

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Perencanaan Energi

Dalam melakukan perencanaan energi terdapat beberapa hal yang harus dilakukan sehingga diperoleh perencanaan energi yang terpadu, berikut langkah-langkah perencanaan energi yang bisa dilakukan [4]:

- Menyusun Skenario Pertumbuhan ekonomi
Pola pembangunan ekonomi menentukan kebutuhan akan energi, sementara faktor harga dan ketersediaan energi dapat membentuk struktur dan pertumbuhan ekonomi. Data yang diperlukan di sini adalah komposisi dan pertumbuhan PDB atau PDRB masing-masing sub-sektor ekonomi, termasuk sektor pertanian dan pedesaan. Pembangunan ekonomi memiliki sejumlah ketidakpastian, karena itu harus dikembangkan beberapa skenario ekonomi misalnya digunakan asumsi skenario pertumbuhan ekonomi tinggi, sedang atau rendah. Struktur ekonomi perlu diuraikan dalam bentuk tabel *input – output* atau matriks akuntansi nasional. Sektor ekonomi utama yang perlu diperhatikan adalah industri, komersial, pertanian, transportasi, perumahan dan pedesaan. Setiap sektor terdiri dari berbagai konsumen utama yang menggunakan beragam sumber daya energi. Untuk itu unit pengukuran yang sama harus dikonsolidasikan pada setiap sektor. Tujuan utamanya adalah menghasilkan pola pertumbuhan permintaan energi berdasarkan pemakai akhir dan sektor dalam bentuk agregat.
- Menyusun Proyeksi Permintaan Energi
Cara paling sederhana memproyeksikan permintaan energi adalah dengan menghubungkan tingkat konsumsi energi saat ini dengan aktivitas dan tingkat pertumbuhan ekonomi. Namun PDB atau PDRB bukan satu-satunya faktor yang mempengaruhi permintaan energi. Ada faktor lain yang mempengaruhi permintaan energi ke depan seperti inovasi teknologi selama periode perencanaan, kemungkinan substitusi, harga energi dunia

dan sebagainya. Dalam konteks ini perlu dibedakan antara konsumsi energi, yaitu total sumber daya energi yang habis dipakai dengan kegunaan energi, yaitu *net* energi yang sesungguhnya digunakan oleh peralatan pemakai akhir. Perbedaan keduanya menunjukkan hilangnya total sumber daya energi

dalam proses konversi. Faktor-faktor dominan perencanaan energi, diantaranya peranan harga relatif, pengaruh perubahan teknologi, potensi substitusi antar-energi, potensi substitusi antar-faktor dan dampak interaksi energi/ekonomi. Harga relatif mengukur kelangkaan berbagai barang dan jasa. Harga relatif pada akhirnya mencerminkan pilihan konsumen terhadap suatu kerangka kerja teknis dan biaya. Perubahan teknologi biasanya terkait dengan potensi penghematan dan substitusi perangkat pemakai akhir yang disempurnakan baik yang baru atau alternatifnya. Potensi substitusi antar-energi terkait dengan pengembangan alternatif sumber daya energi domestik dan impor yang murah atau potensi keseluruhan dalam jangka panjang seperti kebijakan diversifikasi. Dalam substitusi antar faktor diupayakan kombinasi faktor produksi yang efisien. Interaksi energi dengan ekonomi makro serta faktor-faktor dominan akan mempengaruhi permintaan energi di masa depan.

- **Mengkaji Sumber Daya Energi**

Tujuan pengkajian sumber daya energi adalah menentukan ketersediaan sumber daya energi suatu negara atau wilayah. Pengkajian demikian dirancang untuk menghasilkan informasi mengenai jumlah sumber daya energi yang tersedia dan biaya yang diperlukan. Informasi yang dibutuhkan dari sumber daya tak terbarukan –

minyak bumi, batubara dan gas bumi – adalah ukuran besar cadangan dan biaya ekstraksi. Dalam hal energi terbarukan, dengan pengecualian energi panas bumi, pengkajian terkait dengan pertanyaan seberapa besar sumber daya energi terbarukan

dapat diperoleh dan dimanfaatkan dengan pembiayaan seefektif mungkin. Informasi yang dibutuhkan selanjutnya adalah ketersediaan dan harga impor energi. Pengkajian sumber daya energi secara rinci meliputi total

Universitas Indonesia

cadangan, tingkat pertambahan cadangan, tingkat produksi, biaya dan hambatan yang dihadapi produksi energi. Salah satu faktor dominan perencanaan energi adalah bagaimana menghubungkan biaya dengan persediaan sumber daya energi dalam jangka panjang. Biaya yang diperlukan untuk perencanaan energi harus mencerminkan *opportunity cost* sumber daya energi. *Opportunity cost*, selain biaya produksi meliputi rente ekonomi yang dihitung untuk kesempatan yang hilang ketika sumber daya energi tersebut mempunyai nilai yang lebih tinggi di masa mendatang.

- **Melakukan Analisis Dampak**

Setiap alternatif keseimbangan penawaran-permintaan energi memiliki dampak yang berbeda terhadap struktur dan pertumbuhan ekonomi termasuk aspek lingkungan. Dua analisis dampak harus dilakukan untuk mendapatkan neraca penawaran-permintaan yang paling sesuai yaitu analisis dampak ekonomi dan lingkungan. Analisis dampak ekonomi tersebut merupakan suatu pengkajian terhadap ukuran efisiensi ekonomi dengan menggunakan indikator-indikator makro ekonomi. Hasilnya akan berupa satu atau lebih keseimbangan penawaran-permintaan yang dianggap lebih efisien, murah dan ekonomis. Analisis dampak lingkungan mengkaji bahan bakar dan teknologi yang digunakan apakah sesuai dengan kebijakan, standar, dan peraturan lingkungan yang ada. Pada tahap berikutnya, bila keseimbangan penawaran-permintaan telah ditentukan dan konfigurasi penawaran telah didefinisikan, analisis dampak lingkungan diperluas menjadi analisis mengenai dampak lingkungan.

- **Mengembangkan Skenario Investasi**

Perencanaan investasi modal dikembangkan berdasarkan sistem persediaan yang dipilih dan proyek yang harus dikembangkan. Perencanaan investasi modal memiliki empat komponen utama. Pertama, investasi untuk eksplorasi bahan bakar fosil dan penelitian serta pengembangan teknologi nonkonvensional. Kedua, investasi untuk perluasan kapasitas. Ketiga, investasi untuk meningkatkan efisiensi fasilitas pada sisi penawaran. Keempat, investasi untuk meningkatkan efisiensi disisi permintaan pada

Universitas Indonesia

peralatan yang digunakan oleh pemakai akhir. Proses perencanaan investasi bisa dimulai dengan alokasi menyeluruh bagi setiap kategori di atas kemudian dilanjutkan dengan serangkaian penilaian terhadap masing-masing proyek. Rencana biaya operasi dan perawatan berkaitan dengan sistem yang ada dan perluasan yang telah ditentukan untuk masa depan harus tercermin dalam perencanaan keuangan. Rencana biaya impor energi harus masuk dalam perencanaan energi terpadu. Proyek harus mampu memberikan keuntungan bersih dan dapat mengembalikan modal investasi dalam jangka waktu tertentu.

2.2 Teknik Perencanaan Energi

Berbagai teknik atau model perencanaan energi dapat dibangun dari yang paling sederhana sampai yang sangat rumit. Secara umum model tersebut dapat dibedakan dalam lima pendekatan utama, yaitu pendekatan proses, pendekatan *trend*, pendekatan elastisitas, pendekatan ekonometri dan pendekatan *input/output*. Berbagai alternatif proyeksi dapat dibuat dengan menggunakan satu atau beberapa teknik analisis yang tersedia [5]

- **Pendekatan Proses**

Pendekatan proses menguraikan aliran energi dari sumber energi primer sampai permintaan final. Prosesnya mencakup ekstraksi sumber daya energi, penyulingan, konversi, transportasi, penimbunan, transmisi dan distribusi.

Keunggulan pendekatan ini adalah mudah mengakomodasi bahan bakar tradisional, dapat dilakukan dengan perhitungan sederhana dan metode paling cocok dalam menguraikan alternatif teknologi yang ada saat ini. Kendala utamanya, pendekatan ini

hanya dapat dipakai untuk sektor energi saja sehingga tidak dapat menggambarkan interaksi energi-ekonomi dan variabel-variabel kebijakan ekonomi.

- **Pendekatan Trend**

Pendekatan *trend* memiliki keunggulan utama berupa kesederhanaan data dan prasyarat. Pendekatan ini menunjukkan ekstrapolasi kecenderungan

Universitas Indonesia

masa lalu berdasarkan pemilihan kurva. Analisis ini dapat juga dilakukan dengan memproyeksikan nilai historis rata-rata kegiatan energi-ekonomi dan rasio energi per

kapita. Meskipun secara luas digunakan dalam peramalan, terutama oleh negaranegara berkembang, keterbatasannya ternyata cukup banyak. Kecenderungan atau perilaku di masa silam mungkin tidak terlalu relevan dengan kejadian di masa depan. Secara umum pendekatan ini tidak dapat menggambarkan perubahan-perubahan yang bersifat struktural, determinan permintaan. Karena tidak terbuka bagi umpan-balik interaksi energi-ekonomi maka pendekatan ini kurang cocok untuk analisis kebijakan.

- **Pendekatan Elastisitas**

Pendekatan elastisitas dapat dilakukan dengan menghitung besarnya elastisitas permintaan terhadap pendapatan dan elastisitas permintaan terhadap harga. Ini menunjukkan perubahan tingkat permintaan energi terhadap perubahan pendapatan dan harga. Kelemahan pendekatan ini adalah besarnya unsur ketidakpastian atas estimasi elastisitas permintaan. Alasan ketidakpastian tersebut karena kondisi beberapa data, keterbatasan variabel harga, pendapatan dan kenyataan data antarwaktu (*time series*) yang digunakan tidak mencerminkan perubahan sisi dan struktur permintaan energi dalam jangka waktu yang lebih panjang.

- **Pendekatan Ekonometri**

Pendekatan ekonometri menggunakan standar perhitungan kuantitatif untuk analisis dan proyeksi ekonomi. Kelebihan pendekatan ekonometri adalah dalam analisis kebijakan dan proyeksi jangka pendek sampai jangka panjang. Asumsi-asumsi statistik dan perilaku dapat disajikan lewat model persamaan interaksi energiekonomi

secara simultan. Pendekatan ini juga dapat menyajikan pengaruh harga relatif dan absolut terhadap substitusi antar bahan bakar. Di sisi lain, kelemahan pendekatan ekonometri terjadi karena harus mengakomodasi kegiatan perubahan teknologi dan datangnya komoditas baru.

- **Pendekatan *Input-Output***

Pendekatan *input-output* hampir sama dengan pendekatan ekonometri. Ada dua keunggulan pendekatan ini. Pertama, merupakan pendekatan paling komprehensif dan konsisten terhadap semua sektor ekonomi, termasuk aliran berbagai jenis energi dan mudah digabungkan ke dalam model ekonometri, simulasi atau optimasi. Kedua, teknik yang sangat cocok untuk analisis kebijaksanaan pada berbagai tahapan. Keunggulan pertama melekat pada analisis *input-output*. Namun pendekatan ini memiliki keterbatasan aplikasi. Pendekatan ini bersifat statik yang berlaku untuk satu waktu tertentu. Keterbatasan selanjutnya adalah kebutuhan akan data dasar sektor ekonomi yang luas dan komprehensif.

2.3 Model Optimasi

Untuk dapat memecahkan permasalahan yang kompleks, yaitu yang mencakup beberapa alternatif pemecahan maka seorang pengambil keputusan seringkali akan mendapatkan kesulitan untuk menguji dan membandingkan setiap alternatif tersebut apabila hanya menggunakan metode trial and error. Sebagai jalan keluar dalam pemilihan alternatif pemecahan persoalan yang dapat dipakai oleh seorang pengambil keputusan harus mendapatkan alat bantu untuk dapat menguji setiap alternatif pemecahan melalui suatu simulasi dari setiap alternatif pada suatu model. Tentu saja untuk dapat membuat model yang dapat menggambarkan persoalan sebenarnya diperlukan pola pikir sistematis.

Model dapat dikatakan sebagai tiruan dari suatu sistem yang terdiri atas berbagai macam elemen yang sangat kompleks berisi representasi dan abstraksi [6]) Sifat representasi dicerminkan dalam pemetaan dari karakteristik sistem nyata yang akan dianalisis. Dikatakan abstraksi karena dalam model terjadi transformasi karakteristik sistem-sistem nyata dalam konsep-konsep dengan menggunakan simbol-simbol matematis.

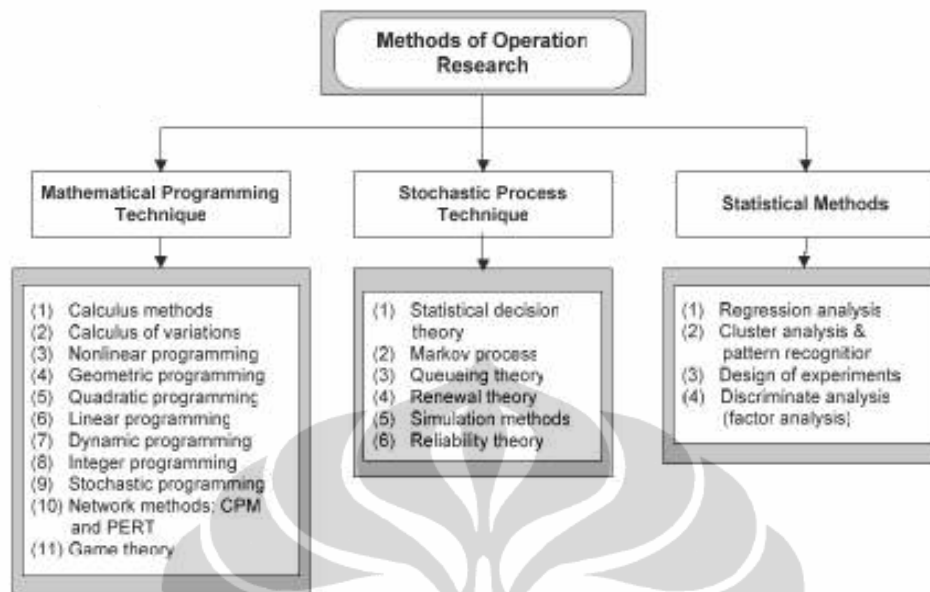
Keuntungan bagi pemakai model dalam pemecahan permasalahan diantaranya adalah: analisa atau percobaan tetap dapat dilaksanakan untuk

situasi yang kompleks dimana tidak dapat dilakukan secara langsung dalam sistem nyata karena dengan model kita tidak mengganggu sistem sesungguhnya, lebih hemat dalam mendiskripsikan suatu keadaan nyata, hemat waktu, dan dapat memfokuskan analisa pada masalah-masalah yang kritis.

Setelah karakteristik dari sistem dituangkan dengan dalam suatu model, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian dengan menggunakan metode matematika sesuai dengan permasalahan yang dihadapi. Untuk keperluan optimasi dari suatu sistem misalnya dapat dianalisis dengan menggunakan metode riset operasional *Operation Research* (OR).

Optimasi merupakan aktivitas untuk mendapatkan hasil yang terbaik dari pilihan yang tersedia [7,]. 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 variable 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 OR. 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 random 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.



Gambar 2.1 Metode dalam *Operations Research* (Rao, 1979)

2.3.1 Program Linier

Program linier (*linier programming* di singkat LP) adalah: metode atau teknik matematik yang digunakan untuk membantu dalam pengambilan keputusan [7]. Secara umum dapat dikatakan bahwa masalah dengan linier programming adalah pengalokasian sumber daya yang terbatas seperti : tenaga kerja, bahan baku, jam kerja, mesin, dan modal dengan cara sebaik mungkin sehingga diperoleh maksimasi yang dapat berupa maksimum keuntungan atau minimasi yang dapat berupa minimum biaya. Untuk permasalahan energi dapat dipilih sebagai minimum biaya penyediaan energi, minimum pemakaian bahan bakar minyak atau maksimum pemakaian energi baru terbarukan.

Suatu penyampaian masalah linier programming perlu dibentuk formulasi secara matematik dari masalah yang sedang dihadapi dengan memenuhi syarat sebagai berikut;

- Adanya variabel keputusan yang dinyatakan dalam simbol matematik dan variabel keputusan ini tidak negatif.

- Adanya fungsi tujuan dari variabel keputusan yang menggambarkan kriteria pilihan terbaik. fungsi ini harus dibuat dalam suatu sel fungsi linier yang dapat berupa maksimum atau minimum.
- Adanya kendala sumber daya yang dibuat dalam satu set fungsi linier.

2.3.2 Aspek-aspek Program Linier

2.3.2.1 Asumsi-asumsi Dalam Program Linier

Terdapat empat asumsi dasar dalam penyelesaian masalah dengan model program linier, yaitu [8] :

- a. Linieritas : fungsi tujuan (*objective function*) dan kendala (*constraint equations*) dapat dibuat satu set fungsi linier.
- b. *Divisibility* : nilai variabel keputusan dapat berbentuk pecahan atau bilangan bulat (*integer*)
- c. *Nonnegativity* : nilai variabel keputusan tidak boleh negatif atau sama dengan nol.
- d. *Certainty* : semua keterbatasan maupun koefisien variabel setiap kendala dan fungsi tujuan dapat ditentukan secara pasti.

Keempat asumsi diatas harus dipenuhi apabila ingin menyelesaikan masalah model linier programming. jika masalah tidak dapat memenuhi asumsi tersebut, persoalan tersebut dapat diselesaikan dengan program matematik yang lain seperti; integer programming, goal programming, nonlinier programming, dan dynamic programming.

2.3.2.2 Formulasi Umum Model Program Linier

Untuk membuat fomulasi model program linier atau sering juga disebut model matematik linier programming, terdapat tiga langkah utama yang harus dilakukan , yaitu;

- Tentukan variabel keputusan atau variabel yang ingin diketahui dan gambarkan dalam simbul matematik.

- Tentukan tujuan dan gambarkan dalam satu sel fungsi linier dari variabel keputusan yang dapat berbentuk maksimum atau minimum.
- Tentukan kendala dan gambar dalam bentuk persamaan linier atau ketidaksamaan linier dari variabel keputusan.

Di dalam model *linier programming* dikenal dua macam fungsi yaitu fungsi tujuan (*objective function*) dan fungsi batasan (*Constraint function*). Fungsi tujuan adalah fungsi yang menggambarkan tujuan atau sasaran didalam permasalahan *linier programming* yang berkaitan dengan pengaturan secara optimal sumber daya agar diperoleh keuntungan maksimal atau biaya yang minimal. Pada umumnya nilai yang akan dioptimalkan dinyatakan sebagai Z

Dalam pembahasan model *linier programming* digunakan simbol-simbol sebagai berikut :

m : macam batasan-batasan sumber atau fasilitas yang tersedia

n : macam kegiatan yang menggunakan sumber atau fasilitas tersebut

i : nomor setiap macam sumber atau fasilitas yang tersedia ($i : 1,2,3,\dots,m$)

j : nomor setiap macam kegiatan yang menggunakan sumber atau fasilitas

yang tersedia ($j : 1,2,3,\dots,n$)

x_j : tingkat kegiatan ke j ($j : 1,2,3,\dots,n$)

a_{ij} : banyak sumber diperlukan untuk menghasilkan setiap unit keluaran

atau output kegiatan j ($i : 1,2,3,\dots,m$ dan $j : 1,2,3,\dots,n$)

b_i : banyak sumber (fasilitas) i yang tersedia untuk dialokasikan ke setiap

unit kegiatan ($i : 1,2,3,\dots,m$)

Z : nilai yang dioptimalkan (maksimum atau minimum)

C_j : kenaikan nilai Z apabila ada pertambahan tingkat kegiatan dengan

satu satuan atau merupakan sumbangan setiap satuan keluaran kegiatan j terhadap nilai Z

Tabel 2.1 Contoh Model Programa Linier

Kegiatan Sumber	Volume (keluaran)					Potensi
	1	2	3	.....	n	
1	a11	a12	a13	.....	a1n	b1
2	a21	a22	a23	.....	a2n	b2
3	a31	a22	a23	.....	a3n	b3
.....
M	am1	am2	am3	....	amn	bm
ΔZ : penambahan tiap unit Tingkat kegiatan	C1	C2	C3	....	Cn	
	X1	X2	X3	.....	Xn	

Atas dasar pengertian diatas maka dapat dirumuskan model matematis programa linier sebagai berikut :

Fungsi tujuan :

$$\text{Maksimasi} \quad Z = C1X1 + 2X2 + C3X3 + \dots + CnXn$$

$$\text{Minimasi} \quad Z = C1X1 + C2X2 + C3X3 + \dots + CnXn$$

Batasan-batasan :

$$\text{a.} \quad a11x1 + a12x2 + a13x3 + \dots + a1mXn < b1$$

$$\text{b.} \quad a21x1 + a22x2 + a23x3 + \dots + a2mXn < b2$$

$$\text{c.} \quad am1x1 + am2x2 + am3x3 + \dots + amnXn < bm$$

$$x1 > 0, \quad x2 > 0$$

2.3.2.3 Langkah-langkah Penyelesaian Optimasi dengan Programa Linier

Universitas Indonesia

Langkah-langkah pelaksanaan analisis dengan menggunakan program linier meliputi : pengumpulan data, pembuatan model program linier, perhitungan optimasi, dan analisis hasil optimal. Secara rinci langkah-langkah tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut [9]:

1. Pengumpulan data

Input data yang diperlukan dalam perhitungan program linier terdiri dari informasi selengkap-lengkapannya dari sistem yang akan diteliti. Sebagai contoh, untuk sistem energi, informasi yang diperlukan adalah data mengenai aktifitas aliran energi, kapasitas, dan investasi kapasitas baru. Secara detail informasinya adalah spesifikasi kapasitas teknologi seperti: biaya investasi, biaya operasi dan perawatan serta karakteristik operasi (lifetime, efisiensi, dan faktor ketersediaan) dari setiap teknologi konversi, proses, dan transportasi. Selain karakteristik teknologi-teknologi tersebut untuk keperluan analisis yang lebih komprehensif diperlukan juga informasi mengenai sifat dan ketersediaan sumber daya energi serta semua alternatif input dan output dari setiap jenis teknologi.

2. Pembuatan model program linier

Setelah karakteristik dari sistem dan informasi dari sistem yang akan diteliti sudah didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah menuangkan informasi tersebut dalam suatu model. Adapun komponen program linier (LP) untuk sistem energi adalah parameter-parameter mengenai: fungsi obyektif, kesetimbangan energi dan kendala-kendala kebutuhan energi, sumberdaya dan teknologi transformasinya.

- Fungsi obyektif
- Kesetimbangan energi (aliran energi dan kapasitas)
- Penentuan kendala-kendala

Sebagai contoh untuk mengoptimasi biaya bahan bakar dengan dua jenis alternatif energi untuk memenuhi permintaan energi di suatu ketel uap pabrik dengan data sebagai berikut: harga bahan bakar $a= 3$ dan harga bahan bakar $b= 5$; kebutuhan bahan bakar dari ketel tersebut

Universitas Indonesia

adalah 6. Apabila menggunakan bahan bakar b yang sangat irit ini, satu unitnya setara dengan 2 unit bahan bakar a, ratio penggunaannya bahan bakar b paling tidak ada satu untuk setiap 2 unit bahan bakar a.

Untuk keperluan penyelesaian dengan LP pertama-tama harus ditentukan fungsi obyektifnya. Dalam contoh diatas tujuannya adalah meminimumkan biaya bahan bakar dari dua alternatif bahan bakar a yang berharga 3 dan b=5 maka fungsi obyektifnya dapat ditulis sebagai $\text{Min } 3a+5b$; kemudian kendala-kendala yang ada adalah kebutuhan ketel uap adalah 6 dan bahan bakar b mempunyai efisiensi 2 kali lebih besar dari a, informasi ini dapat dipakai untuk menyusun kendala kesetimbangan energi, yaitu $a + 2b \geq 6$, sedangkan informasi ratio bahan bakar dapat dijadikan kendala seperti $-2a + b \geq 0$ dan kendala yang lain adalah a dan b tidak boleh kurang dari 0. Secara umum permasalahan tersebut dapat dimodelkan seperti berikut.

Obyektif $\text{Min } 3a + 5b$

Kendala $a + 2b \geq 6$

$-2a + b \geq 0$

$a \geq 0, b \geq 0$

3. Perhitungan optimasi

Perhitungan optimasi dari model program linier dilakukan berdasarkan prinsip-prinsip umum program linier (Linier Programming) yaitu mencari hasil optimum sesuai dengan fungsi obyektif yang ditetapkan. Secara manual penyelesaian dapat dilakukan dengan metode simplek, akan tetapi hal ini hanya dapat dilakukan untuk persoalan yang sederhana.

Tabel Penyelesaian LP dengan Metode Simplek

Dasar	Z	x1	x2	x3	x4	RHS	
Z	1	-3	-5	0	0	0	
x3	0	1	2	1	0	6	
x4	0	-2	1	0	1	0	
Iterasi							
Z	0	-2	1	3	0	18	1
x1	0	1	2	1		6	
x4	0	0	5	2	1	12	
Iterasi							
Z	1	0	0	2,6	-0,2	15,6	2
x1	0	1	0	0,2	-0,4	1,2	
x2	0	0	1	0,4	0,2	2,4	

Dari penyelesaian diatas didapatkan hasil optimal dengan biaya 15.6 dihasilkan dengan komposisi pasokan bahan bakar a sebesar 1,2 unit dan bahan bakar b sebesar 2,4 unit.

Penyelesaian masalah yang menggunakan banyak variabel dan kendala, perhitungannya memerlukan analisa numerik dengan bantuan komputer. Untuk tujuan tersebut saat ini telah banyak paket program komputer program linier seperti MPSX, Linprog, HSLP, Lindo, Lingo, Xpress, Minos, OSL dan masih banyak paket program lainnya yang mempunyai kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Dengan menggunakan bantuan paket-paket program komputer tersebut model yang mempunyai variabel sampai sepuluh ribu dan kendala sampai lima belas ribu dapat diselesaikan. Fasilitas ini dapat membantu penyelesaian permasalahan secara simultan.

Perhitungan biaya pasokan dari setiap jenis produk energi (untuk sistem energi) adalah dilakukan dengan memperhitungkan setiap biaya yang diperlukan untuk mempersiapkan satu unit produk tersebut mulai dari penambangan atau biaya impor ditambah dengan biaya transportasi menuju tempat pemrosesan seperti kilang minyak untuk produk minyak atau proses-proses lainnya untuk produk lainnya. Setelah itu ditambahkan pula biaya transportasi dari tempat ke pemrosesan ke tempat akhir atau ditambahkan biaya konversi untuk jenis listrik dan yang terakhir adalah biaya dari peralatan yang digunakan untuk

Universitas Indonesia

memenuhi kebutuhan akhir. Jadi apabila kita membuat optimasi untuk mendapatkan biaya pasokan energi minimum maka total biaya sistem energi itu adalah mencakup present value (PV) dari biaya-biaya pasokan energi primer (nilai dari penambangan, impor, dan dikurangi ekspor) biaya untuk transformasi energi (kilang minyak, transportasi energi, pembangkit listrik dan peralatan pemakai energi seperti ketel uap, tungku dan peralatan lainnya) sehingga semua kebutuhan energi akhir dari setiap sektor terpenuhi.

4. Hasil optimal

Nilai dari fungsi obyektif menentukan kombinasi optimum dari setiap komponen sistem yang diteliti, seperti aliran material, kapasitas proses, produk utama dan produk sampingan dari setiap proses yang akan diteliti. Pada prinsipnya semua komponen yang telah dimasukkan dalam model dengan semua input data yang lengkap, maka hasil optimalnya akan sesuai dengan kelengkapan data inputnya. Selanjutnya baik buruknya hasil optimasi sangat tergantung dengan baik buruknya data masukannya. Semakin lengkap informasi yang dimasukkan maka kualitas hasil yang didapatkan akan menjadi semakin baik. Dalam hal ini dapat diegaskan bahwa model adalah hanya suatu alat bantu untuk memberikan komposisi yang optimum.

2.4 Penelitian Mengenai Optimasi dengan Menggunakan Program Linier

Beberapa model pengembangan optimasi telah dikembangkan untuk alokasi energi terbarukan dalam perencanaan energi dari sisi makro dan mikro. Model-model optimasi dan simulasi telah dikembangkan untuk pemodelan sistem energi. Samarakao et al (1988) mendemonstrasikan optimasi dan simulasi terbatas untuk merumuskan konfigurasi biaya terendah dari sistem PV/angin/diesel yang terisolasi dengan cadangan baterai. Model ini

Universitas Indonesia

dimplementasikan menggunakan dua program non linier yang berbeda. Hernandez (1997) mempresentasikan optimasi thermo ekonomi dan keseimbangan cost-benefit untuk mensubstitusi bahan bakar untuk energi dari sumber energi terbarukan. Model ini dinalisa berdasarkan kriteria ekonomi-lingkungan.

Elzeftawy dan Abouelela (1991) menggunakan teknik non program linier untuk mengoptimasi kombinasi dari pembangkitan angin-diesel untuk memenuhi beban demand. Tiga prosedur pembangkitan yang berbeda untuk sistem angin-diesel yang ekonomis untuk mensuplai kebutuhan beban dari daerah yang tertinggal. Hoque dan Ahsan (1995) mempresentasikan reliabiliti berdasarkan simulasi model untuk mengevaluasi turbin angin dan PV solar. Probabiliti fungsi densitas untuk angin dan suhu yang digunakan untuk mengevaluasi output yang diharapkan dari konfigurasi variasi PV solar dan generator angin.

Program linier sudah banyak dikembangkan untuk memodelkan sistem energi terbarukan. Honji et al (1994) menggunakan model program linier. Damyant dan David dalam makalahnya yang berjudul *Exploring regional energy futures in Canada: A techno economic energy model for Ontario energy* mengembangkan sebuah model program linier yang digunakan untuk menghitung konfigurasi biaya terendah dari sistem energi di Propinsi Ontario Canada untuk tahun 2021.

Sinha dan Kapal (1991) mengembangkan model program linier untuk tiga pengguna terpenting yaitu memasak, pompa irigasi dan pencahayaan di daerah perdesaan di India. Fungsi tujuan dari model ini adalah meminimasi biaya tahunan dan kendalanya adalah ketersediaan sumberdaya dan demand.

Model program linier deterministik yang disampaikan Ellis et al untuk pembangunan strategi pengurangan hujan asam di Amerika Utara. Model ini memaksimalkan biaya marginal berdasarkan kendala lingkungan.

2.5 Model Program Linier untuk Optimasi yang Telah Diaplikasikan di Indonesia

Universitas Indonesia

Salah satu teknik optimasi yang menggunakan teknik program linier untuk mengalokasikan berbagai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan energi yang digunakan di Indonesia adalah model MARKAL. 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 [4]

$$z = \sum_{j=1}^n c_j X_j$$

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

$$u_j \geq X_j \geq l_j \geq 0$$

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 akonversi 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

Universitas Indonesia

dan ekspor.

- Teknologi proses yang mengubah dari satu bentuk energi menjadi bentuk energi lainnya, misalnya kilang minyak dan pencairan batubara.
- Teknologi konversi, yang mengubah energy 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 (energy primer) hingga pengguna akhir dihubungkan dengan *energy carrier* yang merupakan energy sekunder.

2.6 Teknologi Energi Terbarukan di Indonesia [10]

2.6.1 Panas Bumi

Sejak beberapa dekade yang lalu para ilmuwan telah mengenal energi panasbumi yaitu panas yang berasal dari dalam bumi yang memiliki potensi yang besar untuk pembangkit listrik. Tujuan utama dari pemanfaatan energi panas bumi adalah untuk membangkitkan energi listrik. Selain itu energi panasbumi dapat digunakan langsung untuk kegiatan lain seperti pertanian, peternakan, pemanas ruangan, industri, pengeringan, dan pemandian air panas.

Pembangkit listrik menggunakan fluida panasbumi telah banyak dikembangkan dan sebagian telah komersial. Pemilihan jenis proses konversi energi tergantung pada kondisi alami sumber. Ekstraksi daya dari sumber dengan dominasi uap menggunakan dry steam plant. Flash steam atau binary plant digunakan untuk sumber dengan kondisi dominasi fluida. Disamping itu temperatur sumber juga menentukan proses konversi, artinya temperatur sumber yang lebih tinggi akan memerlukan biaya listrik yang lebih rendah. Pertimbangan lain yang perlu diperhatikan dalam pemilihan teknologi proses konversi meliputi sifat kimia air garam dan persediaan air

pendingin. Pengembangan teknologi konversi ini lebih ditekankan pada usaha untuk mengurangi biaya pada tiap jenis pembangkit dan peningkatan efisiensi dari sistem pembangkit listrik. Teknologi sistem konversi PLTP yang dapat digunakan untuk mengubah energi panas bumi menjadi energi listrik yang dikenal dan digunakan saat ini antara lain: *dry steam geothermal plants, separated steam plants, separated steam/hot water flashes plants, separated steam/multiflash plants, binary cycle plants, single flash steam plants with pumped wells, double flash steam plant with pumped, dan combined flash/binary plants.*

2.6.2 Mikrohidro

Indonesia mempunyai potensi pembangkit listrik tenaga air (PLTA) sebesar 70.000 mega watt (MW). Potensi ini baru dimanfaatkan sekitar 6 persen atau 3.529 MW atau 14,2 % dari jumlah energi pembangkitan PT PLN. Berdasarkan konstruksinya, ada dua cara pemanfaatan tenaga air untuk pembangkit listrik: (i) membangun bendungan dan membuat reservoir untuk mengalirkan air ke turbin; (ii) memanfaatkan aliran air sungai tanpa membangun bendungan dan reservoir atau yang sering disebut dengan *Run-of-river Hydropower.*

Secara umum cara kerja pembangkit listrik tenaga air adalah dengan mengambil air dalam jumlah debit tertentu dari sumber air (sungai, danau, atau waduk) melalui *intake*, kemudian dengan menggunakan pipa pembawa (*headrace*) air diarahkan menuju turbin. Namun sebelum menabrak turbin, air dilewatkan ke pipa pesat (*penstock*) tujuannya adalah meningkatkan energi dalam air dengan memanfaatkan gravitasi. Selain itu pipa pesat juga mempertahankan tekanan air jatuh, oleh karena itu pipa pesat tidak boleh bocor. Turbin yang tertabrak air akan memutar generator dalam kecepatan tertentu, sehingga terjadilah proses konversi energi dari gerak ke listrik. Sementara air yang tadi digunakan untuk memutar turbin dikembalikan ke alirannya.

Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah pembangkit listrik dengan memanfaatkan tenaga air yang dibendung dengan skala besar (IMIDAP). Keunggulan Pembangkit Listrik Tenaga Air umumnya terlihat jelas dari sisi ekonomidan lingkungan. Secara ekonomis, walaupun memerlukan bendungan, ternyata PLTA memiliki ongkos produksi yang relatif rendah. Selain itu PLTA pun umumnya memiliki umur yang panjang, yaitu 50-100 tahun. Bendungan yang digunakan pun biasanya dapat sekaligus digunakan untuk kegiatan lain, seperti irigasi atau sebagai cadangan air dan pariwisata. Sedangkan dari segi lingkungan berkurangnya emisi karbon akibat digunakannya sumber energi bersih seperti air, jelas merupakan kontribusi berharga bagi lingkungan.

Saat ini sedang dilakukan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM) adalah suatu pembangkit listrik yang mendapatkan tenaganya dari sumber tenaga air dari sungai kecil dengan kapasitas 20 kVA – 250 kVA. Dalam hal ini energi yang terkandung dalam air diolah menjadi energi gerak selanjutnya dihubungkan dengan generator listrik.

2.6.3 Surya

Penggunaan energi surya di Indonesia diklasifikasikan dalam dua golongan yaitu sel surya dan surya termal.

A. Sel surya

Pemakaian sistem sel surya di Indonesia digunakan pada daerah perdesaan atau daerah kepulauan yang belum atau sulit mendapatkan aliran listrik PLN. Penggunaan sel surya di Indonesia untuk listrik perdesaan antara lain pompa air, TV umum, telekomunikasi, kulkas untuk klinik kesehatan masyarakat perdesaan. Sedangkan di negara maju sistem teknologi sel surya sudah dipergunakan untuk keperluan komersial pelistrikan suatu perkotaan dan percontohan untuk transportasi kendaraan darat (mobil surya).

Beberapa penggunaan teknologi sel surya :

- Komunikasi

Teknologi ini dipergunakan untuk komunikasi navigasi laut, kereta api, telepon umum, jalan tol, televisi dan lain-lain. Komunikasi untuk suatu daerah atau kepulauan-kepulauan di Indonesia sangat penting dalam meningkatkan pendidikan dan pertukaran informasi. Beberapa sistem komunikasi di Indonesia merupakan percontohan sedangkan di luar negeri sudah dipergunakan untuk komersial.

- Perawatan kesehatan

Teknologi ini dipergunakan untuk menyimpan vaksin dan peralatan kedokteran yang sangat memerlukan kondisi khusus. Sel surya untuk kulkas dipasang di Puskesmas pada daerah-daerah terpencil dengan kapasitas modul kira-kira 0.38 kWp dan baterai 200 Ah sebagai percontohan.

- Pompa air

Teknologi ini digunakan untuk memompa air yang bisa dimanfaatkan untuk minum dan irigasi.

- Penerangan

Teknologi ini dipergunakan untuk sistem listrik perdesaan dan Solar Home System (SHS). Sistem listrik perdesaan menggunakan storage battery yang diisi dengan daya oleh sel surya pada siang harinya dan listriknya dialirkan ke konsumen pada malam hari. SHS dirancang untuk kebutuhan perumahan/skala kecil. Untuk SHS digunakan satu atau dua modul yang dilengkapi dengan baterai pengendali. Satu unit SHS adalah 50 W/rumah untuk 3 tubelamp dan satu stop kontak untuk TV atau radio.

- Stasiun relai TV

Teknologi ini dipergunakan untuk stasiun relai TV. Sistem ini menggunakan sel surya, pengendali, baterai pemancar dan penerima. Teknologi ini dipergunakan oleh relai pemancar untuk keperluan penyebaran informasi ke seluruh pelosok nusantara.

B. Surya termal

Secara tradisional penggunaan surya termal di Indonesia untuk pengeringan langsung. Selain itu teknologi sel surya termal dikembangkan bersama

Universitas Indonesia

dengan teknologi konversi energi. Penggunaan teknologi surya termal pada saat ini meliputi beberapa aspek antara lain:

- Pemanas air surya termal

Pemanas air di Indonesia sudah diproduksi oleh beberapa perusahaan dan sudah dipasarkan serta dipergunakan oleh konsumen untuk mendapatkan air panas dan uap.

- Pengering surya untuk hasil pertanian

Teknologi ini dapat menurunkan kadar air dari hasil pertanian dan peternakan/kulit hewan. DESDM bekerjasama dengan instansi-instansi seperti IPB, BPPT dan lain-lain mengaplikasikan teknologi ini untuk pengolahan pasca panen pertanian dan perikanan seperti kakao, kopi, ikan, vanili dll.

2.6.4. Biomassa

Bioenergi adalah istilah umum bagi energi yang dihasilkan melalui material organik, seperti kayu, tanaman pertanian, sekam, sampah, atau kotoran hewan. Berdasarkan sumbernya, bioenergi dapat dibagi menjadi dua bagian besar yaitu yang dari hasil pertanian dan budidaya, dan yang dari limbah buangan, seperti buangan tanaman sisa panen, kotoran hewan, sampah kota, limbah pabrik, dsb.

Banyak yang menyangsikan kalau bioenergi adalah salah satu solusi energi terbarukan, terutama untuk bioenergi yang bersumber dari hasil pertanian dan budidaya. Hal ini disebabkan karena penggunaan lahan yang sangat besar dan waktu produksi yang terlalu lama. Terlebih lagi ternyata selisih antara energi keluaran dan energi fosil yang terpakai selama proses tidak terlalu signifikan. Selain itu walaupun ditujukan untuk mengurangi polusi CO₂, produksi bioenergi bukan berarti tanpa CO₂, walaupun memang jumlahnya jauh lebih sedikit daripada CO₂ yang dihasilkan dari produksi energi fosil. Sehingga tantangan kedepan agar bioenergi dapat bersaing dengan sumber energi lainnya adalah bagaimana meningkatkan efisiensi

dari teknologi prosesnya dan bagaimana mempercepat produksi sumber energinya.

Pengolahan biomassa menjadi bioenergi dapat dilakukan dalam tiga cara :
(i) pembakaran biomassa padat (ii) produksi bahan bakar gas dari biomassa
(iii) produksi bahan bakar cair dari biomassa.

Cara yang pertama adalah dengan membakar langsung biomassa dan diambil energi panasnya. Energi panas ini dapat digunakan untuk apa saja, bisa sebagai pemanas ruangan, ventilasi, atau jika dalam terminologi kelistrikan, energi panas ini kemudian digunakan untuk memanaskan dan menguapkan air pada aplikasi turbin uap. Biomassa yang digunakan bisa apa saja, namun umumnya adalah sisa produk hutan dan pertanian, arang, atau sampah kota (pada PLTSa).

Cara yang kedua adalah produksi biomassa dalam bentuk gas. Ada beberapa alasan dibalik berkembangnya teknologi ini. Hasil yang didapatkan melalui produk biogas ini selain dapat dimanfaatkan untuk pembakaran biasa / pemanasan, ternyata bisa juga digunakan sebagai bahan bakar pada mesin bakar dan turbin gas. Produk biogas juga menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dari pembakaran biomassa padat, selain itu karena dalam bentuk gas, penyalurannya relatif lebih mudah (bisa dengan menggunakan pipa). Konversi kedalam bentuk gas dapat dilakukan melalui proses biokimia dan termokimia. Untuk proses biokimia, digunakan anaerob yang kemudian akan memecah materi organik kedalam senyawa gula, dan kemudian menjadi zat asam, dan akhirnya menjadi gas.

Untuk proses termokimia, gasifikasi dilakukan dengan cara yang tidak jauh berbeda dengan proses gasifikasi batu bara, hanya saja yang menjadi objeknya adalah biomassa. Produksi gasifikasi dalam kondisi tertentu dapat menghasilkan gas sintesis, kombinasi antara hidrokarbon dan hidrogen. Dari gas sintesis ini hampir seluruh hidrokarbon, bensin sintesis dan bahkan hidrogen murni dapat dibentuk (yang nantinya dapat digunakan pada fuel

cell). Tantangan dari biogas ini adalah proses pembuatannya yang rumit, dan di negara berkembang seperti Indonesia ini masih membutuhkan biaya yang tidak sedikit untuk investasi awalnya.

Cara yang ketiga adalah dengan memproduksi biofuel cair dari biomassa. Fokus terbesar pengembangan bioenergi terletak pada biofuel sebagai pengganti bahan bakar minyak. Ada tiga macam olahan biofuel yang dapat mereduksi penggunaan bahan bakar minyak, yaitu (i) bio-ethanol (ii) bio-diesel (iii) bio-oil.

Bio-ethanol didapatkan melalui proses fermentasi. Proses fermentasi ini membutuhkan produk gula, sehingga sumber paling efektif untuk digunakan dalam produksi bio-ethanol ini adalah tebu. Brazil adalah negara terbesar penghasil ethanol dari residu gula. Kegunaan dari bio-ethanol adalah dapat mereduksi penggunaan bensin, yaitu dengan mencampurkan bio-ethanol ke dalam bensin (premium). Salah satu produknya yang sudah banyak dikenal adalah Gasohol E-10, didapatkan dengan mencampurkan 10% Bio-ethanol dengan 90% premium. Seiring dengan perkembangan teknologi, bukan tidak mungkin campuran Bio-ethanol di kemudian hari akan semakin besar persentasenya.

Bio-diesel didapatkan melalui transesterifikasi minyak sayur (diekstrak dari biji-bijian seperti jarak, kelapa sawit, dsb). Bio-oil didapatkan melalui proses pyrolysis dari sekam, tempurung kelapa, jarak atau kelapa sawit. Proses ini melibatkan penguapan material biomassa sehingga terbagi menjadi uap dan padatan residu. Kemudian uapnya diembunkan sehingga dihasilkan cairan bio-oil yang membawa kandungan energi cukup besar. Bio-oil digunakan sebagai pengganti solar industri (IDO), *Marine Fuel Oil* (MFO), dan kerosin. Bio-oil dapat digunakan pada pembangkit listrik diesel