemrograman untuk menuliskan program model MARKAL. Program digunakan untuk pembentukan data base, *linear programming matrix* untuk dioptimasi dengan menggunakan XPRESS *optimizer*, dan penulisan hasil pemodelan.
- XPRESS *Optimizer*, untuk mengoptimasi model MARKAL yang berupa persoalan *linear programming*.
- MUSS (*MARKAL User Support System*) yang digunakan supaya pemakai lebih interaktif dalam menggunakan model MARKAL di *personal computer*. Kemampuan MUSS meliputi : proses pengolahan database, menganalisis hasil optimasi, menampilkan hasil dalam format grafik, dan manajemen skenario.

6. Penutup

Saat ini *Brookhaven National Laboratories* telah mengembangkan keterkaitan antara model MARKAL dengan sektor ekonomi yang disebut model MARKAL-MACRO[2]. Yang dimaksud MACRO di sini adalah model yang dikembangkan oleh Alan S. Manne dari Universitas Stanford yang prinsip pemodelannya sama dengan model ETA-MACRO, GLOBAL 2100 dan RT12. Model MARKAL-MACRO dibuat dalam bahasa GAMS (*General Algebraic Modeling System*) dengan MINOS sebagai alat untuk mengoptimasi (*non-linear optimisation*).

Daftar Pustaka

- [1] Gary A. Goldstein, *PC-MARKAL and the MARKAL Users Support System (MUSS) : User's Guide*, Brookhaven National Laboratory, New York, 1991.
- [2] IAEA, *DECADES : Computerised Tools for Comparative Assessment of Electricity Generation Option and Strategies*, May, 1994.
- [3] Manfred Kleemann and Dieter Wilde, *Intertemporal Capacity Expansion Models*, Energy, Vol.15, No.7/8, p.549-571, Pergamon Press, UK, 1990.
- [4] Manfred Kleemann, *Energy Use and Air Pollution in Indonesia*, Avebury Studies in Green Research, 1994.
- [5] Sudjanadi, *Uraian Singkat Model MARKAL*, Hasil-hasil Lokakarya Strategi Penyediaan Energi, BPP Teknologi, 1989.
- [6] Trihono Sastrohartono, *Sistem Perencanaan Energi Terpadu yang Berwawasan Lingkungan*, Hasil-Hasil Lokakarya Energi 1992, hal.491-529, KNI-WEC, 1993.