

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Daya Listrik yang Mungkin Terbangkitkan ( $P_{\text{terbangkit}}$ )

Buku Manual Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) tahun 2005 yang menerangkan bagaimana cara menghitung besarnya daya listrik yang mungkin terbangkitkan melalui PLTMH. Besarnya daya listrik yang mungkin terbangkitkan dapat dihitung melalui persamaan 2-1. Konsep dasar PLTMH adalah menyerap tenaga dari ketinggian dan aliran sungai kemudian menyalurkan tenaga tersebut dalam bentuk listrik. Namun sebagian tenaga akan hilang oleh sistem itu sendiri dalam bentuk gesekan, panas, suara, dan sebagainya.

$$P_{\text{terbangkit}} = g \times H_{\text{efektif}} \times Q \times \eta \dots\dots\dots(2-1)$$

- dengan :
- P = Daya listrik yang mungkin terbangkitkan (kW)
  - g = Gravitasi dengan nilai  $9,8 \text{ m/s}^2$
  - H = *Head* efektif (m)
  - Q = Debit aliran sungai ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
  - H = efisiensi sistem

#### **2.1.1 Debit Andalan (Q)**

Pemilihan lokasi daerah tangkapan air sangat mempengaruhi besarnya kapasitas daya listrik PLTMH. Lokasi aliran yang dipilih mempunyai simpanan air cukup di daerah hulu tangkapan air berdasarkan curah hujan yang terjadi di daerah tangkapan. Aliran air inilah yang kemudian diandalkan dan dijadikan acuan dalam perancangan PLTMH.

Debit andalan merupakan debit minimum (terkecil) yang digunakan untuk operasional PLTMH. *Pedoman Studi Kelayakan Hidrologi* (Kurniawan. dkk, 2009) menjelaskan bahwa perhitungan debit andalan untuk desain bangunan air di Indonesia umumnya menggunakan beberapa metode, yaitu Metode Mock, NRECA, dan Tank Model. Berdasarkan pengalaman lapangan, Metode Mock merupakan metode yang direkomendasikan untuk mendukung desain.

Metode Mock (1973) adalah analisis keseimbangan air untuk menghitung harga debit bulanan berdasarkan transformasi data curah hujan bulanan, evapotranspirasi, kelembaban tanah, dan tampungan air tanah. Prinsip Metode Mock menyatakan bahwa hujan yang jatuh pada daerah tangkapan air, sebagian akan hilang akibat evapotranspirasi. Sebagian akan langsung menjadi *direct runoff* dan sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah atau terjadi infiltrasi. Mula-mula infiltrasi ini akan menjenuhkan tanah, kemudian terjadi perkolasi dan air keluar melalui *base flow*.

#### **A. Daerah Aliran Sungai (DAS)**

Menurut Triatmodjo (2008), daerah aliran sungai (DAS) didefinisikan sebagai daerah yang dibatasi oleh punggung-punggung gunung/pengunungan di mana air hujan yang jatuh di daerah tersebut akan mengalir menuju sungai utama pada suatu titik/stasiun yang ditinjau. DAS ditentukan dengan peta topografi yang dilengkapi dengan garis-garis kontur. Garis-garis kontur inilah yang nantinya akan menentukan arah limpasan permukaan. Limpasan berasal dari titik-titik tertinggi dan bergerak menuju titik-titik yang lebih rendah dalam arah tegak lurus dengan garis-garis kontur. Daerah yang dibatasi oleh garis yang menghubungkan titik-titik tertinggi tersebut adalah DAS. Sedangkan garis yang mengelilingi DAS tersebut merupakan titik-titik tertinggi.

Pengukuran luas DAS dilakukan dengan bantuan *software* AutoCAD 2013. Besarnya luas DAS sangat berpengaruh pada debit sungai. Semakin besar luas DAS semakin besar jumlah limpasan permukaan sehingga semakin besar pula aliran permukaan atau debit sungai.

#### **B. Perhitungan Data Curah Hujan**

Data curah hujan diukur melalui alat pengukur hujan yang terdapat di stasiun pencatat hujan. Stasiun pencatatan hujan dipilih dengan persyaratan sebagai berikut:

- a. Pilih stasiun pencatat hujan terdekat dengan jarak kurang 10 km dari lokasi.

- b. Apabila tidak ada stasiun pencatat hujan dengan jarak  $< 10$  km, maka dicari stasiun hujan lain dengan jarak 10-20 km, minimal 2 stasiun pencatat hujan
- c. Apabila tidak ada stasiun pencatat hujan dengan jarak 10-20 km, maka dicari stasiun hujan lain dengan jarak  $< 50$  km, minimal 3 stasiun hujan.

Data hujan daerah tangkapan air yang paling nyata dapat dihitung dengan Metode Poligon Thiessen. Perhitungan hujan menggunakan Metode Poligon Thiessen untuk wilayah daerah aliran sungai mempunyai ciri-ciri:

- a. Luas DAS antara  $500 - 5.000 \text{ km}^2$
- b. Jumlah stasiun pencatat hujan minimal 3 stasiun yang tersebar di sekeliling daerah tangkapan air tersebut.
- c. Kondisi topografinya datar
- d. Stasiun hujan tidak tersebar merata

Perhitungan dengan Poligon Thiessen diasumsikan bahwa setiap stasiun hujan dianggap mewakili hujan dalam suatu daerah dengan luas tertentu, dan luas tersebut merupakan faktor koreksi bagi hujan di stasiun yang bersangkutan. Poligon tersebut didapatkan dengan cara:

- a. Semua stasiun yang terdapat di dalam atau luar daerah tangkapan air dihubungkan dengan garis, sehingga terbentuk jaringan segitiga. Hendaknya dihindari terbentuk segitiga tumpul.
- b. Setiap segitiga ditarik garis sumbunya, dan semua garis sumbu tersebut membentuk poligon.
- c. Luas daerah yang hujannya dianggap diwakili salah satu stasiun yang bersangkutan adalah daerah yang dibatasi garis poligon tersebut atau dengan batas daerah tangkapan air.
- d. Luas relatif daerah ini dengan luas daerah tangkapan air merupakan faktor koreksinya.

Rumus yang digunakan dalam menghitung curah hujan rata-rata ditunjukkan persamaan 2-2.

$$\bar{R} = \frac{(R_1A_1)+(R_2A_2)+(R_3A_3)+\dots+(R_nA_n)}{(A_1+A_2+A_3+\dots+A_n)} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan : R = Curah hujan rata-rata pada suatu daerah. (mm)  
 $R_1, R_2, \dots, R_n$  = Curah hujan pada stasiun 1, 2, ..., n (mm)  
 $A_1, A_2, \dots, A_n$  = Luas stasiun 1, luas stasiun 2, ..., luas stasiun n (km<sup>2</sup>)  
 N = Jumlah stasiun yang mewakili DAS suatu sungai

### C. Melengkapi Data Hujan yang Hilang

Tidak semua stasiun hujan mempunyai data yang lengkap, sehingga perlu dilakukan pengisian data hilang agar semua curah hujan dapat dihitung. Menurut Pedoman Teknis Puslitbang SDA No. PD.T-22-2004, langkah-langkah untuk mencari data curah hujan yang hilang dapat dilakukan dengan menggunakan *Normal Ratio Method* (persamaan 2-3)

1. Menentukan tahun patokan dimana pada satu tahun yang sama, data curah hujan harian stasiun yang berpengaruh lengkap.
2. Menghitung setiap data curah hujan yang hilang / NR dengan rumus :

$$NR = \frac{1}{n} \left[ \frac{N_x}{N_a} P_a + \frac{N_x}{N_b} P_b + \dots + \frac{N_x}{N_n} P_n \right] \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan :  $R_x/NR$  = *Not Recorded* / Data Curah Hujan hilang yang akan dicari  
 N = Jumlah stasiun yang mengisi data berpengaruh (minimal 3 stasiun)  
 $N_x$  = Jumlah curah hujan tahunan pada tahun patokan pada stasiun yang kehilangan data (diambil data yang benar-benar lengkap)  
 $N_a, N_b,$  = Jumlah curah hujan tahunan di tahun patokan pada stasiun yang berpengaruh  
 $P_a, P_b,$  = Data curah hujan harian pada tanggal yang sama dengan data yang akan dicari di stasiun tertentu yang berpengaruh.

## D. Evapotranspirasi

Direktorat Pengairan dan Irigasi menerjemahkan evapotranspirasi sebagai kehilangan air pada suatu daerah aliran sungai akibat proses evaporasi dan transpirasi. Evapotranspirasi dibagi menjadi dua:

### 1. Evapotranspirasi Potensial :

Dalam *FAO Irrigation and Drainage Paper No.56*, evapotranspirasi potensial ( $ET_o$ ) menggambarkan proses evapotranspirasi pada permukaan rumput hijau dengan tinggi yang seragam dan tumbuh dengan pengairan yang cukup. Diasumsikan tanaman acuan sebagai tanaman hipotetik dengan tinggi 0,12 m, mempunyai *fixed surface resistance*  $70 \text{ s m}^{-1}$ , dan koefisien albedo 0,23. Parameter dasar yang mempengaruhi besarnya  $ET_o$  adalah parameter cuaca, meliputi: radiasi matahari, temperatur udara, kelembaban udara, dan kecepatan angin. Dalam perhitungan  $ET_o$  digunakan Metode FAO Penman Monteith (persamaan 2-4).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots (2-4)$$

- dengan:  $ET_o$  = Evapotranspirasi potensial [ $\text{mm day}^{-1}$ ]  
 $R_n$  = radiasi netto pada permukaan tanaman [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ]  
 $G$  = *soil heat flux density* [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ]  
 $T$  = temperatur rata-rata harian pada ketinggian 2 m [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $u_2$  = kecepatan angin pada ketinggian 2 m [ $\text{m s}^{-1}$ ]  
 $e_s$  = *saturation vapour pressure* [kPa]  
 $e_a$  = *actual vapour pressure* [kPa]  
 $e_s - e_a$  = *saturation vapour pressure deficit* [kPa]  
 $\Delta$  = kemiringan dari kurva tekanan uap air [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]  
 $\gamma$  = tetapan psikrometrik [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

0.408 merupakan faktor konversi satuan dari [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ] menjadi [ $\text{mm day}^{-1}$ ]

#### a. Kecepatan Angin

$$u = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \dots\dots\dots (2-5)$$

- dengan  $u$  = kecepatan angin [ $\text{m s}^{-1}$ ]  
 $u_z$  = kecepatan angin pada ketinggian  $z$  m di atas permukaan tanah [ $\text{m s}^{-1}$ ]  
 $z$  = ketinggian terukur di atas permukaan laut [m]

b. *Slope of saturation vapour pressure curve*

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27 T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2} \dots\dots\dots(2-6)$$

dengan  $\Delta$  = slope of saturation vapour pressure curve [kPa °C<sup>-1</sup>]  
 $T$  = temperatur udara [°C]

c. *Tetapan psikrometrik*

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P \dots\dots\dots(2-7)$$

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \dots\dots\dots(2-8)$$

dengan  $\gamma$  = tetapan psikrometrik [kPa °C<sup>-1</sup>]  
 $P$  = tekanan atmosfer [kPa]  
 $Z$  = ketinggian terukur di atas permukaan laut [m]

d. *Vapour pressure*

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \dots\dots\dots(2-9)$$

$$e_a = \frac{e^o(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^o(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \dots\dots\dots(2-10)$$

$$e^o(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27 T}{T+237.3} \right] \dots\dots\dots(2-11)$$

dengan  $e_a$  = mean saturation vapour pressure [kPa]  
 $e_s$  = mean saturation vapour pressure [kPa]  
 $e^o(T_{min})$  = saturation vapour pressure pada temperatur minimum harian [kPa]  
 $e^o(T_{max})$  = saturation vapour pressure pd temperatur maksimum harian [kPa]  
 $RH_{max}$  = kelembaban relatif maksimum [%]  
 $RH_{min}$  = kelembaban relatif minimum [%]  
 $T$  = temperatur udara [°C]

e. *Soil heat flux (G)*

$$G_{month,i} = 0.14 (T_{month,i} - T_{month,i-1}) \dots\dots\dots(2-12)$$

dengan  $T_{month,i}$  = temperatur udara rata-rata pada bulan ke-i [°C]  
 $T_{month,i-1}$  = temperatur udara rata-rata pada bulan sebelumnya [°C]

f. *Net radiation (R<sub>n</sub>)*

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \dots \dots \dots (2-13)$$

dengan  $R_{ns}$  = *net solar or shortwave radiation* [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>]  
 $R_{nl}$  = *net outgoing longwave radiation* [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>]

g. *Net solar or net shortwave radiation (R<sub>ns</sub>)*

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \dots \dots \dots (2-14)$$

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \dots \dots \dots (2-15)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \dots \dots \dots (2-16)$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \dots \dots \dots (2-17)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{\pi}{365} J\right) \dots \dots \dots (2-18)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \dots \dots \dots (2-19)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \dots \dots \dots (2-20)$$

dengan  $R_s$  = *solar or shortwave radiation* [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>]  
 $N$  = lama sinar matahari aktual [hour]  
 $n$  = *daylight hours* [hour]  
 $n/N$  = lama penyinaran matahari relatif  
 $R_a$  = *extraterrestrial radiation* [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>]  
 $a_s$  = konstanta regresi, menunjukkan fraksi dari *extraterrestrial radiation* yang sampai ke bumi pada saat cuaca mendung ( $n=0$ ), rekomendasi nilai  $a_s = 0,25$   
 $b_s$  = fraksi dari *extraterrestrial radiation* yang sampai ke bumi pada saat cuaca cerah ( $n=N$ ), rekomendasi nilai  $b_s = 0.50$   
 $G_{sc}$  = *solar constant* = 0.0820 MJ m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>  
 $d_r$  = *inverse relative distance Earth-Sun*  
 $\delta$  = *solar declination* [rad]  
 $\omega_s$  = *sunset hour angle* [rad]  
 $\Phi$  = *latitude* [rad]

h. *Net longwave radiation (R<sub>nl</sub>)*

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \dots \dots \dots (2-21)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \dots \dots \dots (2-22)$$

dengan  $R_{nl}$  = *net outgoing longwave radiation* [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>]  
 $\sigma$  = tetapan Stefan-Boltzmann [ 4.903x10<sup>-9</sup> MJ K<sup>-4</sup> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> ]  
 $T_{max,K}$  = temperatur absolut maksimum [K=°C+273.16]



$T_{\min,K}$	= temperatur absolut minimum [K=°C+273.16]
$e_a$	= <i>actual vapour pressure</i> [kPa]
$R_s/R_{so}$	= <i>relative shortwave radiation</i> ( $\leq 1.0$ )
$R_s$	= <i>solar radiation</i> [MJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> ]
$R_{so}$	= <i>clear-sky radiation</i> [MJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> ]
$z$	= ketinggian terukur di atas permukaan laut [m]

## 2. Evapotranspirasi Aktual

Evapotranspirasi aktual merupakan evapotranspirasi yang terjadi pada kondisi air yang tersedia terbatas. Evapotranspirasi aktual dipengaruhi oleh proporsi permukaan luar yang tidak tertutupi tumbuhan hijau (*exposed surface*) dan jumlah hari hujan ( $n$ ). (Direktorat Pengairan dan Irigasi, 2006). Rumus Evapotranspirasi aktual dapat dilihat pada persamaan 2-23.

$$Ea = ETo - \left( ETo \left[ \frac{m}{20} \right] (18 - n) \right) \dots \dots \dots (2-23)$$

dengan	$Ea$	= Evapotranspirasi aktual (mm)
	$ETo$	= Evapotranspirasi potensial (ETo)
	$n$	= Jumlah hari hujan
	$m$	= <i>Exposed Surface</i>

**Tabel 2.1 Exposed Surface**

No.	m	Daerah
1	0 %	Hutan primer, sekunder
2	10-40 %	Daerah tererosi
3	30-50 %	Daerah ladang pertanian

(Sumber : Sudirman, 2002)

## E. Metode *Meteorological Water Balance Dr. F. J. Mock*

Dalam *Land Capability-Appraisal Indonesia Water-Availability Appraisal* (Mock, 1973), debit limpasan dihitung dari total *runoff* dikalikan dengan luas daerah aliran sungai, sedangkan total *runoff* sendiri terdiri dari aliran langsung, aliran bawah tanah, dan limpasan badai. Rumus debit limpasan ditunjukkan persamaan 2-24.



$$Q_n = \frac{A.TRO.1000}{H.24.3600} \dots\dots\dots(2-24)$$

dengan     $Q_n$     = Debit yang tersedia bulan n ( $m^3/s$ )  
               $TRO$     = Total Limpasan (mm/bulan)  
               $A$         = Luas DAS ( $km^2$ )  
               $H$         = jumlah hari dalam satu bulan perhitungan

Total Limpasan (TRO) dihitung dengan rumus :

$$TRO = BSF + DRO + SRO \dots\dots\dots(2-25)$$

dengan     $TRO$     = *total runoff* / aliran total (mm/bln)  
               $BSF$     = aliran dasar (mm/bln)  
               $DRO$     = aliran langsung (mm/bln)  
               $SRO$     = *storm run off* (mm/bln)

### 1. Aliran Dasar (BSF)

Menurut *Pedoman Studi Kelayakan Hidrologi* (Kurniawan. dkk, 2009), *base flow* (aliran dasar) terjadi karena adanya infiltrasi yang kemudian menciptakan perkolasi. Salah satu faktor lain yang menyebabkan terjadinya *base flow* adalah perubahan volume air tanah, sehingga perhitungan *base flow* dapat dicari melalui persamaan 2-26.

$$BSF = i - (GWS - IGWS) \dots\dots\dots(2-26)$$

$$GWS = 0,5 \times (1+k) \times i + k \times IGWS \dots\dots\dots(2-27)$$

dengan     $GWS$     = *ground water storage* (mm/bln)  
               $IGWS$     = *initial ground water storage* (mm/bln)  
               $k$         = koefisien resesi air tanah  
               $i$         = infiltrasi (mm/bln)

### 2. Aliran Langsung (DRO)

Faktor yang mempengaruhi besarnya aliran langsung terdiri dari *water surplus* dan infiltrasi. *Water surplus* (WS) terjadi karena air hujan yang mengalami evapotranspirasi mengisi tampungan tanah (SS). Sedang infiltrasi terjadi karena adanya *water surplus* dan koefisien infiltrasi yang terbagi dalam koefisien infiltrasi musim hujan (Januari s/d Maret, November, Desember) dan musim kemarau (April s/d Oktober).

$$DRO = WS - i \dots\dots\dots(2-28)$$

$$WS = (P - ETo) - SS \dots\dots\dots(2-29)$$

$$SS = SM_n - SM_{n-1} \dots\dots\dots(2-30)$$

$$SM = SMC \quad \text{jika } (ISM + (P - ETo)) > SMC \dots\dots(2-31)$$

$$SM = (ISM + (P - ETo)) \quad \text{jika } (ISM + (P - ETo)) < SMC$$

$$i = WS \times if \dots\dots\dots(2-32)$$

dengan	WS	=	<i>water surplus</i> (mm/bln)
	SS	=	tampungan tanah ( <i>soil storage</i> )
	P	=	hujan (mm/bln)
	ETo	=	evapotranspirasi potensial (mm/bln)
	SM <sub>n</sub>	=	<i>Soil Moisture</i> (mm)
	SM <sub>n-1</sub>	=	<i>Soil Moisture</i> bulan sebelumnya (mm)
	SMC	=	<i>Soil Moisture Capacity</i> (mm)
	ISM	=	<i>Initial Soil Moisture</i> (mm)
	i	=	infiltrasi (mm/bln)
	if	=	koefisien infiltrasi

### 3. *Storm Run Off* (SRO)

Sejumlah kecil limpasan langsung terjadi saat hujan deras pada bulan yang tidak mengalami *water surplus*, namun besarnya *storm run off* ini hanya beberapa persen saja dari hujan. Dalam perhitungan *water balance*, *storm run off* harus dikurangi dengan hujan terlebih dahulu sebelum dikurangi dengan evapotranspirasi terbatas untuk mendapatkan *excess rainfall*. *Storm run off* akan mewakili besarnya limpasan langsung di saat *water surplus* pada bulan tersebut = 0 (Direktorat Pengairan dan Irigasi, 2006).

$$SRO = P \times PF \dots\dots\dots(2-33)$$

dengan	P	=	hujan (mm/bln)
	PF	=	<i>Percentage Factor</i> , merupakan persen hujan yang menjadi limpasan. Besarnya PF oleh Mock disarankan 5% - 10%, namun tidak menutup kemungkinan untuk meningkat secara tidak beraturan hingga mencapai 37,3%.

## F. Optimasi Parameter-Parameter yang Belum Diketahui

Dalam mencari parameter-parameter yang belum diketahui seperti SMC, ISM, IGWS, k, WIC, dan DIC digunakan aplikasi solver dalam Microsoft Excel. Adapun batasan nilai untuk parameter-parameter tersebut antara lain:

1.  $0 > \text{Soil Moisture Capacity (SMC)} > 350$
2.  $0 > \text{Initial Soil Moisture Capacity (ISM)} > 350$
3.  $0 > \text{koefisien resesi air tanah (k)} > 1$
4.  $0 > \text{koefisien infiltrasi (WIC dan DIC)} > 1$
5.  $\text{ISM} < \text{SMC}$
6.  $\text{Initial Groundwater Storage (IGWS)} > 0$

Menurut Sujono dkk (1998), solver digunakan untuk mencari penyelesaian suatu fungsi tujuan tertentu dengan berbagai kendala secara otomatis. Namun fungsi tujuan yang diberikan ke dalam *solver* perlu dioptimalakan terlebih dahulu.

Data simulasi model dapat dikatakan teliti jika terdapat nilai korelasi yang tinggi antara data hasil simulasi dengan terukur. Pada penelitian ini digunakan koefisien korelasi (R) sebagai kriteria statistik dalam pengujian model. Koefisien korelasi (R) adalah harga yang menunjukkan besarnya keterkaitan antara nilai observasi dengan nilai simulasi. Jika harga koefisien korelasi berkisar antara 0,7 hingga 1, maka menunjukkan derajat asosiasi yang tinggi. Koefisien korelasi dapat diketahui dari persamaan 2-34.

$$R = \sqrt{\frac{(Dt^2 - D^2)}{Dt^2}} \dots\dots\dots(2-34)$$

$$Dt^2 = \sum_{i=1}^{Nd} (Qobs_i - \bar{Q})^2 \dots\dots\dots(2-35)$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{Nd} Qobs_i}{N} \dots\dots\dots(2-36)$$

$$D^2 = \sum_{i=1}^{Nd} (Qobs_i - Qcal_i)^2 \dots\dots\dots(2-37)$$

dengan      Qobsi = Debit terukur  
               Qcali = Debit terhitung

$$\bar{Q} = \text{Debit terukur rata-rata}$$

$$Nd = \text{Jumlah data}$$

### G. Analisis Debit Andalan (*Dependable Flow*)

Debit andalan adalah debit minimum sungai dengan besaran tertentu yang mempunyai kemungkinan terpenuhi yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan (Triatmodjo, 2008). Debit andalan pada umumnya dianalisis sebagai debit rata-rata untuk periode bulanan.

Debit andalan yang optimal diperoleh melalui analisis dengan menggunakan metode catatan debit sungai berupa data debit terurut dari debit terbesar hingga terkecil dan prosentase probabilitas. Hasil dari tahap ini digunakan nilai terkecil yang memungkinkan sehingga didapat debit keandalan yang aman.

**Tabel 2.2 Nilai Debit Andalan Untuk Berbagai Macam Kegiatan**

Kegiatan	Keandalan
Penyediaan air minum	99%
Penyediaan air industri	95-98%
Penyediaan air irigasi	
- Daerah beriklim setengah lembab	70-85%
- Daerah beriklim kering	80-95%
Pembangkit listrik tenaga air	80-90%

(Soemarto, 1987)

Metode yang sering dipakai untuk analisis debit andalan ( $Q_{80\%}$ ) adalah metoda statistik (rangking). Penetapan rangking dilakukan menggunakan analisis frekuensi/ probabilitas dengan rumus Weibul. Prosedur analisis dimulai dengan mengurutkan seri data dari urutan terbesar sampai ke yang terkecil. Selanjutnya dirangking dimulai dengan rangking pertama ( $m=1$ ) untuk data yang paling besar dan seterusnya. Hasil kemudian dituangkan dalam kolom plotting. Adapun Rumus Weibul ditunjukkan pada persamaan 2-38.

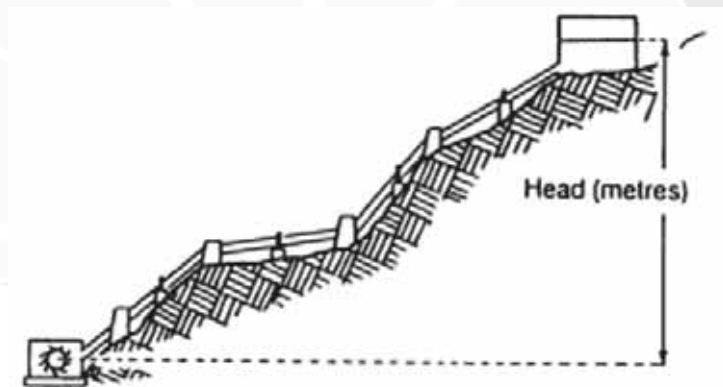
$$P_{rob} = \frac{M}{Nd + 1} \dots\dots\dots(2-38)$$

dengan: Prob = probabilitas

M = rangking  
 $N_d$  = jumlah data

### 2.1.2 Penentuan Tinggi Jatuh Efektif ( $H_{eff}$ )

Berdasarkan buku *BAIK & BURUK dari Mini/Mikro Hidro Volume 1* tahun 2010, *head* adalah perbedaan ketinggian muka air antara rencana lokasi *forebay* (bak penenang) dan as turbin di *power house* dikurangi dengan kehilangan energi (Gambar 2.1). Untuk mengukur perbedaan tinggi itu maka perlu mengetahui elevasi *forebay* dan turbin. Elevasi dari lokasi bangunan sipil PLTMH tersebut dapat diketahui dengan representasi lokasi komponen PLTMH. Dalam mengetahui bentuk medan di lokasi maka digunakan pemodelan 3 Dimensi dengan bantuan *software* AutoCAD 2013 dan Google SketchUp.



Gambar 2.1. *Head* adalah perbedaan elevasi di *forebay* dan as turbin

#### A. Pemodelan 3D

Dengan bantuan *software* AutoCAD 2013, kontur dalam peta topografi diplot mengikuti lekukan garis-garis kontur. Namun sebelum dilakukan plot pada peta topografi, skala dalam peta harus disesuaikan terlebih dahulu. Selanjutnya hasil plot tersebut diimport ke dalam *software* Google SketchUp. Melalui Google SketchUp garis kontur dalam bentuk dua dimensi itu akan *diextrude* sesuai dengan ketinggian yang tertulis dalam peta topografi. Dari hasil *extrude* akan terlihat medan atau bentuk 3 Dimensi dari suatu wilayah. Model 3 Dimensi akan memperlihatkan lembah, bukit, cekungan, ataupun gundukan sesuai dengan peta topografi.

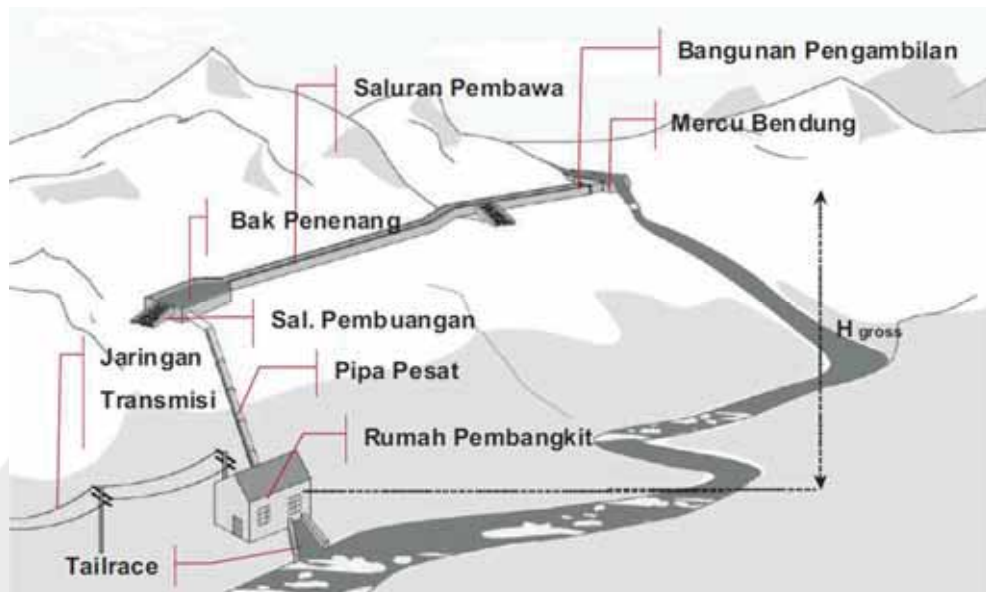
## **B. Plot Koordinat Lokasi PLTMH**

Sebelumnya telah dijelaskan bahwa pada lokasi penelitian terdapat saluran pembawa yang dapat dimanfaatkan sebagai salah satu komponen PLTMH. Dalam mempermudah proses representasi komponen PLTMH, maka saluran pembawa *eksisting* tersebut digambarkan pada pemodelan 3 dimensi. Penggambaran ini membutuhkan koordinat saluran pembawa yang dapat diketahui melalui tracking dengan GPS (*Global Position System*).

Pengukuran dengan GPS sebaiknya dilakukan pada kondisi cuaca yang baik karena GPS bekerja berdasarkan sinyal satelit. Agar lebih akurat, dilakukan pengukuran beberapa kali kemudian dirata-ratakan. Keuntungan pengukuran dengan GPS dapat dilakukan dengan waktu yang singkat.

## **C. Representasi Lokasi Komponen PLTMH**

Setelah pemodelan 3 dimensi lokasi penelitian diketahui, maka dapat dilakukan representasi lokasi komponen PLTMH pada pemodelan tersebut. Namun sebelum dilakukan representasi perlu diketahui kriteria penempatan komponen PLTMH agar diperoleh lokasi yang efisien dari segi ekonomi. *Pedoman Studi Kelayakan Bangunan Sipil* (Kurniawan. dkk, 2009) menjelaskan bahwa suatu lokasi potensi PLTMH dapat dipetakan sebagai sistem yang terdiri dari beberapa bangunan sipil seperti bendung (*weir*), bangunan pengambil (*intake*), saluran pembawa (*headrace*), bak pengendap (*settling basin*), bak penenang (*forebay*), bangunan pelimpah (*spillway*), pipa pesat (*penstock tunnel*), rumah pembangkit (*power house*), dan saluran pembuang (*tail race*) ditunjukkan pada gambar 2.2. Adapun fungsi setiap komponen PLTMH dapat dilihat pada tabel 2.3. Kondisi topografi dan stabilitas tanah menjadi poin utama yang harus dipertimbangkan dalam menentukan lokasi bangunan sipil komponen PLTMH.



**Gambar 2.2** Bagian-bagian dari skema Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

**Tabel 2.3** Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

Komponen PLTMH	Keterangan
Mercu Bendung ( <i>Weir</i> )	Membelokan arah aliran air
Bangunan Pengambilan ( <i>Intake</i> )	Mengarahkan air dari sungai masuk ke dalam saluran pembawa ( <i>headrace</i> )
Saluran Pembawa ( <i>Headrace</i> )	Mengalirkan/membawa air dari <i>intake</i> ke <i>forebay</i>
Bak Penenang ( <i>Forebay</i> )	Memperlambat aliran air
Saringan ( <i>Trash Rack</i> )	Menyaring sampah-sampah atau puing-puing agar tidak masuk ke dalam bangunan selanjutnya
Saluran Pembuangan ( <i>Spillway</i> )	Melimpahkan air dalam <i>headrace</i> kembali ke sungai
Pipa Pesat ( <i>Penstock</i> )	Membawa air dari <i>forebay</i> ke <i>power house</i>
Rumah Pembangkit ( <i>Power House</i> )	Sebagai tempat meletakkan dan menjaga turbin, generator, serta peralatan kontrol
<i>Tailrace</i>	Mengalirkan/membawa air dari turbin kembali ke sungai
Jaringan Transmisi	Mengalirkan energi listrik dari <i>power house</i> ke konsumen



Berikut ini kriteria lokasi komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) :

1. Bendung dan *Intake*

Didefinisikan sebagai bangunan melintang sungai yang bertujuan untuk menaikkan dan mengontrol tinggi air dalam sungai sehingga elevasi muka air cukup untuk dialihkan ke dalam *intake* PLTMH. Biasanya bangunan bendung dan *intake* dibangun berdekatan. Konstruksi *intake* bertujuan mengambil air dari sungai untuk dialirkan ke saluran pembawa. Masalah utama dari bangunan *intake* adalah ketersediaan debit air, baik dari kondisi debit rendah maupun banjir, seringkali adanya lumpur, pasir, dan kerikil atau dahan pohon tumbang dari sekitar sungai yang terbawa aliran. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam memilih lokasi bendung dan *intake*, dapat dilihat pada gambar 2.3.

- a. Pilih aliran sungai yang terjamin ketersediaan airnya, alirannya stabil, terhindar banjir, dan pengikisan akibat aliran sungai.
- b. Pertimbangkan stabilitas dan struktur tanahnya
- c. Jika *intake* dibangun pada lokasi irigasi maka akan mempengaruhi debit air yang digunakan dalam saluran pembangkit
- d. Pembangunan bendung umumnya di bagian sempit dari alur sungai, maka elevasi muka air banjir pada daerah itu lebih tinggi sehingga diperlukan daerah bagian melintang bendung yang diperbesar dimensinya untuk kestabilan.



Gambar 2.3 Contoh yang ideal untuk bendung, *intake*, pengendap, dan bangunan lainnya

## 2. Saluran Pembawa

Bangunan saluran pembawa berfungsi mempertahankan kestabilan debit air dari *intake* ke bak penenang (*forebay*). Ketika sebuah saluran terbuka dibangun pada sebuah lereng bukit maka beberapa hal yang perlu diperhatikan dapat dilihat pada gambar 2.4.

- a. Perhatikan topografi rute saluran, *gradient* kemiringan, dan tingkat potensi longsornya
- b. Gunakan saluran air sepanjang jalan yang tersedia dan saluran irigasi *eksisting*
- c. Bentuk saluran yang baik adalah setengah lingkaran yang akan memberikan efisiensi dalam menyalurkan debit air ke bak penenang.
- d. Pilih lokasi sisi saluran yang cukup jauh dari tebing agar sampah dan sedimen tidak masuk ke dalam saluran.



**Gambar 2.4 Contoh yang ideal untuk saluran pembawa**

### 3. Bak Penenang (*Forebay*)

Tujuan utama dari bak penenang (*forebay*) adalah menjadi tempat pengendapan dan penyaringan terakhir. Selain itu *forebay* juga menjadi tempat permulaan pipa pesat (*penstock*) yang mengendalikan aliran minimum, sebagai antisipasi aliran yang cepat pada turbin, tanpa menurunkan elevasi muka air yang berlebihan dan menyebabkan arus balik. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam memilih lokasi *forebay* (Gambar 2.5)

- a. Sedapat mungkin dipilih lokasi tanah yang relatif stabil dan apabila umumnya terdiri dari batuan keras maka diusahakan mengurangi jumlah galian.
- b. Walaupun ditempatkan pada punggung, dipilih tempat yang relatif datar
- c. Mengurungi hubungan dengan muka air yang lebih tinggi
- d. Lebar *forebay* lebih besar dari saluran pembawa. Paling tidak dua kali lebih besar.



Gambar 2.5 Contoh yang ideal untuk bak pengendap (*forebay*).

#### 4. Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat berfungsi mengubah energi potensial air di bak penenang menjadi energi kinetik air di dalam pipa pesat. Kemudian mengarahkan energi kinetik itu untuk memutar roda gerak turbin. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam memilih lokasi *penstock* ditunjukkan pada gambar 2.6.

- a. Hindari belokan-belokan karena akan mengakibatkan gaya dinamis dan statis yang cukup besar, sehingga dapat mengganggu kinerja pondasi *penstock*
- b. Topografi yang dilewati memiliki tingkat kemiringan yang memenuhi persyaratan dimana trase pipa pesat harus berada di bawah garis kemiringan energi.
- c. Pilih lokasi dengan potensi longsor yang rendah
- d. Sedapat mungkin *penstock* dirancang tidak terlalu panjang, maksimal 5 kali *head*. Selain itu *penstock* panjang akan menimbulkan *head losses* yang relatif besar.



**Gambar 2.6** Contoh yang ideal untuk *penstock*

Dalam representasi lokasi, *penstock* perlu digambar kemudian digabungkan dalam pemodelan 3 Dimensi. Untuk menggambar *penstock* diperlukan dimensinya, antara lain panjang dan diameter *penstock*. Panjang *penstock* mengikuti tampang pemodelan 3 dimensi, sedangkan menurut *Guide On How To Develop Small Hydro Power Plant* (ESHA, 2004) diameter *penstock* dapat dicari melalui persamaan 2-39.

$$D = 2,69 \left( \frac{n^2 \cdot Q^2 \cdot L}{H} \right)^{0,1875} \dots\dots\dots(2-39)$$

dengan    D    = Diameter *Penstock* (m)  
               Q    = Debit Andalan (m/s<sup>3</sup>)  
               H    = *Head* Efektif (m)  
               n    = Koefisien material  
               L    = Panjang pipa *penstock* (m)

**Tabel 2.4** Koefisien Material Pipa *Penstock* (n)

Material	Young's modulus of elasticity E(N/m <sup>2</sup> )E9	Coefficient of linear expansion a(m/m <sup>o</sup> c)E6	Ultimate tensile strength (N/m <sup>2</sup> )E6	n
Welded Steel	206	12	400	0,012
Polythylene	0,55	140	5	0,009
PVC	2,75	54	13	0,009
Asbestos Cement	n/a	8,1	n/a	0,011
Cast Iron	78,5	10	140	0,014
Ductile Iron	16,7	11	340	0,013

(Sumber: ESHA, 2004)



### 5. Rumah Pembangkit (*Power House*)

Rumah pembangkit bertujuan melindungi komponen elektrikal mekanikal seperti turbin, generator, dan panel kontrol dari segala gangguan cuaca maupun pencurian.

Dalam rumah pembangkit juga terdapat saluran pembuang aliran air yang berfungsi menghindari penggenangan bantaran sungai dan permukaan tanah sekitar rumah pembangkit. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam memilih lokasi rumah pembangkit dapat dilihat pada gambar 2.7.

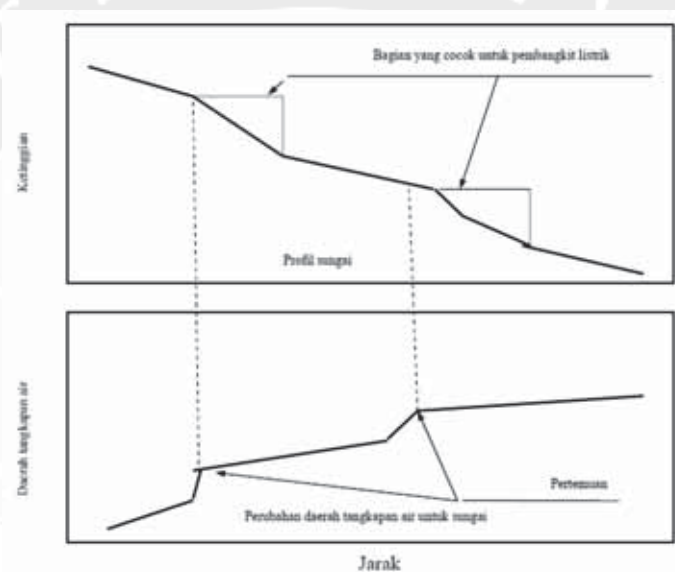
- a. Konstruksi harus berada di atas struktur tanah yang sangat stabil, tidak di lereng yang curam dan umumnya di pinggir badan sungai yang relatif rendah dan datar untuk mempermudah aliran buangan di saluran pembuangan.
- b. Memiliki akses jalan yang cukup untuk transportasi peralatan elektrikal mekanikal yang akan dipasang.
- c. Lokasi yang relatif rata, keras, dan relatif luas sehingga dapat digunakan sebagai tempat perbaikan dan perawatan peralatan.
- d. Elevasi lantai rumah pembangkit harus berada di atas elevasi muka air saat banjir yang paling besar beberapa tahun terakhir.



**Gambar 2.7** Contoh yang ideal untuk rumah pembangkit

### D. Pemilihan Lokasi

Dalam representasi lokasi komponen PLTMH, diusahakan lokasi tersebut memiliki potensi seperti wilayah sungai yang bisa dibendung atau bangunan sadap, *intake*, bak pengendap, saluran pembawa, kondisi topografi yang mendukung pembuatan *penstock*, dan secara alami terdapat *head*. Selain itu, kondisi dan stabilitas tanah calon lokasi-lokasi komponen PLTMH juga harus diperhatikan. (Gambar 2.8)



**Gambar 2.8 Kriteria pemilihan lokasi komponen PLTMH**

### E. Kehilangan Energi Aliran Melalui Pipa

Dalam Triatmodjo (2010), kehilangan energi terjadi karena adanya perubahan tekanan dan ketinggian suatu tempat. Adapun perubahan tekanan yang terjadi diakibatkan oleh gaya gesek dan berat. Kehilangan energi aliran pada pipa lingkaran dihitung dengan rumus Darcy-Weisbach yang ditunjukkan pada persamaan 2-40.

$$H_f = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g}\right) \dots \dots \dots (2-40)$$

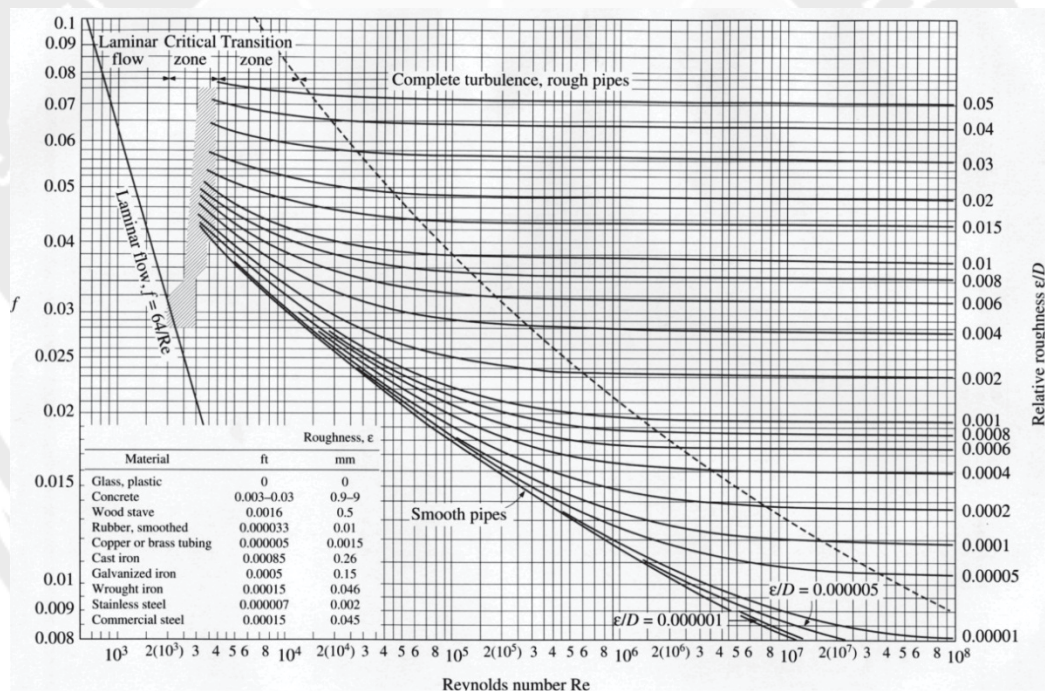
- dengan
- Hf = Kehilangan energi
  - Q = Kecepatan aliran (m/s<sup>2</sup>)
  - D = Diameter pipa (m)
  - g = Gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
  - L = Panjang pipa *penstock* (m)
  - f = Koefisien gesekan



Nilai koefisien gesekan (f) diperoleh dari pembacaan Grafik Moody (Gambar 2.9). Parameter-parameter yang dibutuhkan untuk membca grafik tersebut terdiri dari nilai kekasaran pipa ( $\epsilon$ ) dan angka Reynolds (Re). Nilai k diperoleh dari tabel kekasaran pipa, sedangkan angka Reynolds diperoleh dari persamaan 2-41.

$$Re = \left( \frac{V \cdot D}{\nu} \right) \dots\dots\dots(2-41)$$

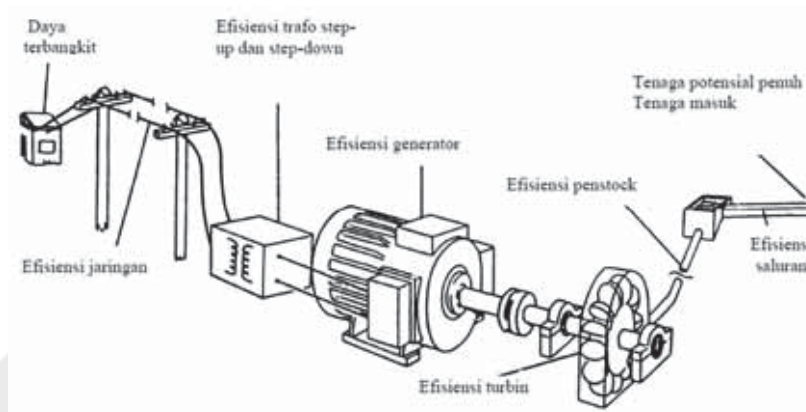
dengan V = Kecepatan aliran (m/s<sup>2</sup>)  
 v = Kekentalan kinematik (m<sup>2</sup>/s)  
 D = Diameter pipa (m)



Gambar 2.9 Grafik Moody

2.1.3 Efisiensi Sistem ( $\eta$ )

Efisiensi merupakan penggunaan tenaga yang minimum namun memperoleh hasil optimum. Dalam PLTMH efisiensi sistem dibagi dalam beberapa bagian (Gambar 2.10). Menurut buku Manual Pembangunan PLTMH tahun 2005, perhitungan efisiensi sistem dapat dihitung dengan persamaan 2-42.

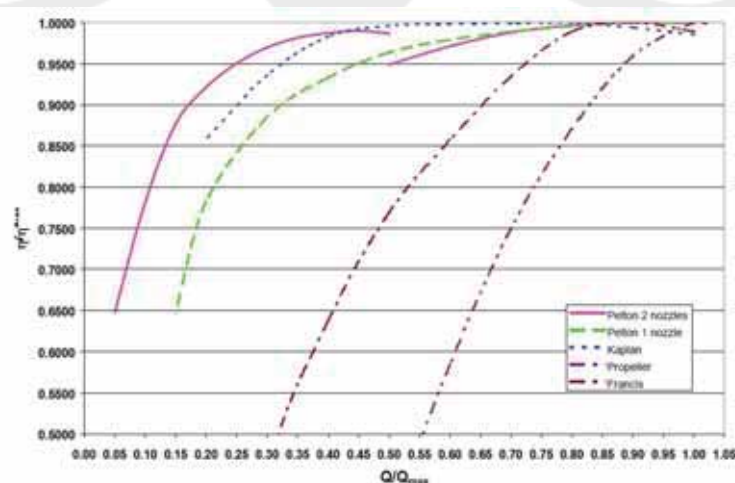


**Gambar 2.10. Efisiensi sistem untuk sebuah skema yang berjalan pada desain aliran penuh**

$$E_o = E_{konstruksi\ sipil} \times E_{penstock} \times E_{sistem\ kontrol} \times E_{generator} \times E_{turbin} \times E_{jaringan} \times E_{trafo} \dots \dots \dots (2-42)$$

- dengan:
- $E_{konstruksi\ sipil}$  : 1.0 - (panjang saluran  $\times$  0.002 ~ 0.005)/ $H_{gross}$
  - $E_{penstock}$  : 0.90 ~ 0.95 (tergantung pada panjangnya)
  - $E_{turbin}$  : 0.70 ~ 0.85 (tergantung pada tipe turbin)
  - $E_{generator}$  : 0.80 ~ 0.95 (tergantung pada kapasitas generator)
  - $E_{sistem\ kontrol}$  : 0.97
  - $E_{jaringan}$  : 0.90 ~ 0.98 (tergantung pada panjang jaringan)
  - $E_{trafo}$  : 0.98

Tipe turbin dapat diketahui setelah debit andalan dan tinggi jatuh efektif telah diperoleh (Gambar 2.11). Selanjutnya besarnya efisiensi turbin yang dipake dapat diketahui dari tabel 2.5.



**Gambar 2.11 Pemilihan tipe turbin**

**Tabel 2.5 Efisiensi turbin**

<b>Turbine type</b>	<b><i>Best efficiency</i></b>
Kaplan single regulated	0,91
Kaplan double regulated	0,93
Francis	0,94
Pelton n nozzles	0,9
Pelton 1 nozzle	0,89
Turgo	0,85

(Sumber: ESHA, 2004)

## **2.2 Kebutuhan Listrik Padukuhan ( $P_{kebutuhan}$ )**

Padukuhan Gorolangu terdiri dari 60 kepala keluarga dan fasilitas umum yang terdiri dari gereja, masjid, dan sekolah dasar. Dalam mengidentifikasi kebutuhan listrik Padukuhan, dilakukan survei langsung ke lokasi untuk mengetahui daya listrik yang selama ini terpasang.