

## **II. TINJAUAN PUSTAKA**

### **A. Pengaruh Komponen Penyusun DAS Terhadap Daya Dukung Lingkungan**

#### **1. Karakteristik Komponen DAS**

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alamiah, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan (UU No. 7 Tahun 2004 tentang Sumberdaya Air).

Pemisah topografi merupakan tampilan permukaan bumi yang mempunyai ketinggian relatif lebih tinggi dari daerah disekitarnya dan membentuk garis imajiner sampai ke laut. Secara alamiah air mengalir dari tempat yang tinggi ke tempat yang rendah, daerah yang relatif lebih tinggi dalam sistem DAS disebut daerah hulu dan daerah yang lebih rendah di sebut daerah hilir, sedangkan yang terletak diantara keduanya disebut daerah tengah.

Daerah hulu merupakan kawasan pedesaan dengan komponen utamanya adalah desa, sawah / ladang, sungai dan hutan (Soemarwoto, 1982). Kawasan perdesaan adalah wilayah yang mempunyai kegiatan utama pertanian, termasuk pengelolaan sumberdaya alam dengan susunan fungsi kawasan sebagai tempat

permukiman perdesaan, pelayanan jasa pemerintahan, pelayanan sosial, dan kegiatan ekonomi (UU No.26 Tahun 2007:10). Secara biogeofisik, daerah hulu DAS dicirikan sebagai berikut: merupakan daerah konservasi, mempunyai kerapatan drainase lebih tinggi, merupakan daerah dengan kemiringan lereng besar (lebih besar dari 15%), bukan merupakan daerah banjir, pengaturan pemakaian air ditentukan oleh *poly drainase*, dan jenis vegetasi umumnya merupakan tegakan hutan (Asdak, 2007 : 11).

Dalam siklus hidrologi, kawasan hutan memegang peranan penting khususnya pada saat terjadinya proses infiltrasi. Pada umumnya kawasan hutan memiliki seresah dan sisteni perakaran yang menyerupai busa (*sponge*), sehingga pada saat terjadi hujan dapat menyerap dan menyimpan air lebih banyak dari jenis kawasan lain. Selain itu karena tingginya aktivitas fauna tanah, akar dan kandungan bahan organik, jumlah pori-pori hayati (*biosfer*) di dalam tanah menjadi lebih banyak, sehingga kapasitas infiltrasi menjadi meningkat. Akan tetapi walaupun mempunyai kemampuan yang lebih tinggi menyerap dan menyimpan air, kawasan hutan juga mengkonsumsi air lebih banyak dari kawasan lain tidak untuk mempertahankan tingkat aliran dasar (*base flow*) sungai. Secara umum kawasan hutan melepas air ke sungai dalam jumlah yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem penggunaan lahan lainnya (Purwanto dan Ruijter, 2004:3-5)

Daerah tengah dalam suatu DAS merupakan daerah pemanfaatan sumberdaya air yang tersedia, bentuk pemanfaatannya sebagian besar dalam sektor pertanian. Pengembangan budidaya pertanian meliputi padi sawah, baik

teknis, semi teknis, tadah hujan, dan juga kolam ikan, selain itu juga perkebunan tanaman semusim maupun tahunan.

Jika daerah hulu merupakan daerah pedesaan, maka daerah hilir merupakan kawasan perkotaan, dengan ciri memiliki kerapatan drainase lebih kecil, merupakan daerah dengan kemiringan lereng kecil sampai dengan sangat kecil (kurang dari 8%), pada beberapa tempat merupakan daerah banjir (genangan), pengaturan pemakaian air ditentukan oleh bangunan irigasi, dan jenis vegetasi didominasi tanaman pertanian kecuali daerah estauria yang didominasi bakau/gambut (Asdak, 2007 : 11).

Dalam siklus air, tanah mempunyai peranan penting yang merupakan suatu perubah kompleks dalam seluruh tata air. Pengaturan hubungan antara intensitas hujan dan kapasitas infiltrasi serta pengaturan aliran permukaan merupakan dasarnya perencanaan konservasi tanah (Arsyad, 2010). Menurut Owoputi dan Stole,1995, dalam Suripin, 2002 : 3) erosi tanah berpengaruh negatif terhadap produktifitas lahan melalui pengurangan ketersediaan air, nutrisi, bahan organik, dan menghambat kedalaman perakaran. Erosi tanah mengurangi kemampuan menahan air karena partikel-partikel lembut dan bahan organik pada tanah terangkut. Selain mengurangi produktifitas lahan dimana erosi terjadi, erosi tanah juga menyebabkan permasalahan lingkungan yang serius di daerah hilirnya. Sedimen hasil erosi mengendap dan mendangkalan sungai-sungai, danau, dan waduk sehingga mengurangi kemampuan untuk irigasi, pembangkit listrik, perikanan, navigasi, dan rekreasi. *Eutrofikasi* dari penambahan nutrisi yang terkandung dalam sedimen ke waduk dan danau juga menjadi masalah tersendiri

bagi produktifitas perikanan darat (Suripin, 2002 : 3-4).

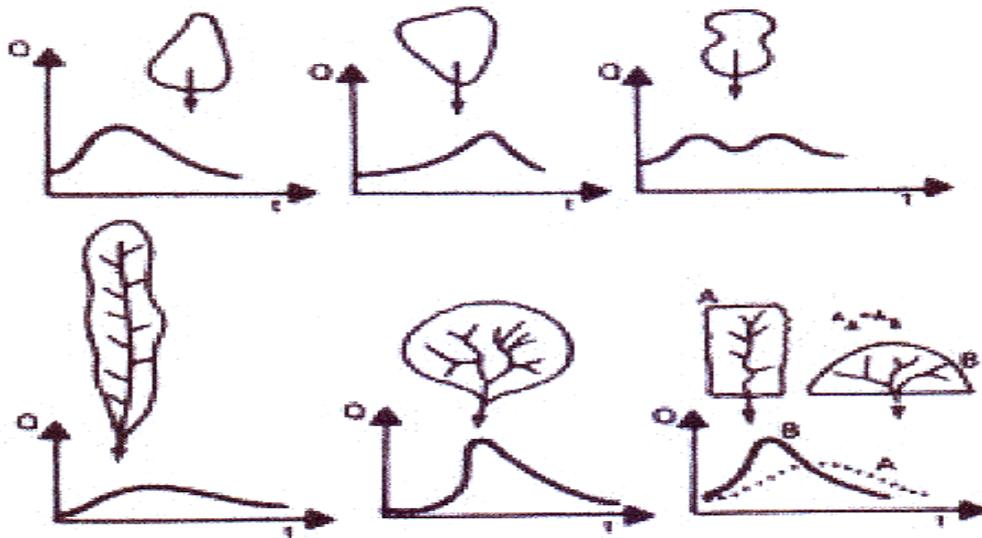
Karakteristik dari komponen penyusun DAS tersebut akan mempengaruhi hasil air, baik air permukaan maupun air tanah. Menurut Suripin (2002 :137) besar kecilnya aliran permukaan ditentukan oleh intensitas, durasi dan penyebaran hujan (faktor iklim) serta karakteristik daerah aliran sungai. Sedangkan karakteristik DAS mempengaruhi aliran permukaan meliputi : luas dan bentuk DAS, topografi dan tata guna lahan (Suripin, 2002 : 138).

**a. Luas DAS**

Semakin luas suatu DAS, maka jumlah dan laju aliran permukaan total semakin besar, akan tetapi apabila dinyatakan persatuan luas, laju dan volume aliran permukaan akan semakin kecil. Hal tersebut terkait dengan waktu konsentrasi yang diperlukan dari titik jatuhnya hujan dan penyebaran intensitas hujan.

**b. Bentuk DAS**

Bentuk DAS berpengaruh terhadap hidrograf aliran permukaan, apabila menerima hujan dengan intensitas yang sama dan mempunyai luas yang sama, DAS dengan bentuk memanjang dan sempit, cenderung menghasilkan laju aliran permukaan yang lebih kecil dibandingkan dengan DAS yang berbentuk melebar atau melingkar. Pada DAS yang memiliki bentuk memanjang mempunyai waktu konsentrasi yang lebih besar dari pada DAS yang berbentuk melebar (Suripin, 2002 : 138), seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. berikut ini:



**Gambar 2.1.** Pengaruh Bentuk DAS terhadap Hidrograf

*Sumber: Seyhan, 1990*

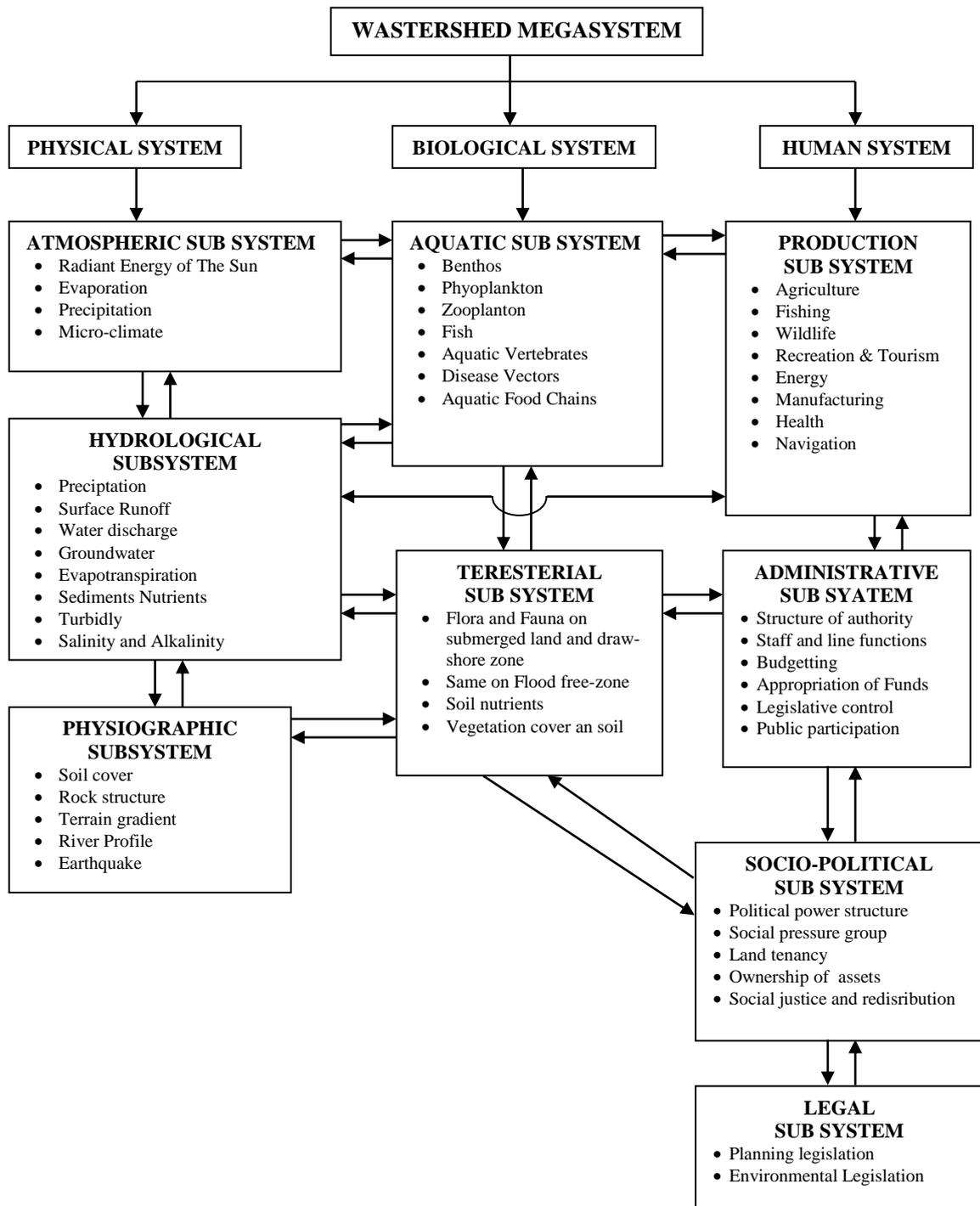
### c. Topografi

Bentuk bentang alam atau topografi DAS seperti kerapatan kontur, kerapatan jaringan drainase serta bentuk cekungan akan mempengaruhi laju dan volume aliran permukaan. DAS dengan bentang alam yang datar dan memiliki cekungan-cekungan tanah tanpa saluran drainase akan menghasilkan debit aliran permukaan yang lebih kecil dibandingkan dengan DAS dengan kemiringan besar dan memiliki jaringan drainase yang rapat. Hal tersebut terjadi karena air hujan yang jatuh di DAS tersebut akan tertahan dulu di cekungan-cekungan tanah sebelum membentuk aliran permukaan, selain itu karena kemiringannya datar dan tidak memiliki saluran drainase, maka aliran permukaan yang terbentuk tidak mudah terkonsentrasi dan mengalami perlambatan sehingga bentuk hidrografnya menjadi datar (Asdak, 2007).

#### **d. Tata Guna Lahan**

Ketiga karakteristik komponen DAS tersebut di atas merupakan komponen alami, komponen lain yang justru sangat berpengaruh terhadap terbentuknya aliran permukaan adalah karakteristik komponen tata guna lahan. Karakteristik dari komponen ini sangat dipengaruhi oleh kegiatan manusia yang cenderung tidak memperhatikan fungsi DAS itu sendiri. Perubahan tata guna lahan karena tekanan pembangunan semakin memperburuk kondisi suatu DAS, misalnya saja penebangan hutan yang mempengaruhi besaran debit puncak dan perubahan hidrograf secara drastis dalam waktu yang relatif singkat. Tekanan lain yang sangat berpengaruh adalah urbanisasi dan industrilisasi yang disertai dengan peningkatan lapisan kedap sehingga meningkatkan aliran permukaan (*surface runoff*) dan mengecilkan aliran dasar (*base flow*) (Sri Harto, 2000 : 321-323).

Tata guna lahan merupakan bentuk peranan manusia dalam mempengaruhi kualitas suatu DAS. Gangguan terhadap salah satu komponen ekosistem akan dirasakan oleh komponen lainnya dengan sifat dampak yang berantai. Keseimbangan ekosistem akan terjamin apabila kondisi hubungan timbal balik antar komponen berjalan dengan baik dan optimal. Kualitas interaksi antar komponen ekosistem terlihat dari kualitas output ekosistem tersebut. Dalam suatu DAS kualitas ekosistemnya secara fisik terlihat dari besarnya erosi, aliran permukaan, sedimentasi, fluktuasi debit, dan produktifitas lahan. Prinsip keberlanjutan (*sustainability*) menjadi acuan dalam mengelola DAS, dimana fungsi ekologis, ekonomi, dan sosial budaya dari sumberdaya (*resources*) dalam DAS dapat terjamin secara berimbang (*balance*) (Ramdan, 2004 : 2).



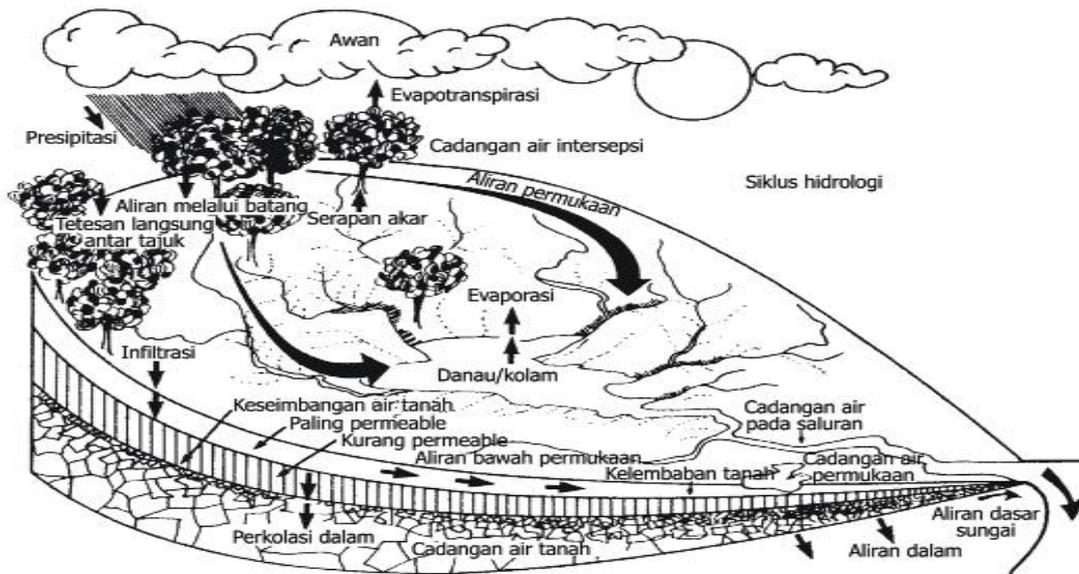
**Gambar 2.2.** Megasistem Daerah Aliran Sungai

*Sumber : Saha and Barrow (1981) dalam Mc Donald and D. Kay (1988) Water Resource : Issues and Strategies. Longman.New York WATERSHED*

Hubungan interrelasi masing-masing komponen dalam DAS di gambar oleh Saha dan Barrow (1981) sebagai hubungan timbal balik yang saling terikat, Gambar 2.2. Ada tiga sistem utama, yaitu : *Physical System*, *Biological System* dan *Human System*. Dalam kaitannya dengan tata guna lahan, maka sistem yang paling berperan adalah *Human System*. Mulai dari subsistem produksi, administrasi, sosial politik dan subsistem regulasi. Dalam rangka mempertahankan dan menunjang kehidupannya manusia (*human*) membuka dan mengembangkan daerah tangkapan air tanpa memperhatikan fungsi keberadaannya. Sehingga kesetimbangan Megasistem DAS terganggu.

## **2. Siklus Hidrologi**

Siklus hidrologi merupakan pusat perhatian dari hidrologi. Siklus tersebut tidak ada awal dan akhirnya, berbagai proses akan terus terjadi. Penguapan air dari laut dan air permukaan menuju atmosfer; uap air tersebut akan bergerak dan terangkat ke atmosfer sampai terkondensasi hingga menjadi hujan yang turun ke tanah dan lautan. Hujan yang turun akan di serap oleh tumbuh-tumbuhan, menggenang di permukaan, terinfiltrasi ke dalam tanah, dan menjadi aliran permukaan. Sebagian air yang terintersepsi dan menjadi aliran permukaan akan kembali ke atmosfer melalui penguapan. Air yang terinfiltrasi maupun perkolasi ke dalam tanah akan mengisi air tanah, dan menjadi mata air atau mengalir masuk ke sungai yang akhirnya mengalir ke laut dan menguap menuju atmosfer, itu adalah siklus hidrologi (Chow et.al. 1988). Gambar 2.3. memperlihatkan siklus hidrologi dalam sebuah tangkapan air dengan berbagai input dan output hidrologi.

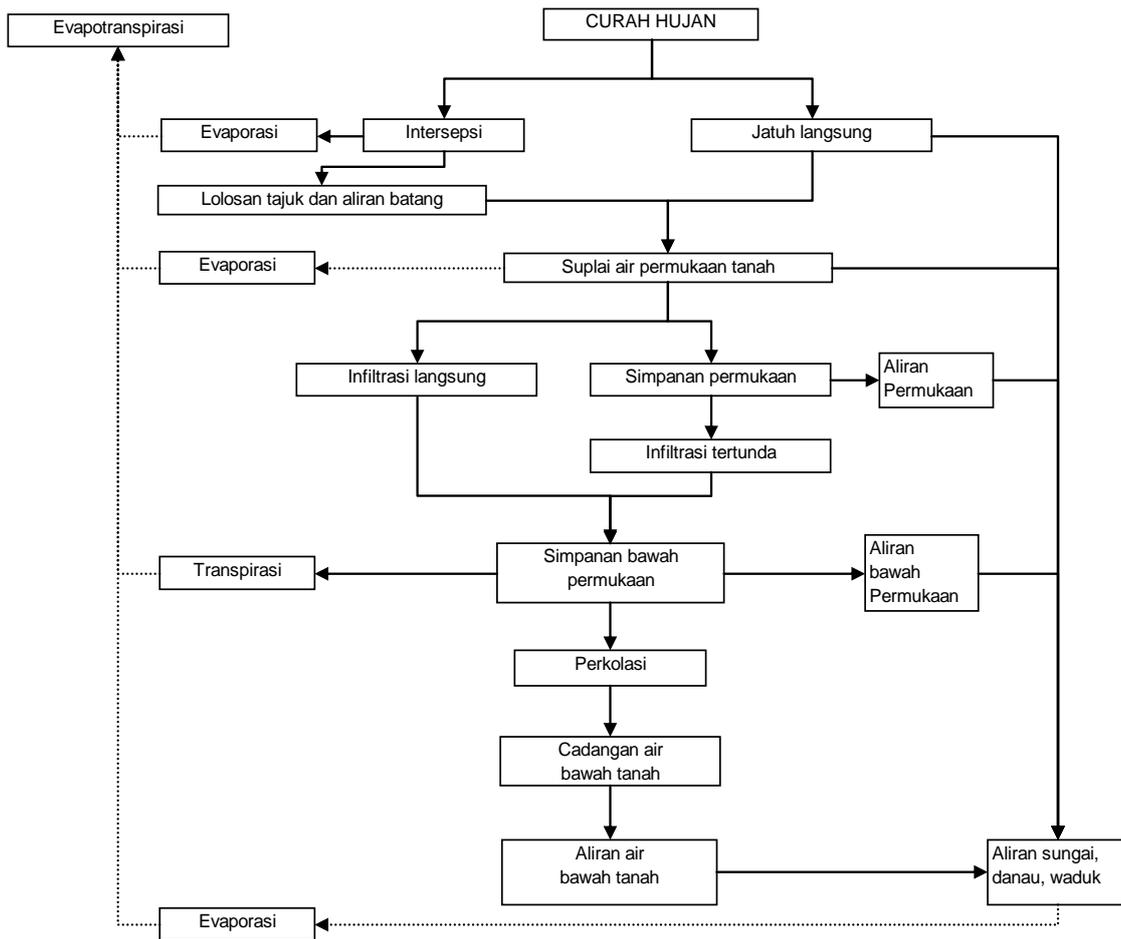


**Gambar 2.3.** Sebuah Tangkapan Air dengan Berbagai Input dan Output Hidrologinya

*Sumber: Messerly dan Ives, 1977 dalam Purwanto dan Ruijter, 2004.*

Siklus hidrologi juga menunjukkan semua hal yang berhubungan dengan air. Bila di lihat keseimbangan air secara menyeluruh maka air tanah dan aliran permukaan: sungai, danau, penguapan dan lain lain, merupakan bagian-bagian dari beberapa aspek hidrologi yang menjadikan siklus hidrologi menjadi seimbang sehingga disebut siklus hidrologi yang tertutup (*closed system diagram of global hydrological cycle*) (Kodoatie & Sjarief, 2008).

Secara sederhana siklus hidrologi dapat dijelaskan dalam bentuk skema seperti Gambar 2.4. berikut ini :



**Gambar 2.4.** Skema Distribusi Air Hujan yang Sampai di Permukaan Bumi.

*Sumber : Arsyad, 2010*

Siklus hidrologi di atas dapat disederhanakan dengan persamaan umum dengan prinsip konservasi massa (Hendrayanto, 2009), persamaan umum tersebut adalah sebagai berikut :

$$Ch = Q - E_{to} \pm \Delta S + U + L \dots\dots\dots(2.1)$$

$$Q = Ch - E_{to} \pm \Delta S + U + L \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

- Q = Total debit, sebagai *outflow*
- Ch = Curah hujan total
- Eto = Evapotranspirasi total
- $\Delta S$  = Perubahan simpanan di permukaan dan dalam tanah.
- U = *underflow*, air yang mengalir di bawah dasar sungai dan yang mengalir sebagai perkolasi dalam (*deep percolation*)
- L = *leakage*, (kebocoran DAS), adalah air yang masuk dari atau keluar ke sistem DAS di sebelahnya, sebagai akibat sistem geologi yang mengakibatkan terbentuknya batas DAS di permukaan tidak sama dengan batas DAS di permukaan.

Memperhatikan persamaan (2.2), menurut Hendrayanto (2009) karena komponen U dan L sulit diukur dalam perhitungan neraca air selalu tidak diperhitungkan, sehingga persamaan disederhanakan menjadi :

$$Q = Ch - Eto \pm \Delta S \dots\dots\dots(2.3)$$

Komponen lebih rinci dari neraca air suatu DAS adalah sebagai berikut :

$$Q = Q_d + Q_i + Q_b \dots\dots\dots (2.4)$$

$$Ch = Ch_q = Ch_i + Ch_w \dots\dots\dots (2.5)$$

$$Eto = ET = E_i + E_w + I + T \dots\dots\dots (2.6)$$

$Q_d$ ,  $Q_i$ , dan  $Q_b$  masing-masing adalah debit aliran di permukaan tanah, di dalam lapisan vadosa, dan di dalam lapisan tanah jenuh yang masuk kedalam jaringan sungai sebagai aliran langsung (*direct flow*), aliran antara (*inter flow*) dan aliran dasar (*base flow*).  $Ch_i$  adalah presipitasi yang sampai di permukaan tanah tanpa dan dengan penutup lahan baik berupa vegetasi maupun bukan, termasuk di danau dan kolam.  $Ch_w$  adalah presipitasi yang sampai di badan sungai atau

jaringan drainase lainnya.  $E_i$  dan  $E_w$  masing-masing adalah evaporasi dari permukaan tanah (gundul), dan badan air,  $I_t$  adalah evaporasi dari permukaan vegetasi yang umumnya diistilahkan sebagai intersepsi ( $I_t$ ) oleh vegetasi.  $T$  adalah transpirasi oleh tanaman. Persamaan neraca air lebih rinci tanpa memperhitungkan *under flow* dan kebocoran DAS adalah :

$$(Q_d + Q_i + Q_b) = (Ch_i + Ch_w) - (E_i + E_w + I_t + T) + \Delta S \dots\dots\dots(2.7)$$

Memperhatikan persamaan 2.7 tersebut, tampak bahwa variabel debit (ketersediaan air) tidak hanya ditentukan oleh kondisi tata guna lahan, akan tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi iklim yang mempengaruhi kejadian hujan, evaporasi, tanah, dan struktur geologi (Hendrayanto, 2009). Walaupun demikian semua variabel di dalam persamaan tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi tata guna lahan, seperti diketahui variabel debit dipengaruhi oleh kapasitas infiltrasi. Hal ini sesuai dengan skema distribusi air hujan pada Gambar 2.4, semua variabel aliran (debit) ditentukan oleh proses infiltrasi yang terjadi. Sedangkan kapasitas infiltrasi dipengaruhi oleh jenis dan tata guna lahan yang diterapkan pada kawasan tersebut demikian juga dengan variabel evapotranspirasi dan intersepsi.

Infiltrasi merupakan peristiwa masuknya air di permukaan ke dalam tanah secara vertikal, apabila jumlah air dipermukaan mencukupi maka masuknya air ke dalam tanah akan mencapai ke dalam profil tanah. Apabila jumlah air masih mencukupi maka air akan terus bergerak di dalam profil tanah, proses lanjutan infiltrasi tersebut disebut dengan perkolasi.

### **3. Ketersediaan Air**

Ketersediaan air adalah jumlah air (debit) yang diperkirakan terus menerus ada di suatu lokasi (bendung atau bangunan air lainnya) di sungai dengan jumlah tertentu dan dalam jangka waktu (periode) tertentu (Direktorat Irigasi, 1980 dalam Triadmodjo, 2009). Dalam rangka pengembangan sumberdaya air, jumlah air atau debit yang terjadi pada suatu sungai harus dicatat secara terus menerus, sebagai dasar dalam perencanaan. Akan tetapi karena kekurangan peralatan ataupun rusaknya alat pengukur debit serta kondisi lokasi yang tidak memungkinkan, data jumlah aliran dari waktu ke waktu pada suatu sungai sering tidak lengkap. Sebaliknya ketersediaan seri data hujan di satuan wilayah sungai relatif lebih baik dan lengkap dibandingkan dengan data aliran sungai. Dalam upaya pengembangan sumberdaya air di suatu wilayah, maka ketersediaan data yang lengkap sangat diperlukan, tetapi dengan keterbatasan data yang ada, maka diperlukan model-model hidrologi untuk menyederhanakan hujan menjadi aliran (Nurrochmad, *et.al.*, 1998 :58).

Air merupakan sumberdaya yang klasifikasinya dapat digolongkan baik kedalam sumberdaya dapat diperbarukan maupun tidak diperbarukan, tergantung pada sumber dan pemanfaatannya (Fauzi, 2008). Sehingga untuk mengukur ketersediaan sumberdaya air dapat dilakukan dengan konsep Rees. Pengukuran sumberdaya dengan konsep Rees (1990) pertama dapat dilakukan dengan kelompok sumberdaya stok (tidak diperbarukan), dengan konsep yang digunakan :

- a. Sumberdaya hipotikal.
- b. Sumberdaya spekulatif
- c. Cadangan kondisional
- d. Cadangan terbukti

Untuk jenis sumberdaya dapat diperbarui (*flow*) ada beberapa konsep pengukuran ketersediaan yang sering digunakan, antara lain adalah :

- a. Potensi maksimum sumberdaya.
- b. Kapasitas lestari (*Sustainable capacity/Sustainable yeald*).
- c. Kapasitas penyerapan (*Absortive capacity*).
- d. Kapasitas daya dukung (*Carrying capacity*).

Sedangkan menurut Kodoatie dan Sjarief (2008), perhitungan ketersediaan air pada prinsipnya didasarkan pada curah hujan, luas DAS dan karakteristik lahan. Pada saat terjadi hujan akan terbentuk aliran permukaan, infiltrasi, aliran bawah permukaan, evapotranspirasi, volume air yang tersimpan di vegetasi, daerah depresi dan dalam tanah sesuai kapasitas tampungannya (*field capacity*). Dengan kata lain ketersediaan air optimal adalah dengan menampung hujan sebanyak mungkin dan sekaligus menahan aliran permukaan sebesar-besarnya, konsep ini dikenal dengan konsep memanen hujan (*rainfall harvesting*).

Dalam pengertian sumberdaya air, ketersediaan air pada dasarnya adalah air yang berasal dari air hujan, air permukaan dan air tanah. Dari ketiga sumber air tersebut, yang mempunyai potensi paling besar untuk dimanfaatkan adalah air permukaan dalam, sedangkan air tanah banyak dimanfaatkan pada daerah yang sulit mendapatkan air permukaan, pemanfaatan air tanah relatif membutuhkan

biaya operasional pompa yang sangat mahal. Karena merupakan bagian dari fenomena alam, ketersediaan air sering sulit untuk diatur dan diprediksi dengan akurat. Hal ini disebabkan besarnya unsur variabilitas ruang (*spatial variability*) dan variabilitas waktu (*temporal variability*). Sehingga didalam proses perencanaan dan pengelolaan sumberdaya air, analisis kuantitatif dan kualitatif harus dilakukan secermat mungkin agar diperoleh informasi yang akurat (Bappenas, 2006 :10-11).

Analisis ketersediaan air pada prinsipnya mengacu debit andalan, yaitu debit minimum air permukaan atau sungai dengan besaran tertentu yang mungkin tercapai sehingga dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan. Untuk keperluan air baku debit andalan yang ditetapkan adalah 90%, sedangkan irigasi 80% (Bappenas, 2006 : 11, Triadmodjo, 2008 : 309).

**a. Debit Andalan Berdasarkan Data Debit**

Analisis debit andalan sangat ditentukan oleh ketersediaan data, untuk menentukan ketersediaan air pada suatu titik pengamatan diperlukan data debit yang cukup panjang, misalnya data debit harian sepanjang tahun. Selanjutnya data tersebut disusun dari data debit maksimum ke debit minimum, susunan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk kurva massa atau dalam bentuk tabel. Pada kurva massa debit, sebagai ordinat adalah debit dan persen waktu sebagai absis, sedangkan untuk bentuk tabel data harian diurutkan dari nilai terbesar sampai terkecil, persen keandalan diperoleh dari nilai  $m/n$  dimana  $m$  nomor urut dan  $n$  jumlah data (Triadmodjo, 2008 : 309-310).

**b. Debit Andalan Berdasarkan Model Hujan Aliran**

Untuk data debit yang terbatas akan tetapi data hujan mencukupi, maka analisis debit andalan dapat dilakukan dengan model hujan aliran. Model hujan aliran merupakan model yang dibangun berdasarkan hubungan data debit dan data hujan pada periode dengan memperhatikan karakteristik DAS. Selanjutnya dari model tersebut dapat dibangkitkan data debit untuk periode yang lain berdasarkan data hujan yang tersedia. Sampai saat ini model hujan aliran telah banyak dikembangkan diantaranya adalah model regresi, Model Mock, model tangki, SMAR, NRECA, dll. Dalam perkembangannya Model Mock lebih sering digunakan, selain karena dikembangkan di Indonesia (Jawa) model ini cukup mudah penggunaannya dan mempunyai akurasi yang tinggi (Bappenas, 2006 : 11-12, Triadmodjo, 2008 : 312).

Model Mock merupakan model yang menggambarkan proses aliran air permukaan maupun air tanah. Masukan yang dibutuhkan model ini meliputi data curah hujan, ETo, kelembaban tanah dan tampungan air tanah untuk menduga besarnya limpasan. Metode ini mampu menduga infiltrasi (I), aliran dasar (BF), dan limpasan (QRO) yang nilainya sesuai dengan persamaan berikut:

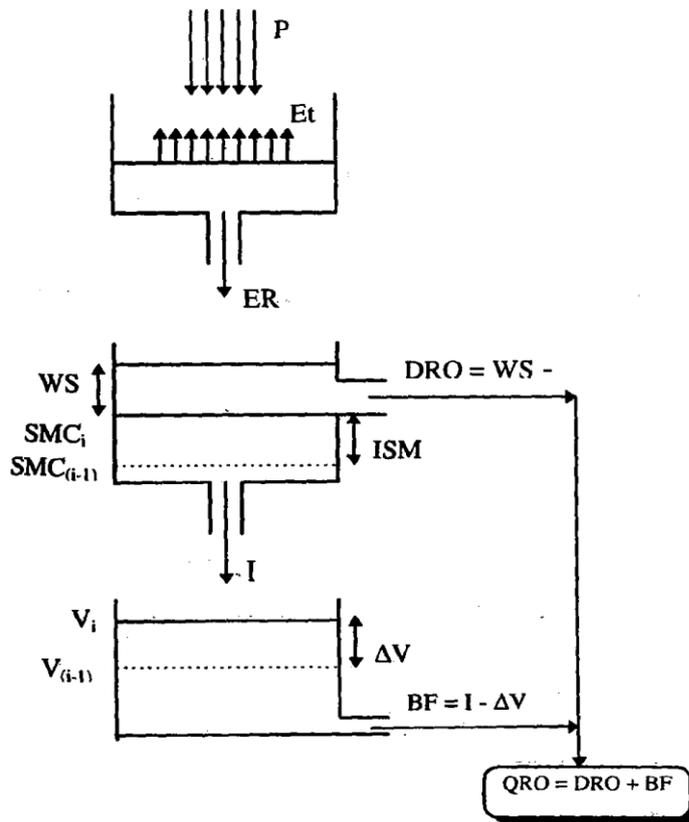
$$ER = P - Et \dots \dots \dots (2.8)$$

$$WS = ER - SMC \dots \dots \dots (2.9)$$

$$DRO = WS - I \dots \dots \dots (2.10)$$

$$BF = I - \Delta V \dots \dots \dots (2.11)$$

$$QRO = DRO + BF \dots \dots \dots (2.12)$$



**Gambar 2.5.** Struktur Model Mock

Sumber : Nurrochmad, et.al, 1998 p:59

#### 4. Kebutuhan Air

Kebutuhan air adalah air yang diperlukan atau dipergunakan oleh manusia untuk menunjang kehidupannya, terdiri dari kebutuhan air domestik dan non domestik, irigasi, perikanan, peternakan dan penggelontoran kota serta pemeliharaan sungai. (Kodoatie & Sjarif, 2008, Triatmodjo, 2009).

##### a. Kebutuhan Air Domestik

Pertumbuhan penduduk merupakan salah satu faktor penting dalam perencanaan kebutuhan air domestik. Proyeksi jumlah penduduk digunakan sebagai dasar untuk menghitung tingkat kebutuhan air baku pada masa

mendatang. Proyeksi jumlah penduduk di suatu daerah dan pada tahun tertentu dapat dilakukan apabila diketahui tingkat pertumbuhan penduduknya. Selain itu pertumbuhan penduduk juga tergantung pada Rencana Tata Ruang dan Wilayah kabupaten atau kota, yang berlaku di kawasan tersebut. Daerah perkotaan dan pedesaan atau diantara keduanya mempunyai karakteristik kebutuhan air yang berbeda, sehingga perlu dikaji lebih mendalam. Pada kawasan yang sudah terlayani oleh instalasi PDAM, laju penyambungan menjadi parameter yang penting untuk analisis proyeksi kebutuhan air masa mendatang. Hal ini terkait dengan pandangan masyarakat terhadap nilai air atau harga air dan sistem pelayanan penyediaan air bersih (Kodoatie & Sjarif, 2008).

**Tabel 2.1** Nilai Kebutuhan Air Bersih untuk Bangunan Tempat Tinggal

Kategori Kota	Keterangan	Jumlah Penduduk (orang)	Kebutuhan Air Minum (liter/orang/hari)
I	Kota Metro	Diatas 1 Juta	190
II	Kota Besar	500.000 s.d. 1 Juta	170
III	Kota Sedang	100.000 s.d. 500.000	150
IV	Kota Kecil	20.000 s.d. 100.000	130
V	Desa	10.000 s.d. 20.000	100
VI	Desa Kecil	3.000 s.d. 10.000	60

*Sumber : Direktorat Jendral Cipta Karya DPU, 1999*

**Tabel 2.2.** Kriteria Pemakaian Bersih

No	Parameter	Kota			
		Metro	Besar	Sedang	Kecil
1	Kebutuhan Domestik : a. Sambungan Rumah (liter/orang/hari) b. Kran Umum (liter/orang/hari)	190	170	150	130
		30	30	30	30
2	Kebutuhan Non Domestik : a. Industri (liter/detik/hektar) 1) Berat 2) Sedang 3) Ringan	0,5 – 1,00			
		0,25 – 0,50			
		0,15 – 0,25			

No	Parameter	Kota			
		Metro	Besar	Sedang	Kecil
	b. Komersial (liter/detik/hektar)				
	1) Pasar	0,10 – 1,00			
	2) Rumah Makan (liter/unit/hari)	15			
	3) Hotel (liter/kamar/hari)				
	a) Lokal	400			
	b) Internasional	1.000			
	c. Sosial dan Institusi				
	1) Sekolah (liter/siswa/hari)	15			
	2) Rumah Sakit (m <sup>3</sup> /unit/hari)	1 – 2			
	3) Puskesmas (liter/hari)	400			
3	Kebutuhan Air Rata-rata	Kebutuhan domestik + non domestik			
4	Kebutuhan Air Maksimum	Kebutuhan rata-rata x 1,15 – 1,2 (faktor kehilangan jam max)			
5	Kehilangan Air : Kota Metro dan Besar Kota Sedang dan Kecil	25% x Kebutuhan rata-rata 30% x Kebutuhan rata-rata			
6	Kebutuhan Jam Puncak	Kebutuhan rata-rata x Faktor jam puncak (165% - 200%)			

Sumber : Direktorat Jendral Cipta Karya DPU, 1999

Proyeksi jumlah penduduk di masa mendatang dapat dilakukan dengan menggunakan tiga metode yaitu :

### 1) Metode Aritmatik

Jumlah perkembangan penduduk dengan menggunakan metode ini dirumuskan sebagai berikut (Muliakusumah, 1981) :

$$P_n = P_0(1 + rn) \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana :

- $P_n$  : Jumlah penduduk tahun proyeksi
- $P_0$  : Jumlah penduduk di awal tahun proyeksi (tahun dasar)
- $r$  : Faktor pertumbuhan penduduk
- $n$  : Tahun proyeksi

## 2) Metode Geometrik

Dengan menggunakan metode geometrik, maka perkembangan penduduk suatu daerah dapat dihitung dengan formula sebagai berikut (Rusli, 1996 : 115).

Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_n = P_0(1+r)^n \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

- $P_n$  : Jumlah penduduk tahun proyeksi
- $P_0$  : Jumlah penduduk di awal tahun proyeksi (tahun dasar)
- $r$  : Faktor pertumbuhan penduduk
- $n$  : Tahun proyeksi

## 3) Metode Eksponensial

Perkiraan jumlah penduduk berdasarkan metode eksponensial dapat didekati dengan persamaan berikut (Rusli, 1996 : 115) :

$$P_n = P_0 \cdot e^{r \cdot n} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

- $P_n$  : Jumlah penduduk tahun proyeksi
- $P_0$  : Jumlah penduduk di awal tahun proyeksi (tahun dasar)
- $r$  : Faktor pertumbuhan penduduk
- $n$  : Tahun proyeksi
- $e$  : Bilangan eksponensial

### b. Kebutuhan Air Non-Domestik

Kebutuhan air non domestik meliputi kebutuhan air industri, komersial dan kebutuhan institusi. Kebutuhan air untuk industri saat ini bisa ditentukan

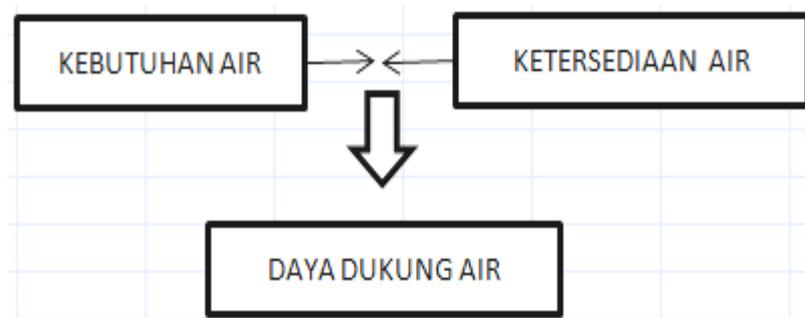
berdasarkan data produksi dan jenis industri tersebut, sedangkan kebutuhan mendatang cukup sulit untuk ditentukan. Untuk mempermudah perhitungan dapat dilakukan dengan pendekatan prosentase 2 - 5% dari total produksi. Kebutuhan institusi yang meliputi kebutuhan air untuk pendidikan, rumah sakit, gedung pemerintahan, tempat ibadah, *hydrant*, MCK umum dan lain-lain, dapat diperhitungkan dengan mengambil angka 5% dari kebutuhan total kawasan. Kebutuhan komersial akan meningkat sejalan dengan peningkatan jumlah penduduk dan perubahan tata guna lahan, angka yang dapat diambil adalah 20-25% dari total kebutuhan air kawasan (Kodoatie & Sjarif, 2008).

## **5. Neraca Air dan Daya Dukung Lingkungan**

Neraca air dalam suatu DAS diperoleh dengan membandingkan kebutuhan dan ketersediaan air dalam suatu periode dan tahun yang diproyeksikan. Ketersediaan air didasarkan pada debit andalan 80%, sedangkan kebutuhan air dibagi menjadi dua kriteria kebutuhan air irigasi dan non irigasi. Kebutuhan air non irigasi konstan sepanjang tahun, sedangkan kebutuhan irigasi disesuaikan periode pertumbuhannya (Triadmodjo, 2009). Neraca air biasanya memberi gambaran keseimbangan air dalam suatu DAS dalam periode bulanan atau setengah bulanan.

Berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 17 Tahun 1997, daya dukung lingkungan hidup terbagi menjadi 2 (dua) komponen, yaitu kapasitas penyediaan (*supportive capacity*) dan kapasitas tampung limbah (*assimilative capacity*). Dalam pedoman ini, telaahan daya dukung lingkungan hidup terbatas pada kapasitas penyediaan sumberdaya alam, terutama berkaitan dengan kemampuan lahan

serta ketersediaan dan kebutuhan lahan serta air dalam suatu ruang/wilayah. Penentuan daya dukung air dilakukan dengan membandingkan antara ketersediaan dan kebutuhan air dalam suatu kawasan, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.

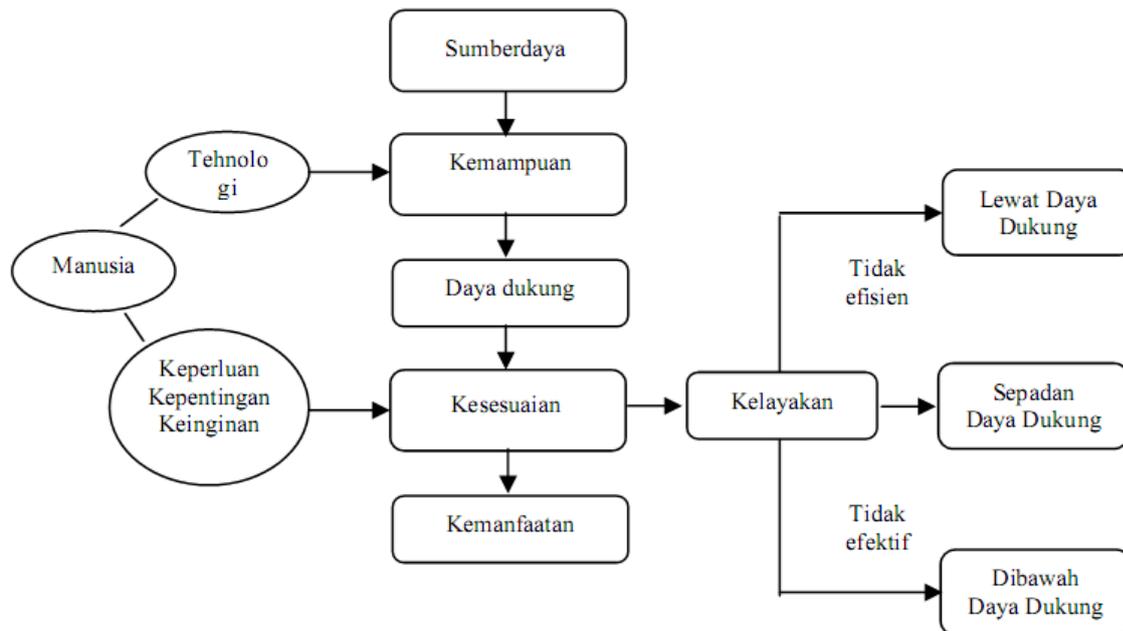


**Gambar 2.6.** Diagram Penentuan Daya Dukung Air

*Sumber : Lampiran Permen LH No. 17 Tahun 1997*

Mengacu Undang-Undang No. 41 tahun 1999 tentang kehutanan untuk menjaga keseimbangan ekosistem suatu kawasan, luas minimum kawasan hutan adalah 30% dari luas wilayah. Merujuk batasan tersebut maka kualitas lingkungan dapat terjaga dengan baik apabila pemanfaatan sumberdaya alam maksimum 70% dari daya dukung alamiahnya. Menurut Soerjani (1987) batas ini dianggap baik karena jika penggunaan sumberdaya alam melebihi 70% sampai 100% akan berdampak pada menurunnya kualitas lingkungan sehingga keadaan akan menjadi semakin buruk.

Pemanfaatan sumberdaya alam tergantung oleh teknologi yang dikuasai dan kepentingan atau keperluan manusia sebagai pemanfaat sumberdaya. Kelayakan pemanfaatan sumberdaya alam akan tercapai apabila setara dengan daya dukung lingkungan, sedangkan pemanfaatan yang melebihi daya dukung lingkungan berarti tidak efisien dan apabila kurang berarti tidak efektif, seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. berikut ini



**Gambar 2.7.** Diagram Pemanfaatan Sumberdaya Alam dan Daya Dukung Lingkungan

*Sumber : Notohadiprawiro, 1991*

Ketersediaan air dalam siklus hidrologi dipengaruhi oleh proses infiltrasi, sedangkan infiltrasi dipengaruhi oleh tata guna lahan. Perubahan tata guna lahan yang mengarah pembentukan lapisan di suatu kawasan akan menurunkan volume air yang terinfiltrasi, yang mengakibatkan turunnya ketersediaan air pada bulan-bulan kering akan tetapi meningkat pada saat bulan basah. Daya dukung lingkungan pada bulan-bulan kering akan mengalami penurunan karena ketersediaan air akan turun.

Perubahan tata guna lahan dalam suatu kawasan saat ini didominasi untuk kepentingan permukiman, seiring meningkatnya jumlah penduduk dari tahun ke tahun. Peningkatan jumlah penduduk juga akan meningkatkan jumlah kebutuhan air, sehingga daya dukung lingkungan pada saat bulan kering semakin terpuruk. Kondisi tersebut semakin lama semakin parah, pertambahan penduduk disertai peningkatan lapisan kedap akan memperburuk daya dukung lingkungan dalam penyediaan air.

Perubahan tata guna lahan di daerah tangkapan air seharusnya tidak memperburuk daya dukung lingkungan apabila tujuan penataan ruang diikuti. Tujuan penataan ruang adalah untuk mewujudkan harmonisasi antara lingkungan alam dan lingkungan buatan serta melindungi ruang untuk keberlanjutan lingkungan (Hadi, 2014). Daerah tangkapan air merupakan ruang yang harus dilindungi untuk menjaga fungsi hidrologisnya dalam menjaga ketersediaan air. Selain memperburuk ketersediaan air, pembangunan pemukiman di daerah tangkapan air juga akan meningkatkan kebutuhan air kawasan tersebut. Sehingga pemanfaatan sumberdaya alam berada di atas daya dukungnya, karena peningkatan kebutuhan air dan turunnya ketersediaan air.

## **B. Ekonomi Lingkungan dan Daya Dukung Lingkungan**

### **1. Ekonomi Lingkungan**

Ekonomi lingkungan adalah ilmu yang mempelajari kegiatan manusia dalam memanfaatkan lingkungan sedemikian rupa sehingga fungsi/peranan lingkungan dapat dipertahankan atau bahkan dapat ditingkatkan dalam penggunaannya untuk jangka panjang (Suparmoko & Ratnaningsih, 2008). Dalam ekonomi lingkungan keuntungan finansial bukan merupakan tujuan utama, akan tetapi lebih kepada tujuan kesejahteraan manusia (*human well being*) dengan mempertimbangkan dimensi waktu (Sanim, 2006). Sedangkan lingkungan hidup menurut Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan hidup, termasuk manusia dan perilakunya, yang mempengaruhi alam itu sendiri,

kelangsungan perikehidupan, dan kesejahteraan manusia serta makhluk hidup lain.

Dengan demikian hal yang mendasar dari ekonomi lingkungan adalah keberlanjutan lingkungan dalam mendukung kehidupan semua makhluk. Menurut Fauzi (2006) suatu hal penting yang mendasar dari aspek ekonomi sumberdaya alam adalah bagaimana ekstraksi sumberdaya alam tersebut dapat memberikan manfaat atau kesejahteraan kepada masyarakat secara keseluruhan. Mengingat dimensi kesejahteraan sendiri menyangkut ukuran yang sangat kompleks, ukuran kesejahteraan yang diajukan menggunakan pondasi ekonomi neo-klasik. Dalam ekonomi neo-klasik ukuran kesejahteraan menyangkut pengukuran surplus yang diperoleh dan konsumsi maupun dari produksi barang dan jasa yang dihasilkan dari sumberdaya alam. Surplus yang diperoleh dari sumberdaya alam pada dasarnya didapat dari interaksi antara permintaan dan penawaran.

Dari sisi konsumsi, jasa lingkungan sesungguhnya setara dengan barang dan jasa lain yang memberikan manfaat bagi pihak yang mengkonsumsi. Banjir yang selalu melanda pemukiman akan mengurangi nilai manfaat pemukiman tersebut. Dengan kata lain, bebas banjir akan memberi manfaat positif. Banjir dapat dihindari melalui berbagai pendekatan, diantaranya melalui teknik sipil yang membutuhkan biaya dan menjaga ekosistem yang juga membutuhkan biaya. Menurut Millenium Ecosystem Assessment (2005) : *(1) An ecosystem is a dynamic complex of plant, animal, and microorganism communities and the nonliving environment interacting as a functional unit. Humans are an integral part of ecosystems. Ecosystems vary enormously in size; a temporary pond in a*

*tree hollow and an ocean basin can both be ecosystems; (2) Ecosystem services are the benefits people obtain from ecosystems. These include provisioning services such as food and water; regulating services such as regulation of floods, drought, land degradation, and disease; supporting services such as soil formation and nutrient cycling; and cultural services such as recreational, spiritual, religious and other nonmaterial benefits.* Dalam kaitannya dengan PES, fokus lebih diberikan kepada jasa yang tidak ada pasarnya karena jasa yang telah ada pasarnya telah memperoleh imbalan dalam proses pertukaran. Beberapa jasa lingkungan dapat tersedia karena kegiatan manusia, meskipun selama ini jasa lingkungan tersebut masih lebih banyak bersifat produk sampingan dari kegiatan ekonominya atau yang lazim dikenal dengan *eksternalitas*. Tanpa internalisasi maka produksi eksternalitas akan terlalu banyak untuk kasus *eksternalitas negatif* dan akan terlalu sedikit untuk kasus *eksternalitas positif*. PES tidak lain adalah upaya *internalisasi eksternalitas* tersebut. Jasa lingkungan mengacu pada eksternalitas positif (Kosoy, *et. al.*, 2007). Dengan demikian, PES dapat dipahami sebagai suatu skema pemberian imbalan kepada penghasil jasa untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas jasa lingkungan, bukan merupakan pembayaran kepada ekosistemnya itu sendiri (Soedomo, 2009).

## **2. Siklus Hidrologi dan Ekonomi**

Siklus hidrologi merupakan pusat perhatian dari hidrologi. Siklus tersebut tidak ada awal dan akhirnya, berbagai proses akan terus terjadi. Penguapan air dari laut dan air permukaan menuju atmosfer: uap air tersebut akan bergerak dan terangkat ke atmosfer sampai terkondensasi hingga menjadi hujan yang turun ke

tanah dan lautan. Hujan yang turun akan di serap oleh tumbuh-tumbuhan, menggenang di permukaan, terinfiltrasi ke dalam tanah, dan menjadi aliran permukaan. Sebagian air yang terintersepsi dan menjadi aliran permukaan akan kembali ke atmosfer melalui penguapan. Air yang terinfiltrasi maupun perkolasi ke dalam tanah akan mengisi air tanah, dan menjadi mata air atau mengalir masuk ke sungai yang akhirnya mengalir ke laut dan menguap menuju atmosfer, itu adalah siklus hidrologi (Chow, *et.al.* 1988).

Siklus hidrologi juga menunjukkan semua hal yang berhubungan dengan air. Bila di lihat keseimbangan air secara menyeluruh maka air tanah dan aliran permukaan: sungai, danau, penguapan dan lain-lain, merupakan bagian dari beberapa aspek hidrologi yang menjadikan siklus hidrologi menjadi seimbang sehingga disebut siklus hidrologi yang tertutup (*closed system diagram of global hydrological cycle*) (Kodoatie & Sjarief, 2008).

Ketika tekanan pertumbuhan ekonomi menyebabkan perubahan daerah tangkapan air (lingkungan) menjadi kawasan perekonomian (permukiman, perdagangan dan perkantoran), maka keseimbangan siklus hidrologi akan bergeser. Bergesernya siklus hidrologi akan menyebabkan terjadinya perbedaan debit air di saat musim hujan (banjir) dan musim kemarau (kekeringan) semakin besar. Kondisi tersebut apabila tidak segera diperbaiki akan menyebabkan daya dukung lingkungan akan semakin menurun, sampai pada batas kehilangan daya dukung yang berdampak lumpuhnya kemampuan ekonomi untuk tumbuh.

Kepentingan ekonomi dan lingkungan sebenarnya bisa sama-sama tercapai dan tidak akan terkesan kontradiktif. Kuatnya saling interaksi dan ketergantungan

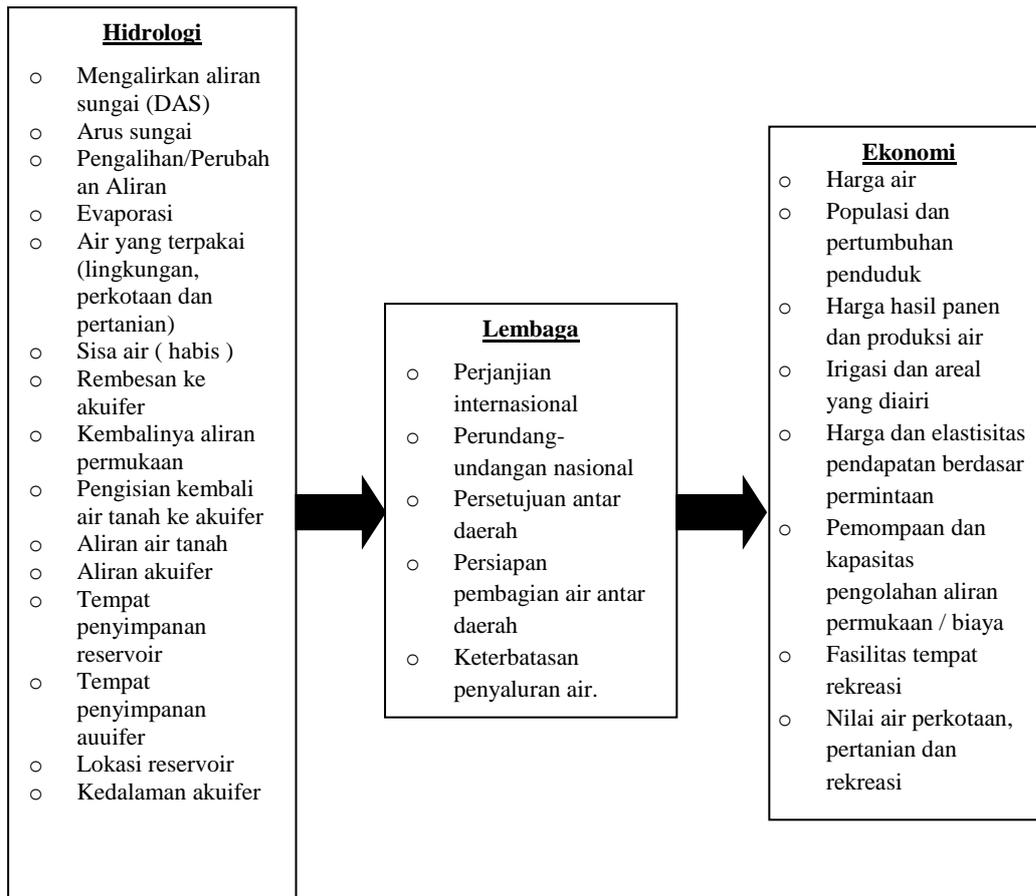
antara dua faktor tersebut memerlukan pendekatan yang cocok bagi pembangunan berkelanjutan atau pembangunan berwawasan lingkungan. Secara teoritis dan praktis, penilaian ekonomi sumberdaya alam dengan berdasarkan biaya moneter dari kegiatan ekstraksi dan distribusi sumberdaya semata sering telah mengakibatkan kurangnya insentif bagi penggunaan sumberdaya yang berkelanjutan. Untuk mendukung penggunaan sumberdaya yang berkelanjutan, maka biaya lingkungan akibat degradasi itu harus diintegrasikan dalam seluruh aspek kegiatan ekonomi tidak hanya pola konsumsi dan perdagangan, tetapi juga terhadap semua sumberdaya (Pearce, *et.al*, 1994).

Pertumbuhan ekonomi harus difokuskan pada pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan, sumberdaya alam tidak hanya dieksploitasi untuk kepentingan saat ini saja, akan tetapi untuk kepentingan masa depan makhluk bumi. Konferensi Tingkat Tinggi (KTT) Bumi tahun 1992 di Rio de Janeiro, Brasil telah bersepakat untuk menerima paradigma pembangunan berkelanjutan sebagai politik pembangunan global. Tujuannya tidak lain adalah untuk mengintegrasikan kepentingan lingkungan hidup kedalam agenda pembangunan nasional setiap negara. Bersama-sama dengan pembangunan ekonomi dan peningkatan kesejahteraan sosial, pelestarian lingkungan hidup dijadikan sebagai pilar utama pembangunan. Dengan demikian, pada tataran tertentu, paradigma pembangunan berkelanjutan dapat dilihat sebagai sebuah teori normatif yang menawarkan jalan keluar bagi kegagalan paradigma *developmentalisme*. Paradigma pembangunan berkelanjutan sesungguhnya juga merupakan kritik terhadap ideologi

pembangunan yang selama ini diterapkan oleh sebagian besar negara, yang justru mengancam kehidupan di bumi (Keraf, 2005 : 166-167).

Dalam upaya menjaga keberlanjutan sumberdaya air, kebijakan pengembangan sumberdaya air harus dilakukan secara komprehensif. Untuk membantu para pengambil keputusan dalam pengembangan sumberdaya air dengan yang komprehensif, Ward (2009) mengusulkan menggunakan *Cost Benefit Analysis (CBA)* sebagai dasar penentuan kebijakan. Dalam skala DAS penggunaan metode tersebut terkendala dalam penentuan *benefit* dan alokasi *cost* yang sesuai dengan *benefit* yang dihasilkan. Agar metode tersebut dapat digunakan secara tepat, Ward mengajukan *Hydroeconomic Model* sebagai upaya memberikan ilustrasi dampak kebijakan pengembangan sumberdaya air dan aspek kelembagaan serta ekonomi dalam skala DAS.

Dalam *Hydroeconomic Model* belum memasukkan unsur imbal jasa lingkungan sebagai upaya menjaga keberlanjutan sistem ekonomi yang dikembangkan. Model ini merupakan model yang mengedepankan produksi agar memperoleh *benefit* maksimum sebagai upaya memperoleh keuntungan dari *cost* yang sudah dikeluarkan (*Cost Benefit Analysis*). Sistem hidrologi masih sebagai pemberi, belum sebagai penerima. Dengan memasukkan unsur imbal jasa lingkungan model tersebut menjadi seimbang, sehingga upaya untuk mengisi kembali air tanah ke akuifer dapat dijalankan.



**Gambar 2.8.** Struktur Komprehensif Model *Hydroeconomic*

*Sumber : Ward, 2009*

### 3. Valuasi Ekonomi Jasa Lingkungan

Degradasi lingkungan menyebabkan menyusutnya fungsi hidrologis Daerah Tangkapan Air (DTA) suatu DAS, sehingga intensitas terjadi banjir di saat musim hujan dan kekeringan di saat musim kemarau semakin meningkat. Pada saat kondisi lingkungan masih terjaga, lingkungan (DTA) memberi jasanya dengan menjaga ketersediaan air dari waktu ke waktu, menyimpan air saat musim hujan dan mengeluarkannya saat musim kemarau. Dalam upaya menjaga fungsi DTA menjaga ketersediaan air, diperlukan pembiayaan yang besar dan memakan waktu

yang lama. Ramdan (2006) mengusulkan penerapan mekanisme alokasi air lintas wilayah sebagai dasar penerapan biaya konservasi dibagian hulu wilayah tersebut, estimasi biaya konservasi dibebankan kepada nilai air minum yang dibayarkan pengguna air. Alternatif lain pembiayaan tersebut adalah dengan memberikan nilai terhadap jasa lingkungan yang telah diterima. Ratnaningsih (2008) mengajukan harga air sebagai indikator pembayaran jasa lingkungan hutan sebagai fungsi tata air. Ada tiga pendekatan yang digunakan untuk menilai harga air yaitu kesediaan membayar harga air, menilai harga air sebagai faktor produksi, dan dengan pendekatan *full cost pricing* yang memasukkan unsur biaya penggunaan sumberdaya alam dan biaya lingkungan. Menurut Tietenberg, 1992 (dalam Tampubolon, 2009 :11) tidak dimasukkannya biaya-biaya lingkungan dari kalkulasi pendapatan merupakan salah satu penyebab terabaikannya persoalan lingkungan dari ilmu ekonomi pembangunan selama ini. Untuk itu diperlukan suatu penilaian atau pemberian nilai (harga) terhadap jasa lingkungan yang telah diterima.

Pengertian nilai atau *value*, khususnya yang menyangkut barang dan jasa yang dihasilkan oleh sumberdaya alam dan lingkungan, memang bisa berbeda jika dipandang dari berbagai disiplin ilmu. Dari sisi ekologis, misalnya, nilai dari hutan mangrove bisa berarti pentingnya hutan mangrove sebagai tempat reproduksi spesies ikan tertentu atau untuk fungsi ekologis lainnya. Dari sisi teknik, nilai hutan mangrove bisa sebagai pencegah abrasi atau banjir dan sebagainya. Perbedaan mengenai konsepsi nilai tersebut tentu saja akan menyulitkan pemahaman mengenai pentingnya suatu ekosistem. Karena itu, diperlukan suatu

persepsi yang sama untuk penilaian ekosistem tersebut. Salah satu tolok ukur yang relatif mudah dan bisa dijadikan persepsi bersama berbagai disiplin ilmu tersebut adalah pemberian *price tag* (harga) pada barang dan jasa yang dihasilkan sumberdaya alam dan lingkungan. Dengan demikian, kita menggunakan apa yang disebut *nilai ekonomi* sumberdaya alam (Fauzi, 2007).

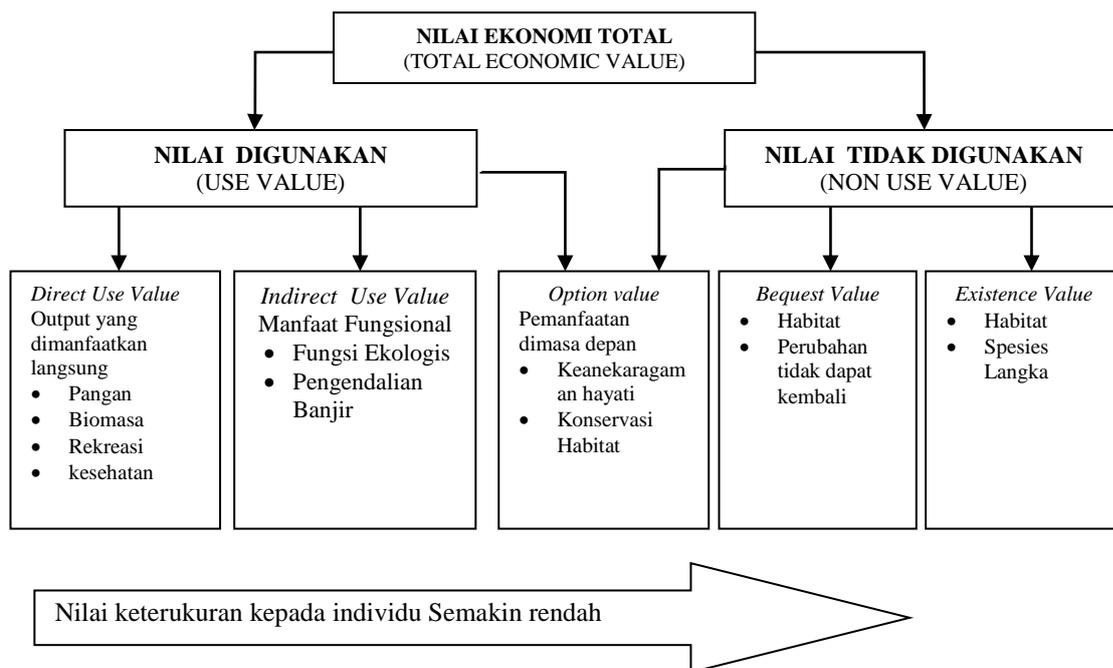
Menurut Pearce *et. al* (1994), sebelum memberikan nilai dalam arti uang (*moneter*), perlu dipahami nilai macam apa sajakah yang dapat diberikan kepada suatu sumberdaya alam atau lingkungan. Konsep nilai ini bermacam-macam, karena menyangkut berbagai macam tujuan yang berkaitan dengan keberadaan sumberdaya alam dan lingkungan itu sendiri. Pada dasarnya nilai lingkungan dibedakan menjadi: (a) nilai atas dasar penggunaan (*instrumental value* atau *use value*) dan (b) nilai yang terkandung di dalamnya atau nilai yang melekat tanpa penggunaan (*intrinsic value* atau *non use value*). Nilai atas dasar penggunaan menunjukkan kemampuan lingkungan apabila digunakan untuk memenuhi kebutuhan, sedangkan nilai yang terkandung dalam lingkungan adalah nilai yang melekat pada lingkungan tersebut. Atas dasar penggunaannya nilai itu dibedakan lagi atas dasar penggunaan langsung (*direct use value*), nilai penggunaan tidak langsung (*indirect use value*), nilai atas dasar pilihan penggunaan (*option use value*), dan nilai yang diwariskan (*bequest value*). Selanjutnya nilai atas dasar tanpa penggunaan juga dibedakan menjadi nilai atas dasar warisan (*bequest value*) dan nilai karena keberadaannya (*existence value*). Jadi dalam menentukan nilai lingkungan secara keseluruhan atau nilai totalnya (*Total Economic Value - TEV*), merupakan penjumlahan nilai penggunaan langsung, nilai penggunaan tidak

langsung, nilai pilihan dan nilai keberadaannya (Randal, 1987 dalam Tampubolon, 2009:14). Secara sederhana Nilai Ekonomi Total dapat ditulis dengan persamaan matematika, sebagai berikut (Sudita & Antara, 2006):

$$TEV = UV + NUV \text{ atau } TEV = (DUV+IUV+OV) + (EV+BV), \dots \dots (2.16)$$

Keterangan:

- TEV = Nilai Ekonomi Total (*Total Economic Value*)
- UV = Nilai Penggunaan (*Use Value*)
- NUV = Nilai non Penggunaan (*Non Use value*)
- DUV = Nilai Penggunaan Langsung (*Direct Use Value*)
- IUV = Nilai Penggunaan tak langsung (*Indirect Use Value*).
- OV = Nilai Pilihan (*Option Value*).
- EV = Nilai Keberadaan (*Existence Value*)
- BV = Nilai Warisan (*Bequest Value*).



**Gambar 2.9.** Hierarki Valuasi Ekonomi Barang dan Jasa Lingkungan.

Sumber: Munasinghe, 1993 dalam Tampubolon, 2009:15.

Metode pendekatan valuasi ekonomi lingkungan yang telah banyak digunakan di berbagai negara, pada dasarnya dapat dibagi menjadi 3 metode, yaitu: a) metode nilai pasar atau produktivitas; b) metode nilai pasar pengganti atau barang pelengkap dan ke-3) metode survei (Suparmoko & Ratnaningsih, 2007).

**a. Metode Nilai Pasar atau Produktivitas**

Metode nilai pasar atau produktivitas banyak digunakan untuk menilai pengaruh suatu pembangunan, misalnya pembangunan bendungan, jalan tol, PLTA dan sistem irigasi. Dalam pembangunan bendungan dan sistem irigasi, selain ada peningkatan intensitas tanam sehingga produksi pertanian meningkat juga terjadi kehilangan produksi pada areal genangan bendungan. Peningkatan dan kerugian produksi pertanian tersebut pada umumnya dapat dinilai dengan harga pasar.

**b. Metode Nilai Barang Pengganti atau Barang Pelengkap**

**1) Pendekatan Nilai Kekayaan**

Apabila metode nilai pasar ataupun harga alternatif tidak dapat diterapkan, maka dengan metode nilai barang pengganti atau barang pelengkap kita dapat menentukan nilai barang tersebut. Barang atau jasa yang tidak dipasarkan tersebut kita dekati dengan barang pengganti atau pelengkap yang terpengaruh oleh perubahan kondisi lingkungan karena adanya pembangunan.

**2) Pendekatan Nilai Upah**

Pendekatan ini menggunakan nilai upah pada jenis pekerjaan yang sama, akan tetapi pada lokasi dengan kondisi lingkungan yang berbeda. Pembayaran

upah yang diminta pekerja pada lokasi yang memiliki resiko bahaya akan lebih tinggi daripada lokasi dengan kondisi normal, atau upah yang diminta pada daerah yang tercemar akan lebih tinggi daripada daerah yang tidak tercemar.

### **3) Pendekatan Biaya Perjalanan**

Biaya perjalanan atau transportasi yang dikeluarkan untuk menuju dan menikmati keindahan kawasan wisata dipandang sebagai nilai lingkungan yang dibayarkan oleh para wisatawan tersebut.

#### **c. Pendekatan Teknik Survei**

Pendekatan teknik survei ada dua macam, yang semuanya berdasarkan wawancara di lapangan yaitu wawancara kemauan membayar (*willingness to pay*) atau menerima kompensasi (*willingness to accept*) dan wawancara tentang pilihan kualitas (Sudita dan Antara, 2006).

##### **1) Wawancara Kemauan Membayar atau Menerima Kompensasi atau Pampasan.**

Asumsi pendekatan tawar menawar ini ialah bahwa harga barang atau jasa-jasa berbeda tergantung pada perubahan dalam jumlah kualitas yang disuplai. Orang ditanya untuk menilai kelompok-kelompok yang terdiri dari berbagai barang dan jasa. Penilaian didasarkan pada kesediaan orang untuk membayar sekelompok barang yang lebih baik (variasi kompensasi) atau kesediaan menerima pembayaran bila memperoleh barang dan jasa yang lebih *inferior* (*variasi ekuivalen*). Untuk barang publik kurva penawaran dijumlah secara vertikal untuk memperoleh tawaran total. Biaya marginal menyediakan barang dengan pemakaian marginal sama dengan nol. Kurva ini merupakan *surogatcurve*

permintaan yang dipampas oleh penghasilan (*income compensated demand curve*), dengan prosedur, yaitu: (1) Pewawancara menjelaskan kuantitas, kualitas, waktu, lokasi barang yang dapat dipakai dalam waktu tertentu; (2) Mulai ditanya bersedia membayar, kalau ya dinaikkan sampai dia tak bersedia membayar; kemudian (3) Diturunkan lagi sampai benar-benar bersedia membayar berapa; (4) Ini disebut pendekatan *converging* atau dengan kata lain orang ditanya: lebih baik membayar berapa dari pada kehilangan barang itu.

## 2) Wawancara tentang Pilihan Kualitas

Pendekatan ini mewawancarai secara langsung untuk menentukan pilihan orang atas berbagai jumlah barang, sehingga dapat disimpulkan kesediaan orang untuk membayar sejumlah uang. Pilihan tersebut tanpa biaya dalam arti bahwa perbandingan dilakukan antara dua atau lebih alternatif yang masing-masing diinginkan orang dan gratis. Salah satu alternatif tersebut ada harganya, yaitu barang lingkungan, yang lain barang biasa yang dibeli orang bila dia memiliki cukup uang. Dengan demikian nilai barang lingkungan, apabila barang tersebut dipilih, paling tidak senilai dengan uang yang hilang. Jadi ada nilai minimum barang.

## 4. Daya Dukung Lingkungan dan Ekonomi Hijau

Konsep dasar ekonomi hijau adalah harmonisasi pembangunan dan kehidupan kita dengan sistem alam, agar ekonomi dapat mengalir secara alamiah mengikuti prinsip ekosistem. Implementasi prinsip ekonomi hijau membutuhkan pengetahuan yang mendasar dan melebar serta kreatifitas manusia peran serta masyarakat umum secara luas (Djajadiningrat, *et.el.* 2014). Sedangkan tujuan

ekonomi hijau, menurut Hadi (2014) adalah meningkatkan kualitas hidup, kesejahteraan manusia dan keadilan sosial yang secara bersama-sama menjaga keseimbangan lingkungan dan kelangkaan ekologis.

Secara sederhana ekonomi hijau merupakan manifestasi dari pemanfaatan sumberdaya lingkungan pada batas setara dengan daya dukung lingkungan. Salah satu prinsip ekonomi hijau adalah mengikuti aliran alam, seperti siklus hidrologi yang mengalir secara alamiah dari hulu ke hilir dan menguap membentuk butiran hujan yang jatuh di hulu yang kemudian mengalir kembali ke hilir. Secara alamiah apabila air hujan jatuh di hulu yang merupakan daerah tangkapan air suatu DAS (wilayah) air akan mengalir ke hilir secara perlahan baik menjadi aliran permukaan maupun masuk ke dalam tanah membentuk aliran dasar (*base flow*).

Peningkatan jumlah penduduk, selain meningkatkan kebutuhan air, juga berpotensi menurunkan ketersediaan air karena terganggunya aliran alamiah tersebut di atas. Menurunnya ketersediaan dan naiknya kebutuhan air suatu wilayah, menunjukkan bahwa daya dukung lingkungan untuk menopang kehidupan mulai menurun. Peningkatan jumlah penduduk tidak mungkin dihentikan, bahkan dengan bertambahnya penduduk diperlukan lapangan pekerjaan untuk menjaga kehidupan mereka dari garis kemiskinan. Sehingga eksploitasi sumberdaya alam semakin masif, dan terlampauinya daya dukung lingkungan.

Menjaga terlampauinya daya dukung lingkungan, penerapan ekonomi hijau dalam setiap kegiatan menjadi penting. Seperti diketahui (Djajadiningrat *et.al.*, 2014) ekonomi hijau mempunyai fokus utama pada kebutuhan manusia dan

lingkungan, untuk mewujudkan hal tersebut suatu proses ekonomi baru harus dirancang sehingga aturan insentif penegakan prinsip ekologi dapat menyatu dalam kehidupan ekonomi. Sebagai gambaran adalah sistem ekologi DAS, pembagian peran antara hulu dan hilir dalam menjaga ketersediaan air harus dirumuskan dengan jelas. Pada saat air hujan yang jatuh di hulu langsung mengalir ke hilir, maka akan terjadi erosi yang merugikan daerah hulu dan terjadi banjir yang akan merugikan daerah hilir. Selain itu pada saat musim kemarau debit *base flow* di hilir mengecil dan sumur di daerah hulu akan semakin dalam.

## **C. Evaluasi Kondisi Komponen DAS**

### **1. Potensi Erosi**

Mengacu pada karakteristik DAS yang diajukan oleh Suripin (2002), komponen penyusun DAS yang berpengaruh pada distribusi debit air adalah: luas, bentuk DAS, topografi dan tata guna lahan. Sedangkan untuk mengetahui kondisi DAS tersebut dapat dilakukan dengan mengevaluasi tingkat kejadian erosi, semakin besar tingkat erosi yang terjadi semakin buruk kondisi DAS tersebut. Analisis erosi merupakan analisis yang mengevaluasi kondisi setiap komponen penyusun DAS dan variabel hidrologis, metode yang digunakan adalah Metode USLE.

USLE (*Universal Soil Loss Equation*) adalah model erosi yang digunakan untuk memprediksi laju erosi suatu bidang tanah. Metode ini selain sederhana juga sangat baik diterapkan di daerah-daerah yang faktor utama penyebab

erosinya adalah hujan dan aliran permukaan. Model ini dikembangkan oleh Wischmeier dan Smith (1978) yang memungkinkan perencana untuk dapat memprediksi laju erosi sebidang tanah dengan bentuk topografi dan tata guna lahan (kegiatan konservasi) serta pola hujan yang terjadi. Bentuk persamaan dari USLE adalah dengan mengelompokkan berbagai parameter fisik dan tata guna lahan ke dalam enam variabel utama yang dapat ditetapkan secara numerik, yaitu R (hujan), K (erodibilitas tanah), L (panjang lereng), S (kecuraman lereng), C (vegetasi penutup) dan P (tindakan konservasi). Sedangkan bentuk persamaannya adalah (Arsyad, 1989) :

$$A = R.K.L.S.C.P. \dots\dots\dots(2.17)$$

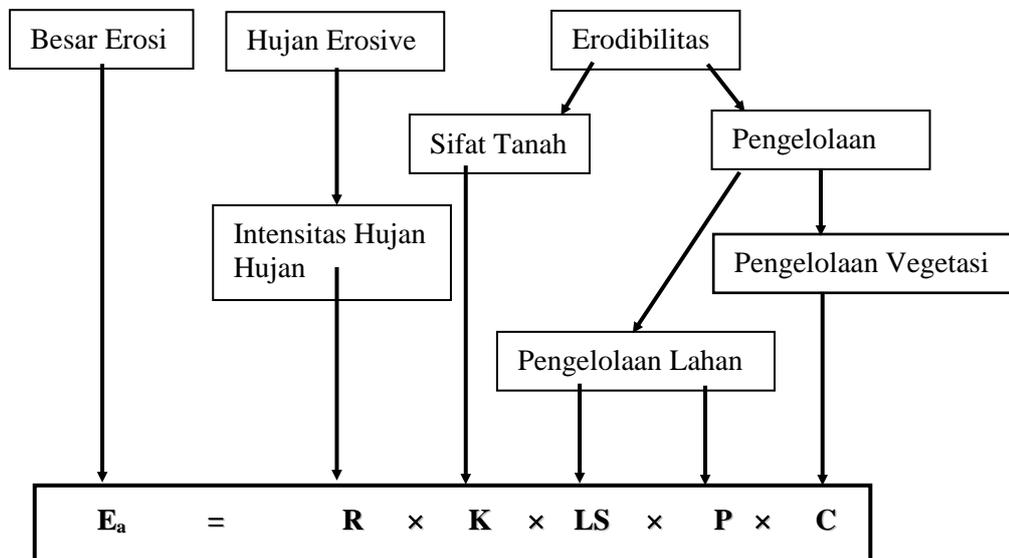
dimana :

- $E_a$  = adalah banyaknya tanah yang tererosi dalam (*ton per ha per tahun*).
- R = adalah faktor curah hujan dan aliran permukaan (erosivitas hujan), yaitu jumlah satuan indeks erosi hujan, yang merupakan perkalian antara energi hujan total ( $E$ ) dengan intensitas hujan maksimum 30 menit ( $I_{30}$ ) tahunan.
- K = adalah faktor erodibilitas tanah, yaitu laju erosi per indeks erosi hujan ( $R$ ) untuk suatu tanah yang didapat dari petak percobaan standar, yaitu petak percobaan yang panjangnya 72,6 ft (22,1 m) dan terletak pada lereng 9% tanpa tanaman.
- L = adalah faktor panjang lereng, yaitu perbandingan antara besarnya erosi dari tanah dengan suatu panjang lereng tertentu terhadap erosi dari tanah dengan panjang lereng 72,6 ft (22,1 m) di bawah keadaan yang identik.
- S = adalah faktor kecuraman lereng, yaitu perbandingan antara besarnya erosi yang terjadi dari suatu bidang tanah dengan kecuraman lereng tertentu, terhadap besarnya erosi dari tanah dengan lereng 9% di bawah keadaan yang identik.

C = adalah faktor vegetasi penutup tanah dan pengelolaan tanaman, yaitu perbandingan antara besarnya erosi dari suatu bidang tanah dengan vegetasi penutup dan pengelolaan tanaman tertentu terhadap besarnya erosi dari tanah yang identik tanpa tanaman.

P = adalah faktor tindakan-tindakan khusus konservasi tanah, yaitu perbandingan antara besarnya erosi dari tanah yang diberi perlakuan tindakan konservasi khusus (seperti pengolahan tanah menurut kontur, penanaman dalam *stripping* atau terras), terhadap besarnya erosi dari tanah yang diolah searah lereng dalam keadaan yang identik.

Secara skematik persamaan USLE dapat dijelaskan pada Gambar 2.10. di bawah ini.



**Gambar 2.10.** Skematik Persamaan USLE

*Sumber: Arsyad, 1989*

Metode USLE didesain untuk digunakan memprediksi kehilangan tanah yang dihasilkan oleh erosi yang diendapkan pada segmen lereng bukan pada hulu DAS, selain itu juga didesain untuk memprediksi rata-rata jumlah erosi

dalam waktu yang panjang. Akan tetapi kelemahan model ini adalah tidak dipertimbangkannya keragaman spasial dalam suatu DAS dimana nilai input parameter yang diperlukan merupakan nilai rata-rata yang dianggap homogen dalam suatu unit lahan (Hidayat, 2003 dalam As-syakur, 2008), khususnya untuk faktor erosi ( $R$ ) dan kelereng ( $LS$ ). Untuk mengatasi permasalahan tersebut As-syakur (2008) menggunakan Sistem Informasi Geografi (SIG) dalam memprediksi erosi dengan Metode USLE. SIG merupakan teknologi berbasis pixel sebagai alat pemodelan spasial sehingga dalam memprediksi erosi bisa membantu keakuratan data yang dihasilkan khususnya pada lahan-lahan yang mempunyai keadaan topografi yang kompleks. Selain itu SIG dapat melakukan manajemen data yang bereferensi geografi dengan cepat sehingga membuat studi tentang erosi bisa lebih mudah, khususnya bila harus mengulang menganalisis data-data pada daerah yang sama (Amorea et al., 2004 dalam As-syakur, 2008).

Aplikasi SIG memerlukan data *Digital Elevation Model (DEM)* untuk menghasilkan gambaran faktor  $LS$  yang lebih spesifik dalam setiap pixelnya. Dalam perkembangannya, ada beberapa formula untuk menentukan nilai faktor  $LS$  berbasis DEM dalam SIG yang mempertimbangkan heterogenitas lereng serta mengutamakan arah dan akumulasi aliran dalam perhitungannya (Blanco & Nadaoka, 2006 dalam As-syakur, 2008). Asumsi yang dipergunakan adalah nilai faktor  $LS$  akan berbeda antara lereng bagian atas dan bagian bawah. Nilai  $LS$  akan lebih besar ditempat terjadinya akumulasi aliran dari pada dilereng bagian atas walaupun mempunyai panjang lereng dan kemiringan lereng yang sama.

Model elevasi digital atau DEM adalah sekumpulan koordinat titik 3 D yang mewakili suatu permukaan fisik wujud koordinat ini dapat berupa titik dengan lokasi acak semata atau dapat dibentuk segitiga, (*raster*) grid, atau membentuk pola garis kontur. Mustafa (2009) memanfaatkan DEM untuk mengevaluasi dampak pembangunan di kawasan DTA terhadap distribusi debit air yang terjadi. Selain mempresentasikan bentuk topografi lahan, DEM juga dapat membantu menentukan arah aliran dalam suatu kawasan tersebut.

## 2. Pola Hujan Aliran

Kondisi komponen DAS khususnya daerah tangkapan air tercermin dari pola hujan aliran DAS tersebut, untuk itu digunakan Model F.J. Mock yang digunakan untuk menganalisis ketersediaan air. Pola hujan aliran dalam model tersebut tercermin dalam variabel berikut ini:

### a. Infiltrasi (I)

Infiltrasi adalah masuknya air hujan ke dalam tanah yang berperan dalam terbentuknya cadangan air yang selanjutnya menjadi aliran dasar (*baseflow*). Semakin besar jumlah air hujan yang terinfiltrasi berarti semakin besar cadangan air untuk musim kemarau. Apabila tata guna lahan didominasi oleh bangunan yang mempunyai lapisan kedap, seperti jalan, halaman berlapis semen dan rumah maka jumlah air yang terinfiltrasi akan semakin kecil.

### b. *Baseflow* (Bf)

Aliran dasar atau dalam Model Mock disebut *Baseflow* dengan inisial Bf merupakan kelanjutan dari proses infiltrasi. Semakin kecil air yang terinfiltrasi

akan semakin kecil juga aliran dasarnya, sehingga pada saat musim kemarau di saat air hujan tidak datang maka aliran permukaan akan hilang.

*c. Direct runoff (DRo)*

Aliran permukaan langsung merupakan jumlah air hujan yang terkonsentrasi menjadi aliran di permukaan tanah secara langsung dikenal juga sebagai *runoff*.

Pada saat jumlah air hujan yang terinfiltrasi semakin kecil maka jumlah air hujan yang menjadi aliran permukaan akan semakin besar. Semua variabel tersebut di atas dipengaruhi oleh kondisi tata guna lahan daerah tangkapan air, karena kondisi tata guna lahan akan menentukan jumlah air yang dapat terinfiltrasi masuk ke dalam tanah.

#### **D. Komponen DAS dan Konservasi**

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 tentang Sumberdaya Air, ada 3 (tiga) aspek utama dan 2 (dua) aspek pendukung dalam pengelolaan sumberdaya air, yaitu:

1. Konservasi Sumberdaya Air
2. Pendayagunaan Sumberdaya Air
3. Pengendalian Daya Rusak Air
4. Sistem Informasi Sumberdaya Air
5. Pemberdayaan Masyarakat.

Kegiatan konservasi sumberdaya air mengacu pada pola pengelolaan sumberdaya air yang ditetapkan pada setiap wilayah sungai dan menjadi acuan dalam perencanaan tata ruang meliputi :

1. Perlindungan dan pelestarian sumberdaya air
2. Pengawetan air
3. Pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran air.

Pengelolaan air yang baik haruslah berbasis daerah aliran sungai (DAS) dan memperhitungkan semua keperluan akan air. Pengelolaan berbasis DAS artinya pengelolaan air meliputi berbagai kebijakan dan upaya mulai dari hulu, sebagai daerah tangkapan air, sampai ke daerah bagian tengah dan hilir tempat sebagian besar pemakaian air terjadi, secara terintegrasi. Pengelolaan air dalam suatu DAS harus memperhitungkan semua keperluan akan air seperti keperluan rumah tangga manusia, industri, pertanian, penyangga lingkungan (seperti danau, rawa), dan lingkungan hewan dan pertumbuhan (Arsyad & Rustiandi, 2008).

Pengelolaan air di bagian hulu berdasar pada kebijakan dan upaya menjaga agar tanah tidak rusak dan fungsi hidrologisnya tidak hilang, yang lebih banyak memerlukan cara dan metode konservasi tanah. Konservasi tanah adalah upaya menggunakan tanah atau lahan sesuai dengan kemampuan tanah tersebut dan memberikan perlakuan sesuai dengan sifat dan kualitas tanah agar tanah tidak rusak dan kehilangan fungsi hidrologisnya (Arsyad, 1989).

Pengelolaan air di bagian tengah dan hilir, tempat sebagian besar pemakaian air terjadi, berdasar pada kebijakan dan upaya mengefisienkan pemakaian air, yang lebih banyak memerlukan cara atau metode konservasi air (Arsyad & Rustiandi, 2008). Konsep dasar konservasi air adalah jangan membuang-buang sumberdaya air. Pada awalnya konservasi air diartikan sebagai menyimpan air dan menggunakannya untuk keperluan yang produktif di kemudian hari. Konsep ini

disebut konservasi sebagai suplai. Perkembangan selanjutnya konservasi lebih mengarah kepada pengurangan atau efisiensi penggunaan air, dan dikenal sebagai konservasi sisi kebutuhan (Suripin, 2002).

Berbagai metode konservasi air telah dikembangkan, namun demikian berbagai cara atau metode konservasi tanah adalah juga merupakan metode konservasi air dalam pemakaian air untuk pertanian. Oleh karena itu, kedua metode tersebut umumnya disatukan menjadi konservasi tanah dan air (Arsyad & Rustiandi, 2008).

Memperhatikan beberapa penjelasan di atas, penentuan metode konservasi suatu DAS harus memperhatikan kondisi dan lokasi komponen pendukung DAS tersebut. Beberapa metode konservasi sumberdaya air yang banyak digunakan antara lain adalah:

#### **1. Metode Vegetatif**

Metode vegetatif merupakan kegiatan konservasi yang memanfaatkan tumbuhan atau bagian dari tumbuhan sebagai pelindung tanah dari tumbukan air hujan yang jatuh pada kawasan tersebut. Sehingga secara umum fungsi metode vegetatif adalah: a) melindungi tanah dari daya rusak air hujan yang jatuh, b) melindungi tanah dari daya rusak aliran air, c) meningkatkan kapasitas infiltrasi sehingga dapat mengurangi aliran permukaan. Metode ini dapat dikelompokkan menjadi 7 kelompok, a) penanaman dalam strip, b) penggunaan sisa-sisa tanaman, c) geotekstil, d) strip tumbuhan, e) tanaman penutup, f) pergiliran tanaman, dan g) *Agroforestry* (Suripin, 2002, Arsyad, 1989).

Sampai saat ini peneliti belum menemukan penelitian yang dapat menentukan dengan pasti perubahan aliran permukaan dan aliran dasar yang disebabkan konservasi dengan metode vegetatif ini, khususnya peningkatan jumlah air hujan yang terinfiltrasi. Semuanya masih dalam bentuk pernyataan kualitatif, meningkatkan jumlah air yang terinfiltrasi.

## **2. Metode Mekanik**

Upaya untuk meningkatkan kemampuan penggunaan tanah dan mengurangi aliran permukaan dan erosi melalui perlakuan fisik mekanis serta pembuatan struktur bangunan merupakan kegiatan konservasi dengan metode mekanik. Metode ini berfungsi memperlambat aliran permukaan, mereduksi dan menyalurkan energi kinetik air, memperbesar kapasitas infiltrasi dan memperbaiki abrasi tanah dan menyediakan air bagi tanaman. Termasuk dalam metode ini adalah: a) pengolahan tanah (*tillage*), b) pengolahan tanah menurut kontur, c) guludan bersaluran menurut kontur, d) parit pengelak, e) teras, f) dam penghambat (*check dam*), waduk, kolam, rorak, tanggul, g) perbaikan drainase, dan h) irigasi.

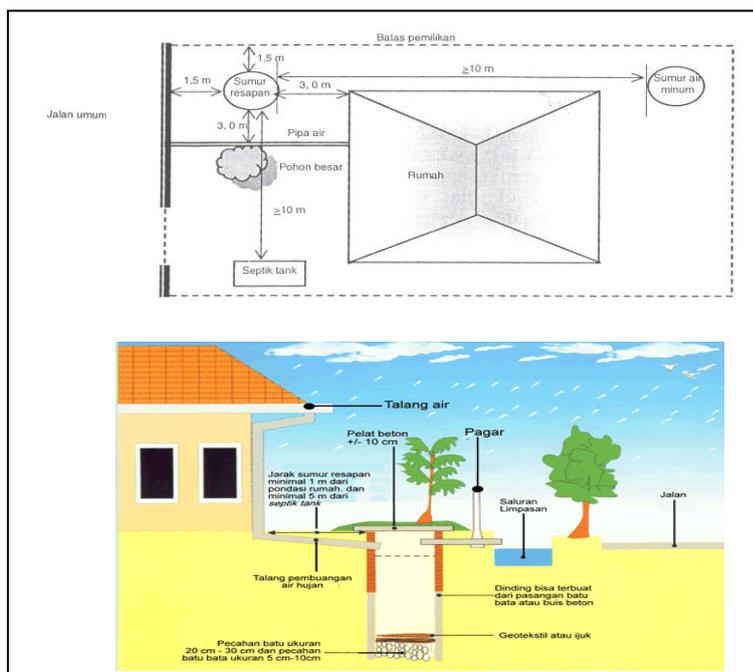
Berbeda dengan metode vegetatif dampak dari konservasi metode mekanik terhadap pola aliran air dalam siklus hidrologi ada beberapa metode yang dapat diukur secara pasti. Metode tersebut adalah dam penghambat, waduk dan kolam penampung, pola aliran akan berubah sesuai kapasitas tampung dari bangunan tersebut.

### 3. Metode Kimiawi

Metode kimia merupakan upaya peningkatan stabilisasi tanah dan mencegah erosi dengan menggunakan preparat kimia baik senyawa sintetik bahan alami yang telah diolah. Preparat kimia tersebut secara umum dinamakan *soil conditioner* yang berarti pemantap tanah, yang dikemukakan pertama kali pada simposium di Philadelphia pada bulan Desember 1951. (Suripin, 2002: 130, Arsyad, 2010 :235-236).

### 4. Sumur Resapan

Sumur resapan merupakan metode konservasi yang dikembangkan untuk meningkatkan volume air hujan yang masuk ke dalam tanah, dengan kata lain sumur resapan berupaya meningkatkan volume air yang terinfiltrasi karena meningkatnya lapisan kedap air. Seperti dalam Gambar 2.11 berikut :



**Gambar 2.11.** Tata Letak Sumur Resapan (atas) dan Konstruksi Sumur Resapan Air Hujan Rumah Tinggal (bawah)

Sumber : Suripin, 2004

Faktor yang mempengaruhi dimensi sumur resapan adalah :

- a. Luas permukaan tanah
- b. Intensitas hujan
- c. Koefisien permeabilitas tanah
- d. Lama hujan dominan
- e. Selang waktu hujan
- f. Tinggi muka air
- g. Luas daerah layanan

Untuk menghitung kedalaman sumur resapan dipergunakan rumus dasar keseimbangan (Sunyoto, 1987)

$$H = \frac{Q}{FK} \left( 1 - e^{-\frac{FKT}{\pi R^2}} \right) \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana :

- H : tinggi muka air dalam sumur (m)
- F : faktor geometrik (m)
- Q : debit air masuk (m<sup>3</sup>/dt)
- T : waktu pengaliran (detik)
- K : koefisien probabilitas tanah (m/dt)
- R = jari jari sumur (m)

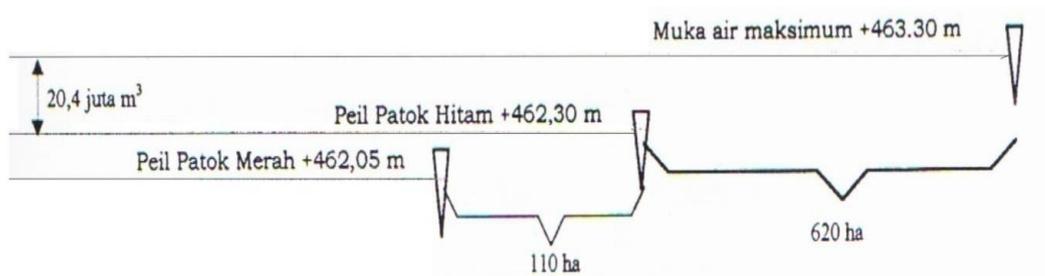
### 5. Pola Operasi Danau

Untuk menjaga keberfungsian suatu Danau, diperlukan suatu pedoman operasi yang dapat mengoptimumkan fungsi danau tersebut. Demikian pula halnya dengan Danau Rawapening, sejak mulai dioperasikan telah mengalami tiga periode pola operasi (Fakultas Teknik Undip & Balitbang Jateng, 2004), yaitu :

**a. Periode Pra Koproning**

Periode ini diberlakukan mulai tahun 1938-1966, dengan beberapa ketentuan yang diterapkan adalah :

- 1) Tanah pada elevasi + 462,05 mdpl dikenal dengan batas patok merah sampai pada elevasi tanah + 462,30 mdpl atau patok hitam, hak tanamnya telah dibeli oleh pemerintah, sehingga lahan yang terletak diantara batas patok merah dan hitam tersebut hanya mendapat hak tanam satu kali dalam satu tahun, yaitu pada saat musim hujan, mulai bulan Agustus sampai bulan Februari.
- 2) Hak milik tanah di antara kedua patok merah dan hitam tetap berada di tangan petani.
- 3) Mulai 6 Maret diadakan pengisian sampai pada elevasi + 463,30 m dpl yang dijadwalkan jatuh pada tanggal 1 Juni sampai akhir Juli.
- 4) Elevasi muka air + 462,05 m dpl dipertahankan selama waktu antara 12 Oktober sampai 6 Maret tahun berikutnya yaitu selama pertanaman padi musim hujan
- 5) Sesudah akhir bulan Juli mulai tanggal 1 Agustus diatur eksploitasi musim kemarau dengan penurunan muka air sampai garis terendah + 462,05 m yang jatuh pada tanggal 12 Oktober.



**Gambar 2.12.** Skematik Posisi Patok Hitam dan Merah Danau Rawapening

*Sumber : FT Undip & Balitbang Jateng, 2004.*

Faktor-faktor yang menjadi pertimbangan :

- 1) Debit pengisian Rawapening lebih kecil dari pada debit pengeluaran (lewat turbin dan lewat bendung).
- 2) Tuntutan kebutuhan air minum dan irigasi untuk rakyat Kabupaten Grobogan dan Demak.
- 3) Debit pengeluaran musim kemarau pada tahun basah mencapai 5,50 m<sup>3</sup>/detik, namun pada tahun kering hanya 1,30 m<sup>3</sup>/detik (20 Oktober 1982), posisi +461,70 m dpl.
- 4) SOP di Bendung Glapan yang berlaku menyatakan bahwa untuk debit  $Q \leq 2,0$  ml/detik hanya diperuntukkan bagi air minum, tidak boleh untuk tanaman.
- 5) Kehilangan air antara Rawapening dan Bendung Glapan pada tahun kering pernah mencapai 20%.
- 6) Pembacaan muka air terendah selama di Rawapening mencapai level +461,53 m (17 September 1982, dengan debit pengeluaran 3,70 m<sup>3</sup>/detik).

**b. Periode Koproring**

Selaku Paperda Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta, Pangdam VII/DIPONEGORO menerbitkan surat keputusan No. Kep PPD/00116/9/1966 tanggal 16 September 1966 perihal pembentukan Komando Proyek Rawapening (Koproring), yang kemudian dikuatkan oleh Keputusan DPRGR Propinsi Jawa Tengah Seksi C tanggal 16 April 1966 No.6/1/C/DPR-GR/68 tentang persetujuan menaikkan elevasi Candi Dukuh dari +463,60 m dpl menjadi +463,90 m dpl. Kenaikan elevasi Candi Dukuh menjadi +463,90 m dpl membawa akibat tergenangnya sawah/tanah penduduk dengan tanda sebagai berikut :

- 1) Patok Merah, elevasi + 462,30 m dpl (elevasi lama + 462,05 m dpl)
- 2) Patok Hitam, elevasi + 463,30 m dpl (elevasi lama + 462,30 m dpl)

Perubahan elevasi patok merah dan hitam tersebut dilakukan oleh Koproring dengan tujuan agar debit yang lewat intake PLTA Jelok dan Timo dapat mencapai debit maksimal, sehingga produksi listrik yang dihasilkan kedua PLTA tersebut dapat maksimal. Pada saat itu PLTA Jelok dan PLTA Timo merupakan tulang punggung sumber energi listrik di Jawa Tengah.

**Tabel 2.3.** Karakteristik PLTA Jelok dan Timo

Uraian	PLTA JELOK	PLTA TIMO
LOKASI	Desa Jelok, Kec. Tuntang	Desa Kunci Putih
Waduk		
Nama	Rawapening	Kolam Tando Harian
Fungsi	Serbaguna	Ekaguna
El. Operasi maksimum	+463,60 m	+ 315,15 m (4,5m)
El. Operasi minimum	+461,50 m	+ 311,65 m (1,5 m)

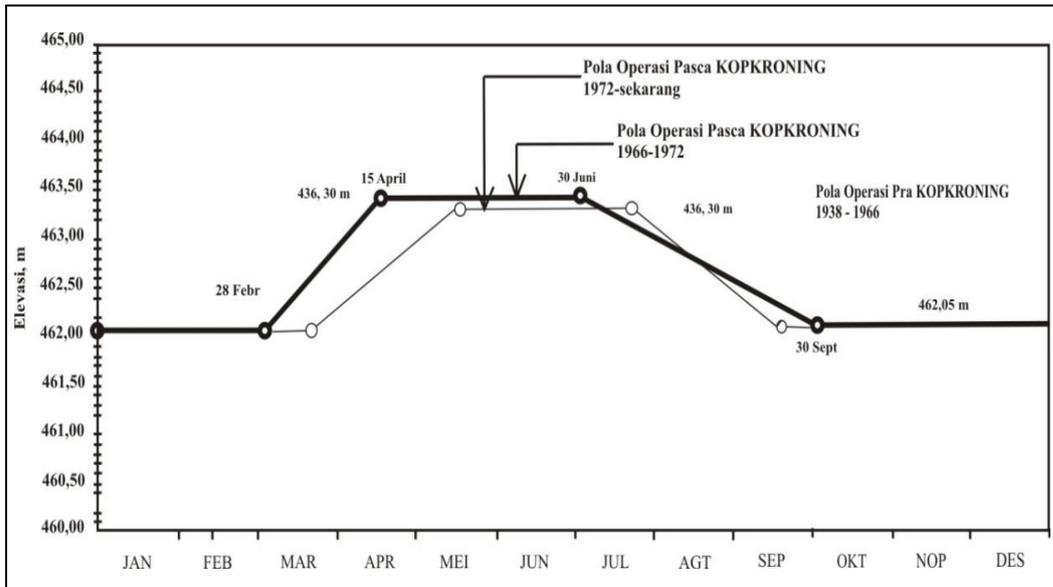
Uraian	PLTA JELOK	PLTA TIMO
Kapasitas efektif (m <sup>3</sup> )	13.000.000	60.000
Kapasitas total (m <sup>3</sup> )	45.000.000	75.000
Q inflow (m <sup>3</sup> /dt)	45	12 (maksimum)
Turbine		
Tahun Operasi	1938	1962
Pabrik	Werk Spoor Escher Wyss Hoolad	
Tipe	Francis poros datar	Francis poros datar
Kapasitas (MW)	4 x 5,12	3 x 4,17
Debit (m <sup>3</sup> /dt)	4 x 4,46	3 x 4,60
Rateh Head (m)	144,40	103,00
Putaran (rpm)	230,8	600
Produksi Tahunan (MWH)	98.000	58.000

Sumber : FT Undip & Balitbang Jateng, 2004

### c. Periode Pasca Koproning

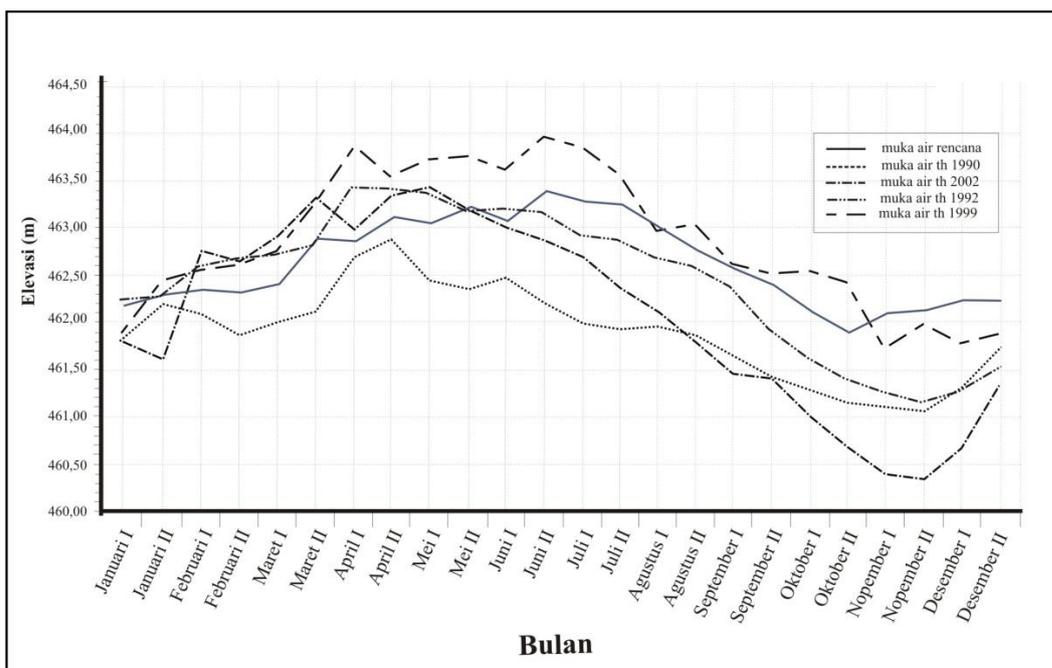
Pada tahun 1972 pengelolaan Danau Rawapening dilakukan oleh DPU Pengairan Jawa Tengah. Mempertimbangkan kebutuhan air di Kabupaten Grobogan dan Demak dan selesainya jaringan interkoneksi PLN sehingga PLTA Jelok dan Timo tidak lagi merupakan tulang punggung pembangkit listrik di wilayah Jawa Tengah bagian utara, maka DPU Pengairan Jawa Tengah mengembalikan pola operasi Danau Rawapening ke pola operasi semula. Pola operasi tersebut mempertahankan elevasi terendah pada +462,02 m dpl, sehingga kebutuhan irigasi di daerah hilir terjaga, akan tetapi pada elevasi tersebut PLTA Jelok tidak dapat beroperasi optimum. Hal tersebut terkait dengan rendahnya *inflow* pada saat musim kemarau. Selain itu pada saat musim hujan diharapkan

Danau Rawapening dapat menampung debit banjir sebanyak mungkin, sehingga kejadian banjir di bagian hilir dapat dikurangi.



**Gambar 2.13.** Pola Operasi Danau Rawapening Berbagai Periode

Sumber : FT Undip & Balitbang Jateng, 2004



**Gambar 2.14.** Posisi Muka Air Danau Rawapening Periode 1990-2002

Dibandingkan dengan Muka Air Rencana.

Sumber: FT Undip & Balitbang Jateng, 2004

## **E. Analisis Investasi**

Dengan memandang pembayaran jasa lingkungan sebagai bagian dari investasi masa depan, maka kegiatan yang dibiayai melalui pembayaran jasa lingkungan harus dilakukan studi kelayakannya terlebih dahulu. Menurut Suyanto (2001) apabila dalam tahap studi kelayakan suatu kegiatan dianggap layak atau *feasible*, yang berarti memenuhi parameter *benefit* dan *cost*, maka kegiatan tersebut layak untuk dibiayai dan dilaksanakan.

Mekanisme ini diharapkan akan meningkatkan realisasi pembayaran jasa lingkungan, karena konsekuensi logis dari setiap pengeluaran biaya dapat diukur kelayakannya. Selain itu proyeksi keuntungan di masa depan dapat diperhitungkan secara ekonomi dengan lebih mudah.

### **1. Biaya Investasi (*Cost*)**

Komponen biaya dalam suatu pengembangan sumberdaya air tergantung dari prasarana dan sarana yang akan dibangun. Menurut Suyanto (2001) biaya investasi suatu proyek bisa didefinisikan sebagai jumlah semua pengeluaran dana yang diperlukan untuk melaksanakan proyek sampai selesai. Biaya tersebut dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu biaya langsung dan biaya tidak langsung.

Dalam hubungannya dengan konservasi sumberdaya air, biaya langsung meliputi prasarana dan sarana fisik, pembuatan kolam resapan, terasering, *agroforestry*, kolam rorak sedangkan biaya tidak langsung antara lain sosialisasi, kampanye penyelamatan air, pendamping petani, evaluasi, dan monitoring.

## 2. **Biaya Tahunan (*Annual Cost*)**

Biaya tahunan adalah biaya yang dikeluarkan selama bangunan konservasi atau hutan diberdayakan. Menurut Suyanto (2001) Bunga, depresiasi dan amortisasi merupakan biaya yang harus dibayar tiap tahun. Untuk pembiayaan perusahaan, depresiasi dan amortisasi kedua-duanya diperhitungkan tetapi untuk proyek pengembangan sumberdaya air atau pengairan biaya tahunan hanya memperhitungkan depresiasi atau amortisasi saja, dan tidak kedua-duanya. Biaya tahunan yang besarnya kadang-kadang diperkirakan dari prosentase biaya modal.

## 3. **Manfaat (*Benefit*)**

Dalam pengembangan sumberdaya air manfaat proyek dapat dibedakan atas manfaat langsung atau manfaat utama (*direct/main benefit*) dan manfaat tidak langsung atau manfaat kedua (*indirect/secondary benefit*). *Direct benefit* adalah manfaat yang langsung dapat dinikmati setelah proyek selesai, misalnya tersedianya tenaga listrik, pengurangan kerugian akibat banjir atau peningkatan produksi pertanian. Manfaat tidak langsung adalah manfaat yang akan dinikmati secara berangsur-angsur dan dalam jangka panjang (Suyanto, 2001).

Dalam hubungannya dengan konservasi sumberdaya air, maka manfaat langsung yang dinilai adalah ketersediaan air, sedangkan manfaat tidak langsung adalah pengurangan debit banjir. Untuk mengkaji perubahan ketersediaan air dan perubahan debit banjir dapat dilakukan dengan analisis hidrologi dengan bantuan model, misalnya Model Mock.

#### 4. Metode Penilaian Investasi

Untuk melakukan penilaian investasi yang ditanamkan menurut Suryanto (2001) dapat digunakan tiga metode utama dalam analisis ekonomi yaitu :

##### a. Metode Nilai Sekarang Bersih (*Net Present Value Method*)

Metode ini juga dikenal sebagai metode Present Worth dan digunakan untuk menentukan apakah suatu rencana mempunyai keuntungan dalam periode waktu analisis. Hal ini dihitung dari *Present Value of the Benefit (PVB)* dan *Present Value of the Cost (PVC)*. Dasar dari metode ini adalah bahwa semua keuntungan ataupun biaya mendatang yang berhubungan dengan biaya proyek dikonversikan ke nilai saat ini (*present value*), dengan mempergunakan suatu tingkat suku bunga tertentu. Persamaan umum untuk metode ini adalah:

$$NPV_t = \sum_{i=0}^n [(B_n - C_n (1-r))^n] \dots\dots\dots (2.19)$$

dimana :

- NPV : nilai bersih saat ini
- $B_n$  : keuntungan pada tahun ke-n
- $C_n$  : biaya pada tahun ke-n
- r : tingkat bunga (*discount rate*) yang menggambarkan penurunan nilai uang pada tiap periode waktu tertentu. Tingkat bunga ini telah termasuk inflasi
- n : umur ekonomi proyek, dimulai dari tahap perencanaan sampai akhir umur rencana jalan.

Dalam hal ini semua rencana akan dilaksanakan apabila  $NPV > 0$ , atau persamaan di atas memenuhi :

$$Net Present Value [NPV] = PV_{benefit} - PV_{cost} = \text{positif} \dots\dots\dots(2.20)$$

Hal tersebut berarti bahwa pembangunan prasarana akan memberikan keuntungan, dimana *benefit cash flow* positif akan lebih besar daripada *cost / cash flow* negatif.

**b. Metoda Tingkat Pengembalian (*Internal Rate of Return*)**

Metoda tingkat pengembalian / *Internal Rate of Return Method* (IRR) berdasarkan pada penentuan nilai *discount rate*, dimana semua keuntungan masa depan yang diekuivalenkan ke nilai sekarang adalah sama dengan biaya kapital. Metode ini digunakan untuk memperoleh suatu tingkat bunga dimana nilai pengeluaran sekarang bersih (NPV) adalah nol. Perhitungan untuk dapat memperoleh nilai IRR ini dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Persamaan umum untuk metode ini adalah sebagai berikut :

$$NPV = \sum_{i=0}^n [(B_i - C_i)(1 + IRR)^{-i}] = 0 \dots \dots \dots (2.21)$$

Jika nilai IRR lebih besar dari *discount rate* yang berlaku, maka proyek mempunyai keuntungan ekonomi dan nilai IRR pada umumnya dapat dipakai untuk membuat ranking bagi usaha-usaha proyek yang berbeda.

**c. Metoda Perbandingan Keuntungan dan Biaya (*Benefit Cost Ratio Method*)**

Metoda ini dipakai untuk mengevaluasi kelayakan proyek dengan membandingkan total keuntungan terhadap total biaya yang telah diekuivalenkan ke tahun dasar dengan memakai nilai *discount rate* yang berlaku. Metoda ini dilakukan berdasarkan nilai sekarang, yaitu dengan membandingkan selisih

manfaat dengan biaya yang lebih besar dari nol dan selisih manfaat dari biaya yang lebih kecil dari nol. Persamaan untuk metoda ini adalah sebagai berikut.

$$B / C_{net} = \frac{PresentValueNettBenefi\ddot{t}s}{CapitalCost} \dots\dots\dots(2.22)$$

Nilai B / C<sub>net</sub> yang lebih kecil dari satu menunjukkan investasi yang buruk. Hal ini menggambarkan bahwa keuntungan yang diperoleh para pemakai lebih kecil daripada investasi yang diberikan pada pembangunan sistem tersebut.

**d. Analisis Sensitivitas**

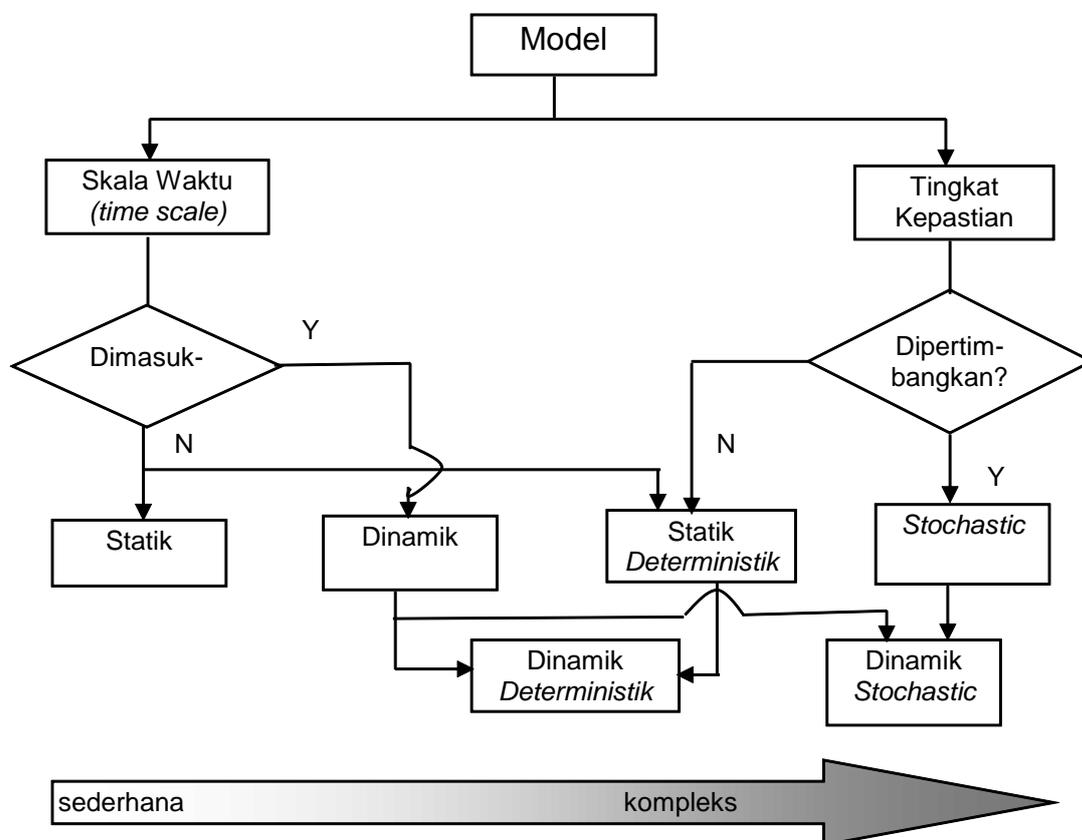
Analisis sensitivitas bertujuan untuk mengetahui dampak dari perubahan asumsi komponen proyek yang diberlakukan dalam analisis investasi. Beberapa komponen yang dapat dilakukan perubahan antara lain; kenaikan biaya 10%, penurunan manfaat 10% dan keterlambatan penyelesaian proyek konservasi. Dengan memasukkan perubahan tersebut di dalam analisis investasi, maka akan diketahui komponen mana yang paling sensitif terhadap keberhasilan suatu proyek (Suripin, 2004 :250).

**F. Model Simulasi Neraca Air Berbasis Ekonomi Lingkungan**

**1. Permodelan Lingkungan**

Secara umum model dapat dikategorikan berdasarkan skala waktu dan tingkat kompleksitas yang dicerminkan dari aspek ketidakpastian. Jika model tidak mempertimbangkan aspek waktu, model tersebut kita sebut model statis. Jika aspek waktu *intertemporal* dipertimbangkan, model tersebut kita sebut model

dinamik. Jika kemudian model yang dibangun mempertimbangkan aspek ketidakpastian yang lebih menggambarkan realitas dunia nyata, model tersebut kita sebut model yang bersifat *deterministic*. Jika kepastian dimasukkan ke dalam model tersebut kita sebut model yang bersifat *stochastic*. Interaksi antara skala waktu dan ketidakpastian akan menghasilkan model yang lebih kompleks lagi, seperti model yang *dynamic-stochastic*. Jenis-jenis model tersebut secara diagram dapat dilihat pada Gambar 2.15, arah panah dari kiri ke kanan menggambarkan derajat kompleksitas model. Dengan kata lain, semakin jauh panah bergerak ke kanan, semakin rumit model yang dibangun (Fauzi & Anna, 2005 : 6-7).



**Gambar 2.15.** Jenis-Jenis Model

Sumber : Fauzi & Anna, 2005

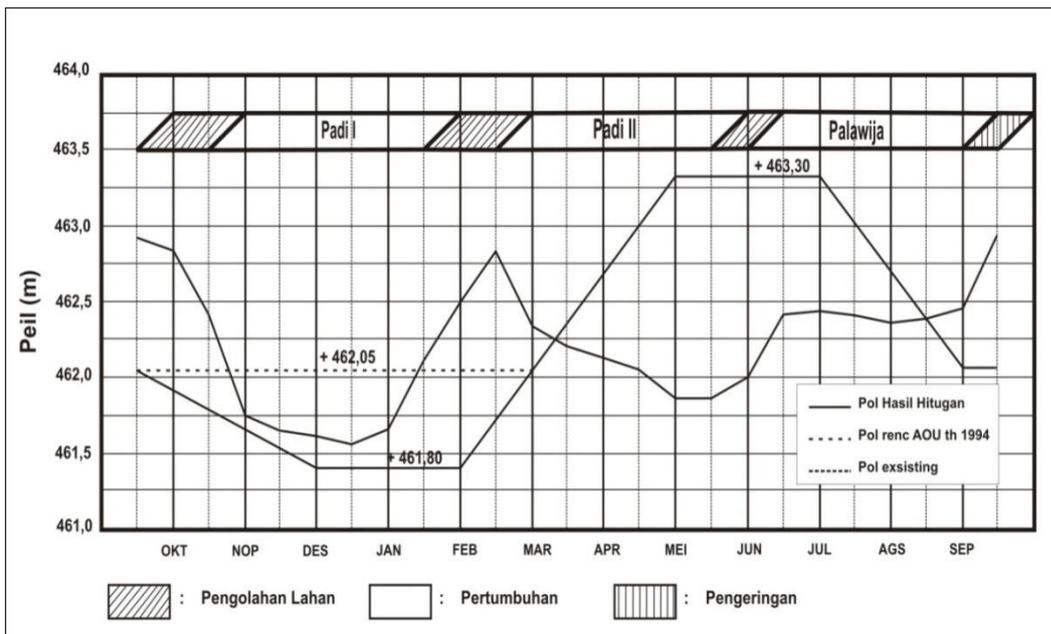
Dalam permodelan lingkungan banyak digunakan istilah pendekatan sistem. Pendekatan sistem merupakan pendekatan yang menggunakan berbagai model dengan tujuan utama untuk menentukan model atau sistem yang memberikan hasil paling optimal (Sasongko, 2005:46). Dalam permasalahan pengembangan sumberdaya air, penggunaan model matematik merupakan cara yang telah umum dipakai. Menurut Jayadi (2000), penerapan metode ini didasarkan pada prinsip utama pendekatan sistem yaitu *system engineering* dan *system analysis*. Penggunaan *system engineering* dimaksudkan untuk menerapkan hukum-hukum fisika terkait dengan aspek teknis yang berlaku pada kasus yang ditinjau. Penerapan cara ini akan terkait dengan pemakaian ilmu-ilmu dasar seperti Hidrologi, Hidraulika, Teknik Sungai, Transport Sedimen dan lain-lain.

## **2. Simulasi Sistem Sumberdaya Air**

Kemajuan yang begitu cepat dalam bidang teknik komputer sangat mendukung pembuatan model untuk menyelesaikan persoalan pada sistem yang berskala besar dan rumit. Pada sistem sumberdaya air yang mempunyai konfigurasi sangat kompleks metode optimasi dari *reset* operasi (*operation research*) sering kali tidak mampu menyelesaikan persoalan secara rinci, menyeluruh dan simultan. Untuk itu alternatif yang dapat dilakukan adalah dengan model simulasi dengan memanfaatkan komputer digital sebagai teknik dasar permodelan sistem (Jayadi, 2000).

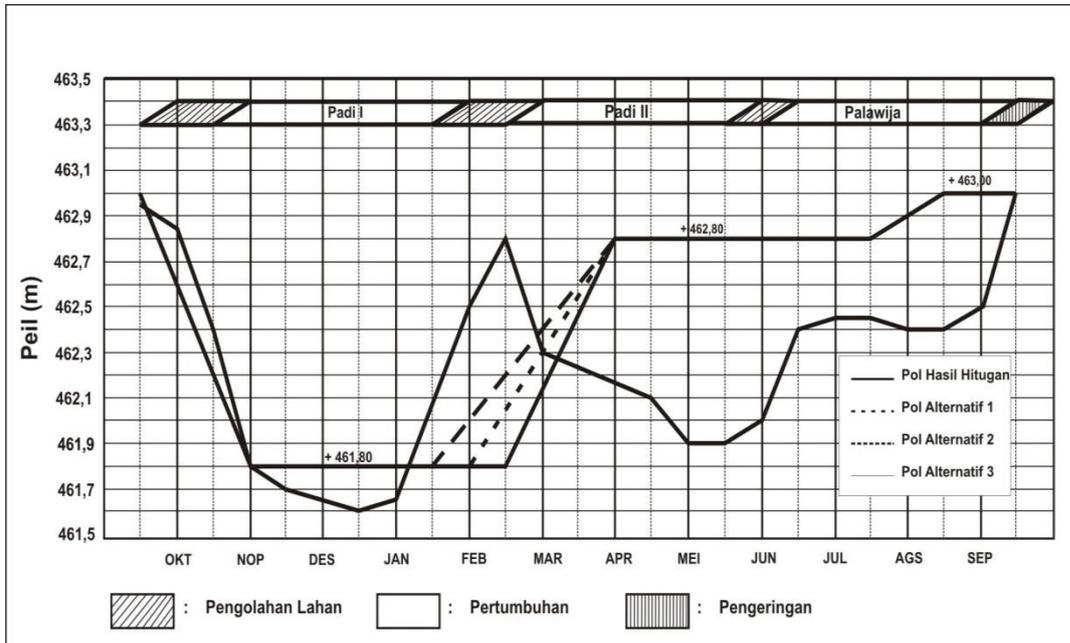
Dalam konteks sumberdaya air, *terminologi* simulasi memiliki pengertian yang lebih sempit, yaitu teknik permodelan di mana operasi suatu sumberdaya air direpresentasikan dengan beberapa hubungan logika dan matematik pada suatu

tahapan waktu (*time step*) tertentu berdasarkan input spesifik, deskripsi fisik dan ekonomi sistem dan beberapa kebijakan operasional yang diterapkan. Masukan model simulasi dapat berupa debit *inflow* dan kebutuhan air (Jayadi, 2000). Dalam upaya mengoptimalkan penggunaan air Danau Rawapening, Jayadi (1999) mengembangkan berbagai alternatif garis operasi danau. Untuk memperoleh garis tersebut dilakukan simulasi neraca air sistem Danau Rawapening dengan masukan data historis ketersediaan air dan kebutuhan air. Hasil penelitian menunjukkan debit air yang dialirkan kemasing-masing zona mendekati kebutuhan air zona tersebut, hal ini menunjukkan bahwa garis operasi danau yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang lebih baik dari garis operasi danau yang digunakan sebelumnya.



**Gambar 2.16.** Garis Operasi Danau Rawapening Eksisting, Usulan AOU - 1994 dan Hasil Hitungan

Sumber : Jayadi, 1999



**Gambar 2.17.** Tiga Alternatif Garis Operasi Danau Rawapening Eksisting Hasil Simulasi

*Sumber : Jayadi, 1999.*

Tiga alternatif garis operasi Danau Rawapening tersebut di atas merupakan hasil simulasi model yang dikembangkan berdasarkan kaidah neraca air, simulasi dilakukan berulang kali dengan merubah beberapa variabel dalam neraca air sehingga diperoleh faktor K mendekati 1. Faktor K merupakan perbandingan antara realisasi debit air yang di alirkan dengan kebutuhan debit air daerah layanan, nilai tertinggi adalah 1 atau 100%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa garis operasi alternatif II memberikan nilai rata rata faktor K tertinggi, dengan batas elevasi muka air minimum pada elevasi +461,80 m dan batas air maksimum pada elevasi + 463,00 m.

Model lain yang dikembangkan dalam upaya menyelesaikan persoalan sumberdaya air adalah model optimasi alokasi air yang dikembangkan oleh

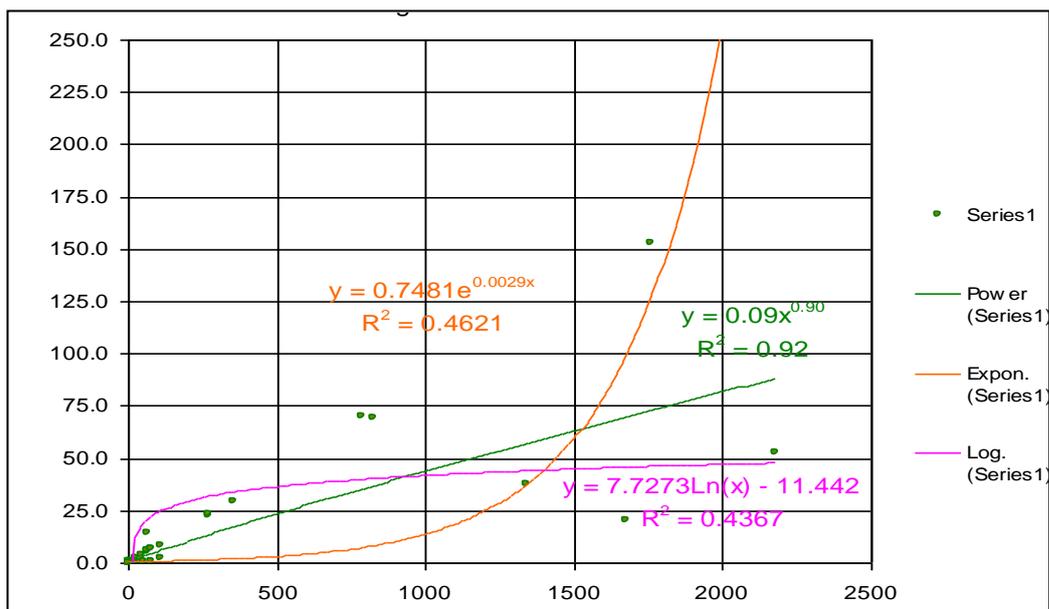
Rispiningtati (2008). Model yang dikembangkan merupakan model matematik yang merepresentasikan alokasi dan harga air dalam satu sistem sungai yang memiliki 13 danau besar. Optimasi dilakukan dalam dua tahap, yaitu optimasi alokasi air danau dan optimasi harga air.

Optimasi alokasi air danau dilakukan dengan mengoptimalkan debit yang dialirkan dapat memenuhi kebutuhan air pengguna yang berada di hilir masing-masing danau. Penyelesaian optimasi dilakukan dengan bantuan program *solver* dengan memaksimalkan debit yang dialirkan serta faktor pembatas volume tampungan danau dan kebutuhan air pengguna. Optimasi dilakukan terutama untuk danau tahunan, yaitu danau yang dapat menyimpan air selama musim hujan kemudian dialirkan pada musim kemarau. Danau tahunan pada daerah aliran sungai Brantas terdapat pada 4 danau yaitu Sutami, Wonorejo, Selorejo dan Bening.

Dalam optimasi alokasi air, karena danau yang berada dalam sistem sungai Brantas terikat dalam satu sistem hidrologis, maka optimasi harus dilakukan dalam satu sistem. Sedangkan optimasi harga air peneliti melakukan optimasi pada masing-masing danau (danau tunggal) tanpa menghubungkan dengan danau lain. Model optimasi harga air memungkinkan dimasukkannya kebijakan penetapan harga air, seperti kebijakan harga naik, turun atau sesuai dengan pendapatan (*benefit*) masing-masing pengguna.

Hasil simulasi model tersebut tertuang dalam bentuk grafik dengan berbagai kebijakan harga yang diambil, yaitu: 1) alokasi dan harga air seluruh pengguna untuk seluruh sistem (multi waduk), 2) hubungan alokasi dan harga air pengguna

pada setiap danau (danau tunggal), 3) alokasi dan harga air kumpulan pengguna. Yang dimaksud pengguna dalam model tersebut adalah Irigasi, PLTA, Kendali Banjir, Industri dan air minum. Kumpulan pengguna adalah kumpulan 9 pengguna irigasi, 6 pengguna PLTA, 13 pengguna Kendali Banjir, 2 pengguna air minum seperti yang terlihat pada Gambar 2.18.



**Gambar 2.18.** Grafik Optimasi Multi Danau R II.1 (Alokasi Naik Harga Turun).

Alokasi dan harga air masing-masing danau digantikan dengan satu grafik hubungan diatas. Contoh penggunaan : bila Alokasi 600 ( $10^6\text{m}^3$ ) untuk sebarang waduk, Harga air : Rp 50,- /  $\text{m}^3$

*Sumber : Riptiningsih, 2008*

Pengaturan harga sangat tergantung pada kebijaksanaan pengelola, seperti harga yang makin tinggi bila konsumsi makin banyak, atau harga makin sedikit bila mengkonsumsi banyak, atau sebanding dengan pemasukan yang diterima oleh masing-masing pengguna. Sesuai dengan penentuan waktu pada debit maka biaya juga disesuaikan dalam kurun waktu tahunan, semua komponen yang

berhubungan dengan waktu dan biaya dikonversikan secara tahunan dengan komponen bunga yang berlaku umum di Indonesia (sekitar 12%). Kendala-kendala utama tersebut meliputi batasan alokasi optimal waduk dan kebijaksanaan harga. Gambar 2.17. merujuk pada kebijakan alokasi naik harga turun, dengan sumbu Y alokasi air dan sumbu X harga air.

### 3. Kalibrasi dan Verifikasi

Kalibrasi adalah proses mengatur model agar data-data yang ada di sistem alamiah yang ditirukan sesuai dengan yang ada di model. Setelah sesuai dilakukan verifikasi, yaitu pembuktian bahwa model sudah sesuai dengan sistem alamiah yang ditiru. Pada perhitungan menggunakan metode Mock kalibrasi dilakukan terhadap nilai koefisien infiltrasi ( $i$ ) dan faktor resesi air tanah ( $k$ ) yang sangat dipengaruhi oleh topografi dan jenis tanah. Penentuan kedua nilai ini dilakukan dengan menguji semua koefisien pada selang nol sampai satu. Pada umumnya  $i$  yang digunakan untuk daerah dataran rendah dan pegunungan masing-masing adalah 0,3 dan lebih dari 0,5, sedangkan untuk  $k$  berkisar antara 0,5 untuk daerah dataran rendah dan 0,6 untuk daerah pegunungan. Untuk mendapatkan nilai  $i$  dan  $k$  yang sesuai maka digunakan Uji MSE (*Mean Squared Error*) yang dihitung sesuai dengan persamaan:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n \left( Y_i - \hat{Y}_i \right)^2}{n - 2} \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana  $Y_i$  merupakan rata-rata hasil perhitungan,  $\hat{Y}_i$  merupakan rata-rata hasil pengukuran langsung, dan  $n$  merupakan jumlah data. Nilai MSE terkecil dari  $i$  dan  $k$  yang nantinya digunakan dalam perhitungan debit sungai.