

Perencanaan Energi Nasional dengan Model MARKAL¹

Agus Sugiyono

1. Pendahuluan

Konsumsi energi di Indonesia terus meningkat sejalan dengan meningkatnya kegiatan perekonomian. Mengingat cadangan sumber daya energi yang kita miliki semakin menipis dan kemampuan pembiayaan untuk sektor ini sangat terbatas maka diperlukan suatu perencanaan energi terpadu dengan memperhatikan aspek ekonomi, lingkungan hidup dan kesinambungan suplai energi jangka panjang.

Dalam mempertimbangkan aspek ekonomi, strategi penyediaan energi dituntut untuk mendapatkan komposisi suplai dan teknologi energi yang paling optimal, sehingga diperoleh ongkos untuk penyediaan energi yang semurah-murahnya. Dengan strategi tersebut akan membantu daya saing produk industri nasional, khususnya industri yang berorientasi ekspor, karena ongkos produksinya bisa lebih murah. Kondisi ini akan membantu mengurangi pengeluaran masyarakat dalam memenuhi kebutuhan energi. Disamping itu diharapkan dapat memberikan kesempatan seluas-luasnya kepada industri nasional untuk berpartisipasi dan meningkatkan kemampuan dalam penyediaan teknologi energi. Hal ini akan meningkatkan aktifitas perekonomian di sektor energi yang akan memberikan *multiplier effect* terhadap ekonomi makro dan sekaligus dapat menghemat devisa negara.

Disamping aspek ekonomi, aspek lingkungan hidup perlu mendapat perhatian dalam penyusunan strategi penyediaan energi jangka panjang yaitu supaya dapat tetap terjaga keseimbangan lingkungan (sumber daya alam dan ekosistem) dan dapat memanfaatkan energi terbarukan secara optimum. Selain dari kedua aspek tersebut, strategi penyediaan energi hendaknya juga mempertimbangkan kelestarian cadangan dari setiap jenis energi serta peningkatan usaha-usaha konservasi dan diversifikasi terhadap jenis-jenis energi tertentu sehingga kesinambungan suplai energi jangka panjang dapat terjamin.

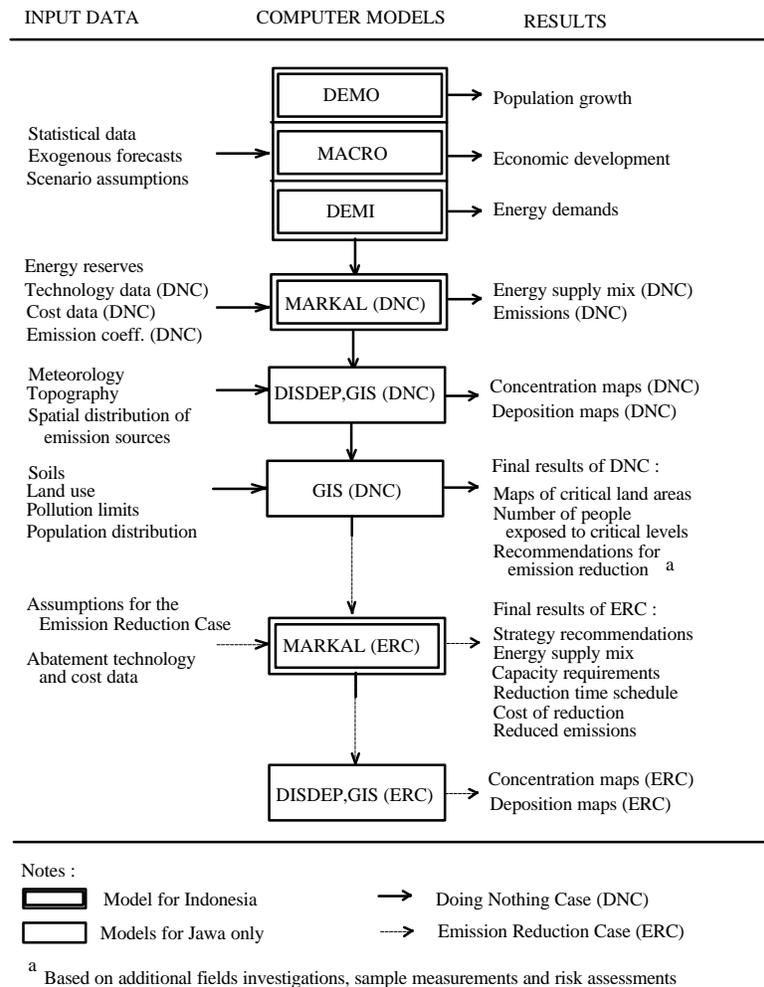
BPP Teknologi dengan melibatkan berbagai instansi pemerintah yang terkait telah membuat perencanaan energi terpadu dengan menggunakan model MARKAL sejak tahun 1983 dengan tahapan dan topik seperti berikut ini.

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

Secara garis besar susunan model dalam studi MARKAL ditunjukkan pada Gambar 1. Karena wilayah Indonesia sangat luas maka untuk merefleksikan perkembangan masing-masing daerah, dalam studi ini Indonesia dibagi menjadi empat wilayah, yaitu : Jawa, Sumatera, Kalimantan, dan Pulau-pulau lain. Kebutuhan energi sebagai input untuk penyusunan strategi penyediaan energi terlebih dahulu ditentukan berdasarkan tingkat pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan penduduk dan data historis pemakaian energi dengan menggunakan model MACRO, DEMO, dan DEMI. Penyediaan energi yang optimal ditentukan dengan mempergunakan model MARKAL berdasarkan teknik *linear programming* dengan mempertimbangkan pilihan sumber daya dan teknologi energi yang tersedia sehingga kebutuhan energi terpenuhi. Berdasarkan hasil yang optimum, jumlah emisi dari penggunaan

¹ Laporan Teknis, Desember 1997

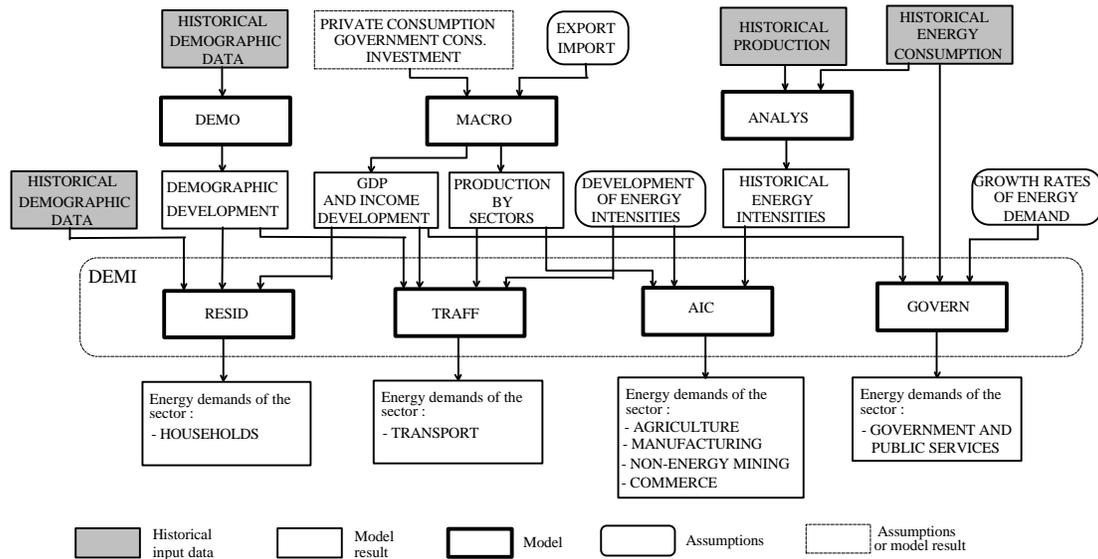
energi dapat dihitung dengan memakai data koefisien emisi dari masing-masing teknologi dengan model DISDEP dan GIS untuk kasus tanpa tindakan (*Doing Nothing Case / DNC*). Dari hasil perhitungan ini kemudian disusun pedoman pengurangan emisi dengan memasukkan teknologi bersih lingkungan ke dalam model MARKAL yang kemudian disebut sebagai kasus pengurangan emisi (*Emission Reduction Case / ERC*). Pada kasus ERC dilakukan optimasi ulang untuk mendapatkan susunan jenis energi dan teknologi yang optimum dari segi ekonomi dengan memperhatikan lingkungan hidup.



Gambar 1. Susunan model dalam studi MARKAL [7]

2. Proyeksi Kebutuhan Energi

Proyeksi kebutuhan energi merupakan dasar bagi penyusunan strategi penyediaan energi. Faktor utama yang menentukan tingkat kebutuhan energi di masa mendatang adalah pertumbuhan ekonomi, jumlah penduduk, harga energi dan pola pemakaian energi di masa lampau. Pertumbuhan ekonomi dapat diproyeksikan berdasarkan pertumbuhan tiap sektor ekonomi, laju pertumbuhan industri nasional serta perkembangan ekspor dan impor. Berdasarkan tingkat pertumbuhan ekonomi tersebut maka kebutuhan energi untuk sektor-sektor : rumah tangga, komersial, industri, transportasi, pemerintahan dan pelayanan umum dapat diperkirakan. Secara garis besar metode untuk memproyeksikan kebutuhan energi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema pendekatan dari penyusunan kebutuhan energi

2.1 Model DEMO

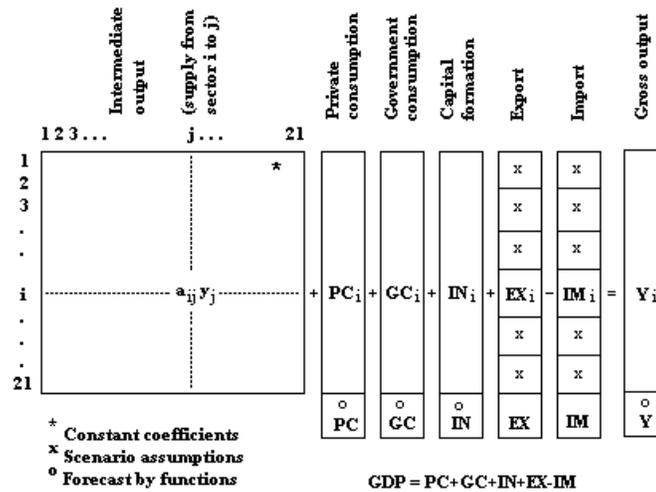
Model DEMO digunakan untuk membuat proyeksi jumlah penduduk untuk setiap wilayah menurut daerah perkotaan dan pedesaan sampai tahun 2023. Laju pertumbuhan penduduk diperkirakan akan menurun secara moderat dalam waktu-waktu mendatang. Laju pertumbuhan penduduk pulau Jawa diperkirakan lebih rendah dari laju pertumbuhan pulau-pulau lain. Secara umum pertumbuhan penduduk daerah perkotaan lebih tinggi dari daerah pedesaan, hal ini lebih banyak disebabkan oleh tingginya tingkat urbanisasi dari desa ke kota serta menurunnya tingkat kematian penduduk, tetapi bukan disebabkan oleh kenaikan angka kelahiran. Laju pertumbuhan penduduk menurun dari 2.2 % per tahun pada tahun 1980 menjadi sekitar 1.7 % saat ini. Hal ini menunjukkan kesuksesan dari program keluarga berencana. Pada akhir Repelita IX laju pertumbuhan penduduk menurun lagi menjadi 0.8 % per tahun seperti diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Proyeksi pertumbuhan penduduk

Tahun	Sumatera		Jawa		Kalimantan		Pulau Lain		Indonesia		
	Kota	Desa	Kota	Desa	Kota	Desa	Kota	Desa	Kota	Desa	Total
1991	10017	28366	41926	67662	2531	6439	5050	21862	59524	124329	183853
1996	12877	30535	51800	65517	3186	6864	6289	23274	74152	126190	200342
2001	16114	32410	61587	62937	3910	7234	7667	24629	89278	127210	216488
2006	19693	33911	70987	60060	4695	7538	9181	25907	104556	127416	231972
2011	23555	34964	79700	57036	5524	7764	10823	27088	119602	126852	246454
2016	27620	35514	87436	54016	6383	7906	12583	28152	134022	125588	259610
2021	31788	35520	93933	51145	7248	7957	14447	29081	147416	123703	271119
2023	33459	35365	96134	50068	7591	7951	15217	29411	152401	122795	275196

2.2 Model MACRO

Model MACRO digunakan untuk membuat proyeksi pertumbuhan ekonomi secara menyeluruh dan proyeksi perkembangan 21 sektor ekonomi sampai tahun 2023. Model ini menggunakan tabel input-output Indonesia tahun 1985 dan mengacu pada skenario perkembangan harga ekspor dari minyak/gas/batubara. Dari 21 sektor ekonomi ada 9 sektor industri yang diharapkan berperan dalam menunjang pertumbuhan perekonomian di masa mendatang yaitu sektor peraltan & mesin, industri kertas, industri kimia, listrik/air/gas, industri tekstil, jasa, kilang minyak, pertanian serta minyak/gas/batubara.



Gambar 3. Metode perhitungan berdasarkan tabel input-output [7]

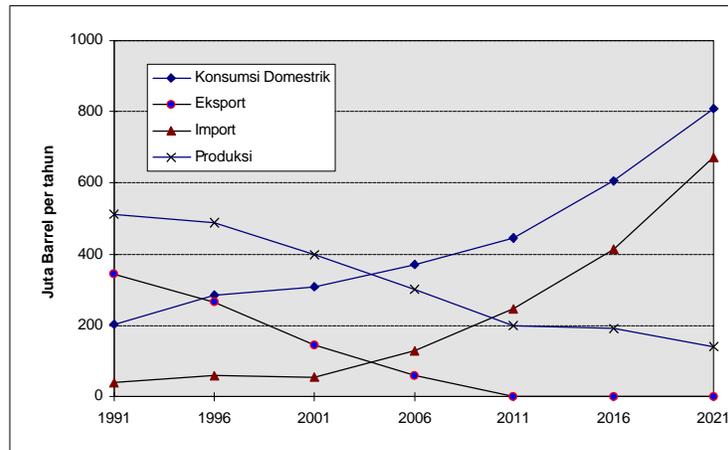
Tabel input-output dapat dikelompokkan menjadi permintaan antara ($A_{ij} * Y_j$), konsumsi rumah tangga (PC) termasuk di dalamnya institusi nonprofit, konsumsi pemerintah (GC) termasuk untuk pertahanan dan keamanan, investasi (IN), ekspor (EX), impor (IM) serta produksi (Y). Dalam model ini metode yang dipergunakan diperlihatkan pada Gambar 3. 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 :

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

dengan :

$$F = PC + GC + IN \tag{2}$$

$$I = \text{matriks identitas} \tag{3}$$



Gambar 4. Skenario ekspor, impor dan konsumsi domestik dari minyak mentah

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

- nilai impor merupakan variabel endogeneous dengan mendefinisikan rasio permintaan domestik. Rasio ini menunjukkan banyaknya perubahan nilai impor (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.

Skenario impor, ekspor serta konsumsi dalam negeri minyak mentah dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 2 menunjukkan laju pertumbuhan ekonomi yang diidentikkan dengan Produk Domestik Bruto (PDB). Secara umum prospek pertumbuhan ekonomi cukup baik dengan adanya deregulasi untuk meningkatkan sumber daya manusia dan meningkatkan ekspor non migas. Dalam Repelita VI laju pertumbuhan PDB diperkirakan akan menurun karena dalam Repelita VI ekspor minyak mulai menurun sebagai akibat menurunnya cadangan minyak mentah. Analisis sensitivitas yang dilakukan menunjukkan bahwa bila ekspor minyak dipertahankan seperti pada tahun 1991 yaitu sebesar 278 juta ton per tahun maka laju pertumbuhan PDB akan mencapai 6.5 % per tahun. Demikian juga dalam Repelita VIII penurunan laju pertumbuhan PDB disebabkan oleh perubahan kondisi Indonesia menjadi negara pengimpor minyak yang disertai dengan kenaikan harga minyak mentah internasional. Dalam periode-periode berikutnya angka ini meningkat kembali, yang menunjukkan mulai mantapnya industrialisasi di Indonesia. Untuk dapat mempertahankan pertumbuhan PDB, maka ekspor non migas harus menjadi penggerak perekonomian dalam Repelita VI, VII dan VIII.

Tabel 2. Pertumbuhan PDB

Tahun pertengahan	Periode	PDB (%/tahun)	PDB(milyar Rp. 85)
1991	Pelita V	6,4	140.033,10
1996	Repelita VI	5,7	184.823,70
2001	Repelita VII	6,3	248.503,60
2006	Repelita VIII	5,1	332.006,80
2011	Repelita IX	6,0	428.336,70
2016	Repelita X	6,1	574.134,30
2021	Repelita XI	6,2	777.568,90
Rata-rata		6,0	

2.3 Model DEMI dan ANALYS

Berdasarkan hasil dari model DEMO dan MACRO, proyeksi kebutuhan energi disusun dengan memakai model DEMI (*Demand Energy Model for Indonesia*) 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 dihasilkannya.

Model DEMI terdiri atas empat sub model yang berdasarkan sektor pemakaian energi (lihat Gambar 2), 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 sub model AIC, kebutuhan energi dihitung berdasarkan intensitas energi yang diperoleh dari data historis produksi dan pemakaian energi menggunakan model ANALYS.
- GOVERN, untuk sektor pemerintahan (*GOVERNment*) dan pelayanan umum.

Tabel 3 memberikan gambaran proyeksi kebutuhan energi Indonesia untuk tiap-tiap sektor. Kebutuhan energi pada Pelita V masih didominasi oleh pemakaian sektor rumah tangga dengan pangsa sebesar 46 % dari total kebutuhan energi nasional diikuti oleh sektor industri dan transportasi. Mulai Repelita VII pangsa kebutuhan energi yang terbesar bergeser pada sektor industri. Pada Repelita XI pangsa terbesar adalah sektor industri yaitu sekitar 51 % dan transportasi pada tempat kedua sebesar 30 %, hal ini mengindikasikan mulainya proses industrialisasi.

Tabel 3. Proyeksi kebutuhan energi final (PJ per tahun)

Sektor	Pelita V	Repelita VI	Repelita VII	Repelita VIII	Repelita IX	Repelita X	Repelita XI
Industri	789,57	1.142,13	1.624,00	2.225,77	2.997,52	4.127,89	5.704,45
Transportasi	536,87	753,28	1.040,33	1.408,56	1.841,73	2.442,83	3.246,73
Rumah Tangga	1.124,40	1.255,34	1.367,57	1.471,07	1.575,33	1.684,88	1.792,48
Komersial	18,13	27,73	43,08	65,82	98,40	151,79	236,97
Pemerintahan dan Pelayanan Umum	10,96	16,12	23,28	32,35	43,46	59,80	82,46
Total	2.479,93	3.194,60	4.098,26	5.203,57	6.556,44	8.467,19	11.063,09

2.3.1. Sektor rumah tangga

Proyeksi kebutuhan energi sektor rumah tangga dihitung berdasarkan laju pertumbuhan jumlah rumah-tangga dan tingkat pemakaian energi yang didasarkan pada pertumbuhan GDP. Kebutuhan energi ini dipakai untuk memasak, penerangan dan peralatan-peralatan listrik. Kebutuhan energi untuk sektor rumah tangga yang sebesar 1.124,40 Peta Joule (PJ) pada Repelita V diperkirakan akan tumbuh dengan laju pertumbuhan rata-rata sebesar 1,6 % per tahun menjadi 1.792,48 PJ pada Repelita XI.

2.3.2. Sektor industri dan komersial

Sektor industri dianalisis secara sektoral, antara lain menurut industri-industri : logam dasar, semen, pupuk, kimia, kertas, gula, dan non-metalik. Proyeksi kebutuhan energi dihitung berdasarkan proyeksi output yang dihasilkan model MACRO untuk setiap sektor industri sedangkan intensitas pemakaian energi dihitung menurut penggunaannya sebagai pemanas langsung dan pemanas tak-langsung.

Kebutuhan energi sektor industri pada Repelita V adalah sebesar 789,57 PJ dan diperkirakan akan tumbuh rata-rata sebesar 6,6 % per tahun menjadi 5.704,45 PJ pada Repelita XI. Sedangkan energi yang dipergunakan sebagai bahan baku ataupun sebagai katalis adalah sebesar 251,05 PJ pada Repelita V dan akan menjadi 2.030,18 PJ pada Repelita XI. Sektor komersial saat ini membutuhkan energi sebesar 18,13 PJ dan diperkirakan akan menjadi 236,97 PJ pada Repelita XI.

2.3.3. Sektor transportasi

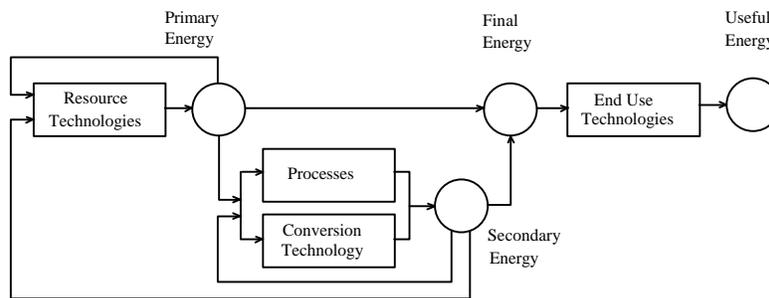
Pada sektor transportasi, yang saat ini menduduki peringkat ketiga dalam mengkonsumsi energi setelah sektor rumah tangga dan sektor industri, pertumbuhan pemakaiannya dipengaruhi oleh laju pertumbuhan penduduk dan tingkat perekonomian nasional. Konsumsi energi pada Repelita V adalah sebesar 536,87 PJ dan diperkirakan akan tumbuh sekitar 6 % per tahun sampai Repelita XI (3.246,73 PJ).

2.3.4. Sektor pemerintah dan pelayanan umum

Konsumsi energi sektor pemerintahan dan pelayanan umum sebagian besar berupa tenaga listrik, yang dipergunakan antara lain untuk penerangan jalan, kantor-kantor pemerintahan, rumah-sakit umum dan yayasan-yayasan sosial. Pada Repelita V konsumsi energinya sebesar 10,96 PJ. Pangsa konsumsi energi untuk sektor pemerintah dan pelayanan umum tidak terlalu besar secara nasional. Pertumbuhannya diperkirakan akan sebesar 7 % per tahun.

3. Strategi Penyediaan Energi

3.1 Model MARKAL



Gambar 5. Jaringan sistem energi[6]

Setelah diperoleh proyeksi kebutuhan energi kemudian dilakukan optimasi penyediaan energi dengan menggunakan model MARKAL (*Market Allocation*). Model MARKAL adalah suatu model yang memakai teknik *linear programming* (LP) dan mempunyai kemampuan multiobyektif. Fungsi obyektif antara lain dapat berupa : meminimumkan biaya penyediaan energi, meminimumkan dampak negatif terhadap lingkungan, meminimumkan penggunaan energi fosil, atau memaksimalkan penggunaan energi terbarukan. Sebelum melakukan optimasi LP, harus terlebih dahulu diformulasikan hubungan antara sumber energi dan kemungkinan penggunaannya melalui teknologi yang tersedia. Kemudian disusun suatu jaringan sistem energi seperti pada Gambar 5. Jaringan sistem energi ini secara umum terbagi menjadi beberapa kategori teknologi, yaitu :

- *resource technology*, seperti penambangan, impor 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.

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.

3.2. Model Perhitungan Emisi Polutan

Pemakaian energi di semua sektor akan menimbulkan emisi polutan sebagai hasil dari proses pembakaran atau konversi. Emisi polutan dapat berupa SO₂, NO₂, VHC (*Volatile Hydrocarbon*) dan SPM (*Suspended Particulate Matter*) akan tersebar dari sumbernya kemudian akan menurunkan kualitas udara, tanah, dan air di sekitarnya. Konsentrasi polutan dipermukaan tanah dan deposisinya ke tanah dihitung dengan model DISDEP (*Dispersion and Deposition*) sebagai fungsi dari besarnya sumber emisi, keadaan meteorologi dan topografi.

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. Emisi ini dihitung dengan model *Extended Gaussian Plume*.
- *line source*, untuk emisi dari transportasi jalan raya antar kota dan dihitung dengan model *Box*.
- *area source*, untuk emisi rumah tangga, industri kecil serta transportasi di dalam kota dan dihitung dengan model *fading function*.

Dalam studi MARKAL tahap kedua emisi polutan dihitung hanya untuk wilayah Jawa 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 5x5 km² yang keseluruhannya berjumlah 80x220 kisi. Berdasarkan peta ini kemudian dilakukan analisis dampak lingkungan terhadap tanah, tanaman, ekosistem air, dan kesehatan manusia akibat adanya polutan tersebut.

3.3 Kasus Tanpa Tindakan (DNC)

Dalam kasus ini, teknologi yang dipakai untuk penyediaan energi maupun pemakaian energi dianggap tidak mengalami perubahan dari apa yang telah direncanakan atau dilaksanakan pada saat sekarang. Teknologi bersih lingkungan seperti *fluidized bed boiler*, *desulphurization*, *de-NOx*, katalis untuk kendaraan belum diperhitungkan.

3.3.1 Penyediaan energi yang optimal

Hasil studi menunjukkan bahwa pada Repelita V konsumsi energi primer domestik mencapai 3.344,2 PJ per tahun. Penyediaan energi tersebut didominasi oleh minyak bumi dengan pangsa 39% dan biomasa sebesar 30%. Pangsa suplai gas alam mencapai 21%, dan sisanya dipenuhi oleh batubara, tenaga air dan geothermal. Pada masa yang akan datang suplai energi primer menurut hasil optimasi diperkirakan meningkat sebesar 5,5% per tahun, yaitu sebesar 16.618,9 PJ per tahun pada Repelita XI (lihat tabel 4).

Proyeksi penyediaan energi final setiap jenis energi dapat dilihat pada Tabel 5. Penyediaan energi final pada Pelita V didominasi oleh penggunaan biomasa yang mempunyai pangsa sebesar 40 % (1.005,4 PJ per tahun), sedangkan yang kedua adalah penggunaan bahan bakar minyak (34 %) dan yang ketiga adalah bahan bakar gas (11 %). Peranan bahan bakar minyak pada Repelita VII diperkirakan menjadi paling besar atau sebesar 34 % dari penyediaan energi final nasional diikuti oleh biomasa (30 %) kemudian tenaga listrik (11 %). Komposisi pangsa suplai energi final tersebut tidak berubah sampai Repelita IX, tetapi pada

Repelita XI peringkat kedua, bergeser menjadi listrik pada tempat kedua dan biomasa pada tempat ketiga. Hal ini mengisyaratkan bahwa peranan tenaga listrik cukup dominan pada Repelita XI.

Tabel 4. Optimisasi suplai energi primer domestik (PJ)

	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Geothermal	72,50	91,00	100,20	99,10	94,90	88,70	78,60
Nuklir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gas Alam	593,40	935,20	1194,30	1283,30	1599,30	1832,80	2096,50
Minyak Bumi	1346,20	1687,50	1842,10	2150,90	2628,70	3525,90	4788,30
Tenaga Air	69,20	97,80	291,00	422,90	449,30	457,70	453,90
LPG	56,90	120,50	199,10	285,50	400,10	568,20	800,20
Biomasa	1005,40	1134,10	1256,30	1347,90	1450,20	1568,60	1726,80
Batubara	200,60	355,90	835,50	1708,90	2714,50	4280,90	6674,60
Total	3344,20	4422,00	5718,50	7298,50	9337,00	12322,80	16618,90

Tabel 5. Proyeksi Penyediaan Energi Final (PJ)

Jenis Energi	Pelita V	Repelita VI	Repelita VII	Repelita VIII	Repelita IX	Repelita X	Repelita XI
Listrik	186,87	288,44	441,13	648,92	930,54	1364,01	1998,49
Batubara	78,51	128,20	200,29	295,28	438,38	691,57	1135,02
Gas	272,49	387,00	529,81	707,29	906,77	1161,43	1485,26
Kerosin	274,94	306,37	303,87	368,61	448,75	545,28	613,09
LPG	79,02	150,94	276,64	376,58	487,46	653,48	910,26
ADO	288,80	422,92	614,12	848,83	1074,40	1391,46	1802,95
FO	49,64	68,68	89,97	120,13	159,69	214,86	269,58
Mogas	230,46	306,01	378,25	479,37	640,35	846,63	1090,14
Biomasa	1005,36	1134,15	1256,31	1347,95	1450,19	1568,62	1726,81
Pelumas	14,02	19,24	26,32	35,29	45,91	60,86	81,28
T o t a l	2480,11	3211,95	4116,71	5228,25	6582,44	8498,20	11112,88

3.3.2 Pemilihan teknologi yang optimal

Teknologi yang digunakan dalam model terdiri atas berbagai pilihan kelompok teknologi tertentu, seperti proses yang berbeda pada unit-unit kilang minyak, alternatif pipanisasi, dan berbagai jenis pembangkit listrik. Semua teknologi yang telah dipakai dan pengembangan teknologi yang memungkinkan untuk digunakan di masa mendatang dimasukkan ke dalam model.

Selama Repelita V sampai XI permintaan tenaga listrik di Indonesia akan meningkat dengan rata-rata 8,2 % per tahun, yaitu dari 51.980 GWh pada Repelita V menjadi 554.940 GWh pada Repelita XI. Untuk kasus tanpa tindakan, pembangunan PLTU batubara konvensional di pulau Jawa akan meningkat dengan sangat cepat, yaitu sekitar 13,2% per tahun. Bila pada Repelita V kapasitas terpasang PLTU batubara konvensional adalah sebesar 1,68 GW maka pada Repelita XI diperkirakan akan menjadi 68,8 GW. Tabel 6 menunjukkan perkembangan kapasitas terpasang pembangkit listrik di pulau Jawa.

Untuk memenuhi permintaan tenaga listrik di luar Jawa sebesar 17.540 GWh pada Repelita V dan 211.630 GWh pada Repelita XI harus dipersiapkan pembangkit listrik dengan kapasitas sebesar 10,51 GW pada Repelita V dan 52,51 GW pada Repelita XI. Secara lengkap proyeksi kapasitas pembangkit listrik di luar Jawa diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 6 Proyeksi kapasitas terpasang pembangkit listrik di Jawa untuk DNC

Jenis Pembangkit (GW)	Pelita V	Repelita VII	Repelita IX	Repelita XI
PLTU Batubara	1,68	10,05	31,90	68,82
PLT Gas Turbin	1,10	4,10	3,94	0,06
PLTU Minyak	1,97	1,78	0,33	0,00
PLT Diesel	3,84	2,82	0,81	0,81
PLTG Minyak	0,73	0,25	4,55	19,70
PLT Panas Bumi	0,17	0,36	0,29	0,00
PLT Air	1,99	3,12	3,12	3,27
PLTU Biomasa	0,01	0,01	0,00	0,00
PLT Nuklir	0,00	0,00	0,00	0,00
T o t a l	11,49	22,42	44,94	92,66

Tabel 7. Proyeksi kapasitas terpasang pembangkit listrik di luar Jawa untuk DNC

Jenis Pembangkit (GW)	Pelita V	Repelita VII	Repelita IX	Repelita XI
PLTU Batubara	0,25	0,70	6,15	21,26
PLTG Gas	0,97	1,31	0,72	0,39
PLTU Minyak	0,24	0,17	0,00	0,23
PLTG Minyak	0,38	0,39	0,31	11,68
PLT Diesel	7,18	6,59	3,25	3,23
PLT Panas Bumi	0,00	0,14	0,14	0,06
PLT Air	0,88	4,78	7,76	7,76
PLTU Biomasa	0,26	0,26	0,25	0,45
PLTU Gas	0,26	0,29	0,29	0,00
PLT Gas Uap	0,09	0,74	4,95	7,45
T o t a l	10,51	15,37	23,82	52,51

PLT Diesel pada awal periode masih mempunyai kapasitas terbesar (dengan pangsa sebesar 68 % pada saat ini). Hal ini disebabkan oleh kurang tersedianya jaringan transmisi. Tetapi untuk waktu mendatang pangsa pemakai PLT Diesel akan menurun (rata-rata 2,6 % per tahun) dan tinggal kurang dari 1 % pada akhir periode (Repelita XI). Sedangkan pembangkit yang mempunyai pertumbuhan pesat adalah PLTU Batubara dan PLTG Minyak.

3.4 Kasus Pengurangan Emisi (ERC)

Pada kasus pengurangan emisi hanya akan dibahas untuk sistem energi di Jawa karena kepadatan penduduk di Jawa paling padat dan aktivitas ekonominya paling dinamis. Dengan memperhitungkan dampak lingkungan, emisi polutan akibat penggunaan energi di pulau Jawa akan melampaui batas yang telah ditetapkan. Untuk menanggulangnya perlu disusun suatu strategi penyediaan energi yang ekonomis dengan memperhatikan faktor-faktor lingkungan. Dalam hal ini ada beberapa pilihan yang ditambahkan ke dalam model adalah seperti berikut :

- Teknologi bersih lingkungan seperti, PLTU batubara *fluidized bed*, *integrated gasification combined cycle*, dan PLT Nuklir.
- Teknologi pengurang pencemaran, *de-SOx*, *de-NOx*, *electrostatic precipitator*, katalitik kendaraan dan lain-lain.
- Pemandahan lokasi penghasil polutan untuk mengurangi konsentrasi pencemaran yang terlalu padat pada suatu wilayah.

3.4.1 Perencanaan pembangkit listrik di Jawa.

Dalam kasus pengurangan emisi input energi baik jumlah maupun jenisnya untuk pembangkit listrik adalah tetap sama dengan kasus tanpa tindakan. Dalam kasus pengurangan emisi ini usaha utama adalah dalam penggunaan teknologi pencegahan serta pengurangan pencemaran pada instalasi tersebut. Tabel 8 menunjukkan kapasitas terpasang menurut jenis pembangkit listrik untuk kasus pengurangan emisi di Jawa.

Tabel 8. Proyeksi kapasitas terpasang pembangkit listrik di Jawa untuk ERC

Jenis Pembangkit (GW)	Pelita V	Repelita VII	Repelita IX	Repelita XI
PLTU Batubara	1,68	4,19	3,39	0,84
PLTU Batubara ¹⁾	0,00	5,43	29,09	69,25
PLT Gas Turbin	1,10	3,91	3,72	0,00
PLT Gas Turbin ¹⁾	0,00	0,03	0,06	0,06
PLTU Minyak	1,97	1,78	0,33	0,00
PLT Diesel	3,84	2,82	0,94	0,87
PLTG Minyak	0,73	0,18	0,06	0,00
PLTG Minyak ¹⁾	0,00	0,00	4,50	19,64
PLT Panas Bumi	0,17	0,36	0,29	0,00
PLT Air	1,99	3,12	3,12	3,37
PLTU Biomasa	0,01	0,01	0,00	0,00
PLT Nuklir	0,00	0,00	0,00	0,00
T o t a l	11,49	21,83	45,50	94,03

¹⁾ Teknologi Bersih

Langkah-langkah yang dilakukan pada kasus pengurangan emisi untuk pembangkit listrik misalnya adalah sebagai berikut :

- o Mulai Repelita VII tidak dibangun lagi PLTU batubara dan PLTG konvensional yang tidak menggunakan alat-alat pengendali emisi.
- o Mulai dilaksanakan pembangunan pembangkit listrik bersih lingkungan dengan beberapa pilihan, antara lain : PLTU batubara dengan *de-SOx*, dan *de-NOx* serta PLTG dan PLTGU (minyak dan gas) dengan *de-NOx*.

Langkah-langkah di atas akan membawa perubahan yang cukup mendasar dalam perencanaan pembangkitan tenaga listrik di masa mendatang. Selain itu perubahan ataupun tambahan teknologi dan peralatan ini secara langsung akan meningkatkan investasi dari pembangkit listrik dan pada akhirnya akan meningkatkan harga dari listrik yang dibangkitkan.

3.4.2 Penerapan teknologi bersih lingkungan lainnya.

Usaha pengurangan emisi pada sektor selain pembangkit listrik, antara lain adalah penggunaan :

- o Katalitik konverter (*three ways catalytic converter*) pada kendaraan bermotor,
- o Unit *de-NOx* dan *de-SOx* untuk boiler industri dan kilang minyak, dan
- o Unit penangkap debu (*electrostatic precipitator*, *cyclone*, atau *bag filter*) pada industri.

3.4.3 Penambahan biaya

Penerapan teknologi bersih lingkungan akan meningkatkan biaya untuk keseluruhan sistem energi. Perbedaan biaya antara kasus pengurangan emisi dengan kasus tanpa tindakan yaitu bila tidak dilaksanakan pencegahan pencemaran merupakan salah satu masukan untuk pengambilan keputusan. Penambahan biaya untuk mengurangi dampak lingkungan akibat

penggunaan energi dengan penambahan alat-alat bersih emisi, pengurangan kadar polutan pada bahan bakar dan pemakaian teknologi bersih lingkungan diperlihatkan pada Tabel 9. Penambahan biaya pada sektor listrik dan sektor transportasi cukup besar, sedangkan untuk total sistem energi nasional dibutuhkan tambahan biaya sebesar 1 Milyar US \$ per tahun pada Repelita IX dan akan bertambah menjadi 3 Milyar US \$ per tahun pada Repelita XI.

Tabel 9. Penambahan biaya pada kasus pengurangan emisi

(Juta US\$, konstant 1989)	1991	2001	2011	2021
Listrik	0,00	515,80	788,90	1.310,70
Transportasi	0,00	329,10	546,80	748,30
Total Sistem	0,00	883,90	1.332,47	2.972,25

3.5 Emisi Akibat Penggunaan Energi di Jawa

Tabel 10 menunjukkan perbandingan emisi SO₂, NO₂, *Volatile Hydrocarbon* (VHC), dan debu yang ditimbulkan oleh konversi dan penggunaan energi di pulau Jawa untuk kasus tanpa tindakan (DNC) dan kasus pengurangan emisi (ERC).

- Emisi SO₂ pada Repelita XI untuk DNC diperkirakan menjadi 8 kali dari tingkat emisi Pelita V. Sedangkan total emisi SO₂ untuk ERC pada Repelita XI akan meningkat 8 kali lipat (2,78 juta ton) dibanding tahun 1991. Pada Repelita XI tingkat emisi untuk ERC hanya mencapai 43% dibandingkan emisi untuk DNC.
- Emisi NO₂ pada Repelita XI akan meningkat 7 kali lipat (3,95 juta ton) dibanding Pelita V untuk DNC dan untuk ERC hanya meningkat 3 kali.
- Emisi VHC pada Repelita XI untuk ERC bisa ditekan dan tinggal 66% dari DNC.
- Emisi debu pada Repelita XI berjumlah 2,56 juta ton (3 kali) dibanding Pelita V untuk DNC, dan untuk ERC pada Repelita XI dapat ditekan sampai 43%.

Tabel 10. Perbandingan emisi akibat penggunaan energi di Jawa

Juta ton per tahun		Pelita V	Repelita VII	Repelita IX	Repelita XI
SO ₂	DNC	0,35	0,56	1,36	2,78
	ERC	0,35	0,45	0,65	1,20
NO ₂	DNC	0,56	1,08	2,10	3,95
	ERC	0,56	0,81	1,03	1,73
VHC	DNC	0,28	0,41	0,63	1,02
	ERC	0,28	0,32	0,43	0,67
Debu	DNC	0,85	1,31	1,83	2,56
	ERC	0,85	1,05	1,09	1,09

Untuk DNC, dispersi dan deposisi polutan akan mempengaruhi ekosistem beberapa daerah di Jawa. Kadar asam yang tinggi di dalam tanah akan dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan dapat terjadi di areal seluas 14 % dari luas pulau Jawa pada tahun 2020. Sedangkan 40 % areal lainnya akan secara cepat menjadi daerah kritis. Kontaminasi air tanah juga akan menjadi masalah di areal seluas 27 % dari luas pulau Jawa pada tahun 2020. Resiko pencemaran udara akan sangat meningkat di daerah perkotaan dan pada tahun 2020 akan mempengaruhi kesehatan sekitar sepertiga penduduk di Jawa. Dengan skenario ERC, yaitu dengan mempergunakan teknologi bersih lingkungan maka dampak negatif dapat dikurangi. Meskipun masih menghasilkan emisi tetapi jauh lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan teknologi biasa dan emisinya masih di bawah standar emisi yang diperbolehkan.

3.6. Kasus Pengurangan Emisi CO₂

Sesuai dengan kesepakatan deklarasi Rio de Janeiro pada tahun 1992, Indonesia turut serta dalam upaya mengurangi emisi CO₂ sebagai salah satu penyebab pemanasan global. Salah satu cara untuk menguranginya yaitu dengan menggunakan teknologi baru untuk sektor energi. Untuk penerapan teknologi tersebut diperlukan suatu studi yang intensif dan saat ini sedang dilakukan dalam studi MARKAL tahap ketiga.

Pilihan teknologi untuk mengurangi emisi CO₂ dimasukkan dalam model MARKAL dan dinamakan *Abatement Scenario* (ABAT). Skenario yang lainnya yaitu ABAT1 dan ABAT2 disusun berdasarkan ABAT dengan membuat target pengurangan CO₂ sebagai fungsi pembatas dalam model. Besarnya pengurangan emisi CO₂ dinyatakan dalam % terhadap ABAT ditunjukkan dalam Tabel 11.

Tabel 11. *Abatement Scenario*

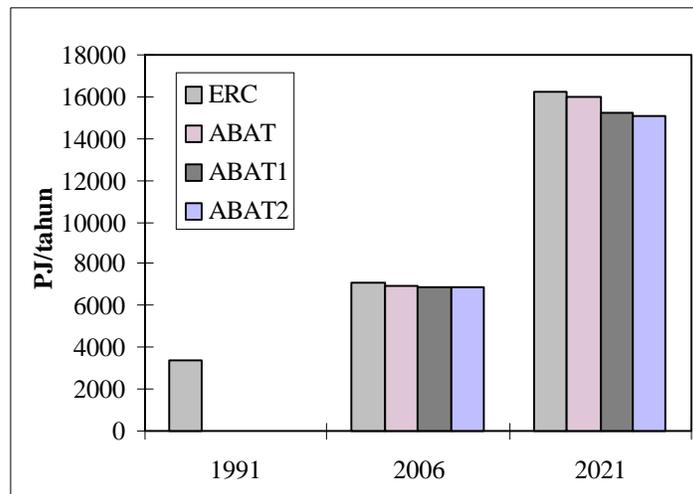
Skenario	% emisi CO ₂ terhadap skenario ABAT	
	2006	2021
ABAT	tanpa fungsi pembatas	tanpa fungsi pembatas
ABAT1	12.5 %	25.0 %
ABAT2	15.0 %	30.0 %

Tabel 12. Total emisi CO₂ (dalam juta ton/tahun)

Skenario	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021
ABAT	156	220	288	379	518	747	1077
ABAT1	156	218	280	336	444	612	840
ABAT2	156	218	278	326	426	579	784

3.6.1 Konservasi energi

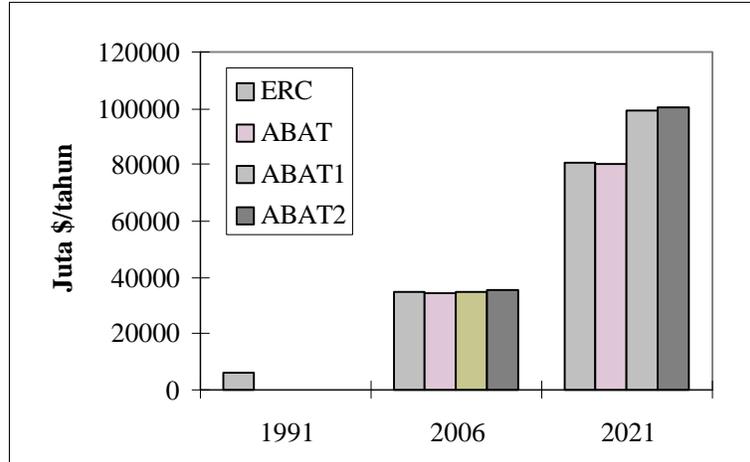
Gambar 5 memperlihatkan konsumsi energi primer dengan beberapa kasus dan skenario. Pada skenario ABAT1 konsumsi energi primer turun 7.5 % atau 1.234 PJ/tahun, dengan kata lain dapat dihemat sepertiga dari konsumsi energi saat ini. Dengan skenario ABAT2 penghematan energi akan menjadi lebih besar yaitu 8.9 % atau 1.465 PJ/tahun atau 44 % dari konsumsi saat ini dapat dihemat.



Gambar 5. Konsumsi energi primer

3.6.2 Biaya sistem energi

Perubahan pola pemakaian bahan bakar akan menyebabkan meningkatnya biaya untuk keseluruhan sistem. Pada Gambar 6 diperlihatkan total biaya tahunan (*discounted*) dari dari sistem energi. Meskipun dengan skenario ABAT dapat dihemat biaya sebesar 2 % tetapi dengan skenario ABAT1 naik sebesar 19.3 % dan pada skenario ABAT2 naik sebesar 23.5 % pada Repelita XI.



3.6.3 Proyeksi pembangkit listrik

Dalam Repelita XI pangsa batubara akan turun (ABAT1 : 35 % dan ABAT2 : 8 %) sedangkan pangsa energi baru meningkat (ABAT1 dan ABAT2 sekitar 22 %). Dengan skenario ABAT1 maupun ABAT2, PLTN akan mulai beroperasi pada tahun 2006 sebesar 1.34 GW.

Tabel 13. Kapasitas pembangkit listrik di Jawa (GW)

	1991		2001		2011		2021	
	ABAT1	ABAT2	ABAT1	ABAT2	ABAT1	ABAT2	ABAT1	ABAT2
PLTU Batubara	1.56	1.56	3.9	3.9	3.15	3.15	0.78	0.78
PLTU Btbr Bersih	0	0	0	0	3.77	0.23	26.9	6.2
PLTG	0.15	0.15	0.03	0.03	0	0	0	0
PLTG Bersih	0	0	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05
PLT GCC	0.84	0.84	3.59	3.59	3.59	3.59	0	0
PLT GCC Bersih	0	0	3.4	3.22	17.5	15.5	14.1	16.6
PLTG CHP	0	0	0.79	0.79	2.52	2.66	4.12	4.36
PLTU Minyak	2.25	2.25	1.84	1.84	0.31	0.31	0	0
PLTU Minyak Bersih	0	0	0	0	0	4.83	10.7	19
PLT Diesel	3.42	3.42	2.51	2.51	0.72	0.72	0.72	24.8
PLTG Minyak	0.73	0.73	0.18	0.18	0.53	0.06	4.6	0
PLT Panasbumi	0.15	0.15	0.33	0.33	0.26	1.06	7.07	7.07
PLTA	1.98	1.98	3.1	3.1	4.1	4.1	4.1	4.1
PLTU Biomass	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21	0.21	0.21	0.21
PLTN	0	0	0	0	1.34	1.34	6.72	6.72
Total Jawa	11.1	11.09	19.71	19.53	38.00	37.80	80.00	89.80

Dengan skenario ABAT1, target pengurangan emisi CO₂ dapat tercapai bila mulai Repelita VII semua industri yang menghasilkan gas buang bertemperatur medium sampai tinggi menggunakan sistem cogeneration. Sedangkan pembangkit listrik berbahan bakar batubara mulai Repelita VIII harus menggunakan teknologi *Pressurized Fluidized Bed Combustion* (PFBC) dan *Integrated Gasification Combined Cycle* (IGCC).

Tabel 14. Kapasitas pembangkit di luar Jawa (GW)

	1991		2001		2011		2021	
	ABAT1	ABAT2	ABAT1	ABAT2	ABAT1	ABAT2	ABAT1	ABAT2
PLTU Batubara	0.20	0.20	0.56	0.56	0.50	0.50	0.14	0.14
PLTG	0.90	0.90	1.11	0.93	1.08	2.26	11.50	7.09
PLT GCC	0.08	0.08	0.88	0.87	5.31	2.01	4.51	6.80
PLTU Minyak	0.19	0.19	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
PLTU Gas	0.21	0.21	0.23	0.23	0.23	0.23	0.00	0.00
PLT Diesel	6.37	6.37	5.84	5.84	2.89	2.89	2.88	2.88
PLTG Minyak	0.27	0.27	0.27	0.27	0.57	0.32	12.82	12.47
PLT Panasbumi	0.00	0.00	0.11	0.11	0.11	2.93	6.53	6.53
PLTA	0.88	0.88	3.63	4.23	7.72	7.72	7.72	7.72
PLTU Biomass	0.22	0.22	0.22	0.22	1.03	1.03	1.01	1.01
Total luar Jawa	9.32	9.32	12.99	13.41	19.46	19.91	47.12	44.64

4. Penutup

Pada Pelita V penyediaan minyak bumi adalah sekitar 1.290 PJ (sekitar 221 juta barrel) per tahun atau sekitar 39 % dari total penyediaan energi nasional, sedangkan penyediaan batubara sekitar 194 PJ (sekitar 7 juta ton) atau sekitar 6 % dari total penyediaan energi nasional. Diperkirakan konsumsi minyak bumi tumbuh dengan laju pertumbuhan sekitar 4,5 % per tahun, sehingga dalam Repelita XI konsumsi minyak bumi akan mencapai 4.719 PJ (808 juta barrel) per tahun atau sekitar 29 % dari total penyediaan energi nasional. Penyediaan batubara meningkat dengan 12,5 % per tahun sehingga mencapai 6.520 PJ (sekitar 230 juta ton) per tahun pada Repelita XI atau sekitar 40 % dari total penyediaan energi nasional.

Dengan penerapan teknologi bersih lingkungan dapat diharapkan pencemaran di pulau Jawa akan dapat ditekan sampai ke tingkat yang tidak membahayakan bagi ekosistem maupun manusia. Berkaitan dengan hal itu dapat diusulkan beberapa prioritas program sebagai berikut:

- **Prioritas pertama**, pengurangan debu dengan pemakaian *cyclon* dan *electrostatic precipitator* khususnya pada pembangkit listrik dan boiler industri. serta penggunaan mesin diesel dengan emisi rendah untuk kendaraan bermotor.
- **Prioritas kedua**, pengurangan NO_x dan hidrocarbon pada kendaraan bermotor dengan pemakaian katalis, diperlukan penggunaan bensin tanpa timbal.
- **Prioritas ketiga**, pengurangan SO₂ dan NO₂ di pembangkit listrik dan industri dengan menggunakan peralatan *de-SO_x* dan *de-NO_x*.

Sedangkan dengan skenario pengurangan CO₂ sebesar 12.5 % pada tahun 2006 dan 25.0 % pada tahun 2021, PLTN akan mulai muncul pada tahun 2006.

Daftar Pustaka

- [1] BPPT-KFA, *Energy Strategies, Energy R+D Strategies, Technology Assessment, for Indonesia, Optimal Result*, Final Report, May 1988.
- [2] BPPT-KFA, *Environmental Impacts of Energy Strategies for Indonesia, Emission Coefficients of Power Plants, Industrial Boiler & Refineries*, volume 1, Data Report, Nopember 1990.
- [3] BPPT-KFA, *Environmental Impacts of Energy Strategies for Indonesia, Assessment of the Emission Coefficients of the Traffic Sector in Jawa*, Data Report, Januari 1991
- [4] BPPT-KFA, *Environmental Impacts of Energy Strategies for Indonesia, Electricity Sector & Coal Sector*, Updated of the 1991 Report, Januari 1992.
- [5] BPPT-KFA, *Environmental Impacts of Energy Strategies for Indonesia*, Final Report, 1993.
- [6] Manfred Kleemann and Dieter Wilde, *Intertemporal Capacity Expansion Models*, Energy, Vol.15, No.7/8, p.549-571, Pergamon Press, UK, 1990.
- [7] Manfred Kleemann, *Energy Use and Air Pollution in Indonesia*, Avebury Studies in Green Research, 1994.
- [8] Trihono Sastrohartono, *Sistem Perencanaan Energi Terpadu yang Berwawasan Lingkungan*, Hasil-Hasil Lokakarya Energi 1992, hal.491-529, KNI-WEC, 1993.
- [9] BPPT-KFA, *Technology Assessment for Energy Related CO₂ Reduction Strategies for Indonesia*, Final Report, July 1995.