ANALISIS PENGAMBILAN KEPUTUSAN UNTUK PERENCANAAN PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

Agus Sugiyono

ABSTRACT

Electricity sector is an important sector to drive industrialization process. There are some importance factors that should be consider making electricity planning, i.e.: energy resource scarcity, energy cost, and environmental impact. MARKAL (market allocation) model is used to make planning strategy based on least cost optimization. Five cases as decision alternatives were created, i.e.: baseline (BASE), increasing renewable energy use (RENEW), household energy conservation (CONSERV), decreasing photovoltaic cost (PVCOST), and replacing captive power (CAPTIVE). Result shows that coal is an dominant fuel for electricity generation in the future almost in every scenarios.

The final goal of electricity planning is provided information to help decision makers. Decision maker must choose among alternatives that represented in scenarios. Many aspects in the alternatives have a number of conflicting objectives (e.g., minimize cost and minimize emission). Therefore, it is appropriate using tools to make decision analysis among alternatives. DAM (Decision Analysis Module) is a multiple criteria decision analysis tool that easy to used and powerful to make decision among scenarios. After performing analysis, RENEW and CONSERV scenario are the potentially optimal alternatives. If the unit costs of NOx emission is set at a certain value then RENEW scenario become an optimal alternatives.

1 PENDAHULUAN

Sektor energi sangat penting bagi perekonomian Indonesia karena selain sebagai komoditas ekspor juga digunakan di dalam negeri sebagai bahan bakar dan bahan baku. Sektor ketenagalistrikan merupakan bagian dari sektor energi yang sangat berperan dalam proses industrialisasi. Kendala utama dalam pengembangan ketenagalistrikan adalah cadangan beberapa sumber energi fosil semakin terbatas dan semakin ketatnya peraturan untuk mempertahankan kualitas lingkungan hidup.

Data dari Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM) tahun 2002 menunjukkan bahwa besarnya cadangan minyak bumi Indonesia adalah 5×10^9 SBM. Cadangan gas bumi sebesar 90 TSCF (Tera Standard Cubic Feet), sedangkan batubara mempunyai cadangan sebesar 5×10^9 TCE (Ton Coal Equivalent). Bila ditinjau dari rasio cadangan (*Reserve to Production Ratio - R/P*), batubara mempunyai R/P tertinggi, yaitu sekitar 50 tahun, disusul gas bumi dan minyak bumi yang masing-masing mempunyai *R/P* sekitar 30 tahun dan 10 tahun. Besarnya R/P tersebut didasarkan pada cadangan dan produksi tahun 2002[(6)]. Dengan mempertimbangkan kondisi ini pemerintah membuat kebijakan untuk secara bertahap mengganti penggunaan minyak bumi dengan bahan bakar lain khususnya untuk pembangkit tenaga listrik.

Penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar di pembangkit tenaga listrik dapat menimbulkan polusi udara yang dihasilkan dari proses pembakaran atau konversi. Polusi ini dapat berupa SO_2, NO_2, CO_2, VHC (*Volatile Hydrocarbon*) dan SPM (*Suspended Particulate Matter*). Polusi tersebut, akan tersebar dari sumbernya melalui proses dispersi dan deposisi yang dapat menurunkan kualitas udara, tanah, dan air di sekitarnya. Pemerintah melalui Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. KEP-13/MENLH/3/1995 telah mengeluarkan peraturan standar emisi untuk pembangkit tenaga listrik. Peraturan ini mengatur batas maksimum dari semua emisi yang dikeluarkan, yaitu batas maksimum untuk partikel sebesar 150 mg/m^3, emisi SO_2 sebesar 750 mg/m^3, emisi NO_2 sebesar 850 mg/m^3, dan

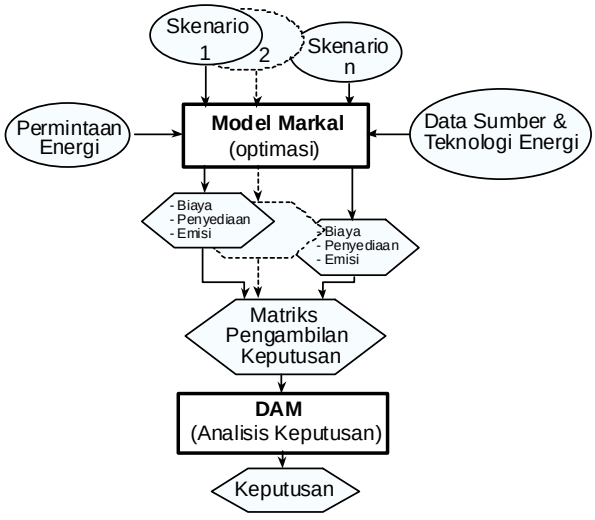
tingkat opasitas sebesar 20 %. Dengan adanya batas maksimum pengeluaran emisi tersebut, menyebabkan pemilihan teknologi pembangkit tenaga listrik perlu mempertimbangkan penggunaan teknologi baru yang lebih efisien dan ramah lingkungan[11].
Penggunaan minyak bumi dan gas bumi sebagai bahan bakar untuk pembangkit tenaga listrik menghasilkan polusi udara yang relatif kecil dibandingkan dengan penggunaan batubara. Penggunaan batubara sebagai bahan bakar di pembangkit tenaga listrik dalam jumlah yang besar akan menimbulkan polusi yang semakin besar, walaupun biaya pembangkitannya dapat bersaing dengan pembangkit listrik berbahan bakar minyak bumi dan gas. Untuk itu, *trade-off* antara biaya dan lingkungan sangat diperlukan dalam pemanfaatan sumber energi fosil sebagai bahan bakar di pembangkit tenaga listrik.

Energi terbarukan seperti energi surya (matahari) meskipun ramah lingkungan tetapi biaya untuk investasi cukup besar. Energi air dan energi panas bumi meskipun mempunyai potensi yang cukup besar namun perlu pertimbangan yang matang untuk pengembangannya, karena sumber energi ini berada jauh dari pengguna. Oleh karena itu, penelitian perencanaan pembangkit tenaga listrik yang dianalisis dalam makalah ini, diarahkan pada pemilihan komposisi bahan bakar dan pengembangan pembangkit tenaga listrik secara terpadu dengan memperhatikan kelestarian lingkungan.

Penelitian perencanaan pembangkit tenaga listrik dilakukan dengan menggunakan optimasi dari sisi penyediaan energi dengan mengambil kurun waktu selama 30 tahun, yaitu dari tahun 2000 sampai tahun 2030. Dari optimasi ini dibuat lima kasus dengan mempertimbangkan komposisi dari bahan bakar untuk pembangkit tenaga listrik. Masing masing kasus akan menghasilkan biaya serta emisi tertentu. Berdasarkan biaya dan emisi ini akan dipilih kasus yang optimum melalui analisis pengambilan keputusan dengan berbagai kriteria.

2 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian prakiraan penyediaan energi dari 2000 sampai tahun 2030 menggunakan perangkat lunak model MARKAL (*Market Allocation)* dengan selang periode selama 5 tahun. Analisis dilakukan untuk lima buah kasus dengan mempertimbangkan komposisi dari bahan bakar untuk pembangkit tenaga listrik. Hasil optimasi untuk setiap kasus berupa penggunaan setiap teknologi serta total biayanya. Emisi penggunaan bahan bakar untuk setiap teknologi ditentukan berdasarkan konstanta emisi. Dalam penelitian ini hanya emisi SO_2, emisi NOx, emisi SPM dan emisi CO_2 yang dipertimbangkan. Biaya dan emisi dari analisis hasil sebelumnya merupakan parameter untuk melakukan analisis pengambilan keputusan dengan berbagai kriteria menggunakan perangkat lunak DAM (*Decision Analysis Module*). Diagram alir dari penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3.1 Model Markal

Model MARKAL adalah suatu model untuk mengalokasikan penyediaan energi primer dan sekunder dengan berbagai pilihan sumber dan teknologi energi untuk memenuhi kebutuhan energi final maupun energi bermanfaat (*useful energy*). Model ini menggunakan teknik *linear programming* (LP) untuk mengalokasikan penyediaan energi. Persoalan dalam LP dapat dirumuskan secara matematis seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1.

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

dengan variabel *Z* adalah fungsi obyektif, yang dalam hal ini adalah meminimumkan total biaya penyediaan energi, dengan suatu fungsi kendala (Persamaan 2 dan 3).

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

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

dengan :

- i = 1,2, ... , m adalah indeks untuk menyatakan baris
- j = 1,2, ... , 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.

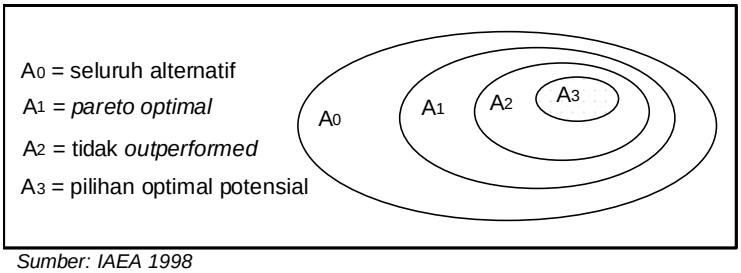
3.2 Perangkat Lunak DAM

Tujuan akhir dalam perencanaan pembangkit tenaga listrik adalah untuk memperoleh informasi yang berguna bagi pengambilan keputusan. Pengambil keputusan harus dapat memilih diantara beberapa allternatif pilihan yang direpresentasikan sebagai kasus. Beberapa aspek dari alternatif pilihan (yang disebut kriteria) sering saling bertolak belakang, seperti mempunyai biaya pembangkitan yang murah tetapi tinggi tingkat pencemarannya. Oleh karena itu perlu suatu perangkat pembantu untuk dapat menentukan pilihan berdasarkan pertimbangan yang obyektif.

Perangkat lunak DAM merupakan alat yang dapat membantu untuk menganalisis pengambilan keputusan dengan berbagai kriteria (*multiple criteria decision analysis*). DAM dapat digunakan sebagai alat untuk:

- mengidentifikasi alternatif pilihan dengan menggunakan beberapa konsep optimalisasi yang berbeda.
- memahami mengapa suatu alternatif pilihan disebut optimal.
- menganalisis sensitivitas setiap alternatif pilihan.
- merepresentasikan hasil analisis, baik dengan menggunakan format grafik maupun numerik (IAEA 1998).

Metodologi yang digunakan dalam DAM menerapkan teknik terbaru dalam analisis pengambilan keputusan, termasuk didalamnya melakukan *trade-off*. *Trade-off* biasanya dilakukan berdasarkan pembobotan kriteria. Jika bobot tidak diketahui dengan pasti (informasi tidak lengkap) dan ini sering terjadi, ada kemungkinan tidak mendapatkan pilihan yang optimal. Dalam kondisi yang demikian ini, maka lebih baik untuk mengidentifikasi kandidat pilihan. Kandidat pilihan meskipun tidak optimal masih lebih baik dalam beberapa kriteria dari pada alternatif lainnya. Hierarki kandidat pilihan mulai dari yang kurang optimal ke yang optimal adalah: *pareto optimal* (efisien), tidak *outperformed*, dan optimal potensial. Relasi antar ketiga ranking ini dinyatakan dalam Gambar 2.



Sumber: IAEA 1998

Gambar 2. Hierarki kandidat pilihan

Alternatif pilihan A_1 dikatakan lebih baik secara *pareto optimal* dari pada A_0 bila dan hanya bila A_1 tidak lebih jelek dalam semua kriteria dari pada A_0 dan A_1 minimal ada satu kriteria yang lebih baik dari pada A_0. Alternatif pilihan A_2 dikatakan tidak *outperformed* dari pada A_1 bila A_2 mempunyai skor total yang lebih tinggi dari pada A_1 untuk semua kombinasi bobot yang mungkin. Alternatif pilihan A_3 dikatakan optimal potensial bila A_3 mempunyai skor total yang maksimum untuk semua kombinasi bobot yang mungkin.

3.3 Kasus

Alternatif pilihan dibuat berdasarkan lima buah kasus sebagai strategi dalam pengembangan pembangkit tenaga listrik. Kelima kasus tersebut adalah:

- Kasus dasar (*BASECASE*)
  Kombinasi bahan bakar pembangkit tenaga listrik dioptimasi berdasarkan biaya yang termurah. Kasus ini mengasumsikan bahwa harga minyak bumi sebesar 28 $/barel dan biaya investasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) tetap sebesar 1650 $/kW mulai pada tahun 2010.
- Kasus meningkatkan penggunaan energi terbarukan (*RENEW*)
  Karena masih banyak mempunyai sumber energi terbarukan seperti: tenaga air, panas bumi, tenaga surya dan biomasa, maka penggunaan energi tersebut perlu dioptimalkan. Meskipun pemanfaatan energi terbarukan untuk pembangkit tenaga saat ini sangat kecil, pada kasus ini ditingkatkan penggunaannya menjadi 10% setelah tahun 2020.
- Kasus konservasi energi untuk rumak tangga (*CONSERV*)
  Kasus ini mempertimbangkan penggunaan peralatan rumah tangga yang lebih efisien. Sehingga dapat tercapai target peningkatan konservasi energi sebesar 1% per tahun.
- Kasus penurunan biaya investasi PLTS (*PVCOST*)
  Kasus ini mengasumsikan bahwa biaya investasi PLTS akan terus menurun. Biaya investasi akan menurun secara bertahap dari sebesar 1650 $/kW pada tahun 2010 menjadi 968 $/kW pada tahun 2030. Sedangkan biaya operasi dan perawatan sebesar 1% dari biaya investasi.
- Kasus penggantian *captive power* (*CAPTIVE*)
  Kasus ini mempertimbangkan target pemerintah untuk mengganti *captive power* pada tahun 2010.

Hasil dari optimasi yang penting untuk diketahui dan akan digunakan sebagai data dalam menganalisis pengambilan keputusan adalah:

- Kombinasi bahan bakar untuk pembangkit listrik yang optimal.
- Total biaya sistem yang tidak didiskonto (*undiscounted cost*) dan atau yang didiskonto (*discounted cost*) termasuk didalamnya biaya investasi, biaya operasi dan perawatan, serta biaya pengangkutan dan pengadaan.
- Total emisi setiap tahun yang tidak didiskonto (emisi SO_2, emisi NOx, emisi SPM dan emisi CO_2).

3 ANALISIS SEKTOR KETENAGALISTRIKAN

Pembangkit tenaga listrik di Indonesia dikelompokkan menjadi dua, yaitu pembangkit tenaga listrik untuk kepentingan umum dan pembangkit tenaga listrik untuk kepentingan sendiri. Pembangkit

tenaga listrik untuk kepentingan umum sebagian besar dipasok oleh PLN dan sebagian lagi dipasok oleh perusahaan tenaga listrik swasta (*Independent Power Producer* - IPP) dan koperasi. Sedangkan pembangkit tenaga listrik untuk kepentingan sendiri (*captive power)* diusahakan oleh swasta untuk kepentingan operasi perusahaan sendiri dan biasanya tidak terjangkau oleh jaringan PLN.

3.1 Pembangkit Tenaga listrik

Pada tahun 2000 kapasitas terpasang dari PLN mencapai 20,7 GW dengan total produksi tenaga listrik sebesar 92,6 TWh. Dari total produksi tersebut hanya 9,7% dibeli dari perusahaan tenaga listrik swasta maupun koperasi. Pembangkit tenaga listrik dengan bahan bakar batubara mempunyai pangsa yang paling besar yaitu sebesar 34,5% dari total pembangkitan. Pangsa yang kedua adalah pembangkit tenaga listrik yang menggunakan gas bumi yaitu sebesar 30,4%. Sisanya adalah pembangkit tenaga listrik diesel (21,0%), pembangkit tenaga listrik air (10,9%) dan pembangkit tenaga listrik panas bumi (3,2%).

Pada tahun 2000 kapasitas terpasang *captive power* diperkirakan mencapai 16,8 GW. Sedangkan data produksi tenaga listrik dari *captive power* sangat sulit diperoleh karena banyak *captive power* yang instalasinya hanya sebagai unit cadangan. Berdasarkan survei yang dilakukan Pape (1998) produksi tenaga listrik dari *captive power* tahun 1997 mencapai 39,1TWh. *Captive power* sebagian besar menggunakan bahan bakar diesel (42,0%) diikuti oleh batubara (29,2%), gas bumi (17,6%), dan tenaga air (11,2%). Dari total kapasitas terpasang pembangkit listrik PLN dan *captive power* ternyata batubara merupakan bahan bakar yang paling banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik.

3.2 Prakiraan Kebutuhan Tenaga listrik

Krisis ekonomi yang dialami pada pertengahan tahun 1997 menyebabkan investasi terutama di bidang infrastruktur menurun, sehingga rencana pembangunan pembangkit tenaga listrik banyak yang tertunda, khususnya untuk pembangkit tenaga thermal dengan kapasitas besar.

Meskipun terjadi penurunan penggunaan tenaga listrik di sektor industri pada tahun 1998, namun pada tahun-tahun berikutnya penggunaan tenaga listrik tetap mengalami pertumbuhan. Penggunaan tenaga listrik PLN tahun 1995 mencapai 49,7 TWh dan meningkat menjadi 79,2 TWh pada tahun 2000, atau selama kurun waktu 5 tahun penggunaan tenaga listrik PLN rata-rata tumbuh sekitar 9,8% per tahun. Dalam kurun waktu tersebut penggunaan tenaga listrik di sektor industri hanya meningkat sebesar 6,7% per tahun dari sebesar 24,7 TWh menjadi 34,0 TWh. Pertumbuhan penggunaan tenaga listrik PLN terbesar adalah sektor komersial yang mencapai sebesar 16% per tahun dari 6,9 TWh menjadi 14,5 TWh, kemudian disusul sektor rumah tangga yang tumbuh sebesar 11,1% per tahun dari 18,1 TWh menjadi 30,6 TWh.

Prakiraan kebutuhan tenaga listrik dihitung berdasarkan besarnya aktivitas dan intensitas penggunaan tenaga listrik. Aktivitas penggunaan tenaga listrik berkaitan dengan tingkat perekonomian dan jumlah penduduk. Semakin tinggi tingkat perekonomian akan menyebabkan aktivitas penggunaan tenaga listriknya semakin tinggi, begitu juga untuk jumlah penduduk. Pertumbuhan pendapatan domestik bruto (PDB) merupakan pemicu pertumbuhan aktivitas penggunaan tenaga listrik di semua sektor, kecuali sektor rumah tangga. Penggunaan tenaga listrik di sektor rumah tangga dipengaruhi oleh jumlah penduduk per kapita. Prakiraan kebutuhan tenaga listrik sebagai masukan model untuk optimasi ditampilkan pada Tabel 1. Kebutuhan tenaga listrik dalam kurun waktu 2000 - 2030 diperkirakan rata-rata akan tumbuh sebesar 7% per tahun.

Table 1. Prakiraan Kebutuhan Tenaga Listrik dan Kapasitas Terpasang

		2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Kebutuhan Listrik	PJ	379,9	550,7	791,6	1193,1	1761,9	2579,3	3666,0
Kapasitas Terpasang	GW	38,4	52,3	70,5	94,3	125,1	162,5	2094

Catatan: tahun 2000 adalah tahun dasar yang merupakan data historis.

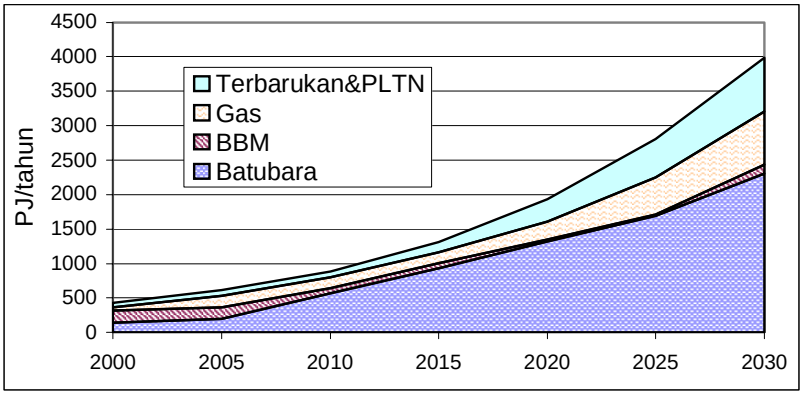
4 ANALISIS PENGAMBILAN KEPUTUSAN

4.1 Prakiraan Pembangkit Tenaga Listrik

Lebih dari 80 macam teknologi pembangkit tenaga listrik digunakan dalam model ini, baik yang sudah komersil saat ini maupun teknologi baru. Untuk lebih mempermudah analisis, teknologi pembangkit tenaga listrik diagregasi menjadi 4 macam sesuai dengan bahan bakarnya, yaitu:

- Batubara
- Bahan bakar minyak (BBM) yaitu 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).

Secara garis besar hasil optimasi menunjukkan bahwa penyediaan tenaga listrik akan didominasi oleh pembangkit listrik batubara untuk semua kasus. Dalam makalah ini hanya skenario *BASE* yang ditampilkan hasilnya seperti ditunjukkan pada Grafik 1. Pada kasus *BASE* 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%.



Grafik 1. Prakiraan Pembangkit Tenaga Listrik (Skenario BASE)

Pada kasus *RENEW* pangsa penggunaan energi terbarukan sedikit meningkat menjadi 21% pada akhir periode analisis diikuti penurunan pangsa penggunaan batubara menjadi 57%. Sedangkan pengunaan bahan bakar lainnya relatif sama dengan kasus *BASE*. Dengan kasus *CONSERV*, penggunaan gas meningkat sedangkan penggunaan batubara pertumbuhannya berkurang menjadi 9,4% per tahun. Pada kasus *PVCOST* pangsa penggunaan batubara pada akhir periode menurun menjadi 50% dan digantikan dengan makin bertambahnya penggunaan energi terbarukan. Sedangkan untuk kasus *CAPTIVE* terjadi peningkatan penggunaan BBM meskipun tidak terlalu besar.

4.2. Total Biaya Sistem

Karena tidak tersedia keluaran untuk biaya pembangkit tenaga listrik maka dalam analisis ini menggunakan total biaya sistem dikalikan dengan 11% yang merupakan pangsa rata-rata pembangkit tenaga listrik terhadap total penyediaan energi. Biaya pembangkit tenaga listrik ditunjukkan pada Tabel 2. Secara umum skenario *CONSERV* paling rendah biaya pembangkitannya dibandingkan dengan skenario lainnya, sedangkan kasus *CAPTIVE* mempunyai biaya pembangkitan yang paling tinggi. Hal tersebut disebabkan pada kasus *CONSERV* kapasitas pembangkit listriknya berkurang, sehigga dapat mengurangi terhadap total biaya sistem. Pada kasus *CAPTIVE*, setelah tahun 2010, yaitu tahun 2015 sampai tahun 2030 pemanfaatan *renewable* dan nuklir pada pembangkit listrik bertambah, sehingga total biaya sistem pada *captive* lebih tinggi dibandingkan kasus lainnya.

Tabel 2. Biaya Pembangkit Tenaga Listrik (*Discounted*) dalam Juta Dolar

Skenario	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	Total
BASE	2.450	2.761	2.564	2.131	1.711	1.401	1.087	70.524
RENEW	2.450	2.761	2.582	2.152	1.724	1.400	1.078	70.731
CONSERV	2.441	2.754	2.546	2.092	1.680	1.358	1.031	69.510
PVCOST	2.450	2.761	2.562	2.123	1.713	1.391	1.083	70.414
CAPTIVE	2.448	2.766	2.552	2.136	1.719	1.441	1.091	70.763

Sumber: Keluaran Model MARKAL

4.3. Emisi

Emisi dihitung berdasarkan besarnya pembangkitan tenaga listrik untuk setiap bahan bakar dengan memperhitungkan koefisien emisi. Tabel 3 menampilkan koefisien emisi dari setiap pembangkit tenaga listrik untuk setiap jenis emisi. Hasil perhitungan emisi yang tidak didiskonto setiap tahun untuk masing-masing kasus ditampilkan pada Table 4. Seperti halnya dengan biaya, emisi yang tidak didiskonto perlu didiskonto ke tahun 2000 dengan faktor diskonto sebesar 10% per tahun sebagai masukan untuk analisis menggunakan DAM. Kasus *CONSERV* mempunyai emisi yang relatif lebih rendah dari pada kasus lainnya. Sedangkan kasus *BASE* mempunyai emisi yang paling besar. Hal ini dapat dipahami karena kasus selain *BASE* dimaksudkan untuk mengurangi dampak lingkungan.

Tabel 3. Koefisien Emisi Pembangkit Tenaga Listrik

Bahan Bakar	Koefisien Emisi			
	ton/PJ			1000 ton/PJ*
	SO_2	NOx	SPM	CO_2
Batubara	1.209,66	1.229,16	186,04	85,67
BBM	683,33	1.266,67	28,89	70,67
Gas	0,00	619,44	0,00	49,50
Terbarukan/PLTN	0,00	0,00	0,00	0,00

Catatan: - Diolah berdasarkan BPPT-GTZ 1995, BPPT-KFA 1993 dan Manne and Richels 1992.
** Untuk Emisi CO_2, PJ dihitung berdasarkan input bahan bakar*

Tabel 4. Emisi SO_2, NO_2, SPM dan CO_2.(*undiscounted*)

Emisi	Skenario	Unit	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
SO_2	BASE	kt/a	324,1	385,9	753,7	1.186,7	1.626,6	2.061,5	2.905,8
	RENEW	kt/a	324,0	383,6	701,8	1.119,2	1.574,4	2.049,8	2.790,2
	CONSERV	kt/a	322,0	378,2	728,5	1.175,2	1.560,6	2.010,4	2.543,2
	PVCOST	kt/a	324,0	385,5	748,8	1.191,5	1.624,2	2.161,4	2.533,5
	CAPTIVE	kt/a	324,5	401,4	739,0	1.147,0	1.566,2	1.959,4	2.840,9
NOx	BASE	kt/a	420,4	559,4	890,6	1.333,8	1.822,8	2.436,2	3.479,3
	RENEW	kt/a	420,4	557,7	835,9	1.254,5	1.725,8	2.350,2	3.364,7
	CONSERV	kt/a	419,8	551,0	864,6	1.323,7	1.739,6	2.305,3	3.105,0
	PVCOST	kt/a	420,4	558,6	888,0	1.344,3	1.815,7	2.454,7	3.062,6
	CAPTIVE	kt/a	420,7	565,9	883,2	1.312,1	1.776,8	2.390,8	3.445,1
SPM	BASE	kt/a	31,4	40,9	107,7	174,8	247,1	315,1	432,1
	RENEW	kt/a	31,4	40,8	100,2	166,8	239,4	313,3	417,4
	CONSERV	kt/a	31,0	40,0	104,2	173,6	237,2	307,5	387,1
	PVCOST	kt/a	31,4	41,0	107,0	175,5	246,6	329,0	374,2
	CAPTIVE	kt/a	31,4	43,4	105,5	168,9	237,7	292,9	415,5
CO_2	BASE	Mt/a	66,4	92,5	154,3	231,8	320,5	432,3	612,4
	RENEW	Mt/a	66,4	92,4	145,0	219,0	302,6	415,4	594,0
	CONSERV	Mt/a	66,3	91,2	149,9	230,4	305,7	407,6	552,3
	PVCOST	Mt/a	66,4	92,5	153,9	233,8	319,0	432,6	538,4
	CAPTIVE	Mt/a	66,4	93,5	153,2	228,6	312,8	422,6	603,9

Catatan: - kt/a = kilo ton / annum (kilo ton/tahun)
- Mt/a = million ton / annum (juta ton/tahun)

4.4 Analisis Menggunakan DAM

Berdasarkan hasil optimasi dan perhitungan emisi maka dapat diformulasikan matriks untuk pengambilan keputusan seperti pada Tabel 5. Matriks ini merupakan masukan untuk DAM. Kasus digunakan sebagai alternatif keputusan (data baris) dan biaya serta emisi sebagai kriteria (data kolom). Kriteria disamping mempunyai unit juga mempunyai arah optimasi (meminimumkan atau memaksimumkan), dalam hal ini baik kriteria biaya maupun kriteria emisi bertindak sebagai kriteria yang akan diminimumkan. Satuan dari kriteria diubah-ubah supaya rentang nilai data tidak jauh berbeda satu dengan yang lainnya.

Table 5. Biaya Pembangkit Tenaga Listrik dan Emisi (*discounted*)

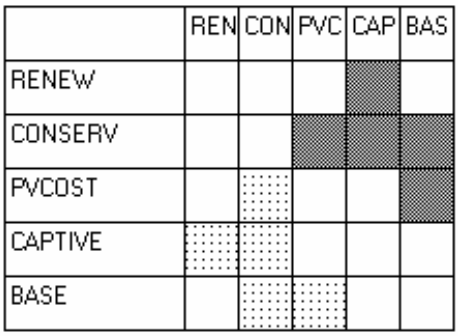
Skenario	Biaya	SO_2	NOx	CO	CO_2
	10^9 $	kTon	kTon	kTon	MTon
BASE	70,52	8.764,15	10.725,35	1.164,78	1.823,79
RENEW	70,73	8.496,41	10.371,80	1.129,49	1.763,05
CONSERV	69,51	8.488,83	10.401,78	1.127,68	1.768,91
PVCOST	70,41	8.695,91	10.613,30	1.154,09	1.803,08
CAPTIVE	70,76	8.626,99	10.641,54	1.139,05	1.808,29

4.4.1 Analisis Efisiensi (*Pareto Dominance*)

Hasil analisis menggunakan DAM berupa matriks dan setiap sel matriks dapat berisi salah satu warna: merah, biru atau kuning. Setiap warna mempunyai arti tertentu, yaitu:

- Merah, menunjukkan bahwa alternatif dalam baris tidak lebih jelek dari pada alternatif dalam kolom untuk setidaknya satu kriteria (dalam makalah ini warna merah dinyatakan dalam warna gelap).
- Biru, menunjukkan kebalikan dari warna merah, yaitu bahwa alternatif dalam baris tidak lebih baik dari pada alternatif dalam kolom setidaknya untuk satu kriteria (dalam makalah ini dinyatakan dalam warna titik-titik).
- Kuning, menunjukkan bahwa baik alternatif dalam kolom maupun dalam baris tidak lebih baik maupun tidak lebih jelek (dalam makalah ini dinyatakan dalam warna putih).

Dari hasil analisis efisiensi dapat ditarik kesimpulan bahwa kasus *RENEW* lebih efisen dari pada *CAPTIVE*. Kasus *CONSERV* lebih efisien dari pada *PVCOST, CAPTIVE* dan *BASE*. Sedangkan kasus *PVCOST* lebih efisien dari pada *BASE*. Sedangkan hubungan lainnya tidak dapat ditentukan (lihat Gambar 3).



Gambar 3. Analisis *Pareto Dominance*

4.4.2 Analisis *Outperformance*

Untuk menganalisis lebih lanjut, kriteria untuk *trade-off* harus ditentukan, karena tidak adanya data yang akurat ataupun studi tentang biaya per unit emisi di Indonesia, nilainya ditentukan dengan batas bawah 1 dan batas atas 10.000 untuk masing-masing emisi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kasus *CONSERV* lebih baik dari pada *PVCOST*, *CAPTIVE* dan *BASE* seperti pada hasil sebelumnya. Namum masih ada tambahan informasi yang diperoleh yaitu kasus *RENEW* lebih baik dari pada *PVCOST, CAPTIVE* dan *BASE*. Ini berarti bahwa dengan penambahan biaya per unit emisi pada rentang nilai tertentu menyebabkan kasus *BASE* menjadi tidak optimal. Tetapi sampai dengan

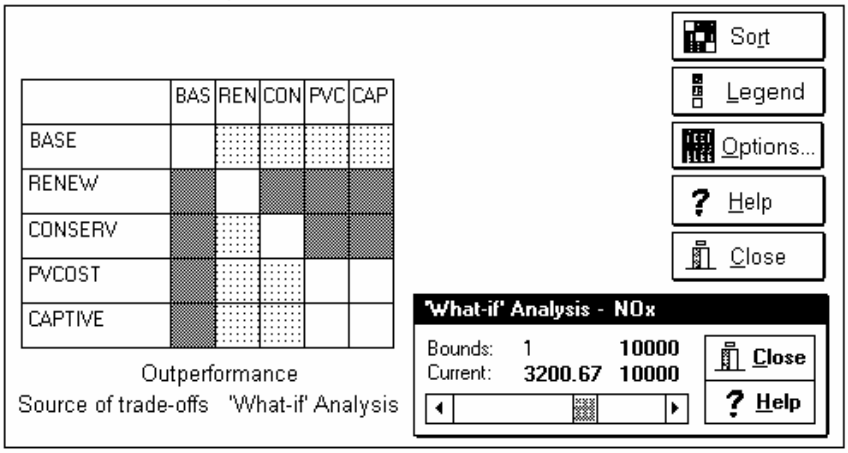
analisis ini belum dapat ditentukan kasus yang optimal karena hubungan antara kasus *CONSERV* dan *RENEW* belum bisa ditentukan.

4.4.3 Analisis Optimal Potensial

Analisis ini dapat menghasilkan pilihan yang optimum ataupun kandidat pilihan dengan adanya kombinasi *trade-off* yang memungkinkan terjadinya seleksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kasus *RENEW* dan *CONSERV* merupakan dua kandidat pilihan yang optimal potensial.

4.4.4 Analisis *'What-If'*

Jika skenario *RENEW* dan *CONSERV* dievaluasi lebih jauh dengan menggunakan analisis *what-if* maka beberapa temuan baru dapat ditunjukkan. Dengan mengubah rentang biaya per unit emisi dari 1 sampai 10.000 untuk kriteria SO_2, SPM dan CO_2 maka tidak terjadi perubahan kandidat pilihan. Ini berarti bahwa biaya per unit emisi SO_2, SPM dan CO_2 tidak penting untuk analisis. Bila biaya per unit emisi NOx diubah rentangnya dari 1 sampai 10.000 maka kandidat pilihan akan berubah dan pada nilai biaya per unit emisi NOx di atas 3200 (bila dikembalikan ke unit semula menjadi 320 ribu $/ton) maka pilihan yang optimal adalah skenario *RENEW* (Gambar 4).



Gambar 4. Hasil Pengujian *What-if*

5 KESIMPULAN DAN SARAN

Faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam membuat strategi perencanaan pengembangan kelistrikan adalah terbatasnya cadangan sumber daya energi, biaya pembangkitan untuk setiap jenis bahan bakar, dan dampak lingkungan. Dengan menggunakan model MARKAL dan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, batubara diperkirakan akan menjadi bahan bakar yang utama untuk pembangkit tenaga listrik karena cadangannya masih sangat besar.

Dari hasil pengujian serta analisis dengan menggunakan DAM terhadap lima kasus sebagai alternatif pilihan untuk pengembangan pembangkit tenaga listrik ternyata yang optimal potensial adalah kasus *RENEW* dan *CONSERV*. Jika biaya per unit emisi NOx ditentukan pada nilai di atas 320 ribu $/ton, skenario *RENEW* merupakan pilihan yang optimum.

Beberapa kelemahan dalam perhitungan emisi dan pembuatan kasus pada penelitian ini adalah emisi seharusnya dapat dihitung secara lebih teliti dengan memperhitungkan setiap unit dari teknologi pembangkit tenaga listrik, bukan dari agregat pembangkit tenaga listrik. Selain itu, kasus seharusnya dibuat lebih moderat sehingga terlihat perbedaan hasil antara kasus yang satu dengan lainnya, baik untuk total biaya maupun emisinya. Dua hal tersebut sangat berpengaruh terhadap hasil analisis untuk menentukan pilihan yang optimum. Oleh karena itu, dibutuhkan adanya penelitian lebih lanjut dengan alternatif yang lebih banyak sehingga dapat digunakan sebagai masukan bagi pembuat kebijakan energi.

DAFTAR PUSTAKA

1. BPPT (2000). *Decision Analysis and Planning for Electricity Generation in Indonesia*, Final Report for IAEA Research Contract No. RC 9527/R2, Jakarta.
2. BPPT-GTZ (1995). *Technology Assessment for Energy Related CO_2 Reduction Strategies for Indonesia*, Final Report prepared by IC Consult Industrie & Communal Consulting GmbH.
3. BPPT-KFA (1993). *Environmental Impacts of Energy Strategies for Indonesia*, Final Summary Report.
4. Department of Energy and Mineral Resources. Center for Energy Information (2002) *Handbook of Indonesia's Energy Economy Statistics 2002*. Jakarta.
5. DESDM (2003). *Pedoman dan Pola Tetap Pengembangan Industri Ketenagalistrikan Nasional 2003-2020*, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
6. DESDM (2004). Kebijakan Energi Nasional 2003-2020, Rancangan, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
7. IAEA (1998) *DECADES. Tools User's Manual for Version 1.0*, DECADES Project Document No. 2, International Atomic Energy Agency, Vienna.
8. Manne, A.S. and Richels, R.G. (1992). *Buying Greenhouse Insurance : The Economic Costs of CO_2 Emission Limit*, The MIT Press.
9. Pape, H. (1998). *Captive Power in Indonesia, Development in the Period 1980 - 1997*, The World Bank.
10. Pusat Informasi Energi (2002). *Prakiraan Energi Indonesia 2020*, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral bekerja sama dengan EAPO, Jakarta.
11. Sugiyono, A. (2000). *Prospek Penggunaan Teknologi Bersih untuk Pembangkit Listrik dengan Bahan Bakar Batubara di Indonesia*, Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol.1, No.1, hal. 90-95, Jakarta.