

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkitan listrik mikrohidro adalah pembangkitan listrik dihasilkan oleh generator listrik DC atau AC. Mikrohidro berasal dari kata *micro* yang berarti kecil dan *hydro* artinya air, arti keseluruhan adalah pembangkitan listrik daya kecil yang digerakkan oleh tenaga air. Tenaga air berasal dari aliran sungai kecil atau danau yang dibendung dan kemudian dari ketinggian tertentu dan memiliki debit yang sesuai akan menggerakkan turbin yang dihubungkan dengan generator listrik. Generator yang digunakan untuk mikrohidro dirancang mudah untuk dioperasikan dan dipelihara, didesain menunjang keselamatan, tetapi peralatan dari listrik akan menjadi berbahaya bila tidak digunakan dengan baik.

Pemanfaatan tenaga air oleh manusia telah dilakukan sejak ribuan tahun yang lalu, dimulai dengan pembuatan kincir air yang ditempatkan pada aliran air. Energi yang dihasilkan pada mulanya dimanfaatkan secara mekanik. Pada awal abad ke-19 perkembangan mini hidro di dunia, khususnya di Eropa, sangat pesat. Energi mekanik dan energi listrik yang dihasilkan disalurkan ke industri di sekitar lokasi stasiun pembangkit. Dengan berkembangnya proyek-proyek mega hidro di tahun 1930-an, pengembangan mini hidro sangat menurun, bahkan diabaikan oleh pemerintah. Sehubungan dengan kerugian

ekologi yang ditimbulkan oleh proyek-proyek mega hidro dan naiknya harga minyak bumi, industri mini hidro bangkit kembali sekitar empat puluh tahun yang lalu. Dengan semakin meningkatnya kebutuhan energi listrik, pemerintah dibanyak negara membuka kesempatan kepada swasta untuk terlibat dalam pengembangan mini hidro dan mikro hidro. Berdasarkan kapasitas keluarannya, Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

Tabel 2.1 Klasifikasi PLTA

No.	Jenis PLTA	Kapasitas
1.	PLTA besar	> 100 MW
2.	PLTA menengah	15 - 100 MW
3.	PLTA kecil	1 - 15 MW
4.	PLTM (mini hidro)	100 kW - 1 MW
5.	PLTMH (mikro hidro)	5 kW - 100 kW
6.	Pico hidro	< 5 kW

Sumber : (Prayogo. 2003)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), biasa disebut mikrohidro, adalah suatu pembangkit listrik kecil yang menggunakan tenaga air dengan kapasitas tidak lebih dari 100 kW yang dapat berasal dari saluran irigasi, sungai, atau air terjun alam dengan cara memanfaatkan tinggi terjunan (*head*) dan debit air (Prayogo, 2003).

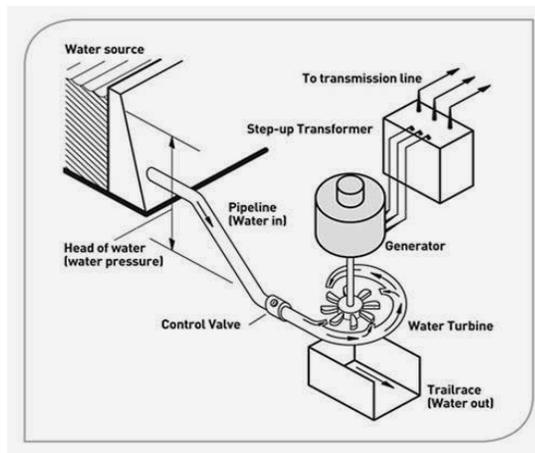
Umumnya PLTMH merupakan pembangkit listrik tenaga air jenis *run-off river* dimana *head* diperoleh tidak dengan cara membangun bendungan besar, tetapi dengan mengalihkan sebagian aliran air sungai ke salah satu sisi sungai

dan menjatuhkannya lagi ke sungai yang sama pada suatu tempat dimana *head* yang diperlukan sudah diperoleh. Dengan melalui pipa pesat air diterjunkan untuk memutar turbin yang berada di dalam rumah pembangkit. Energi mekanik dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator.

2.1.1 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkit tenaga listrik mikrohidro pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit air perdetik yang ada pada aliran air irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik.

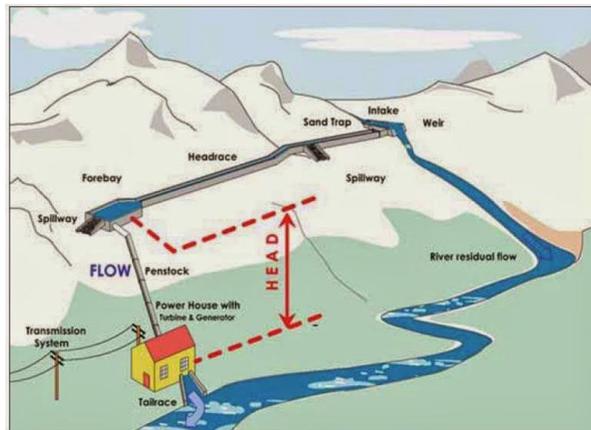
Energi Potensial - Energi Mekanik - Energi Listrik



Sumber: Theraja (2001)

Gambar 2.1 Prinsip Kerja PLTMH

2.1.2 Bagian-bagian Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)



Sumber: Prayogo (2003)

Gambar 2.2 Sistem PLTMH

- **Waduk (reservoir)**

Waduk adalah danau yang dibuat untuk membandung sungai untuk memperoleh air sebanyak mungkin sehingga mencapai elevasi.

- **Bendungan (dam)**

Dam berfungsi menutup aliran sungai-sungai sehingga terbentuk waduk. Tipe bendungan harus memenuhi syarat topografi, geologi dan syarat lain seperti bentuk serta model bendungan.

- **Bak Penenang (*Forebay*)**

Bak penenang berfungsi untuk mengontrol perbedaan debit dalam pipa pesat (*penstock*) dan saluran pembawa karena fluktuasi beban, disamping itu juga sebagai pemindah sampah terakhir (tanah, pasir, dan kayu) dalam air yang mengalir. Bak penenang dilengkapi saringan (*trashrack*) dan pelimpas (*spillway*).

$$V_f = A_f \times h_f$$

Dengan:

V_f = Volume desain bak penenang

A_f = Luas bak penenang

h_f = Tinggi muka air pada bak penenang

- **Saringan (Sand trap)**

Saringan ini dipasang didepan pintu pengambilan air, berguna untuk menyaring kotoran-kotoran atau sampah yang terbawa sehingga air menjadi bersih dan tidak mengganggu operasi mesin PLTMH.

- **Pintu pengambilan air (Intake)**

Pintu Pengambilan Air adalah pintu yang dipasang diujung pipa dan hanya digunakan saat pipa pesat dikosongkan untuk melaksanakan pembersihan pipa atau perbaikan.

- **Pipa pesat (penstok)**

Penstock adalah saluran penghubung antara bak penenang (*forebay*) menuju turbin. Fungsinya untuk mengalirkan air dari saluran penghantar menuju turbin. Pipa pesat mempunyai posisi kemiringan yang tajam dengan maksud agar diperoleh kecepatan dan tekanan air yang tinggi untuk memutar turbin. Konstruksinya harus diperhitungkan agar dapat menerima tekanan besar yang timbul termasuk tekanan dari pukulan air. Pipa pesat merupakan bagian yang cukup mahal, untuk itu pemilihan pipa yang tepat sangat penting. Pipa ini direncanakan untuk dapat menahan

tekanan tinggi dan berfungsi untuk mengalirkan air dari pengambilan (*intake*) menuju bak penenang. Untuk mendapatkan diameter pipa dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = Q/A$$

Dengan:

A = Luas pipa pesat (m^2)

Q = Debit pembangkit (m^3/dt)

V = Kecepatan aliran pada pipa pesat (m/dt)

- **Katup utama (main value atau inlet value)**

Katup utama dipasang didepan turbin berfungsi untuk membuka aliran air, Menstart turbin atau menutup aliran (menghentikan turbin). Katup utama ditutup saat perbaikan turbin atau perbaikan mesin dalam rumah pembangkit. Pengaturan tekanan air pada katup utama digunakan pompa hidrolik.

- **Power House**

Gedung Sentral merupakan tempat instalasi turbin air, generator, peralatan bantu, ruang pemasangan, ruang pemeliharaan dan ruang control.

Beberapa instalasi PLTMH dalam rumah pembangkit adalah :

- a. Turbin, merupakan salah satu bagian penting dalam PLTMH yang menerima energi potensial air dan mengubahnya menjadi putaran (energi mekanis). Putaran turbin dihubungkan dengan generator untuk menghasilkan listrik.



Sumber: Notosudjono (2002)

Gambar 2.3 Turbin

- b. Generator yang digunakan adalah generator pembangkit listrik AC. Untuk memilih kemampuan generator dalam menghasilkan energi listrik disesuaikan dengan perhitungan daya dari data hasil survei. Kemampuan generator dalam menghasilkan listrik biasanya dinyatakan dalam volt ampere (VA) atau dalam kilo volt ampere (kVA).
- c. Penghubung turbin dengan generator atau sistem transmisi energi mekanik ini dapat digunakan sabuk, roda gerigi atau dihubungkan langsung pada porosnya.
- 1) Sabuk atau puli digunakan jika putaran per menit (rpm) turbin belum memenuhi putaran motor pada generator, jadi puli berfungsi untuk menurunkan atau menaikkan rpm motor generator.
 - 2) Roda gerigi mempunyai sifat yang sama dengan puli

- 3) Penghubung langsung pada poros turbin dan generator, jika putaran turbin sudah lama dengan putaran motor pada generator

2.2. Sungai

2.2.1 Karakteristik Sungai

Sungai mempunyai fungsi mengumpulkan curah hujan dalam suatu daerah tertentu dan mengalirkannya ke laut. Sungai itu dapat digunakan juga untuk berjenis-jenis aspek seperti pembangkit tenaga listrik, pelayaran, pariwisata, perikanan dan lain-lain. Dalam bidang pertanian sungai itu berfungsi sebagai sumber air yang sangat penting untuk irigasi.

2.2.2 Daerah Pengaliran

Daerah pengaliran sebuah sungai adalah tempat presipitasi itu mengkonsentrasi ke sungai. Garis batas daerah-daerah aliran yang berdampingan disebut batas daerah pengaliran. Luas daerah pengaliran diperkirakan dengan pengukuran daerah itu pada peta topografi. Daerah pengaliran, topografi, tumbuh-tumbuhan dan geologi mempunyai pengaruh terhadap debit banjir, corak banjir, debit pengaliran dasar dan seterusnya (Suyono,1999).

2.3 Bangunan Tenaga Air

Pembangkit listrik tenaga air adalah suatu bentuk perubahan tenaga dari tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik, dengan

menggunakan turbin air dan generator. Daya yang dihasilkan adalah suatu persentase atau bagian hasil perkalian tinggi terjun dengan debit air. Oleh karena itu berhasilnya pembangkit listrik dengan tenaga air tergantung dari usaha untuk mendapatkan tinggi terjun air yang cukup dan debit yang cukup besar secara efektif dan produktif.

Tenaga air (Dandekar, 1991) merupakan sumberdaya terpenting setelah tenaga uap/panas. Hampir 30% dari seluruh kebutuhan tenaga di dunia dipenuhi oleh pusat-pusat listrik tenaga air.

Tenaga air mempunyai beberapa keuntungan seperti berikut :

1. Bahan bakar (air) untuk PLTA tidak habis terpakai ataupun berubah menjadi sesuatu yang lain.
2. Biaya pengoperasian dan pemeliharaan PLTA sangat rendah jika dibandingkan dengan PLTU dan PLTN.
3. Turbin-turbin pada PLTA bisa dioperasikan atau dihentikan pengoperasiannya setiap saat.
4. PLTA cukup sederhana untuk dimengerti dan cukup mudah
5. untuk dioperasikan.
6. PLTA dengan memanfaatkan arus sungai dapat bermanfaat menjadi sarana pariwisata dan perikanan, sedangkan jika diperlukan waduk untuk keperluan tersebut dapat dimanfaatkan pula sebagai irigasi dan pengendali banjir.

Adapun kelemahan PLTA diantaranya :

1. Rendahnya laju pengembalian modal proyek PLTA.

2. Masa persiapan suatu proyek PLTA pada umumnya memakan waktu yang cukup lama.
3. PLTA sangat tergantung pada aliran sungai secara alamiah.

Untuk PLTA jenis bendungan terdiri dari bagian-bagian berikut :

- a. Bendungan (dam) lengkap dengan pintu pelimpah air (*spillway*) serta bendung yang terbentuk di hulu sungai.
- b. Bagian penyalur air (*waterway*)
 1. Bagian penyadapan air (*intake*)
 2. Pipa atau terowongan tekan (*headrace pipe/tunnel*)
 3. Tangki pendatar atau sumur peredam (*surgetank*)
 4. Pipa pesat (*penstock*)
 5. Bagian pusat tenaga (*power house*) yang mencakup turbin dan generator pembangkit listrik
 6. Bagian yang menampung air keluar dari turbin untuk dikembalikan ke aliran sungai (*tail race*)
- c. Bagian elektromekanik, yaitu peralatan yang terdapat pada pusat tenaga (*power station*) meliputi turbin, generator, crane dan lain-lain. Besarnya daya yang dihasilkan merupakan fungsi dari besarnya debit sungai dan tinggi terjun air. Besarnya debit yang dipakai sebagai debit rencana, bisa merupakan debit minimum dari sungai tersebut sepanjang tahunnya atau diambil antara debit minimum dan maksimum, tergantung fungsi yang direncanakan PLTA tersebut.

Besarnya tinggi terjun air terikat pada kondisi geografis di mana PLTA tersebut berada. Panjangnya lintasan yang harus dilalui air dari bendungan ke

turbin menyebabkan hilangnya sebagian energi air, energi air yang tersisa (tinggi terjun efektif) inilah yang menggerakkan turbin air dan kemudian turbin air ini yang menggerakkan generator. Besarnya daya yang dihasilkan juga tergantung dari efisiensi keseluruhan (*overall efficiency*) PLTA tersebut yang terdiri dari efisiensi hidrolis, yaitu perbandingan antara energi efektif dan energi kotor (bruto), efisiensi turbin dan efisiensi generator.

Dengan demikian besarnya daya menurut (Arievolution, 2009) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \rho \cdot 9,8 \cdot Q \cdot h \cdot \eta \quad (\text{KW}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Dimana :

ρ = densitas air (kg/m^3)

Q = debit air (m³/detik)

h = tinggi terjun air efektif (m)

η = efisiensi keseluruhan PLTA

Efisiensi keseluruhan PLTA menurut (Subroto, 2002) didapatkan dari :

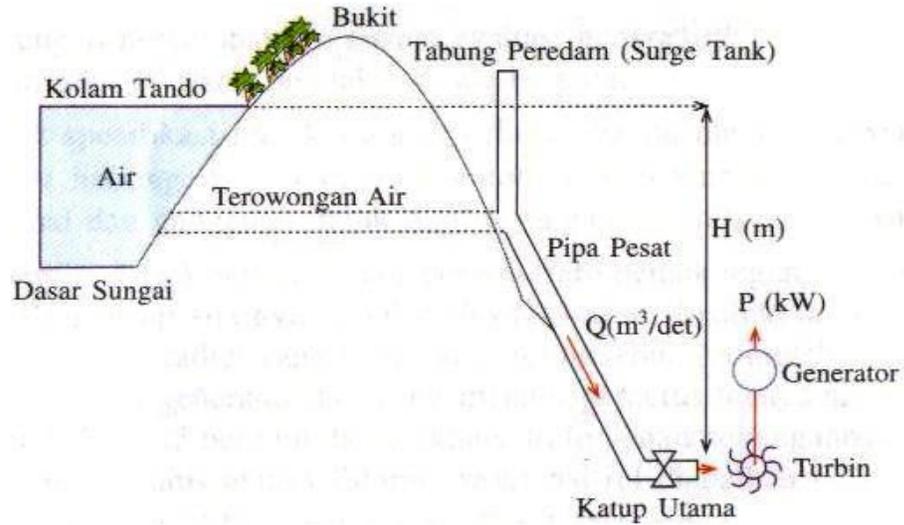
$$\eta = \eta_h \times \eta_t \times \eta_g \quad \dots\dots\dots (5)$$

dimana :

η_h = efisiensi hidrolis

η_t = efisiensi turbin

η_g = efisiensi generator



Sumber: Dandekar (1991)

Gambar 2.4 Perencanaan Tenaga Air

Kehilangan energi pada terowongan tekan disebabkan oleh dua hal, yaitu kehilangan energi akibat gesekan (primer) dan kehilangan energi akibat turbulensi (sekunder) pada pemasukan, pengeluaran dan belokan-belokan dan katub atau pintu serta perubahan penampang saluran.

a. Kehilangan energi akibat gesekan (primer)

Besar kehilangan energi akibat gesekan (h_f) dapat dihitung dengan persamaan Darcy – Weisbach, yaitu :

$$h_f = \frac{\lambda(Lv^2)}{D \cdot 2g} \quad \dots\dots\dots (6)$$

dimana :

- λ = koefisien gesekan
- L = panjang saluran (meter)
- v = kecepatan air di saluran (m/s)
- D = diameter saluran (m)
- g = gaya gravitasi bumi (m²/detik)

b. Kehilangan energi sekunder

Kehilangan energi sekunder ini terdiri dari :

1. Kehilangan energi pada pemasukan (h_e)

$$h_e = K_e \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (7)$$

K_e adalah koefisien kehilangan energi pada pemasukan

2. Kehilangan energi pada belokan (h_b)

$$h_b = K_b \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (8)$$

K_b adalah koefisien kehilangan energi karena belokan

3. Kehilangan energi pada katup atau pintu (h_g)

$$h_g = K_g \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (9)$$

K_g adalah koefisien kehilangan energi pada katup pintu

Dengan demikian total kehilangan tinggi energi (h_t) yang terjadi pada terowongan tekan adalah :

$$h_t = h_e + h_f + h_b + h_g \dots\dots\dots (10)$$

Besarnya kehilangan tinggi energi ini dihitung sebagai kehilangan produksi listrik per tahun dengan memasukkan harga listrik perKWH, maka dapat dihitung besarnya kehilangan produksi yaitu sebesar :

$$9,8 \times Q \times h_t \times T \times \text{harga listrik per Kwh} \dots\dots\dots (11)$$

Dimana :

Q = debit (m³/detik)

T = lama pengoperasian per tahun (jam)

Untuk menekan besarnya kehilangan energi, maka dilakukan upaya untuk memperkecil yaitu dengan cara :

- a. Pelapisan dan penghalusan (lining) permukaan saluran,
- b. Memperbesar profil saluran,
- c. Menghindari kemungkinan belokan-belokan dan perubahan profil

2.4 Siklus Hidrologi

Hujan yang jatuh ke bumi baik menjadi aliran langsung maupun tidak langsung melalui vegetasi atau media lainnya akan membentuk siklus aliran air mulai dari tempat yang tinggi (gunung, pegunungan) menuju ke tempat yang lebih rendah baik di permukaan tanah maupun di dalam tanah yang berakhir di laut. (Harto, 1993)

Air berubah wujud berupa gas/uap akibat panas matahari dan disebut dengan proses penguapan atau evaporasi. Uap ini bergerak di atmosfer (udara) kemudian akibat perbedaan temperatur di atmosfer dari panas menjadi dingin maka air akan terbentuk akibat kondensasi dari uap menjadi cairan. Bila temperatur berada di bawah titik beku (*freezing point*) kristal-kristal es terbentuk. Tetesan air kecil timbul akibat kondensasi dan berbenturan dengan tetesan air lainnya dan terbawa oleh gerakan udara turbulen sampai pada kondisi yang cukup besar menjadi butiran-butiran air. Apabila jumlah butir air sudah cukup banyak akibat gravitasi butir-butir itu akan turun ke bumi dan proses tersebut disebut dengan istilah hujan.

Hujan jatuh ke bumi baik secara langsung maupun melalui media tanaman (vegetasi). Air mengalir dan bergerak dengan berbagai cara. Pada retensi (tempat penyimpanan) air akan menetap/tinggal untuk beberapa waktu. Retensi dapat berupa retensi alam seperti daerah-daerah cekungan, danau, tempat-tempat rendah, maupun retensi buatan manusia seperti tampungan, sumur, embung, waduk dan lain-lain.

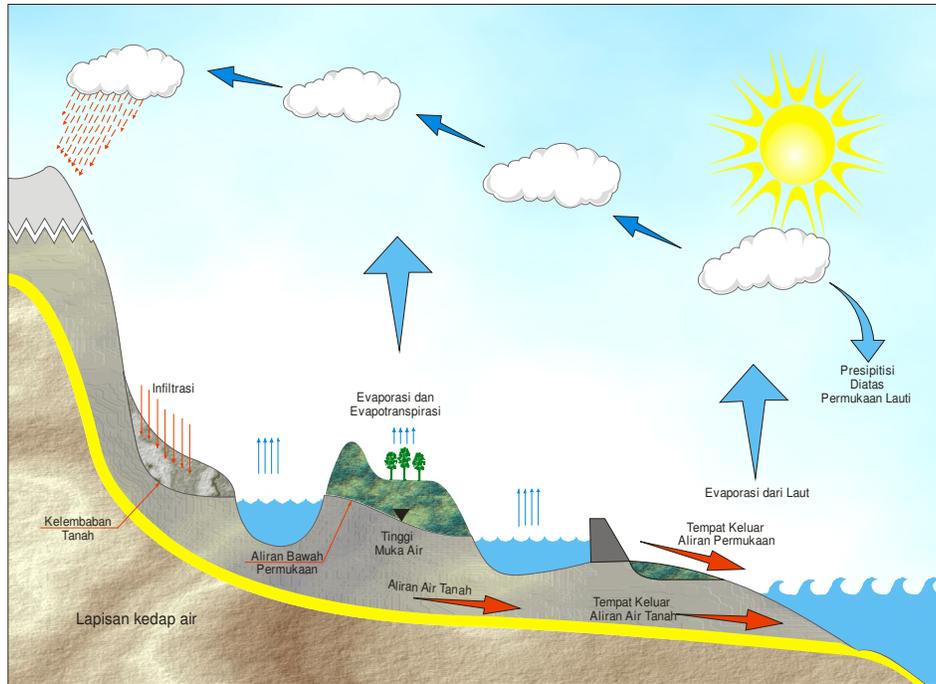
Secara gravitasi (alami) air mengalir dari daerah yang tinggi ke daerah yang rendah, dari gunung-gunung, pegunungan ke lembah, lalu ke daerah lebih rendah lagi, sampai ke daerah pantai dan akhirnya akan bermuaran ke laut. Aliran air ini disebut aliran permukaan tanah karena bergerak di atas muka tanah. Aliran ini biasanya akan memasuki daerah tangkapan atau daerah aliran menuju ke sistem jaringan sungai, sistem danau ataupun waduk. Dalam sistem sungai air mengalir mulai dari sistem sungai yang kecil menuju ke sistem sungai yang besar dan akhirnya menuju mulut sungai atau sering disebut estuari yaitu tempat bertemunya sungai dengan laut.

Sebagian air hujan yang jatuh di permukaan tanah meresap ke dalam tanah dalam bentuk-bentuk infiltrasi, perkolasi, kapiler. Aliran tanah dapat dibedakan menjadi aliran tanah dangkal, aliran tanah dalam, aliran tanah antara dan aliran dasar (*base flow*). Disebut aliran dasar karena aliran ini merupakan aliran yang mengisi sistem jaringan sungai. Hal ini dapat dilihat pada waktu musim kemarau, ketika hujan tidak turun untuk beberapa waktu, pada satu sistem sungai tertentu masih ada aliran secara tetap dan kontinyu.

Akibat panas matahari air di permukaan bumi juga akan berubah wujud menjadi gas/uap dalam bentuk evaporasi dan bila melalui tanaman disebut transpirasi. Air akan diambil oleh tanaman melalui akar-akarnya yang dipakai untuk pertumbuhan tanaman tersebut, lalu air dari tanaman juga akan keluar berupa uap akibat energi panas matahari (*evaporasi*). Proses pengambilan air oleh akar tanaman kemudian terjadinya penguapan dari dalam tanaman tersebut disebut sebagai evapotranspirasi.

Evaporasi yang lain dapat terjadi pada sistem sungai, embung, *reservoir*, waduk maupun air laut yang merupakan sumber air terbesar. Air laut merupakan tempat dengan sumber air yang sangat besar dan dikenal dengan nama air asin (*salt water*).

Rangkaian kejadian tersebut merupakan suatu pergerakan yang membentuk suatu siklus dan disebut siklus hidrologi. Siklus ini merupakan konsep dasar tentang keseimbangan air secara global di bumi. Siklus hidrologi menunjukkan semua hal yang berhubungan dengan air. Bila dilihat keseimbangan air secara menyeluruh maka air tanah dan aliran permukaan, sungai, danau, penguapan, dll. merupakan bagian-bagian dari beberapa aspek yang menjadikan siklus hidrologi seimbang. Dengan kata lain volume air di dalam sistem tersebut tetap kuantitasnya dan melakukan peredaran melalui susbsistem-subsistem. Seluruh sistem dalam siklus tersebut dikendalikan oleh radiasi matahari yang datang (*incomming radiation*) ataupun radiasi matahari yang pergi (*outgoing radiation*).



Sumber : (Martha. 1985)

Gambar 2.5 Skema Siklus Hidrologi

Dengan demikian maka proses-proses yang terjadi dalam siklus hidrologi adalah:

1. Presipitasi
2. Evapotranspirasi
3. Infiltrasi dan perkolasi
4. Limpasan permukaan (*surface run off*) dan aliran air tanah (*groundwater flow*)

2.5 Siklus Limpasan

Siklus limpasan sebenarnya hanya merupakan penjelasan lebih rinci sebagian siklus hidrologi, khususnya yang terkait dengan aliran air di permukaan lahan

yang juga memberikan gambaran sederhana tentang neraca air. Semula penjelasan ini diberikan oleh Hoyt (Harto, 2000) dalam lima fase akan tetapi untuk praktisnya, dibagian ini akan diringkas dalam 4 fase saja, yaitu fase akhir musim kemarau, fase permulaan musim hujan, fase pertengahan musim hujan dan fase awal musim kemarau. Pada dasarnya antara siklus limpasan, siklus hidrologi dan neraca air tidak dapat dipisahkan satu dengan yang lainnya. Meskipun demikian terdapat dua pengertian yang diperlukan untuk menjelaskan siklus limpasan ini.

- a. Kapasitas Lapangan (*field capacity*) yang mempunyai arti jumlah maksimum yang dapat ditahan oleh massa tanah terhadap gaya berat.
- b. *Soil Moisture Deficiency* (SMD) yaitu perbedaan jumlah kandungan air dalam massa tanah suatu saat dengan kapasitas lapangannya.

Siklus limpasan Hoyt (Harto, 2000) dijelaskan sebagai berikut.

2.5.1 Fase I (Akhir musim kemarau)

Selama musim kemarau, diandaikan sama sekali tidak terjadi hujan. Hal ini berarti tidak ada masukan ke dalam DAS. Proses hidrologi yang terjadi seluruhnya merupakan keluaran dari DAS yaitu aliran antara, aliran dasar dan penguapan. Penguapan terjadi pada semua permukaan yang lembab. Dengan demikian penguapan terjadi hampir di seluruh permukaan DAS. Khususnya dipermukaan lahan, apabila satu lapisan telah kering maka penguapan terus terjadi dengan penguapan lapisan dibawahnya. Dengan demikian maka lapisan tanah di atas akuifer menjadi semakin kering, atau nilai SMD semakin besar. Dalam fase ini,

limpasan sama sekali tidak ada, sehingga aliran di sungai sepenuhnya bersumber dari pengatusan (*drain*) dari akuifer, khususnya sebagai aliran dasar (*baseflow*). Karena tidak ada hujan, berarti tidak ada infiltrasi dan perkolasi, maka tidak ada penambahan air ke dalam akuifer. Akibatnya muka air (tampungan air) dalam akuifer menyusut terus, yang menyebabkan penurunan debit aliran dasar. Keadaan ini dapat nampak pada sumur-sumur dangkal (*unconfined aquifer*), yang menunjukkan penurunan muka air. Hal ini akan terjadi terus selama belum terjadi hujan.

2.5.2 Fase II (Awal musim hujan)

Dalam fase ini diandaikan keadaannya pada awal musim hujan, dan diandaikan hujan masih relatif sedikit. Dengan andaian ini beberapa keadaan dalam sistem dapat terjadi. Hujan yang terjadi ditahan oleh tanaman (pohon-pohonan) dan bangunan sebagai air yang terintersepsi (*interception*). Dengan demikian dapat terjadi jumlah air hujan masih belum terlalu besar untuk mengimbangi kehilangan air akibat intersepsi. Di sisi lain, air hujan yang jatuh di permukaan lahan, sebagian besar terinfiltrasi, karena lahan dalam keadaan sangat kering. Dengan demikian diperkirakan bagian air hujan yang mengalir sebagai aliran permukaan dan limpasan masih kecil, yang sangat besar kemungkinannya inipun masih akan tertahan dalam tampungan-tampungan cekungan (*depression storage*) yang selanjutnya akan diuapkan kembali

atau sebagian terinfiltrasi. Oleh sebab itu sumbangan limpasan permukaan (*surface runoff*) masih sangat kecil (belum ada), sehingga belum nampak pada perubahan cepat muka air di sungai. Selain itu air yang terinfiltrasi pun juga tidak banyak, yang mungkin baru cukup untuk ‘membasahi’ lapisan atas tanah. Dengan pengertian lain, air yang terinfiltrasi masih digunakan oleh tanah untuk mengurangi SMD-nya, sehingga belum banyak air yang diteruskan ke bawah (perkolasi). Dengan demikian maka potensi akuifer belum berubah, maka aliran yang dapat dihasilkan sebagai aliran dasar juga belum berubah.

2.5.3 Fase III (Pertengahan musim hujan)

Dalam periode ini diandaikan hujan sudah cukup banyak, sehingga kehilangan air akibat intersepsi sudah tidak ada lagi (karena sudah terimbangi oleh *stemflow*). Demikian pula tampungan cekungan (*depression storage*) telah terpenuhi, sehingga air hujan yang jatuh di atas lahan dan mengalir sebagai *overlandflow*, kemudian mengisi tampungan cekungan diteruskan menjadi limpasan (*runoff*) yang selanjutnya ke sungai.

Dengan demikian maka akan terjadi perubahan muka air secara jelas, yaitu dengan naiknya permukaan sungai akibat hujan. Kenaikan relatif cepat itu disebabkan karena pengaruh limpasan permukaan. Bagian air hujan yang terinfiltrasi, karena diandaikan lapisan-lapisan tanah telah mencapai kapasitas lapangan, maka masukan air ke dalam tanah akan diteruskan baik sebagai aliran

antara (*interflow*) maupun komponen aliran vertikal (*percolation*), yang akan menambah tampungan air tanah (*ground water storage/aquifer*). Akibat penambahan potensi air tanah ini maka muka air tanah akan naik (terutama yang nampak di akuifer bebas) dan aliran air tanah juga akan bertambah. Sehingga terjadi penambahan debit aliran dasar di sungai. Keadaan semacam ini berlanjut terus sampai akhir musim hujan.

2.5.4 Fase IV (Awal musim kemarau)

Periode ini mengandaikan keadaan di musim kemarau, sehingga hujan sudah tidak ada lagi. Dalam keadaan ini dalam sistem DAS tidak ada lagi masukan (hujan), yang ada adalah keluaran, baik sebagai penguapan maupun keluaran air pengatusan dari akuifer. Keadaan ini adalah awal dari keadaan fase I dan akan berlanjut terus sampai dengan fase I.

2.6 Debit

Debit aliran sungai menurut Bambang Triatmodjo adalah jumlah air yang mengalir melalui tampang lintang sungai tiap satu satuan waktu, yang biasanya dinyatakan dalam meter kubik per detik (m^3/dt). Debit sungai, dengan distribusinya dalam ruang dan waktu, merupakan informasi penting yang diperlukan dalam perencanaan bangunan air dan pemanfaatan sumberdaya air.

Debit di suatu lokasi di sungai dapat diperkirakan dengan cara berikut :

1. Pengukuran di lapangan (di lokasi yang ditetapkan).
2. Berdasarkan data debit dari stasiun di dekatnya.
3. Berdasarkan data hujan.
4. Berdasarkan pembangkitan data debit.

Pengukuran debit di lapangan dapat dilakukan dengan membuat stasiun pengamatan atau dengan mengukur debit di bangunan air seperti bendung dan peluap. Dalam hal yang pertama, parameter yang diukur adalah tampang lintang sungai, elevasi muka air, dan kecepatan aliran. Selanjutnya, debit aliran dihitung dengan mengalikan luas tampang dan kecepatan aliran. Sering di suatu lokasi yang akan dibangun bangunan air tidak terdapat pencatatan debit sungai dalam waktu panjang. Dalam keadaan tersebut terpaksa debit diperkirakan berdasarkan:

1. Debit di lokasi lain pada sungai yang sama
2. Debit di lokasi lain pada sungai di sekitarnya
3. Debit pada sungai lain yang berjauhan tetapi mempunyai karakteristik yang sama.

Debit di lokasi yang ditinjau dihitung berdasar perbandingan luas DAS yang ditinjau dan DAS stasiun referensi.

2.7 Hidrometri

Hidrometri secara umum dapat diartikan sebagai ilmu yang mempelajari cara-cara pengukuran air. Berdasarkan pengertian tersebut berarti hidrometri mencakup kegiatan pengukuran air permukaan dan air bawah permukaan.

Stasiun hidrometri merupakan tempat di sungai yang dijadikan tempat pengukuran debit sungai, maupun unsur-unsur aliran lainnya (Harto, 2000). Dalam satu sistem DAS stasiun hidrometri ini dijadikan titik kontrol (*control point*) yang membatasi sistem DAS. Pada dasarnya stasiun hidrometri ini dapat ditempatkan di sembarang tempat sepanjang sungai dengan mempertimbangkan kebutuhan data aliran baik sekarang maupun di masa yang akan datang sesuai dengan rencana pengembangan daerah.

Dalam penempatan atau pemilihan stasiun hidrometri terdapat dua pertimbangan yang perlu diperhatikan, yaitu :

1. Jaringan hidrologi di seluruh DAS,
2. Kondisi lokasi yang harus memenuhi syarat tertentu.

Dalam pemilihan lokasi stasiun hidrometri perlu diperhatikan beberapa syarat (Harto, 2000) yaitu :

1. Stasiun hidrometri harus dapat dicapai (*accessible*) dengan mudah setiap saat, dan dalam segala macam kondisi baik musim hujan maupun musim kemarau.
2. Di bagian sungai yang lurus dan aliran yang sejajar dengan jangkau tinggi permukaan yang dapat dijangkau oleh alat yang tersedia. Dianjurkan agar bagian yang lurus paling tidak tiga kali lebar sungai.
3. Di bagian sungai dengan penampang stabil, dengan pengertian bahwa hubungan antara tinggi muka air dan debit tidak berubah, atau perubahan yang mungkin terjadi kecil. Untuk sungai-sungai kecil atau saluran, apabila

tidak dijumpai penampang yang stabil dan sangat diperlukan, penampang sungai/saluran dapat diperkuat dengan pasangan batu/beton.

4. Di bagian sungai yang peka (*sensitive*)
5. Tidak terjadi aliran di bantaran sungai pada saat debit besar
6. Tidak diganggu oleh pertumbuhan tanaman air, agar tidak mengganggu kerja *current meter*, dan tidak mengubah liku kalibrasi (*rating curve*)
7. Tidak terganggu oleh pembendungan di sebelah hilir (*backwater*).

2.8 Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi bertujuan untuk mengetahui curah hujan rata-rata yang terjadi pada daerah tangkapan hujan yang berpengaruh pada besarnya debit sungai sekarang. Data hujan harian selanjutnya akan diolah menjadi data curah hujan rencana yang kemudian akan diolah menjadi debit banjir rencana. Data hujan harian didapatkan dari beberapa stasiun di sekitar lokasi rencana bendungan, di mana stasiun tersebut masuk dalam daerah pengaliran sungai.

Adapun langkah-langkah dalam analisis hidrologi adalah sebagai berikut:

2.8.1 Metode Regionalisasi

Regionalisasi pada dasarnya adalah pengklasifikasian atau pengelompokan data ke dalam data sejenis. Dari pengelompokan data tersebut maka akan tampak daerah yang menunjukkan persamaan dan perbedaan. Kesatuan daerah yang menunjukkan karakteristik tertentu sehingga dapat dibedakan dengan daerah lainnya disebut *Region*. Dalam analisis hidrologi ini metode regionalisasi digunakan untuk

menyelidiki kesesuaian karakteristik hidrologi di dua daerah yang diharapkan memiliki sifat karakteristik yang sama sehingga data debit di daerah berbeda bisa digunakan untuk perhitungan debit di lokasi penelitian, hal tersebut dilakukan karena keterbatasan data hidrologi dan hidrometri di lokasi penelitian. Data-data yang digunakan yaitu, curah hujan *real time* yang ada di Suoh dan data debit jam-jaman dari outlet bendungan Way Besai.

2.8.2 Perhitungan Debit Andalan (*Low Flow Analysis*)

Analisis ketersediaan air adalah dengan membandingkan kebutuhan air total termasuk kebutuhan air untuk PLTMH dengan ketersediaan air. Setelah dibandingkan akan didapat kelebihan atau defisit air pada setiap bulannya, baik pada saat ini ataupun waktu yang akan datang. Secara umum debit andalan dinyatakan sebagai data aliran sungai/curah hujan dengan debit andalan 80% dan 90% agar PLTMH dapat berfungsi dengan baik termasuk pada musim kemarau seperti bulan Juni, Agustus, dan September yang terjadi defisit air. Analisis debit andalan bertujuan untuk mendapatkan potensi sumber air yang berkaitan dengan rencana pembangunan PLTMH.

2.9 Aliran Pada Saluran Terbuka

Aliran air dalam suatu saluran dapat berupa aliran saluran terbuka maupun aliran pipa. Kedua jenis aliran tersebut sama dalam banyak hal, namun

berbeda dalam satu hal yang penting. Aliran saluran terbuka harus memiliki permukaan bebas.

Klasifikasi aliran pada saluran terbuka :

a. Aliran permanen dan tidak permanen

Jika kecepatan aliran pada suatu titik tidak berubah terhadap waktu, maka aliran disebut aliran permanen atau tunak (*steady flow*), jika kecepatan pada suatu lokasi tertentu berubah terhadap waktu maka alirannya disebut aliran tidak permanen atau tidak tunak (*unsteady flow*).

b. Aliran seragam dan berubah

Jika kecepatan aliran pada suatu waktu tertentu tidak berubah sepanjang aliran yang ditinjau, maka alirannya disebut aliran seragam (*uniform flow*). Namun, jika kecepatan aliran pada saat tertentu berubah terhadap jarak, maka aliran disebut aliran tidak seragam/berubah (*nonuniform flow or varied flow*). Berdasarkan laju perubahan kecepatan terhadap jarak, maka aliran dapat diklasifikasikan menjadi aliran berubah lambat laun (*gradually varied flow*) atau aliran berubah tiba-tiba (*rapidly varied flow*).

c. Aliran laminar dan turbulen

Jika partikel zat cair bergerak mengikuti alur tertentu dan aliran tampak seperti gerakan serat-serat atau lapisan-lapisan tipis yang parallel, maka alirannya disebut aliran laminar. Sebaliknya, jika partikel zat cair bergerak mengikuti alur yang tidak beraturan, baik ditinjau terhadap ruang maupun waktu, maka alirannya disebut aliran turbulen. Faktor

yang menentukan keadaan aliran adalah pengaruh relatif antara kekentalan (viskositas) dan gaya inersia. Jika gaya viskositas yang dominan, maka alirannya laminar, sedangkan jika gaya inersia yang dominan, maka alirannya turbulen. Hubungan antara gaya kekentalan dan inersia dinyatakan dalam bilangan *Reynold* (Rey) menurut Osborne, (1883), yang didefinisikan seperti rumus berikut :

$$\text{Rey} = \frac{V \times L}{\nu} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

- Rey = bilangan *Reynold*
- V = kecepatan aliran (m/det)
- L = panjang karakteristik (m) pada saluran muka air bebas,
L=R
- R = jari-jari hidrolik saluran
- ν = kekentalan kinematic (m^2/det)

Batas peralihan antara aliran laminar dan turbulen pada aliran bebas terjadi pada bilangan *Reynold*, $\text{Rey} \pm 600$, yang dihitung berdasarkan jari-jari hidrolik sebagai panjang karakteristik. Dalam kehidupan sehari-hari, aliran laminar pada saluran terbuka sangat jarang ditemui. Aliran jenis ini mungkin dapat terjadi pada aliran yang kedalamannya sangat tipis diatas permukaan gelas sangat halus dengan kecepatan yang sangat kecil.

d. Aliran subkritis, kritis, dan superkritis

Aliran dikatakan kritis ($\text{Fr} = 1$) apabila kecepatan aliran sama dengan kecepatan gelombang gravitasi dengan amplitude kecil. Gelombang

gravitasi dapat dibangkitkan dengan merubah kedalaman. Jika kecepatan aliran lebih kecil daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut subkritis ($Fr < 1$), sedangkan jika kecepatan alirannya lebih besar daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut superkritis ($Fr > 1$).

Parameter yang menentukan ketiga jenis aliran tersebut adalah nisbah antara gaya gravitasi dan gaya unersia, yang dinyatakan dengan bilangan *Froude* (Fr) menurut William (1889). Bilangan *Froude* untuk saluran berbentuk persegi didefinisikan sebagai:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

- Fr = bilangan *Froude*
- V = kecepatan aliran (m/det)
- h = kedalaman aliran (m)
- g = percepatan gravitasi (m^2/det)

2.10 Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis (Geographic Information System/GIS) yang selanjutnya akan disebut SIG merupakan sistem informasi berbasis komputer yang digunakan untuk mengolah dan menyimpan data atau informasi geografis (Aronoff, 1989).

Secara umum pengertian SIG sebagai berikut:

” Suatu komponen yang terdiri dari perangkat keras, perangkat lunak, data geografis dan sumberdaya manusia yang bekerja bersama secara efektif untuk memasukan, menyimpan, memperbaiki, memperbaharui, mengelola, memanipulasi, mengintegrasikan, menganalisa dan menampilkan data dalam suatu informasi berbasis geografis ”.

SIG mempunyai kemampuan untuk menghubungkan berbagai data pada suatu titik tertentu di bumi, menggabungkannya, menganalisa dan akhirnya memetakan hasilnya. Data yang akan diolah pada SIG merupakan data spasial yaitu sebuah data yang berorientasi geografis dan merupakan lokasi yang memiliki sistem koordinat tertentu, sebagai dasar referensinya. Sehingga aplikasi SIG dapat menjawab beberapa pertanyaan seperti; lokasi, kondisi, trend, pola, dan pemodelan. Kemampuan inilah yang membedakan SIG dari sistem informasi lainnya.

Telah dijelaskan diawal bahwa SIG adalah suatu kesatuan sistem yang terdiri dari berbagai komponen, tidak hanya perangkat keras komputer beserta dengan perangkat lunaknya saja akan tetapi harus tersedia data geografis yang benar dan sumberdaya manusia untuk melaksanakan perannya dalam memformulasikan dan menganalisa persoalan yang menentukan keberhasilan SIG.

1. Data Spasial

Sebagian besar data yang akan ditangani dalam SIG merupakan data spasial yaitu sebuah data yang berorientasi geografis, memiliki sistem koordinat tertentu sebagai dasar referensinya dan mempunyai dua bagian

penting yang membuatnya berbeda dari datalain, yaitu informasi lokasi (spasial) dan informasi deskriptif (attribute) yang dijelaskanberikut ini :

- a. Informasi lokasi (spasial), berkaitan dengan suatu koordinat baik koordinat geografi (lintang dan bujur) dan koordinat XYZ, termasuk diantaranya informasi datum dan proyeksi.
- b. Informasi deskriptif (atribut) atau informasi non spasial, suatu lokasi yang memiliki beberapa keterangan yang berkaitan dengannya, contohnya : jenis vegetasi, populasi, luasan, kode pos, dan sebagainya.

2. Peta, Proyeksi Peta, Sistem Koordinat, Survey dan GPS

Data spasial yang dibutuhkan pada SIG dapat diperoleh dengan berbagai cara, salah satunya melalui survei dan pemetaan yaitu penentuan posisi/koordinat di lapangan

2.11 FDC (*Flow Duration Curve*)

Data rata-rata debit sungai harian dapat diringkas dalam bentuk flow duration curve (FDC) yang menghubungkan aliran dengan persentase dari waktu yang dilampaui dalam pengukuran. FDC diplotkan dengan menggunakan data aliran atau debit pada skala logaritmik sebagai sumbu y dan persentase waktu debit terlampaui pada skala peluang sebagai sumbu x (Sandro, 2009). Ini juga menjelaskan bahwa bentuk grafik dari FDC adalah logaritmik yang memenuhi persamaan berikut:

$$y = \ln((a/x) - 1)/b$$

y: Log normalised streamflow

x : Peluang terlampaui

a : Intersep aliran

b : Sebuah konstanta yang mengendalikan kemiringan kurva FDC

Dalam membuat kurva FDC kita harus menentukan debit sungai terlebih dahulu. Debit sungai merupakan laju aliran yang didefinisikan sebagai hasil bagi antara volum air yang terlewati pada suatu penampang per satuan waktu. Debit (*discharge*, Q) atau laju volume aliran sungai umumnya dinyatakan dalam satuan volum per satuan waktu, dan diukur pada suatu titik atau *outlet* yang terletak pada alur sungai yang akan diukur. Besar debit atau aliran sungai diperoleh dari hasil pengukuran kecepatan aliran yang melalui suatu luasan penampang basah. Metode pengukuran debit ini dikenal dengan istilah metode kecepatan-luas (*velocity-area method*).

Data debit sungai dengan menggunakan hasil pengukuran luas penampang basah dan kecepatan aliran umumnya telah direkap dan diformulasikan dalam suatu persamaan dan kurva tinggi muka air-debit aliran sungai atau lebih dikenal dengan istilah *stage-discharge rating curve* yang senantiasa dikoreksi untuk setiap kurun waktu atau peristiwa tertentu.