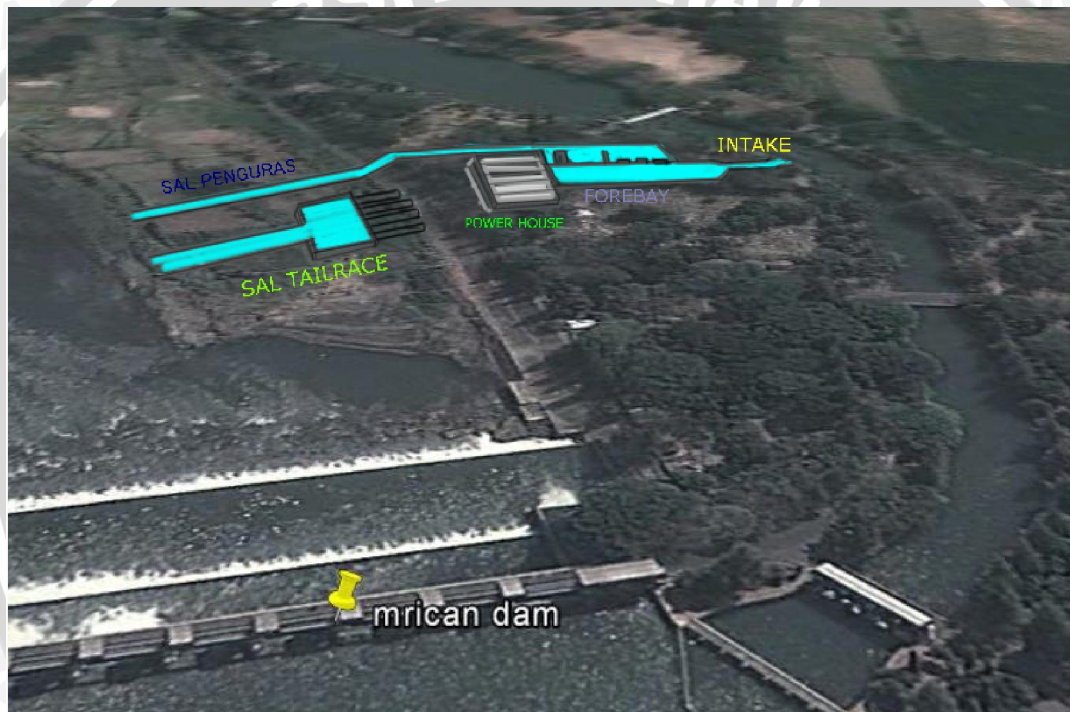


## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Konsep PLTMH Mrican

Dalam studi ini konsep yang mendasari untuk perencanaan PLTMH adalah dengan pemanfaatan debit sungai Brantas yang tak termanfaatkan untuk keperluan irigasi pada bendung gerak Mrican, debit yang tak terpakai atau *outflow* akan dialirkan melalui intake irigasi Turitunggorono dikarenakan dimensi dan kapasitas intake yang lebih besar dibandingkan dengan intake irigasi Warujayeng, selanjutnya debit inflow akan dialirkan menuju sistem PLTMH secara sistem pengalihan aliran (*diversion*) dan akan dialirkan kembali ke sungai Brantas.

Skema konsep PLTMH Mrican digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 4.1. Sketsa konsep PLTMH Mrican**

PLTMH akan direncanakan pada lahan disamping saluran primer Turitunggorono dengan memanfaatkan ketersediaan lahan yang bisa digunakan sistem PLTMH direncanakan dengan sistem tampungan kecil untuk menjaga kestabilan debit operasional pada turbin dan debit yang telah digunakan akan kembali dialirkan menuju sungai Brantas melalui saluran *tailrace* seperti pada gambar 4.1.

Konsep klasifikasi pembangkit tenaga listrik bisa didasarkan atas beberapa faktor seperti kapasitas daya terpasang, tinggi jatuh dan lain lain, klasifikasi berdasarkan

daya terpasang sangat penting untuk dilakukan karena akan berhubungan dengan sistem pengoperasian dan distribusi pembangkit listrik (*central grid* atau *isolated grid*) pada studi ini klasifikasi pembangkit listrik didasarkan tinjauan pustaka pada BAB II dan disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut:

**Tabel 4.1. Klasifikasi PLTMH Mrican**

| No. | Faktor Klasifikasi          | Nilai / (Klasifikasi)                        |
|-----|-----------------------------|--|
| 1   | Tinggi Jatuh (H)            | 6 – 7,5 m (Rendah)                           |
| 2   | Tipe Eksploitasi            | ( <i>Run Off River</i> Dengan Tandon)        |
| 3   | Daya Terpasang (Kw)         | 4 X 700 kW (Mini)                            |
| 4   | Tipe Turbin                 | Kaplan (Turbin Reaksi)                       |
| 5   | Sistem Pembawa Air          | Pipa Pesat (Bertekanan)                      |
| 6   | Penempatan Rumah Pembangkit | (Pada Sistem Pengalihan / <i>Diversion</i> ) |
| 7   | Debit Operasional           | 11 m <sup>3</sup> /dt/Turbin (Mini)          |

Sumber: analisa dan perencanaan

#### 4.2. Analisa Hidrologi

Debit yang digunakan untuk desain PLTMH adalah debit outflow atau debi yang tak digunakan untuk kebutuhan irigasi di intake Turitunggorono dan Warujayeng, analisa hidrologi dilakukan berdasarkan data pengukuran debit outflow pada bendung gerak Mrican selama kurun waktu 17 tahun mulai tahun 1997 – 2013, debit outflow didapatkan dengan persamaan:  $Q_{\text{outflow}} = Q_{\text{inflow}} - Q_{\text{irigasiwarujayeng}} - Q_{\text{irigasituritunggorono}}$ , selain debit outflow juga dibutuhkan debit kebutuhan irigasi pada daerah irigasi Warujayeng dan daerah irigasi Turitunggorono tahun 2012 sebagai acuan kebutuhan debit kebutuhan irigasi aktual pada lokasi studi, data outflow dan kebutuhan irigasi adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.2. Data Pengukuran Debit Outflow Bendung Gerak Mrican**

| No. | tahun | Outflow (m <sup>3</sup> /dt) |       |        |
|-----|-------|------------------------------|-------|--------|
|     |       | max                          | min   | rerata |
| 1   | 1997  | 445,75                       | 12,16 | 117,45 |
| 2   | 1998  | 446,06                       | 24,98 | 129,39 |
| 3   | 1999  | 361,85                       | 26,59 | 67,79  |
| 4   | 2000  | 623,47                       | 25,67 | 164,53 |
| 5   | 2001  | 783,04                       | 42,81 | 145,93 |
| 6   | 2002  | 430,07                       | 39,05 | 136,29 |
| 7   | 2003  | 420,17                       | 34,42 | 130,93 |
| 8   | 2004  | 758,43                       | 21,17 | 131,31 |
| 9   | 2005  | 389,92                       | 34,53 | 108,03 |



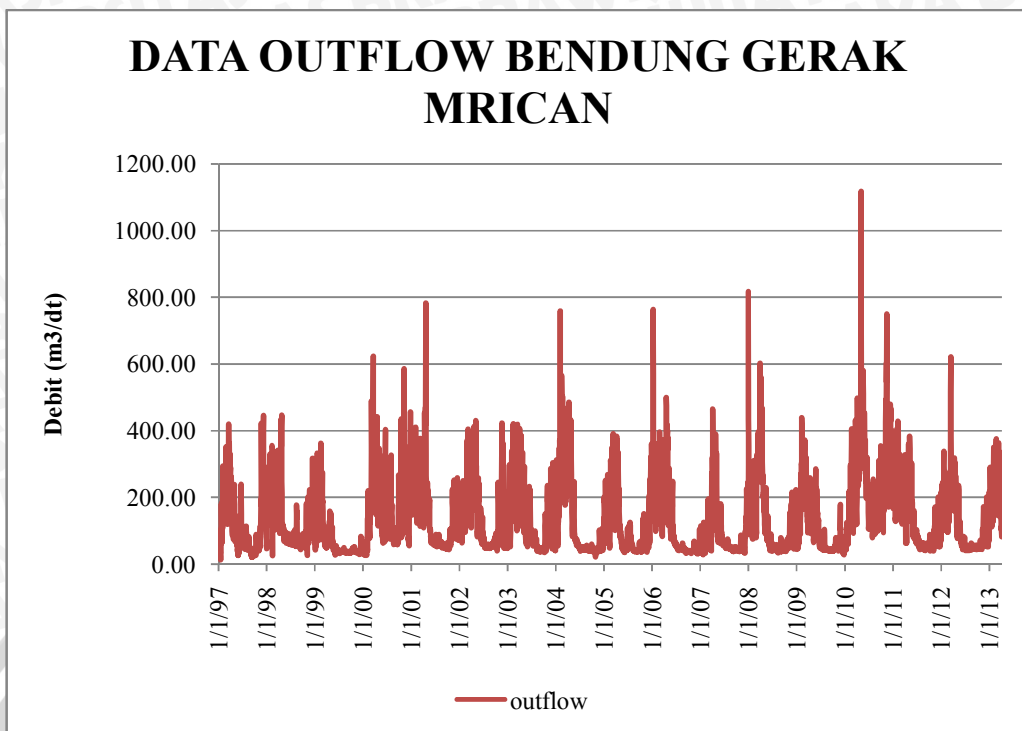
| No.    | tahun | Outflow (m <sup>3</sup> /dt) |       |        |
|--------|-------|------------------------------|-------|--------|
|        |       | max                          | min   | rerata |
| 10     | 2006  | 762,95                       | 30,09 | 121.30 |
| 11     | 2007  | 816,72                       | 27,71 | 91.57  |
| 12     | 2008  | 602,36                       | 33,35 | 126.01 |
| 13     | 2009  | 439,45                       | 27,53 | 104.24 |
| 14     | 2010  | 1117,62                      | 41,50 | 247.50 |
| 15     | 2011  | 427,74                       | 39,41 | 132.45 |
| 16     | 2012  | 621,61                       | 39,78 | 114.84 |
| 17     | 2013  | 374,66                       | 81,20 | 210.79 |
| max    |       | 1117.62                      | 81,20 | 247,50 |
| min    |       | 374.66                       | 27,53 | 91,57  |
| rerata |       | 617.00                       | 39,46 | 139,64 |

Sumber: PJT-1

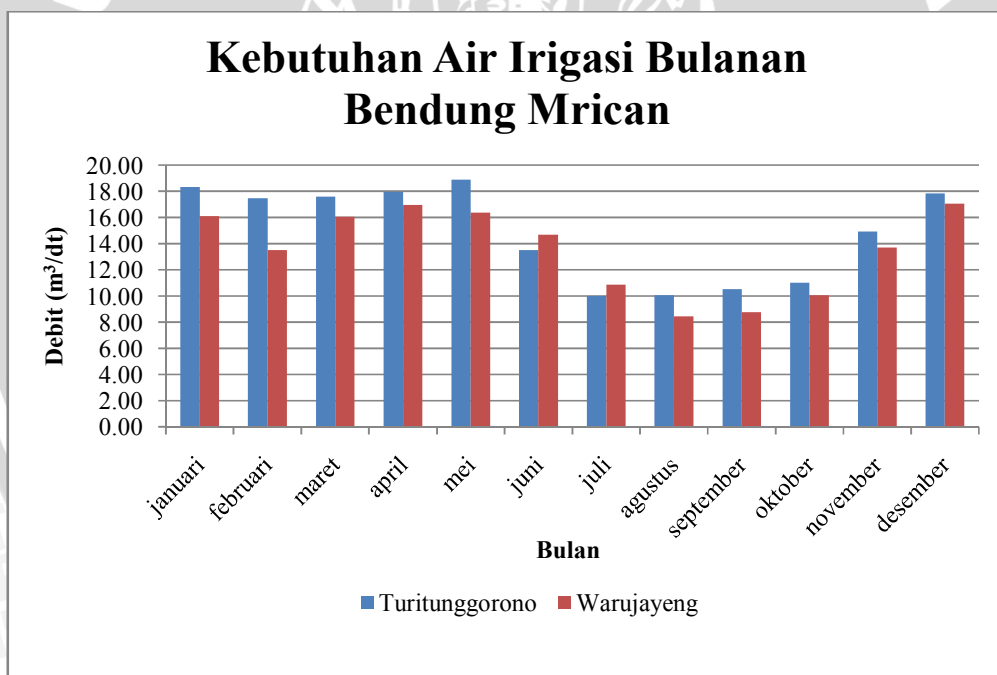
**Tabel 4.3. Data Kebutuhan Debit Irigasi DI Turitunggorono Dan DI Warujayeng**

| bulan     | Debit Irigasi (m <sup>3</sup> /dt) |       |
|-----------|------------------------------------|-------|
|           | Waru                               | Turi  |
| januari   | 16,10                              | 18,33 |
| februari  | 13,48                              | 17,47 |
| maret     | 16,04                              | 17,58 |
| april     | 16,94                              | 17,96 |
| mei       | 16,36                              | 18,90 |
| juni      | 14,68                              | 13,50 |
| juli      | 10,87                              | 10,00 |
| agustus   | 8,44                               | 10,08 |
| september | 8,76                               | 10,54 |
| oktober   | 10,06                              | 11,01 |
| november  | 13,71                              | 14,91 |
| desember  | 17,05                              | 17,84 |
| max       | 17,05                              | 18,90 |
| min       | 8,44                               | 10,00 |
| rerata    | 13,54                              | 14,84 |

Sumber: PJT-1



Gambar 4.2. Grafik Pengukuran Debit Outflow Bendung Gerak Mrican



Gambar 4.3. Grafik Kebutuhan Debit Irigasi DI Warujayeng dan DI Turitunggorono tahun 2012

Data tersebut kemudian dipergunakan untuk analisa debit andalan, analisa debit banjir rancangan dan pemilihan alternatif debit desain.

#### 4.2.1. Analisa Debit Andalan

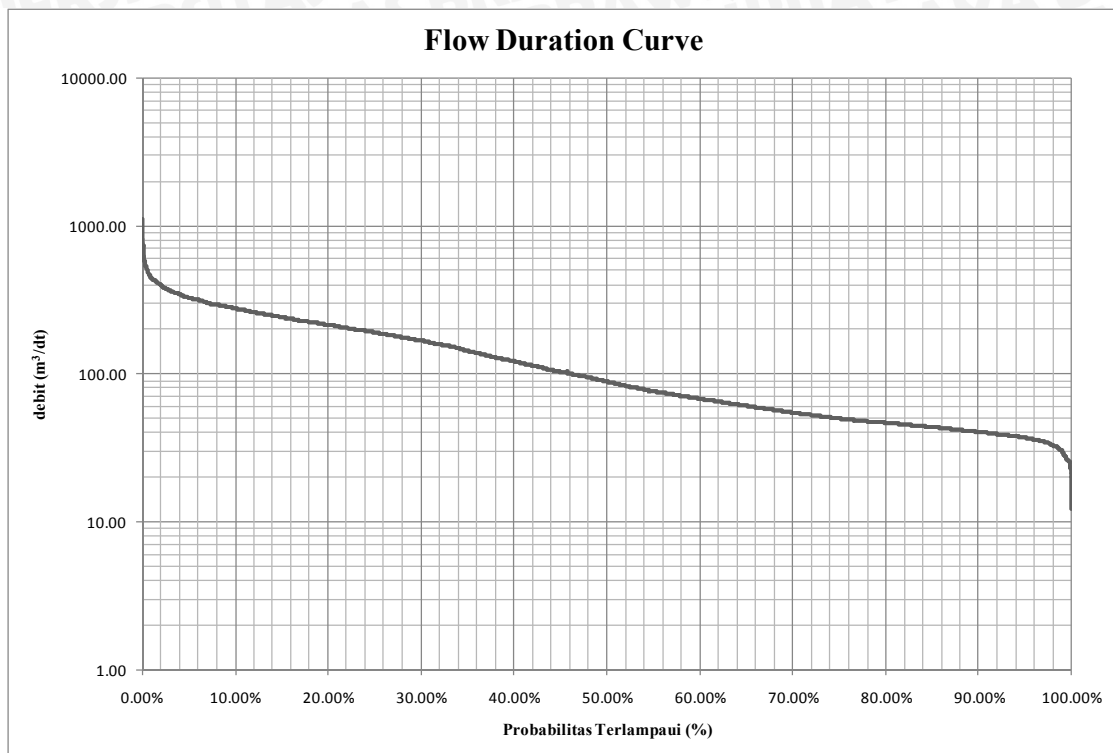
Analisa debit andalan dihitung dengan menggunakan meotde kurva durasi aliran (*flow duration curve*) dengan menggunakan persamaan weibull dimana digunakan series data outflow harian . Hasil perhitungan kurva durasi aliran adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.4. Data Debit berdasarkan keandalan**

| Probabilitas | Debit (m <sup>3</sup> /dt) | Probabilitas Terlampaui Dalam 1 Th (Hari) | Probabilitas Tidak Terlampaui Dalam 1 Th (Hari) |
|--------------|----------------------------|---|---|
| 0,05%        | 784,03                     | 0,182                                     | 364,81  |
| 0,10%        | 758,69                     | 0,36                                      | 364,63  |
| 1,00%        | 446,83                     | 3,65                                      | 361,35  |
| 10,00%       | 277,95                     | 36,5                                      | 328,5   |
| 15,00%       | 242,71                     | 54,75                                     | 310,25  |
| 20,00%       | 215,62                     | 73  | 292   |
| 25,00%       | 191,33                     | 91,25                                     | 273,75  |
| 30,00%       | 168,11                     | 109,5                                     | 255,5   |
| 35,00%       | 144,02                     | 127,75                                    | 237,25  |
| 40,00%       | 121,99                     | 146                                       | 219   |
| 45,00%       | 103,49                     | 164,25                                    | 200,75  |
| 50,00%       | 88,84                      | 182,5                                     | 182,5   |
| 55,00%       | 76,08                      | 200,75                                    | 164,25  |
| 60,00%       | 67,98                      | 219                                       | 146   |
| 65,00%       | 60,93                      | 237,25                                    | 127,75  |
| 70,00%       | 54,79                      | 255,5                                     | 109,5   |
| 75,00%       | 49,89                      | 273,75                                    | 91,25   |
| 80,00%       | 46,73                      | 292                                       | 73  |
| 85,00%       | 43,68                      | 310,25                                    | 54,75   |
| 90,00%       | 40,35                      | 328,5                                     | 36,5  |
| 95,00%       | 37,03                      | 346,75                                    | 18,25   |
| 99,98%       | 12,16                      | 364,93                                    | 0,06  |

Sumber: perhitungan





**Gambar 4.4. Kurva Durasi Aliran Pada Bendung Gerak Mrican**

Dari hasil analisa kurva durasi aliran (FDC) maka dapat diketahui keandalan debit outflow pada bendung gerak Mrican dengan kategori keandalan sebagai berikut:

- Debit aliran tinggi (0 – 10 %) : 784,03 – 277,95 m<sup>3</sup>/dt
- Debit musim basah (10 – 40 %) : 277,95 – 121,99 m<sup>3</sup>/dt
- Debit musim cukup (40 – 60 %) : 121,99 – 67,98 m<sup>3</sup>/dt
- Debit musim kering (60 – 90 %) : 67,98 – 40,35 m<sup>3</sup>/dt
- Debit aliran rendah (90 – 100 %) : 40,35 - 12.16 m<sup>3</sup>/dt

Desain debit yang akan direncanakan untuk PLTMH berada pada kisaran keandalan 80 – 100%.

#### 4.2.2. Analisa Debit Banjir Rancangan

Analisa debit banjir rancangan dihitung dengan menggunakan metode Log pearson tipe III dan uji distribusi yang digunakan adalah uji vertikal (chi kuadrat) dan uji horizontal (smirnov - kolmogrov), data yang dipergunakan adalah data debit maksimum tahunan yang diurutkan sebagai berikut:

Tabel 4.5. Data Debit Yang Diurutkan Dari Besar Ke Kecil

| No              | Tahun | Q<br>(m <sup>3</sup> /dt) | Log Q<br>(m <sup>3</sup> /dt) |
|-----------------|-------|---------------------------|-------------------------------|
| 1               | 2010  | 1117,62                   | 3.05                          |
| 2               | 2007  | 816,72                    | 2.91                          |
| 3               | 2001  | 783,04                    | 2.89                          |
| 4               | 2006  | 762,95                    | 2.88                          |
| 5               | 2004  | 758,43                    | 2.88                          |
| 6               | 2000  | 623,47                    | 2.79                          |
| 7               | 2012  | 621,61                    | 2.79                          |
| 8               | 2008  | 602,36                    | 2.78                          |
| 9               | 1998  | 446,06                    | 2.65                          |
| 10              | 1997  | 445,75                    | 2.65                          |
| 11              | 2009  | 439,45                    | 2.64                          |
| 12              | 2002  | 430,07                    | 2.63                          |
| 13              | 2011  | 427,74                    | 2.63                          |
| 14              | 2003  | 420,17                    | 2.62                          |
| 15              | 2005  | 389,92                    | 2.59                          |
| 16              | 2013  | 374,66                    | 2.57                          |
| 17              | 1999  | 361,85                    | 2.56                          |
| Jumlah          |       | 9821.87                   | 46,54                         |
| Rata-Rata       |       | 577.76                    | 2,74                          |
| Standar Deviasi |       | 210.42                    | 0,15                          |
| Kepencengan     |       | 1.13                      | 0,60                          |

Sumber: perhitungan

#### 4.1.2.1. Uji Vertikal (Chi – Kuadrat)

Prosedur perhitungan uji vertikal adalah sebagai berikut:

- Menentukan jumlah kelas data dengan persamaan  $1+3.3 \times \text{Log}(n)$ , maka kelas data :  $1 + 3,3 \times \text{Log}(17) = 5.025 \sim 5$  kelas.
- Menentukan batas interval kelas dengan cara  $100\%/ \text{jumlah kelas}$ , maka batas intervalnya adalah  $100\%/5 = 20\%$ ,  $0\% - 20\%$ ,  $20\% - 40\%$ , dan seterusnya.
- Menjumlahkan data pengamatan sebesar  $O_i$  tiap-tiap sub grup
- Menjumlahkan data dari persamaan distribusi yang digunakan sebesar  $E_i$
- Untuk tiap-tiap sub grup hitung nilai :  $(O_i - E_i)^2$  dan  $(O_i - E_i)^2/E_i$
- Menjumlahkan nilai  $(O_i - E_i)^2/E_i$  pada seluruh  $G$  sub grup untuk menentukan nilai Chi kuadrat hitung ( $X^2$  hit).

- g Dengan menentukan derajat kebebasan,  $dk = K - m - 1$ , maka derajat kebebasan =  $5 - 2 - 1 = 2$  dan  $\alpha = 5\%$ , maka dari Tabel Chi kuadrat (tabel 2.1) didapatkan  $X^2_{Cr} = 5,99$
- h Harga  $X^2$  hit dibandingkan dengan harga  $X^2_{Cr}$  dari table Chi kuadrat.

**Tabel 4.6. Pembagian Interval Kelas Uji Chi kuadrat**

| Probabilitas (%) | K     | Log Q (m <sup>3</sup> /dt) | Q (m <sup>3</sup> /dt) |
|------------------|-------|----------------------------|------------------------|
| 80               | -1,19 | 2,56                       | 366,31                 |
| 60               | -0,46 | 2,67                       | 467,71                 |
| 40               | 0,26  | 2,78                       | 597,18                 |
| 20               | 0,99  | 2,88                       | 762,49                 |

Sumber: Perhitungan

**Tabel 4.7. Perhitungan Uji Chi Kuadrat**

| Kelas | Interval (m <sup>3</sup> /dt) |   | Ej     | Oj   | (Oj-Ej) <sup>2</sup> /Ej |       |
|-------|-------------------------------|---|--------|------|--------------------------|-------|
| 1     | 0,00                          | - | 366.31 | 3.36 | 1                        | 1.65  |
| 2     | 366,31                        | - | 467.71 | 3.36 | 0                        | 3.35  |
| 3     | 467,71                        | - | 597.18 | 3.36 | 8                        | 6.41  |
| 4     | 597,18                        | - | 762.49 | 3.36 | 3                        | 0.03  |
| 5     | 762,49                        | - | ~      | 3.36 | 5                        | 0.80  |
| $X^2$ |                               |   |        |      |                          | 12,26 |

Sumber: Perhitungan

$X^2$  Hitung = 12.267 dan  $X^2$  Kritis = 5,99

Karena  $X^2$  hit >  $X^2_{Cr}$  maka hipotesa distribusi ditolak, namun dikarenakan data pencatatan adalah data dengan sistem regulasi atau pengaturan manusia maka uji vertikal dapat diabaikan atau tidak digunakan.

#### 4.1.2.2. Uji Horizontal (Smirnov Kolmogrov)

Adapun langkah perhitungan untuk Tahun 1999 adalah sebagai berikut:

1. Data debit tahunan maksimum diurutkan dari kecil ke besar.
2. Menghitung nilai  $S_n$  dengan persamaan (2-2)
3.  $S_n = \frac{1}{17+1} \times 100\% = 4,76\%$
4. Mencari nilai K dengan persamaan (2-3)

$$5. K = \frac{(\text{Log}X_i - \text{Log}X)}{S}$$



6.  $K = \frac{(2,559 - 2,74)}{0,15} = -1,226$
7. Dengan nilai  $K = -1,226$  dan Koefisien Skewness ( $C_s$ ) = 0,6 maka didapatkan  $Pr=81,003\%$
8. Menghitung nilai  $P(x)$  dengan persamaan (2-5)
9.  $P(x) = 100 - Pr$
10.  $P(x) = 100 - 81,003 = 19 \%$
11. Menghitung Selisih  $S_n(x)$  dan  $P(x)$
12.  $\Delta = S_n(x) - P(x)$
13.  $\Delta = 0,056 - 0,19 = - 0,134 \text{ \%} = 0,134$  (nilai absolut)
14. Perhitungan dilanjutkan hingga tahun ke-17, kemudian ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.8. Perhitungan Uji Smirnov Kolmogrov**

| No           | Q Max (X)<br>(m <sup>3</sup> /dt) | S <sub>n</sub> | Log X<br>(m <sup>3</sup> /dt) | K     | Pr<br>(%) | P <sub>x</sub> | S <sub>n</sub> -P <sub>x</sub> |
|--------------|-----------------------------------|----------------|-------------------------------|-------|-----------|----------------|--------------------------------|
| 1            | 361,85                            | 0.05           | 2.55                          | -1.22 | 81.01     | 0.19           | 0.13                           |
| 2            | 374,66                            | 0.11           | 2.57                          | -1.12 | 78.15     | 0.21           | 0.11                           |
| 3            | 389,92                            | 0.16           | 2.59                          | -1.00 | 74.88     | 0.25           | 0.08                           |
| 4            | 420,17                            | 0.22           | 2.62                          | -0.78 | 68.77     | 0.31           | 0.09                           |
| 5            | 427,74                            | 0.27           | 2.63                          | -0.72 | 67.31     | 0.32           | 0.04                           |
| 6            | 430,07                            | 0.33           | 2.63                          | -0.71 | 66.86     | 0.33           | 0.01                           |
| 7            | 439,45                            | 0.38           | 2.64                          | -0.64 | 65.10     | 0.34           | 0.04                           |
| 8            | 445,75                            | 0.44           | 2.64                          | -0.60 | 63.93     | 0.36           | 0.08                           |
| 9            | 446,06                            | 0.50           | 2.64                          | -0.60 | 63.87     | 0.36           | 0.13                           |
| 10           | 602,36                            | 0.55           | 2.78                          | 0.29  | 37.01     | 0.63           | 0.07                           |
| 11           | 621,61                            | 0.61           | 2.79                          | 0.38  | 33.89     | 0.66           | 0.05                           |
| 12           | 623,47                            | 0.66           | 2.79                          | 0.39  | 33.59     | 0.66           | 0.01                           |
| 13           | 758,43                            | 0.72           | 2.88                          | 0.97  | 16.67     | 0.83           | 0.11                           |
| 14           | 762,95                            | 0.77           | 2.88                          | 0.99  | 16.34     | 0.83           | 0.05                           |
| 15           | 783,04                            | 0.83           | 2.89                          | 1.07  | 14.87     | 0.85           | 0.01                           |
| 16           | 816,72                            | 0.88           | 2.91                          | 1.19  | 12.50     | 0.87           | 0.01                           |
| 17           | 1117,62                           | 0.94           | 3.04                          | 2.12  | 3.09      | 0.96           | 0.02                           |
| $\Delta$ max |                                   |                |                               |       |           |                | 0,14                           |

Sumber: Perhitungan

dari hasil uji Smirnov-Kolmogrov didapat nilai  $\Delta_{maks} = 0,139$  dan  $\Delta_{kritis} = 0,34$  (tabel 2.2) Karena harga  $\Delta_{maks} < \Delta_{cr}$ , maka penyimpangan masih dalam batas ijin, yang berarti distribusi debit pengamatan sesuai dengan model distribusi teoritis.

#### 4.1.2.3. Debit Banjir metode Log Pearson Tipe III

Berdasarkan hasil Uji Chi Square dan Smirnov-Kolmogorov, maka distribusi frekuensi curah hujan memenuhi Distribusi Log Pearson Tipe III. Adapun tahapan untuk Debit banjir rancangan dengan kala ulang 2 tahun adalah sebagai berikut:

1. Menghitung logaritma debit rancangan dengan kala ulang tertentu dengan rumus :

$$\text{Log}Q = \overline{\text{Log}Q} + K.s$$

$$\text{Log}Q = 2,737 + (0,146. - 2,51)$$

$$\text{Log}Q_2 = 2,7$$

2. Mencari antilog dari log X untuk mendapatkan hujan rancangan dengan waktu balik yang dikehendaki Tr.

$$\text{Log}Q_2 = 2,7 \quad Q_2 = 10^{2,7} = 502,03 \text{ m}^3/\text{dt}$$

**Tabel 4.9. Perhitungan Debit Banjir Rancangan Metode Log Pearson Tipe III**

| No. | Kala Ulang | Q Rerata (m <sup>3</sup> /dt) | Sd   | Cs   | Peluang (%) | K     | Debit Banjir Rancangan (m <sup>3</sup> /dt) |         |
|-----|------------|-------------------------------|------|------|-------------|-------|---|---------|
|     |            |                               |      |      |             |       | Log Q                                       | Q       |
| 1   | 2          | 2,73                          | 0,14 | 0,59 | 50          | -0,25 | 2,70  | 502,03  |
| 2   | 5          | 2,73                          | 0,14 | 0,59 | 20          | 0,90  | 2,86  | 739,56  |
| 3   | 10         | 2,73                          | 0,14 | 0,59 | 10          | 1,54  | 2,96  | 917,03  |
| 4   | 25         | 2,73                          | 0,14 | 0,59 | 4           | 2,25  | 3,06  | 1165,62 |
| 5   | 50         | 2,73                          | 0,14 | 0,59 | 2           | 2,71  | 3,13  | 1363,07 |
| 6   | 100        | 2,73                          | 0,14 | 0,59 | 1           | 3,13  | 3,19  | 1568,93 |

Sumber: perhitungan

Hasil analisa debit banjir rancangan dalam studi ini sangat jauh berbeda dibandingkan dari debit banjir desain awal pada saat pembangunan bendung gerak Mrican, debit desain (Q100th) pada saat perencanaan adalah 950 m<sup>3</sup>/dt, sedangkan debit desain (Q100th) dalam studi ini adalah 1568,93 m<sup>3</sup>/dt, dimana terjadi peningkatan nilai debit yang hampir dua kali lipat dari desain awal, hal ini menunjukkan adanya perubahan iklim ekstrim atau terjadi perubahan regulasi dari operasi waduk Sutami di hulu DAS Brantas.

#### 4.2.3. Analisa Pemilihan Alternatif Debit Desain

Debit desain memiliki peranan yang sangat penting untuk menentukan besarnya potensi energi yang bisa dibangkitkan serta desain bangunan yang akan digunakan sehingga akan sangat berpengaruh terhadap kelayakan ekonomi dalam studi ini,

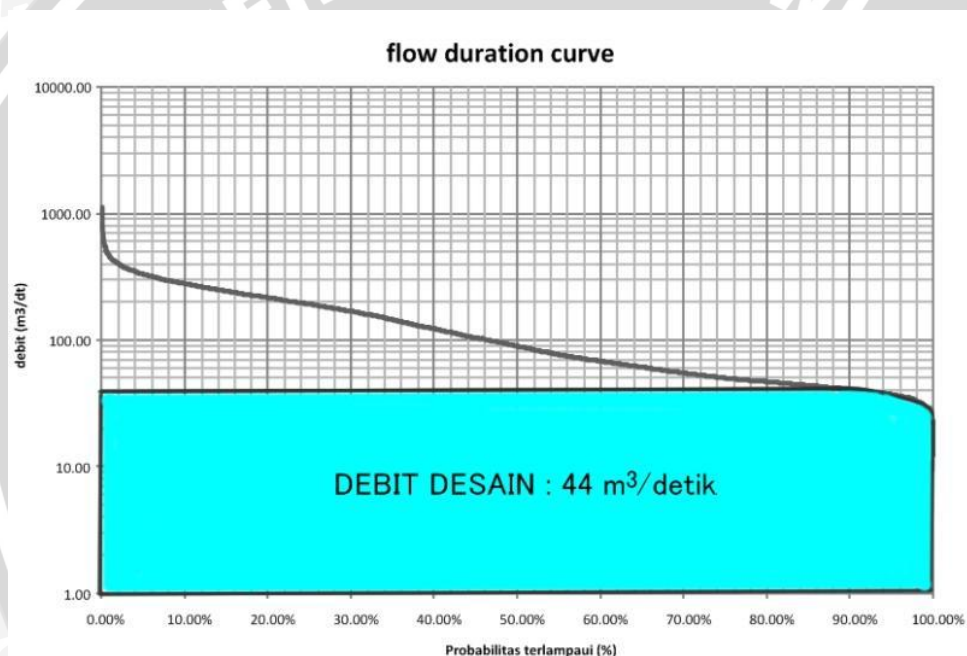


Debit desain dalam studi ini direncanakan dalam 4 alternatif debit untuk penentuan desain PLTMH dan juga pembangkitan energi yang nantinya akan berpengaruh terhadap analisa ekonomi dalam studi ini. Pemilihan debit desain didasarkan atas keandalan debit dari hasil analisa debit andalan pada sub bab 4.1.1. alternatif debit desain yang dipilih adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.10. Alternatif Debit Desain Yang Digunakan Untuk Analisa Energi**

| Alternatif | Debit m <sup>3</sup> /dt | Keandalan (%) | Jumlah Hari Terlampaui | Kegagalan (Hari) |
|------------|--------------------------|---------------|------------------------|------------------|
| 1          | 11.00                    | 100           | 365                    | 0                |
| 2          | 22.00                    | 98            | 358                    | 7                |
| 3          | 33.00                    | 95            | 347                    | 18               |
| 4          | 44.00                    | 84            | 307                    | 58               |

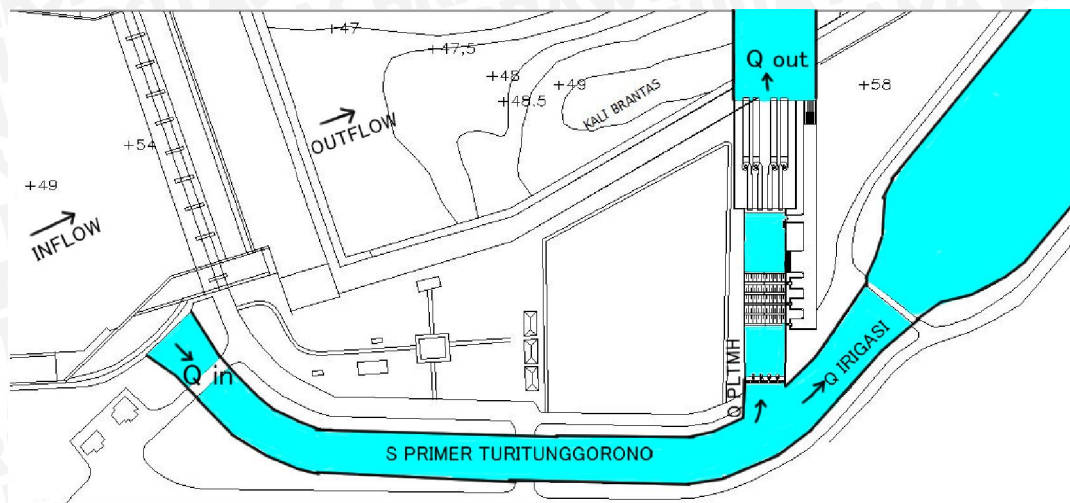
Sumber: perhitungan



**Gambar 4.5. Debit Desain Untuk Perencanaan Desain Bangunan**

Dalam studi ini digunakan 44 m<sup>3</sup>/dt untuk analisa desain awal bangunan PLTMH dan alternatif lainnya akan dianalisa pada perhitungan energi dan ekonomi sehingga akan didapatkan debit desain yang menghasilkan energi dan biaya yang optimum. 44 m<sup>3</sup>/dt dipilih berdasarkan analisa kapasitas saluran primer Turitunggorono yakni sebesar 64,7 m<sup>3</sup>/dt dan debit kebutuhan irigasi terbesar adalah 18,9 m<sup>3</sup>/dt sehingga sisa kemampuan kapasitas saluran adalah 45,8 m<sup>3</sup>/dt jadi untuk debit desain dipakai 44 m<sup>3</sup>/dt dengan direncanakan 4 buah turbin masing masing 11 m<sup>3</sup>/dt. Sehingga konsep alternatif debit desain dapat diilustrasikan pada gambar berikut:





**Gambar 4.6. Konsep Alternatif Desain Terhadap Lokasi Studi**

### 4.3. Analisa Bangunan Eksisting

Dikarenakan PLTMH dibangun pada saluran primer Turitunggorono pada bendung gerak Mrican maka perlu dianalisa beberapa faktor yang menentukan desain dan tata letak dari PLTMH, Jenis analisa yang dilakukan adalah menghitung kapasitas bangunan tersebut dan perubahan yang mungkin terjadi jika dibangun sebuah PLTMH pada lokasi studi. Kajian yang dianalisa adalah:

- a Kapasitas pintu intake eksisting Turitunggorono
- b Kapasitas saluran primer Turitunggorono
- c Kapasitas bendung gerak terhadap debit banjir rancangan
- d *Tail water level* pada bendung gerak Mrican akibat debit banjir rancangan
- e Kapasitas lahan di samping saluran primer Turitunggorono

#### 4.3.1. Analisa Kapasitas Pintu Intake Turitunggorono

Pintu intake Turitunggorono perlu dianalisa kapasitasnya untuk mengetahui kemampuan pintu untuk melewatkan debit desain baru karena adanya penambahan debit untuk operasi PLTMH sehingga debit yang melalui pintu intake akan lebih besar dari debit operasi biasanya, Pintu intake Turitunggorono memiliki data teknis sebagai berikut:

|                |  |
|----------------|--|
| Jumlah pintu   | : 4 buah                                     |
| Jenis Pintu    | : pintu sorong (sluice gate) dengan stop log |
| Ukuran (B x H) | : 4,6 meter x 2,2 meter                      |
| Elv MAN        | : +57,3                                      |
| Elv MAB        | : +57,8                                      |

- Elv dasar pintu : +55,9
- Tinggi air maks : 1,9 meter
- Tinggi air normal : 1,4 meter

Dengan data tersebut maka dapat dianalisa kapasitas pintu tersebut, debit melalui pintu untuk pintu dengan pengaliran bebas dihitung dengan persamaan (2-18). Contoh analisa kapasitas pintu intake (1 pintu) dengan muka air hulu adalah muka air normal adalah sebagai berikut:

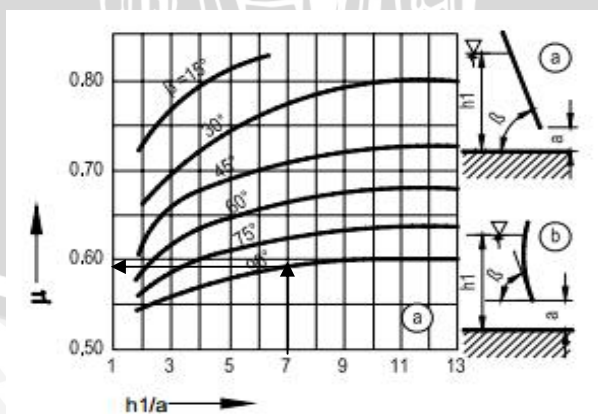
- Diketahui:
- Lebar pintu (b) : 4 meter
  - Tinggi bukaan (a) : 0,2 meter
  - Elv MA hulu : +57,3
  - Tinggi MA hulu (h1) : 1,4 meter
  - h1/a : 7



**Gambar 4.7. Aliran Melalui Pintu Sorong**

Maka debit melalui pintu adalah:

Koefisien ( $\mu$ ) didapatkan dari grafik hubungan nilai muka air hulu pintu ( $h_1$ ) dengan nilai bukaan pintu ( $a$ ) sebagai berikut:



**Gambar 4.8. Grafik Hubungan Nilai h1/a Dengan Koefisien Aliran Bebas**

Dari grafik tersebut didapatkan nilai ( $\mu$ ) adalah sebesar 0,6 maka perhitungan kapasitas pintu adalah:

$$Q = \mu b a \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$Q = 0,6 \cdot 4,6 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,4}$$

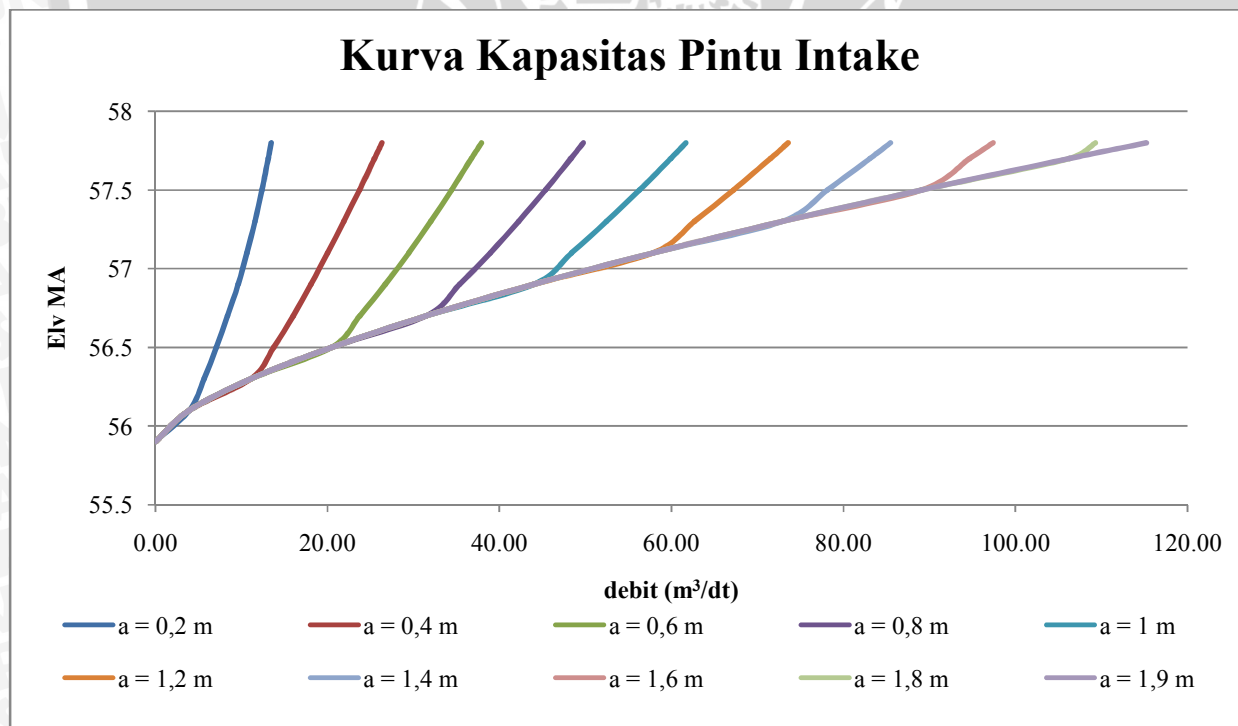
$$Q = 11,57 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Hasil analisa untuk kapasitas pintu intake Turitunggorono selanjutnya ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.11. Kapasitas Pintu Intake Turitunggorono**

| No. | Elevasi (m) | H (m) | Bukaan Pintu (m) |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |
|-----|-------------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
|     |             |       | 0,2              | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1     | 1,2   | 1,4   | 1,6   | 1,8    | 1,9    |        |
| 1   | 55,9        | 0     | 0,00             | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| 2   | 56,1        | 0,2   | 3,94             | 3,94  | 3,94  | 3,94  | 3,94  | 3,94  | 3,94  | 3,94  | 3,94   | 3,94   | 3,94   |
| 3   | 56,3        | 0,4   | 5,67             | 11,13 | 11,13 | 11,13 | 11,13 | 11,13 | 11,13 | 11,13 | 11,13  | 11,13  | 11,13  |
| 4   | 56,5        | 0,6   | 7,07             | 13,76 | 20,45 | 20,45 | 20,45 | 20,45 | 20,45 | 20,45 | 20,45  | 20,45  | 20,45  |
| 5   | 56,7        | 0,8   | 8,38             | 16,04 | 23,76 | 31,49 | 31,49 | 31,49 | 31,49 | 31,49 | 31,49  | 31,49  | 31,49  |
| 6   | 56,9        | 1     | 9,62             | 18,09 | 26,73 | 35,37 | 44,01 | 44,01 | 44,01 | 44,01 | 44,01  | 44,01  | 44,01  |
| 7   | 57,1        | 1,2   | 10,62            | 20,00 | 29,46 | 38,93 | 48,39 | 57,85 | 57,85 | 57,85 | 57,85  | 57,85  | 57,85  |
| 8   | 57,3        | 1,4   | 11,57            | 21,89 | 32,02 | 42,24 | 52,46 | 62,68 | 72,90 | 72,90 | 72,90  | 72,90  | 72,90  |
| 9   | 57,5        | 1,6   | 12,37            | 23,71 | 34,43 | 45,36 | 56,29 | 67,22 | 78,14 | 89,07 | 89,07  | 89,07  | 89,07  |
| 10  | 57,7        | 1,8   | 13,12            | 25,48 | 36,74 | 48,33 | 59,92 | 71,51 | 83,10 | 94,69 | 106,28 | 106,28 | 106,28 |
| 11  | 57,8        | 1,9   | 13,48            | 26,34 | 37,92 | 49,77 | 61,68 | 73,58 | 85,49 | 97,40 | 109,31 | 115,26 | 115,26 |

Sumber: Perhitungan



**Gambar 4.9. Kurva kapasitas Pintu intake Turitunggorono**



Sehingga kapasitas debit maksimum yang dapat dialirkan oleh pintu intake Turitunggoro adalah sebesar  $115,26 \text{ m}^3/\text{dt}$ , sehingga untuk mengalirkan debit irigasi dengan debit PLTMH sebesar  $62,9 \text{ m}^3/\text{dt}$  ( $44 \text{ m}^3/\text{dt} + 18,9 \text{ m}^3/\text{dt}$ ) maka pintu intake harus dioperasikan dengan bukaan setinggi 1,1 meter pada kondisi elevasi muka air +57,8 pada tiap pintu intake Turitunggoro.

#### 4.3.2. Analisa Kapasitas Saluran Primer Turitunggoro

Saluran primer Turitunggoro perlu dianalisa untuk mengetahui apakah perubahan debit operasional akibat penambahan debit untuk PLTMH bisa disalurkan melalui saluran primer Turitunggoro, Saluran primer Turitunggoro memiliki data teknis sebagai berikut:

|                             |                                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Kapasitas saluran           | : $64,7 \text{ m}^3/\text{dt}$   |
| Bentuk saluran              | : persegi ( <i>rectangular</i> ) |
| Jenis pasangan              | : beton                          |
| Lebar dasar (B)             | : 22 meter                       |
| Kemiringan (S)              | : 0,00035                        |
| Elv dasar                   | : +55,9                          |
| Elv Muka air penggelontoran | : +57,8                          |
| Elv Muka air normal         | : +57,3                          |
| Tinggi saluran              | : 2,1 m                          |
| Tinggi muka air             | : 1,9 m                          |

Dengan menggunakan analisa hidrolika dapat dihitung kapasitas saluran primer Turitunggoro sebagai berikut:

$$Q = A \times V$$

$$Q = A \left( \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \right)$$

$$R = A/P$$

$$R = (bxh)/(b+2h) = (22 \times 1,9)/(22 + 2 \times 1,9) = 1,62$$

$$n = 0,017$$

$$Q = (22 \times 1,9) \left( \frac{1}{0,017} 1,62^{2/3} 0,00035^{1/2} \right)$$

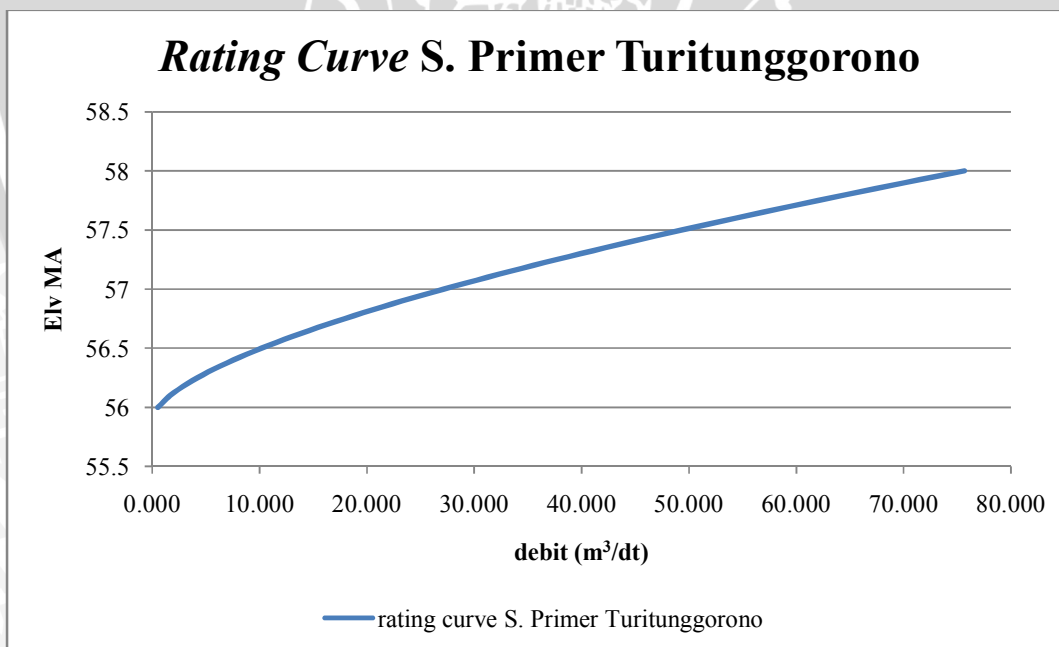
$$Q = 64,7 \text{ m}^3/\text{dt}$$

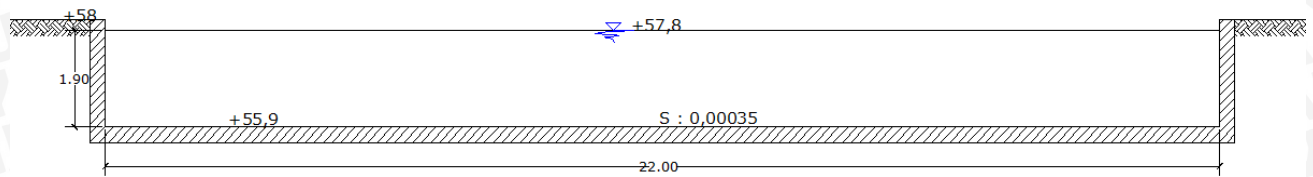
Maka kapasitas saluran primer Turitunggoro pada untuk tiap tinggi muka air ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.12. Kapasitas Saluran Primer Turitunggorono**

| no. | elv MA<br>(m) | H<br>(m) | A<br>(m <sup>2</sup> ) | P<br>(m) | R<br>(m) | V<br>(m/dt) | Q<br>(m <sup>3</sup> /dt) |
|-----|---------------|----------|------------------------|----------|----------|-------------|---------------------------|
| 1   | 56            | 0,1      | 2,2                    | 22,2     | 0,099    | 0,240       | 0,529                     |
| 2   | 56,1          | 0,2      | 4,4                    | 22,4     | 0,196    | 0,379       | 1,668                     |
| 3   | 56,2          | 0,3      | 6,6                    | 22,6     | 0,292    | 0,494       | 3,260                     |
| 4   | 56,3          | 0,4      | 8,8                    | 22,8     | 0,386    | 0,595       | 5,234                     |
| 5   | 56,4          | 0,5      | 11                     | 23       | 0,478    | 0,686       | 7,548                     |
| 6   | 56,5          | 0,6      | 13,2                   | 23,2     | 0,569    | 0,770       | 10,170                    |
| 7   | 56,6          | 0,7      | 15,4                   | 23,4     | 0,658    | 0,849       | 13,074                    |
| 8   | 56,7          | 0,8      | 17,6                   | 23,6     | 0,746    | 0,923       | 16,241                    |
| 9   | 56,8          | 0,9      | 19,8                   | 23,8     | 0,832    | 0,993       | 19,652                    |
| 10  | 56,9          | 1        | 22                     | 24       | 0,917    | 1,059       | 23,295                    |
| 11  | 57            | 1,1      | 24,2                   | 24,2     | 1,000    | 1,122       | 27,154                    |
| 12  | 57,1          | 1,2      | 26,4                   | 24,4     | 1,082    | 1,183       | 31,220                    |
| 13  | 57,2          | 1,3      | 28,6                   | 24,6     | 1,163    | 1,241       | 35,482                    |
| 14  | 57,3          | 1,4      | 30,8                   | 24,8     | 1,242    | 1,296       | 39,931                    |
| 15  | 57,4          | 1,5      | 33                     | 25       | 1,320    | 1,350       | 44,557                    |
| 16  | 57,5          | 1,6      | 35,2                   | 25,2     | 1,397    | 1,402       | 49,355                    |
| 17  | 57,6          | 1,7      | 37,4                   | 25,4     | 1,472    | 1,452       | 54,315                    |
| 18  | 57,7          | 1,8      | 39,6                   | 25,6     | 1,547    | 1,501       | 59,432                    |
| 19  | 57,8          | 1,9      | 41,8                   | 25,8     | 1,620    | 1,548       | 64,700                    |
| 20  | 57,9          | 2        | 44                     | 26       | 1,692    | 1,593       | 70,113                    |
| 21  | 58            | 2,1      | 46,2                   | 26,2     | 1,763    | 1,638       | 75,665                    |

Sumber: Perhitungan

**Gambar 4.10. Rating Curve Saluran Primer Turitunggorono**



**Gambar 4.11. Bentuk Tipikal Saluran Primer Turitunggorono**

Dengan data tersebut maka dapat dianalisa kapasitas saluran terhadap alternatif debit desain yang akan digunakan untuk PLTMH, hasil analisa kapasitas saluran ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.13. Analisa Kapasitas Saluran Terhadap Alternatif Debit Desain**

| Kapasitas Saluran (m <sup>3</sup> /dt) | Debit Desain (m <sup>3</sup> /dt) | Debit Irigasi (m <sup>3</sup> /dt) | Debit Total (m <sup>3</sup> /dt) | Elv MA | tinggi muka air (m) | tinggi jagaan (m) |
|--|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------|---------------------|-------------------|
| 64,7                                   | 11,00                             | 18,9                               | 29,9                             | 57.1   | 1,2                 | 0,9               |
| 64,7                                   | 22,00                             | 18,9                               | 40,9                             | 57.3   | 1,4                 | 0,7               |
| 64,7                                   | 33,00                             | 18,9                               | 51,9                             | 57.6   | 1,7                 | 0,4               |
| 64,7                                   | 44,00                             | 18,9                               | 62,9                             | 57.8   | 1,9                 | 0,2               |

Sumber: perhitungan

#### 4.3.3. Analisa Kapasitas Bendung Gerak Terhadap Debit Banjir Rancangan

Kapasitas pintu utama pada bendung gerak Mrican perlu dianalisa untuk mengetahui atau mengevaluasi kemampuan bendung gerak Mrican dalam pengendalian banjir sehingga dapat dijadikan pertimbangan dalam mendesain komponen bangunan PLTMH (saluran *tailrace*) pada bantaran sungai Brantas di hilir bendung gerak Mrican.

Bendung gerak Mrican memiliki data teknis sebagai berikut:

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Tipe bendung            | : bendung gerak dari beton                             |
| Panjang                 | : 159,8 meter  |
| Lebar                   | : 74,5 meter   |
| Elv MAN                 | : +57,3  |
| Elv MAB                 | : +57,8  |
| Tipe pintu              | : pintu vertikal dengan roda putar dan <i>stop log</i> |
| Jumlah pintu utama      | : 9 buah   |
| Jumlah pintu penguras   | : 4 buah   |
| Elevasi ambang utama    | : +54  |
| Elevasi ambang penguras | : +53,3  |
| Dimensi pintu utama     | : 13,2 meter x 3,85 meter                              |



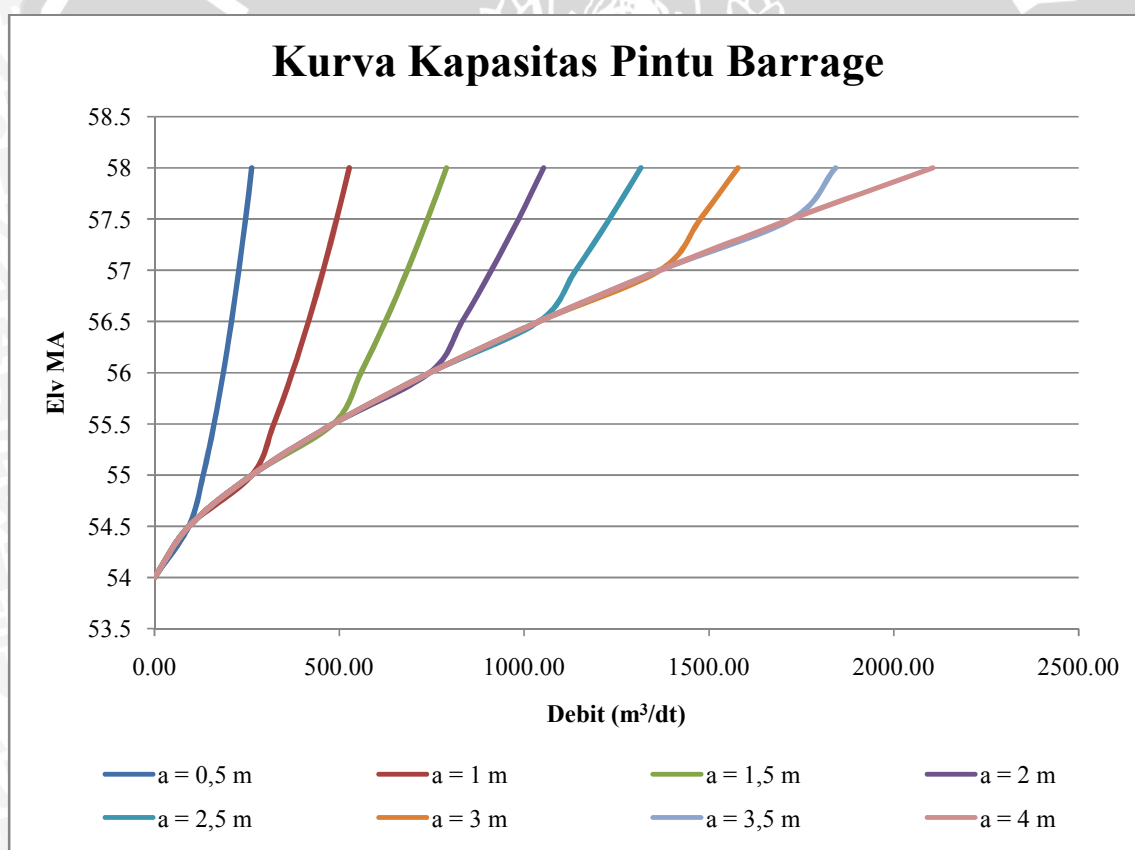
Dimensi pintu penguras : 5 meter x 2,3 meter

Dengan data tersebut maka dapat dianalisa kapasitas bendung gerak, hasil analisa ditabelkan sebagai berikut:

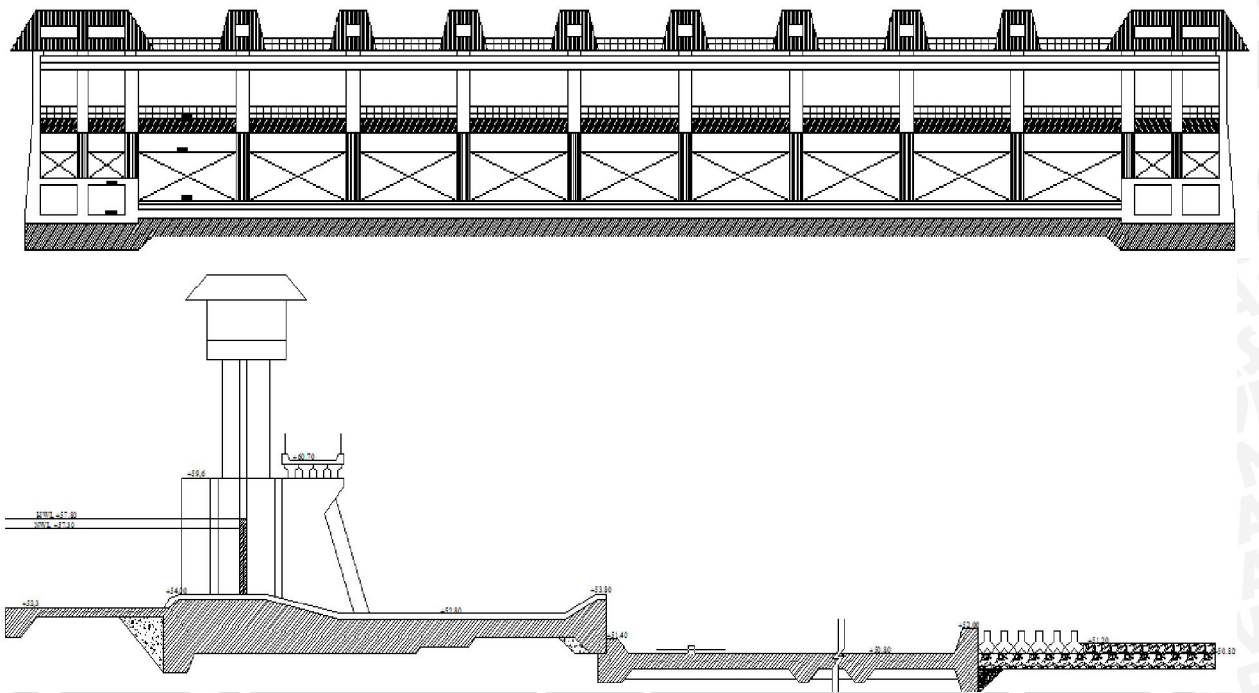
**Tabel 4.14. Analisa Kapasitas Bendung Gerak Terhadap Debit Banjir Rancangan**

| No. | Elevasi MA | Tinggi MA (H) (m) | Bukaan Pintu (m) |        |        |         |         |         |         |         |
|-----|------------|-------------------|------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|     |            |                   | 0.5              | 1      | 1.5    | 2       | 2.5     | 3       | 3.5     | 4       |
| 1   | 54         | 0                 | 0,00             | 0,00   | 0,00   | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00    |
| 2   | 54,5       | 0,5               | 93,02            | 93,02  | 93,02  | 93,02   | 93,02   | 93,02   | 93,02   | 93,02   |
| 3   | 55         | 1                 | 131,55           | 263,11 | 263,11 | 263,11  | 263,11  | 263,11  | 263,11  | 263,11  |
| 4   | 55,5       | 1,5               | 161,12           | 322,24 | 483,36 | 483,36  | 483,36  | 483,36  | 483,36  | 483,36  |
| 5   | 56         | 2                 | 186,05           | 372,09 | 558,14 | 744,19  | 744,19  | 744,19  | 744,19  | 744,19  |
| 6   | 56,5       | 2,5               | 208,01           | 416,01 | 624,02 | 832,02  | 1040,03 | 1040,03 | 1040,03 | 1040,03 |
| 7   | 57         | 3                 | 227,86           | 455,72 | 683,58 | 911,44  | 1139,30 | 1367,16 | 1367,16 | 1367,16 |
| 8   | 57,5       | 3,5               | 246,12           | 492,23 | 738,35 | 984,46  | 1230,58 | 1476,70 | 1722,81 | 1722,81 |
| 9   | 58         | 4                 | 263,11           | 526,22 | 789,33 | 1052,44 | 1315,55 | 1578,65 | 1841,76 | 2104,87 |

Sumber: perhitungan



**Gambar 4.12. Kurva kapasitas Bendung Gerak Mrican**



**Gambar 4.13. Pintu Bendung Gerak Mrican**

Dari hasil analisa diatas dapat disimpulkan bahwa bendung gerak Mrican dapat mengalirkan debit banjir sampai dengan debit  $2104,87\text{m}^3/\text{dt}$  yang dimana lebih besar dari Q100th debit rancangan sebesar  $1568.93\text{ m}^3/\text{dt}$ .

#### **4.3.4. Analisa Tail Water Level (TWL) Pada Hilir Bendung Gerak Mrican**

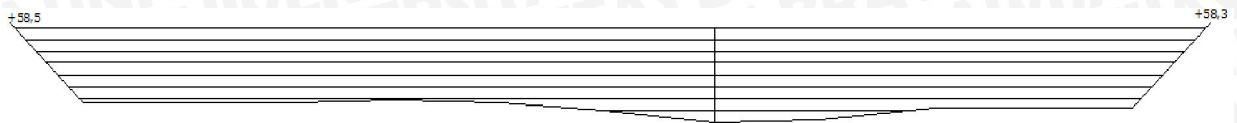
Tail water level pada hilir bendung gerak Mrican dihitung dengan menggunakan persamaan manning (2-16) dengan menggunakan penampang melintang sungai pada lokasi rencana PLTMH. Lokasi rencana PLTMH terletak pada jarak kurang lebih 250 meter dari bendung gerak Mrican sehingga tidak akan terkena dampak dari loncatan hidrolik, data teknis yang digunakan adalah sebagai berikut:

Debit banjir rancangan

|           |                                  |
|-----------|----------------------------------|
| Q minimum | : $12,6\text{ m}^3/\text{dt}$    |
| Q normal  | : $139,64\text{ m}^3/\text{dt}$  |
| Q 2th     | : $502,03\text{ m}^3/\text{dt}$  |
| Q 5th     | : $739,56\text{ m}^3/\text{dt}$  |
| Q 10th    | : $917,03\text{ m}^3/\text{dt}$  |
| Q25th     | : $1165,62\text{ m}^3/\text{dt}$ |
| Q50th     | : $1363,07\text{ m}^3/\text{dt}$ |

Q100th : 1568,93 m<sup>3</sup>/dt

Berikut adalah gambar penampang melintang sungai lokasi PLTMH:



|         |        |        |        |        |        |        |        |       |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| JARAK   | 44.89  | 22.29  | 22.29  | 22.29  | 22.29  | 22.29  | 22.29  | 45.46 |
| ELEVASI | +49,20 | +49,40 | +49,20 | +48,50 | +47,50 | +47,70 | +48,70 |       |

**Gambar 4.14. Potongan Melintang Hilir Bendung Mrican Di Lokasi Rencana PLTMH**

Dari data lokasi eksisting didapatkan:

nilai kemiringan sungai (S) : 0,005

koefisien manning (n) : 0,035 (saluran alamiah)

elevasi dasar sungai : +47,5

maka dapat dihitung besarnya tinggi muka air dengan persamaan manning,

berikut adalah contoh perhitungannya:

diketahui:

tinggi muka air (H) : 1 m

Luas (A) : 133,55 m<sup>2</sup> (didapat dari gambar 4.14.)

Keliling basah (P) : 411,94 m (didapat dari gambar 4.14.)

Jari jari hidrolis (R) : A/P

: 133,55/411,94 : 0,32

Kecepatan (V)

:  $1/n R^{2/3} S^{1/2}$

:  $1/0.035 0,32^{2/3} 0,005^{1/2}$

: 0,83 m/dt

Debit (Q)

: A . V

: 133,55 . 0,83

: 111,42 m<sup>3</sup>/dt

Bilangan Froude (F) :  $V/(gH)^{0,5}$

:  $0,83 / (9,81 \cdot 1)^{0,5}$

: 0,27 (subkritis)

Dengan cara yang sama maka didapatkan parameter profil aliran pada hilir sungai bendung Mrican, perhitungan selanjutnya ditabelkan sebagai berikut:



**Tabel 4.15. Perhitungan Profil Muka Air Pada Hilir Sungai Bendung Mrican**

| no. | H (m) | A (m <sup>2</sup> ) | P (m)  | R    | V (m/dt) | Q (m <sup>3</sup> /dt) | F    | jenis aliran |
|-----|-------|---------------------|--------|------|----------|------------------------|------|--------------|
| 1   | 1     | 133,55              | 411,94 | 0,32 | 0,83     | 111,42                 | 0,27 | subkritis    |
| 2   | 2     | 339,58              | 415,17 | 0,82 | 1,55     | 525,01                 | 0,35 | subkritis    |
| 3   | 3     | 547,91              | 420,83 | 1,30 | 2,11     | 1,154,87               | 0,39 | subkritis    |
| 4   | 4     | 758,55              | 426,19 | 1,78 | 2,60     | 1,969,38               | 0,41 | subkritis    |
| 5   | 5     | 971,50              | 431,70 | 2,25 | 3,04     | 2,949,21               | 0,43 | subkritis    |
| 6   | 6     | 1,186,75            | 438,60 | 2,71 | 3,43     | 4,073,61               | 0,45 | subkritis    |
| 7   | 7     | 1,404,32            | 442,27 | 3,18 | 3,82     | 5,363,01               | 0,46 | subkritis    |

Sumber: perhitungan

Maka dengan mengetahui profil muka air pada hilir sungai dapat diketahui elevasi muka air pada debit banjir untuk tiap kala ulang dengan cara menginterpolasikan besarnya debit sehingga diketahui tinggi muka air yang selanjutnya dipergunakan sebagai elevasi *tail water level* (TWL), perhitungan elevasi TWL ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.16. Perhitungan Elevasi TWL Untuk Tiap Debit Banjir Rancangan**

| no | kala ulang (tr) | Q (m <sup>3</sup> /dt) | H Banjir (m) | Elv TWL (m) |
|----|-----------------|------------------------|--------------|-------------|
| 1  | 2               | 502,03                 | 1,79         | 49,29       |
| 2  | 5               | 739,56                 | 2,19         | 49,69       |
| 3  | 10              | 917,04                 | 2,44         | 49,94       |
| 4  | 25              | 1,165,62               | 2,79         | 50,29       |
| 5  | 50              | 1,363,07               | 3,05         | 50,55       |
| 6  | 100             | 1,568,93               | 3,27         | 50,77       |
| 7  | rata rata       | 139,64                 | 1,03         | 48,53       |
| 8  | min             | 12,60                  | 0,76         | 48,26       |

Sumber: perhitungan

Untuk selanjutnya elevasi TWL dipergunakan sebagai dasar perencanaan tinggi jatuh efektif, titik pusat turbin dan perencanaan saluran *tailrace*.

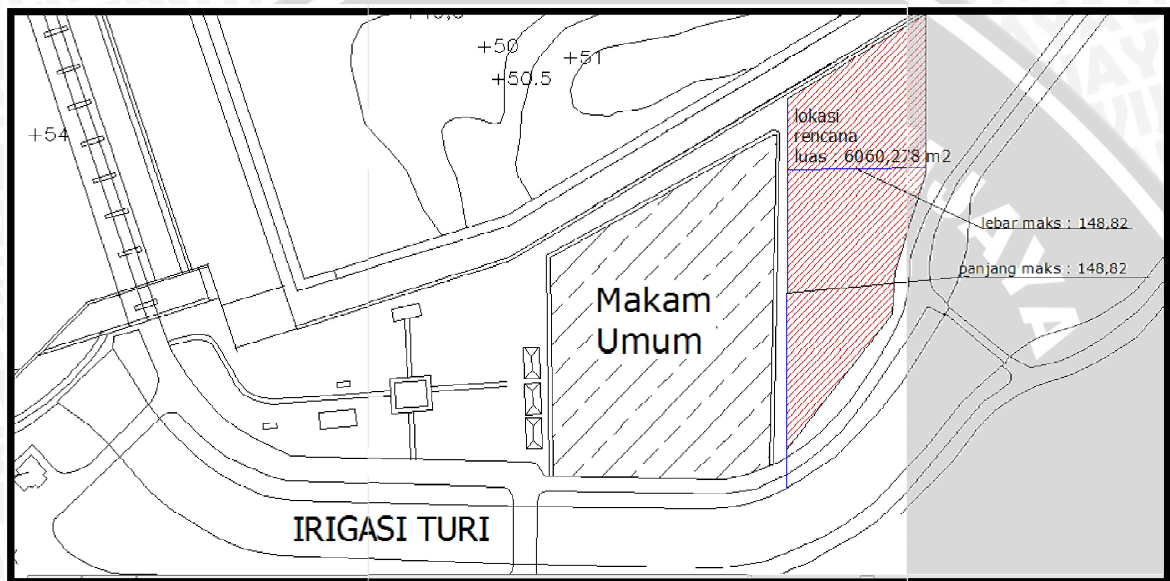
#### 4.3.5. Analisa Kapasitas Lahan Di Samping Saluran Primer Turitunggorono

Selain faktor kapasitas, kapasitas lahan juga merupakan faktor yang menentukan dalam perencanaan tata letak dari komponen bangunan PLTMH, PLTMH direncanakan dibangun pada lahan di samping saluran primer Turitunggorono dengan data teknis kapasitas lokasi yang dapat dipergunakan sebagai berikut:

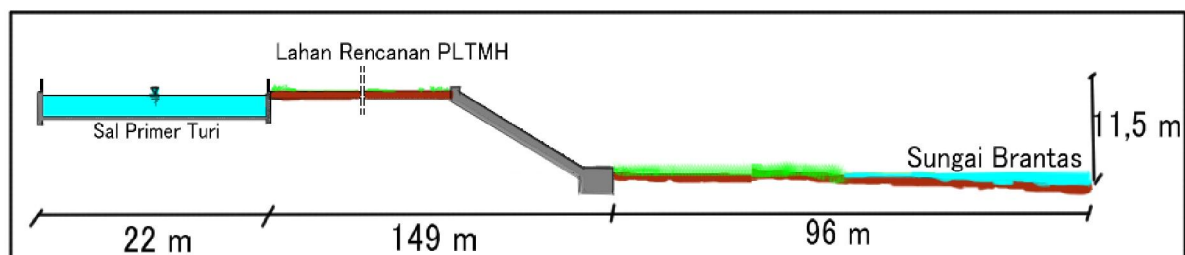
Luas area : 6060,278 m<sup>2</sup>

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Panjang maksimum          | : 148,82 m (panjang dari saluran primer menuju dinding batas luar ) |
| Lebar maksimum            | : 63,98 m (lebar dari tembok makam sampai kantong lumpur)           |
| Elevasi muka tanah        | : +58   |
| Elevasi terendah (sungai) | : +49,5   |
| Tinggi maksimum           | : 8,5 m (dari elevasi muka tanah sampai elevasi sungai Brantas)     |

Untuk lebih jelas kapasitas lahan ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.15. Denah lokasi rencana PLTMH



Gambar 4.16. Lokasi Rencana PLTMH Tampak Samping

#### 4.4. Perencanaan Bangunan Sipil

Perencanaan bangunan sipil dalam studi ini meliputi:

##### a. Bangunan pengambilan

Bangunan pengambilan dalam studi ini menggunakan pintu pengambilan bebas (*free intake*) dikarenakan air akan diambil secara bebas dari saluran



primer Turitunggorono, komponen bangunan pengambilan meliputi: pintu sorong dan *trashrack*.

b Bangunan tengah (*mid structure*)

Bangunan tengah adalah bangunan yang posisinya terletak pada tengah formasi bangunan PLTMH, dalam studi ini menggunakan bak penenang (*forebay tank*), bak penangkap sedimen (*settling tank*), dan bangunan penguras meliputi culvert, pelimpah samping, pinu penguras, dan terjunan.

c Bangunan pembawa

Bangunan pembawa dalam studi ini menggunakan saluran tertutup (pipa pesat). pipa pesat bertujuan untuk mengarahkan aliran bertekanan menuju turbin selain itu pada inlet pipa pesat direncanakan penyaring (*screen*).

d Bangunan pembuang

Bangunan pembuang dalam studi ini menggunakan saluran *tailrace*, desain bentuk dari saluran ini bisa saja berbentuk saluran terbuka atau tertutup sesuai dengan kondisi lokasi perencanaan.

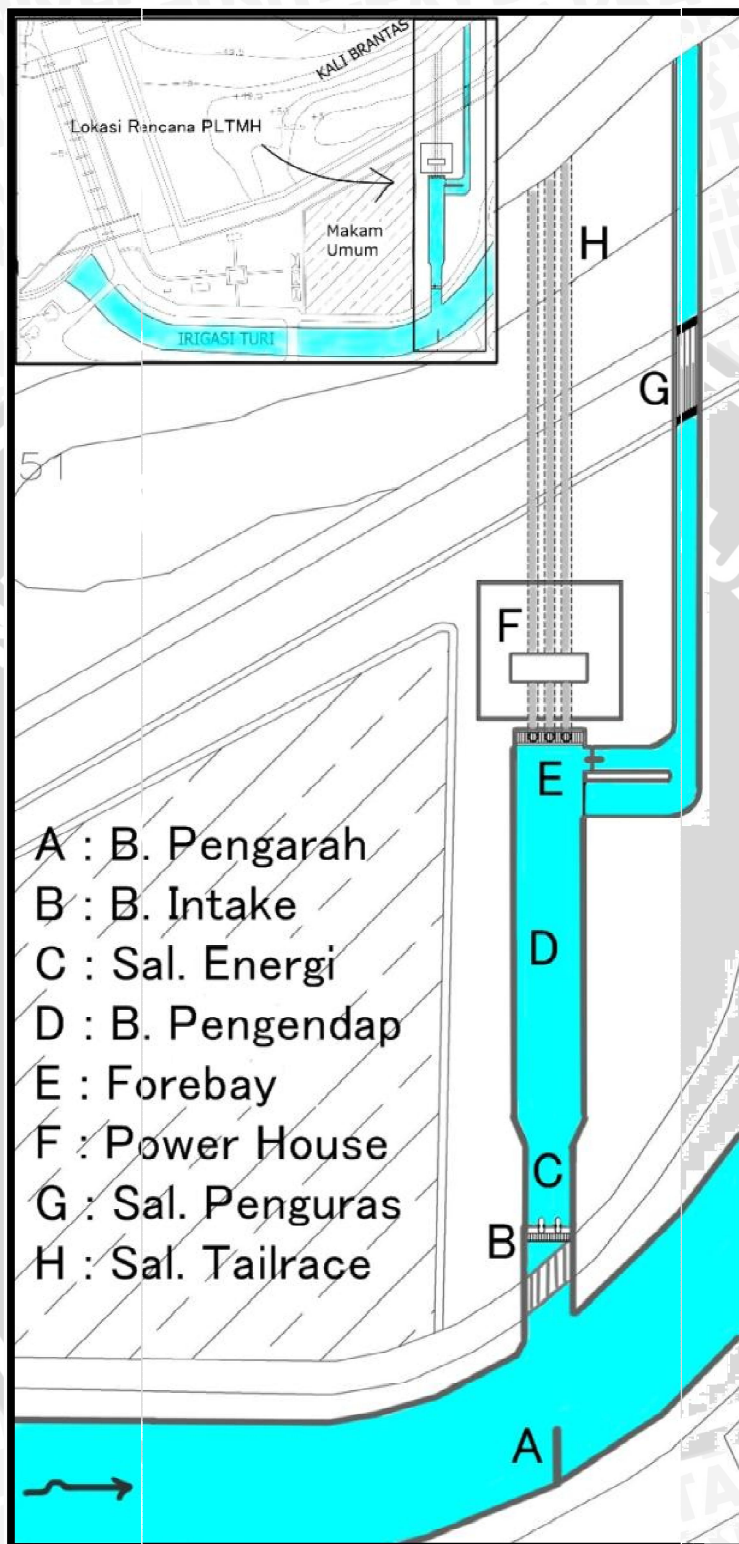
Rencanan komponen bangunan sipil secara berurutan ditunjukkan pada gambar ilustrasi berikut:

|   |  |
|---|--|
|  | <p><b>Bangunan Pengambilan (intake)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Pintu Pengambilan</li> <li>•Trash Rack</li> </ul>                                      |
|  | <p><b>Bangunan Tengah</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Bak Penangkap Sedimen</li> <li>•Bak Penenang (<i>Forebay</i>)</li> <li>•Bangunan Penguras</li> </ul> |
|  | <p><b>Bangunan Pembawa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Pipa Pesat (<i>Penstock</i>)</li> <li>•Inlet Pipa Pesat (<i>Screen + Gate</i>)</li> </ul>           |
|  | <p><b>Bangunan Pembuang</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Saluran Tailrace</li> </ul>  |

**Gambar 4.17. Rencanan Komponen Bangunan Sipil PLTMH Mrican**



Tata letak rencana penempatan bangunan berdasarkan analisa bangunan eksisting dan lahan ditunjukkan pada gambar berikut:

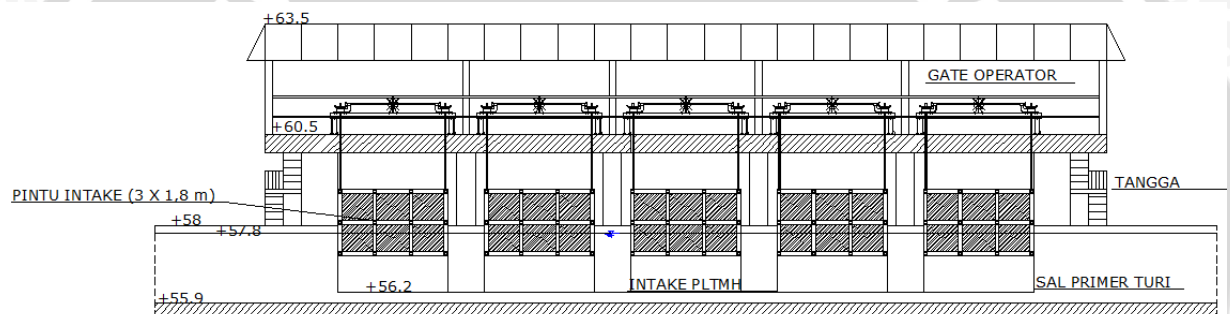


Gambar 4.18. Sketsa Umum Denah Lokasi Penempatan Bangunan

#### 4.4.1. Perencanaan Bangunan Pengambilan

Bangunan pengambilan menggunakan tipe pengambilan bebas (*free intake*) dengan memanfaatkan saluran primer Turitunggorono, data teknis yang direncanakan adalah :

|                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| Jenis pintu           | : Pintu sorong          |
| Bahan pintu           | : baja                  |
| Debit desain          | : 44 m <sup>3</sup> /dt |
| Tinggi pintu          | : 1,8 meter             |
| Lebar pintu           | : 3 meter               |
| Jumlah Pintu          | : 5 pintu               |
| Elv ambang pintu      | : +56,2                 |
| Elv saluran eksisting | : +55,9                 |
| Elv MAN               | : +57,8                 |



**Gambar 4.19. Desain Pintu Intake PLTMH Mrican**

Analisa hidrolik yang dilakukan adalah tentang kapasitas pintu intake, analisa kapasitas pintu intake dihitung dengan menggunakan persamaan : (2-18) untuk pengaliran bebas dan untuk pengaliran tenggelam menggunakan persamaan (2-19). Contoh analisa kapasitas pintu intake (1 pintu) dengan tinggi bukaan 0,1 meter pada kondisi muka air hulu adalah muka air normal adalah sebagai berikut:

Dengan data perencanaan diatas maka:

$$Q = \mu b a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Nilai  $\mu$  diambil 0,5

$$H : \text{Elv MAN} - \text{Elv ambang} : 57,8 - 56,2 : 1,6 \text{ m}$$

$$Q = 0,5 \cdot 3 \cdot 0,1 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,6}$$

$$Q = 0,84 \text{ m}^3/\text{dt}$$

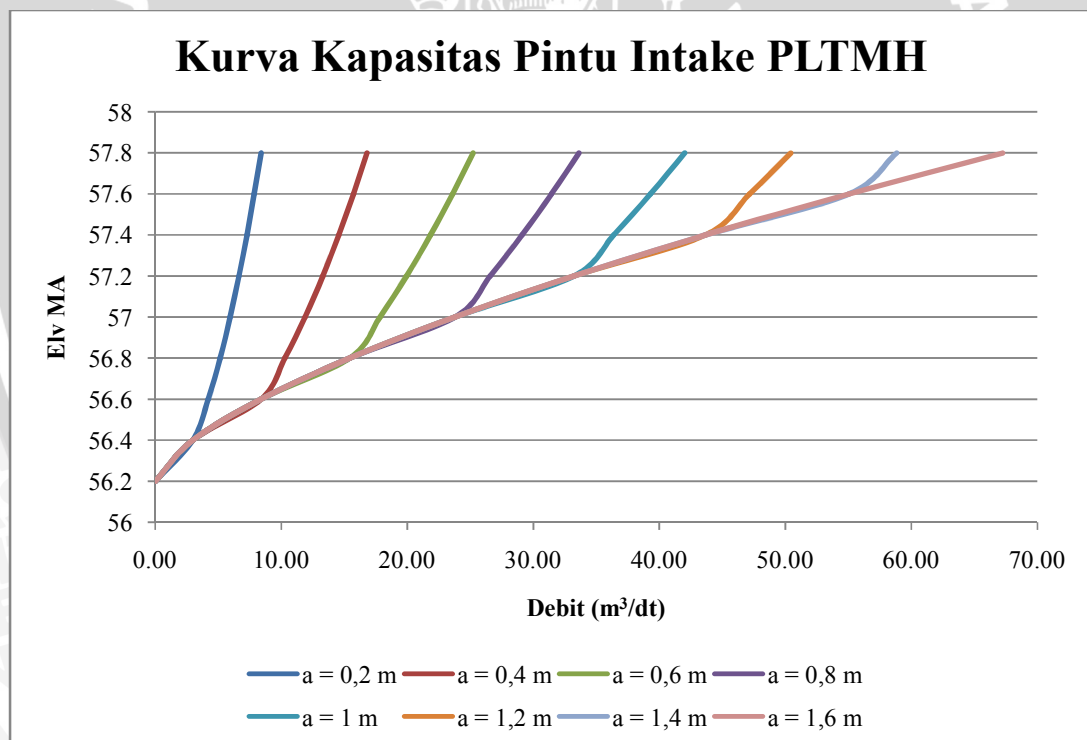
Dengan cara yang sama maka perhitungan kapasitas pintu intake ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.17. Perhitungan Kapasitas Pintu Intake PLTMH**

| No. | Elevasi MA | Tinggi MA (m) | bukaan pintu (m) |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|------------|---------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |            |               | 0,2              | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1     | 1,2   | 1,4   | 1,6   |
| 1   | 56,2       | 0             | 0,00             | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 2   | 56,4       | 0,2           | 2,97             | 2,97  | 2,97  | 2,97  | 2,97  | 2,97  | 2,97  | 2,97  |
| 3   | 56,6       | 0,4           | 4,20             | 8,40  | 8,40  | 8,40  | 8,40  | 8,40  | 8,40  | 8,40  |
| 4   | 56,8       | 0,6           | 5,15             | 10,29 | 15,44 | 15,44 | 15,44 | 15,44 | 15,44 | 15,44 |
| 5   | 57         | 0,8           | 5,94             | 11,89 | 17,83 | 23,77 | 23,77 | 23,77 | 23,77 | 23,77 |
| 6   | 57,2       | 1             | 6,64             | 13,29 | 19,93 | 26,58 | 33,22 | 33,22 | 33,22 | 33,22 |
| 7   | 57,4       | 1,2           | 7,28             | 14,56 | 21,83 | 29,11 | 36,39 | 43,67 | 43,67 | 43,67 |
| 8   | 57,6       | 1,4           | 7,86             | 15,72 | 23,58 | 31,45 | 39,31 | 47,17 | 55,03 | 55,03 |
| 9   | 57,8       | 1,6           | 8,40             | 16,81 | 25,21 | 33,62 | 42,02 | 50,43 | 58,83 | 67,23 |

Sumber : perhitungan

Dari hasil analisa dapat diketahui kapasitas pintu maksimum pada 67,23 m<sup>3</sup>/dt sehingga desain pintu mampu untuk melewati debit desain 44 m<sup>3</sup>/dt . Kurva kapasitas pintu intake PLTMH ditunjukkan pada gambar berikut:



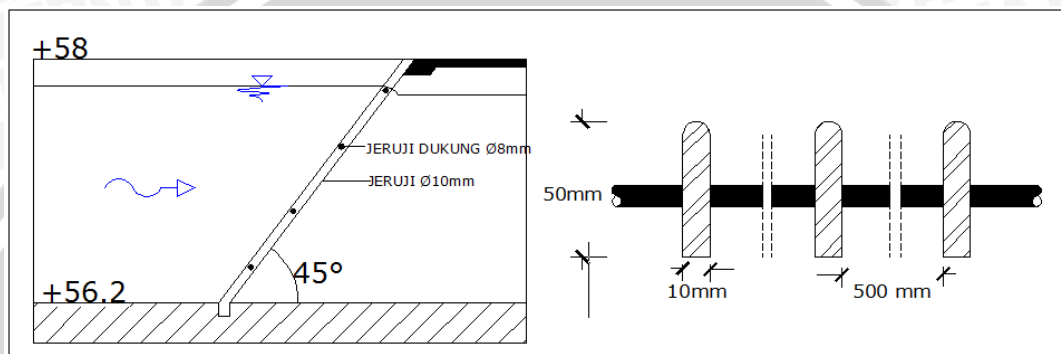
**Gambar 4.20. Kapasitas Pintu Intake PLTMH**

Selain perencanaan pintu intake direncanakan juga penyaring (*trashrack*) dan bangunan pengarah. Penyaring dan bangunan pengarah direncanakan dengan data teknis sebagai berikut:



**Penyaring (trashrack)**

- jenis bahan : besi  
 bentuk jeruji : tipe bulat memanjang  
 kemiringan trashrack : 45°  
 tebal jeruji (s) : 10 mm  
 jarak antar jeruji (b) : 500 mm (jarak untuk rack depan 100mm – 500mm, Varshney,1977:285)  
 kecepatan masuk ( $V_0$ ) : 1.19 m/s (data kecepatan pada saluran primer Turi)  
 jumlah jeruji : 37 jeruji



**Gambar 4.21. Desain Trashrack Intake PLTMH Mrican**

$$\begin{aligned} \text{kecepatan pada rack} &: v = 1,5 - 2V_0 \frac{(s+b)}{b} \\ &: 1,5 - 2 \cdot 1,19 \frac{(0,01+0,5)}{0,5} \\ &: 1,8 \text{ m/dt} \end{aligned}$$

Gambar desain perencanaan pintu intake dan trashrack dapat dilihat pada lampiran.

#### 4.4.2. Perencanaan Bangunan Tengah (Mid Structure)

##### 4.4.2.1. Perencanaan Bak penangkap sedimen

Bak penangkap sedimen direncanakan dengan menggunakan metode pada mosonyi,1963. dengan mempertimbangkan kapasitas lahan yang bisa dipergunakan sebagai bak penangkap sedimen yang biasanya membutuhkan lahan yang cukup besar.

Data teknis yang direncanakan adalah sebagai berikut:

- Debit desain : 1,2 x debit operasi = 1,2 x 44 = 52,8 m<sup>3</sup>/dt  
 Elevasi dasar intake : +56,2  
 Elevasi muka air : +57,8  
 Kedalaman air : 1,6 meter

Diameter butiran : 0,72 mm

Kecepatan aliran pada intake : 1,59 m/dt

Dengan data tersebut maka bak penangkap sedimen (*settling basin*) direncanakan sebagai berikut:

Kecepatan kritis pada bak penangkap sedimen dihitung dengan persamaan:

$$V = a\sqrt{d}$$

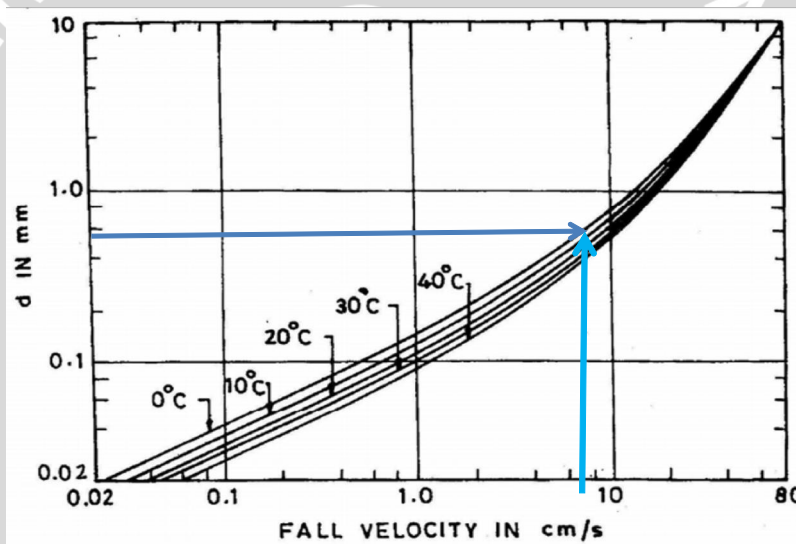
Dimana:

a : 44 (untuk  $10 < d < 0,1$  mm)

$$V = 44 \sqrt{0,73}$$

$$V = 37,24 \text{ cm/dt} = 0,37 \text{ m/dt}$$

Kecepatan endap butiran didapat dari grafik hubungan suhu air dengan diameter butiran, dimana suhu air adalah  $20^\circ$  sehingga kecepatan jatuh butiran ( $w$ ) adalah 0,85 cm/dt atau 0,085 m/dt.



**Gambar 4.22. Penentuan Kecepatan Jauh Butiran Sedimen**

Jika direncanakan kedalaman untuk tumpukan sedimen adalah 2 meter maka tinggi muka air pada bak penangkap sedimen adalah 1,6 meter + 2 meter = 3,6 meter.

Maka dengan persamaan:

$$B = \frac{Q}{h \cdot v} = \frac{52,8}{3,6 \cdot 0,37} = 39,63 \text{ meter}$$

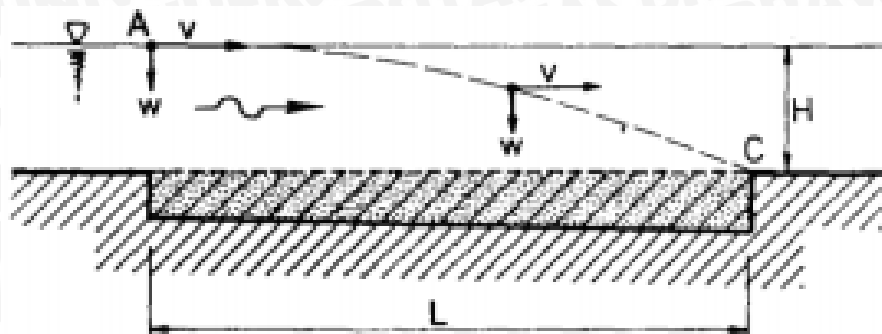
Dengan memperhatikan turbulensi pada aliran maka:

$$\alpha = \frac{0,132}{\sqrt{h}} = \frac{0,132}{\sqrt{3,6}} = 0,25$$

$$w' = w \cdot \alpha = 0,085 \cdot 0,25 = 0,021 \text{ m/dt}$$

$$t \text{ (waktu turun)} : \frac{h}{w-w'} = \frac{3,6}{0,085-0,021} = 56,65 \text{ detik}$$

panjang lintasan yang dibutuhkan untuk mengendap:



**Gambar 4.23. Konsep Kecepatan Jauh Butiran Sedimen**

$$L = t \times w' = 56,65 \times 0,021 = 20,89 \text{ meter}$$

Volume bak penangkap sedimen

$$V = L \times B \times H = 20,89 \times 39,63 \times 3,6 = 2982 \text{ m}^3$$

Maka dari perhitungan diatas direncanakan:

Panjang bak (L) : 21 meter

Lebar bak (B) : 40 meter

Tinggi muka air (H) : 3,6 meter

Volume bak (V) :  $L \times B \times H = 21 \times 40 \times 3,6 = 3024 \text{ m}^3$

Dari hasil perhitungan didapatkan dimensi bak penangkap sedimen yang kurang sesuai dengan kondisi lahan yang tersedia maka modifikasi yang perlu dilakukan adalah dengan mengubah kecepatan pada bak penangkap sedimen sehingga panjang lintasan pengendapan akan bertambah panjang dan lebar bak akan menyempit, direncanakan perubahan kecepatan adalah dua kali dari kecepatan awal yakni:

$$V = 0,37 \text{ m/dt}$$

$$V' = 2 \times v = 0,74 \text{ m/dt}$$

Maka dengan cara yang sama akan didapatkan dimensi baru yaitu:

Panjang bak (L) : 42 meter

Lebar bak (B) : 20 meter

Tinggi muka air (H) : 3,6 meter

Volume bak (V) :  $L \times B \times H = 42 \times 20 \times 3,6 = 3024 \text{ m}^3$

Didalam bak penangkap sedimen direncanakan penangkap sedimen tipe kantong duffour dengan menggunakan tiga kantong, Gambar desain perencanaan dapat dilihat pada **lampiran**.



#### 4.4.2.2. Perencanaan Bak Penampung (*Forebay Tank*)

Menurut AHEC, 2011 bak penampung diusahakan untuk memiliki tampungan sebesar debit operasi dikalikan dengan waktu 2 menit atau  $120Q$  untuk menjaga kestabilan turbin akibat *governor*, untuk *governor* model terbaru volume tampungan dapat diturunkan lagi namun keterbatasan informasi tentang parameter kontrol tampungan maka  $120Q$  sudah mewakili. Maka dari analisa bak penangkap sedimen diketahui:

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Volume bak penangkap sedimen | : $3024 \text{ m}^3$                                |
| Volume bak penampung         | : $120 \times Q = 120 \times 44 = 5280 \text{ m}^3$ |
| Kekurangan tampungan         | : $5280 - 3024 = 2256 \text{ m}^3$                  |

Jika menggunakan lebar yang sama dengan bak penangkap sedimen (20 meter) dan elevasi mulut bak penangkap sedimen +54,2 dengan tinggi muka air 3,6 meter maka panjang yang dibutuhkan adalah:

$$L = V/(B \times H) = 2256/(20 \times 3,6) = 31,33 \text{ meter. diambil } 32 \text{ meter.}$$

Jadi dimensi bak penampung adalah :

|                     |             |
|---------------------|-------------|
| Panjang bak (L)     | : 32 meter  |
| Lebar bak (B)       | : 20 meter  |
| Tinggi muka air (H) | : 3,6 meter |

Gambar desain perencanaan dapat dilihat pada **lampiran**.

#### 4.4.2.3. Perencanaan Bangunan Penguras

Bangunan penguras terdiri dari beberapa komponen bangunan, komponen bangunan yang dipergunakan dalam studi ini adalah:

##### A. *Culvert* penguras

*Culvert* penguras direncanakan pada kantong dufour pada bak penangkap sedimen untuk menggelontor sedimen yang tertangkap pada kantong, direncanakan 3 buah *culvert* dengan sistem penggerak menggunakan katup kupu – kupu (*butterfly valve*) untuk mempermudah pengoperasian saat dilaksanakan operasi penggelontoran sedimen, data perencanaan yang digunakan adalah:

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| elevasi dasar bak penangkap sedimen | : +54.2                                    |
| jenis <i>culvert</i>                | : lingkaran dari baja ( <i>cast iron</i> ) |
| diameter rencana                    | : 1 meter                                  |
| luas penampang (A)                  | : $0,785 \text{ m}^2$                      |
| keliling basah (P)                  | : 3,14 m                                   |

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| jari jari hidrolis (R) | : 0,25                       |
| sudut kemiringan       | : 0° (lurus)                 |
| koefisien manning (n)  | : 0,014 ( <i>cast iron</i> ) |
| tinggi head (H)        | : 3,6 meter                  |

culvert direncanakan dengan aliran bertekanan atau ( $H/d > 1,2$ ), sehingga  $3,6/1 = 3,6 > 1,2$  (aliran bertekanan). Analisa hidrolika yang digunakan adalah:

$$Q = A \times V$$

$$V = \sqrt{\frac{2g(H+L\sin\theta-\frac{D}{2})}{(1+\Sigma C)}}$$

Dimana:

$\Sigma C$  = Nilai kehilangan total = kehilangan akibat inlet + kehilangan akibat belokan + kehilangan akibat gesekan + kehilangan akibat outlet.

Untuk mempermudah perhitungan maka nilai kehilangan total diasumsi sebesar 0,5 m.

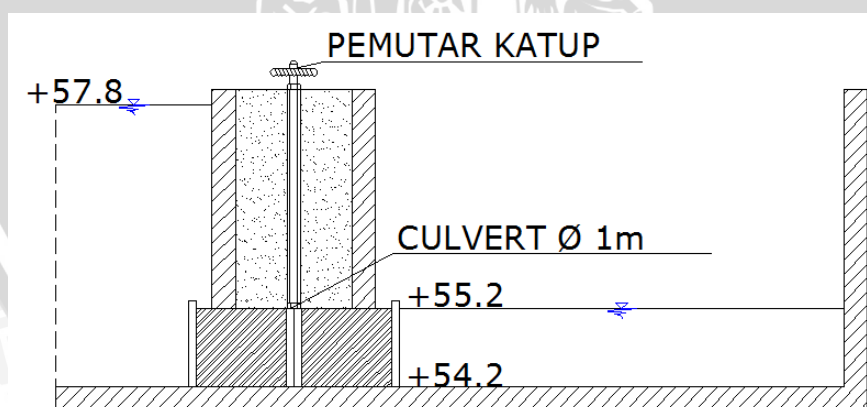
Maka kecepatan pada culvert :

$$V = \sqrt{\frac{29,81(3,6+5\sin 0-\frac{1}{2})}{(1+0,50)}} = 6,86 \text{ m/dt} < 7 \text{ m/dt (kecepatan maksimum pada}$$

pipa baja)

Debit didalam *culvert*:  $A \times V = 0,785 \times 6,86 = 5,39 \text{ m}^3/\text{dt}$

Maka kapasitas dari 3 buah culvert adalah  $= 5,39 \times 3 = 16,16 \text{ m}^3/\text{dt}$



Gambar 4.24. Desain Culvert Penguras Pada Bak Penangkap Sedimen

#### B. Pelimpah samping (*spillway*)

Pelimpah samping berfungsi untuk membuang kelebihan air pada bak penampung (*forebay tank*) jika terjadi kelebihan air, pelimpah samping tidak

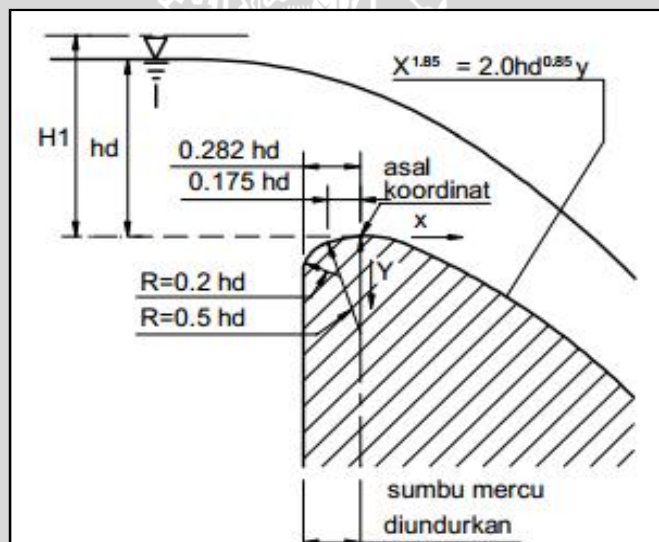


didesain untuk bisa melimpahkan seluruh debit desain ( $44 \text{ m}^3/\text{dt}$ ). Dikarenakan ambang pelimpah terletak pada elevasi muka air operasional (+57,8) sehingga tinggi jagaan dari ambang pelimpah sampai muka tanah hanya 0,2 meter. Data perencanaan adalah:

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| elelevasi amambang pelimpah         | : +57.8       |
| elevasi dasar bak penangkap sedimen | : +54.2       |
| tinggi pelimpah (H)                 | : 3,6 meter   |
| lebar ambang pelimpah (b)           | : 10 meter    |
| bentuk ambang                       | : Ogee tipe I |
| tinggi jagaan                       | : 0,2 meter   |

analisa hidrolis pelimpah menggunakan pendekatan ketinggian kritis ( $Y_c$ ) = tinggi jagaan (0,2 m) sehingga dapat diketahui besarnya kapasitas debit yang dapat dilimpahkan oleh pelimpah dan analisa profil aliran dilakukan dengan bantuan monograph no.25 dari USBR, analisa adalah sebagai berikut:

desain rencanana bentuk pelimpah samping tipe ogee I:



**Gambar 4.25. Parameter Bentuk Dimensi Mercu Ogee Tipe I**

Dengan menggunakan pendekatan bahwa kapasitas maksimum adalah pada elevasi muka tanah (+58) maka nilai  $H_d = 0,2 \text{ m}$ , sehingga :

$$0,282 H_d : 0,282 \cdot 0,2 = 0,054 \text{ m}$$

$$0,175 H_d : 0,175 \cdot 0,2 = 0,035 \text{ m}$$

$$0,2 H_d : 0,2 \cdot 0,2 = 0,04 \text{ m}$$

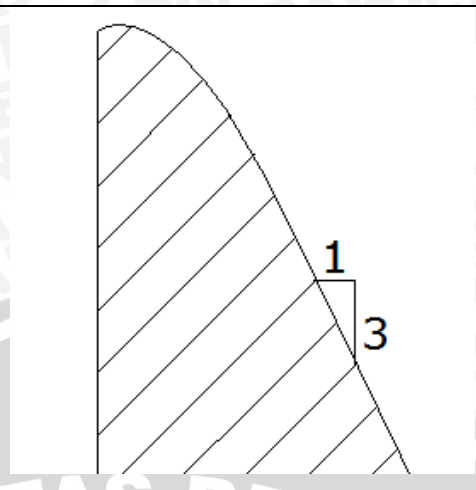
$$0,5 H_d : 0,5 \cdot 0,2 = 0,1 \text{ m}$$

Profil bentuk hilir pelimpah untuk ogee tipe I ( $X^{1.85} = 2Hd^{0.85}$ ) didapatkan:



Tabel 4.18. Perhitungan Profil Hilir Pelimpah Samping Tipe Ogee I

| X     | Y     |
|-------|-------|
| 0,050 | 0,008 |
| 0,100 | 0,030 |
| 0,150 | 0,063 |
| 0,200 | 0,108 |
| 0,250 | 0,163 |
| 0,300 | 0,229 |
| 0,350 | 0,304 |
| 0,400 | 0,390 |
| 0,450 | 0,485 |
| 0,500 | 0,589 |
| 0,550 | 0,702 |



Sumber: perhitungan

Analisa hidrolika untuk pelimpah samping tipe ogee I:

Kemampuan melimpahkan debit dihitung dengan persamaan debit melalui pelimpah:  $Q = C L H e^{3/2}$

Nilai C didapatkan dari rasio P/He dimana He adalah ketinggian head total diatas ambang mercu,  $H_e = H_d + V^2/2g = 0,2 + 0,74^2/2 \cdot 9,81 = 0,23$  m dan tinggi pelimpah adalah 3,6 meter sehingga  $P/H_e = 3,6/0,23 = 18$  menurut Chow untuk rasio diatas 1,33 nilai C yang digunakan adalah sebesar  $4,03 \text{ ft}^{1/2}/\text{dt}$  (SI unit) atau sebesar  $2,22 \text{ m}^{1/2}/\text{dt}$  (metric unit). Sehingga debit diatas ambang pelimpah adalah:

$$Q = 2,2 \cdot 10 \cdot 0,23^{3/2}$$

$$Q = 2,42 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Maka kapasitas pelimpahan yang bisa dilakukan adalah sebesar  $2,42 \text{ m}^3/\text{dt}$  untuk profil aliran pada pelimpah dihitung dengan menggunakan USBR monograph No.25, analisisnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Debit persatuan lebar (q)} : Q/b = 0,24 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$$

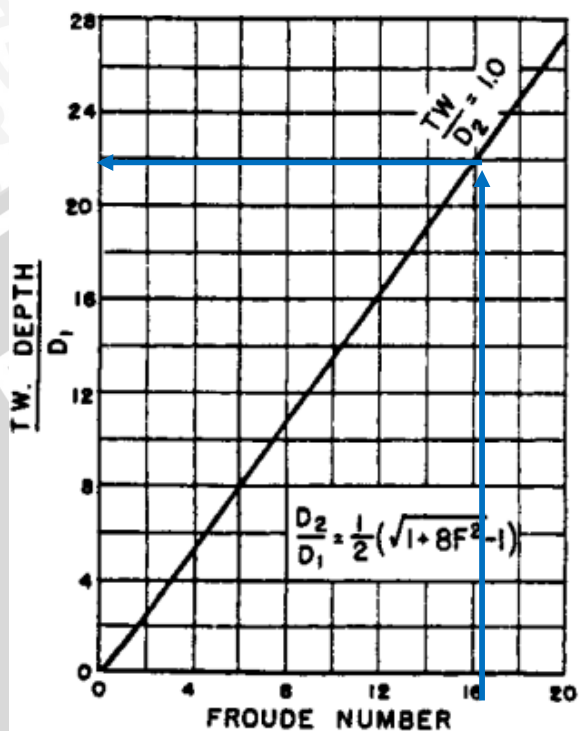
Tinggi air sebelum loncatan ( $Y_1$ ) dihitung dengan menggunakan keseimbangan persamaan kecepatan sebagai berikut:

$$\frac{Q}{L Y_1} = \sqrt{2 g (P + H_e - Y_1)}$$

$$\frac{2,42}{10 Y_1} = \sqrt{2 \cdot 9,81 (3,6 + 0,23 - Y_1)}$$

Dengan cara trial dan error maka didapatkan nilai  $Y_1$  sebesar 0,03 meter dan kecepatan aliran pada kaki pelimpah adalah :  $V = \sqrt{2g(P + H_e - Y_1)} = \sqrt{2 \cdot 9,81 (3,6 + 0,23 - 0,03)} = 8,6 \text{ m/dt}$

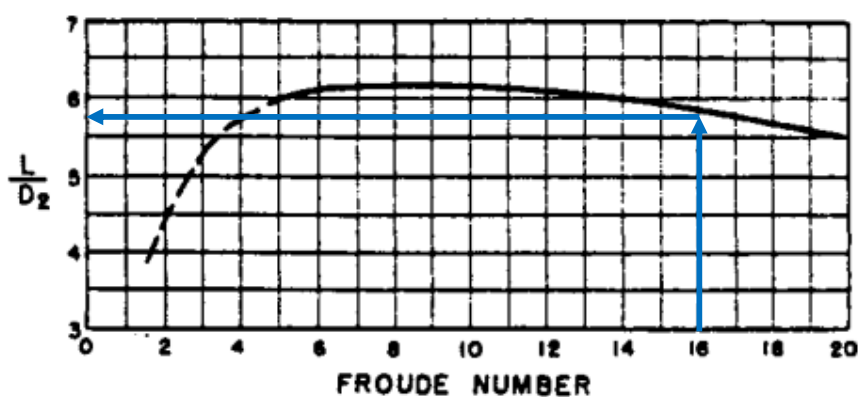
$$\text{Bilangan Froude (F)} : \frac{v}{\sqrt{gY_1}} = \frac{8,6}{\sqrt{9,81 \cdot 0,03}} = 16,48$$



Gambar 4.26. Grafik Hubungan Bilangan Froude Dengan Rasio  $Y_2/Y_1$

Rasio ( $Y_2/Y_1$ ) : 22

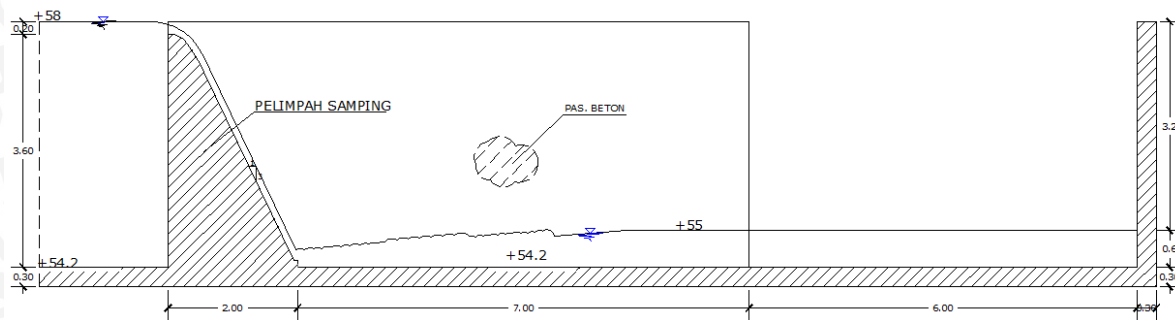
Tinggi air setelah loncatan ( $Y_2$ ) :  $Y_1 \times 22 = 0,03 \times 22 = 0,62 \text{ m}$



Gambar 4.27. Grafik Hubungan Bilangan Froude Dengan Rasio  $L/Y_2$

Rasio ( $L/Y_2$ ) : 5,8

Panjang loncatan ( $L$ ) :  $Y_2 \times 5,8 = 0,62 \times 5,8 = 2,95 \text{ m}$



**Gambar 4.28. Desain Pelimpah Samping Dengan Tipe Ogee**

**C. Pintu pembilas**

Pintu pembilas hanya difungsikan untuk pengurasan bak penampung apabila dilaksanakan penggelontoran sedimen dan tidak difungsikan untuk mengalirkan keseluruhan dari debit desain (44 m<sup>3</sup>/dt). Data perencanaan:

- Jenis pintu : pintu sorong dengan roda putar
- jumlah pintu : 1 buah
- lebar pintu : 3 meter
- tinggi pintu : 3,8 meter
- elevasi dasar pintu : +54,2

kapasitas pintu pembilas dihitung berdasarkan data perencanaan diatas, kapasitas pintu pembilas pada saat pintu terbuka penuh adalah:

$$Q = \mu b a \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Nilai  $\mu$  diambil 0,5

$$H : \text{elv MAN} - \text{elv ambang} : 57,8 - 54,2 : 3,6 \text{ m}$$

$$Q = 0,5 \cdot 3 \cdot 3,6 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3,6}$$

$$Q = 46,63 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Maka kapasitas pintu pembilas : 46,63 m<sup>3</sup>/dt

**D. Saluran penguras**

Saluran penguras difungsikan untuk pembuangan sedimen dan debit penggelontoran (52,8 m<sup>3</sup>/dt), saluran direncanakan dengan metode manning.

Data perencanaan:

- debit rencana : 52,8 m<sup>3</sup>/dt
- elevasi dasar saluran : +54.2





|                    |                            |
|--------------------|----------------------------|
| elevasi muka tanah | : +58                      |
| tinggi jagaan      | : 1 meter                  |
| tinggi muka air    | : 2,8 meter (direncanakan) |
| lebar saluran      | : 6 meter (direncanakan)   |
| bentuk saluran     | : persegi (rectangular)    |
| Jenis pasangan     | : beton                    |
| Koefisien manning  | : 0,012                    |

Analisa hidrolika digunakan dengan pendekatan kemiringan saluran optimal

$$s = \left( \frac{Qn}{AR^{2/3}} \right)^2$$

$$\text{Luas saluran (A)} : A = b \times h = 6 \times 2,8 = 16,8 \text{ m}^2$$

$$\text{Keliling basah (P)} : P = (b + h) \times 2 = (6 + 2,8) \times 2 = 17,6 \text{ m}$$

$$\text{Radius hidrolik (R)} : R = A/P = 16,8/17,6 = 0,95$$

$$\text{Slope saluran (S)} : S = \left( \frac{52,8 \cdot 0,012}{16,8 \cdot 0,95^{2/3}} \right)^2 = 0,0014$$

$$\text{Kecepatan (V)} : V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} = \frac{1}{0,012} 0,95^{2/3} 0,0014^{1/2} = 3,14 \text{ m/dt}$$

$$\text{Kapasitas (Q)} : Q = A \times V = 16,8 \times 3,14 = 52,8 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Saluran penguras akan mengalirkan debit air menuju sungai Brantas di hilir bendung Mrican.

#### E. Terjunan miring (*drop structure*)

Terjunan miring didesain untuk membawa debit dari saluran penguras menuju sungai brantas diakibatkan perbedaan elevasi yang cukup besar (5 meter). Data perencanaan:

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| debit rencana          | : 52,8 m <sup>3</sup> /dt    |
| elevasi hulu terjunan  | : +54,2                      |
| elevasi hilir terjunan | : +48,5                      |
| jenis terjunan         | : terjunan miring dari beton |
| tinggi terjunan        | : 5,7 meter                  |
| kemiringan             | : 1 : 2                      |
| panjang terjunan       | : 11,4 meter                 |
| Lebar                  | : 6 meter                    |

analisa hidrolis pelimpah menggunakan pendekatan ketinggian kritis ( $Y_c$ ), analisa dilakukan dengan bantuan monograph no.25 dari USBR, sehingga profil aliran dan loncatan hidrolis dapat diperhitungkan.

$$\text{Debit persatuan lebar (q)} : Q/b = 52,8/6 = 8,8 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}^2$$

$$\text{Ketinggian MA kritis (Yc)} : \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{8,8^2}{9,81}} = 1,99 \text{ m}$$

Tinggi air sebelum loncatan ( $Y_1$ ) dihitung dengan menggunakan keseimbangan persamaan kecepatan sebagai berikut:

$$\frac{Q}{LY_1} = \sqrt{2g(P + H_e - Y_1)}$$

$$H_e = H_d + V^2/2g = 2,8 + 3,14^2/2 \cdot 9,81 = 3,3 \text{ m}$$

$$\frac{52,8}{6Y_1} = \sqrt{2 \cdot 9,81 (5,7 + 3,3 - Y_1)}$$

Dengan cara trial dan error maka didapatkan nilai  $Y_1$  sebesar 0,86 meter dan kecepatan aliran pada kaki pelimpah adalah :  $V = \sqrt{2g(P + H_e - Y_1)} = \sqrt{2 \cdot 9,81 (5,7 + 3,3 - 0,86)} = 10,23 \text{ m/dt}$

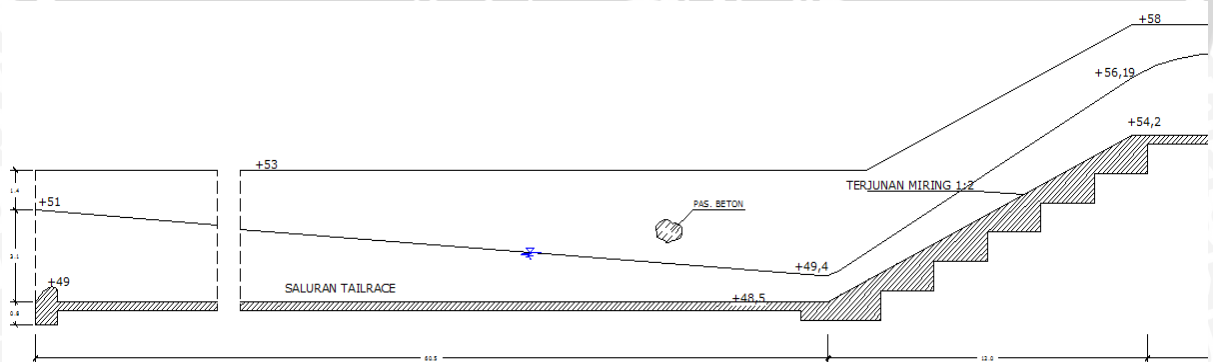
$$\text{Bilangan Froude (F)} : \frac{v}{\sqrt{gY_1}} = \frac{10,23}{\sqrt{9,81 \cdot 0,86}} = 3,53$$

$$\text{rasio } Y_2/Y_1 : 3$$

$$\text{Tinggi air setelah loncatan (Y2)} : Y_1 \times 3 = 0,86 \times 3 = 2,5 \text{ m}$$

$$\text{rasio } L/Y_2 : 5,7$$

$$\text{Panjang lincatan (L)} : Y_2 \times 5,7 = 2,5 \times 5,7 = 12,23 \text{ m}$$



**Gambar 4.29. Desain Terjunan (Drop Structure)**

Gambar desain bangunan penguras dapat dilihat pada **Lampiran**.

#### 4.4.3. Perencanaan Pipa Pesat (Penstock)

Kajian perencanaan pipa pesat dalam studi ini meliputi: diameter pipa pesat, tebal pipa dan intake pipa pesat. Data teknis yang direncanakan adalah:

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Elevasi MA Pada <i>forebay</i> (NWL) | : +57,8  |
| Elevasi MA terendah (LWL)            | +57,3:   |
| Elevasi dasar pipa pesat             | : + 54,2                                       |
| Jumlah pipa pesat                    | : 4 buah                                       |
| Debit desain tiap pipa pesat         | : $1,1 \times 11 = 12,1 \text{ m}^3/\text{dt}$ |
| Panjang pipa pesat                   | : 20 meter                                     |
| Jenis pipa                           | : pipa lingkaran dari baja (cast iron)         |
| Tegangan ijin pipa                   | : $1400 \text{ kN/mm}^2$                       |
| Koef kekasaran                       | : 0,014  |
| Sudut kemiringan                     | : $30^\circ$                                   |
| Gross head                           | : 8 meter                                      |

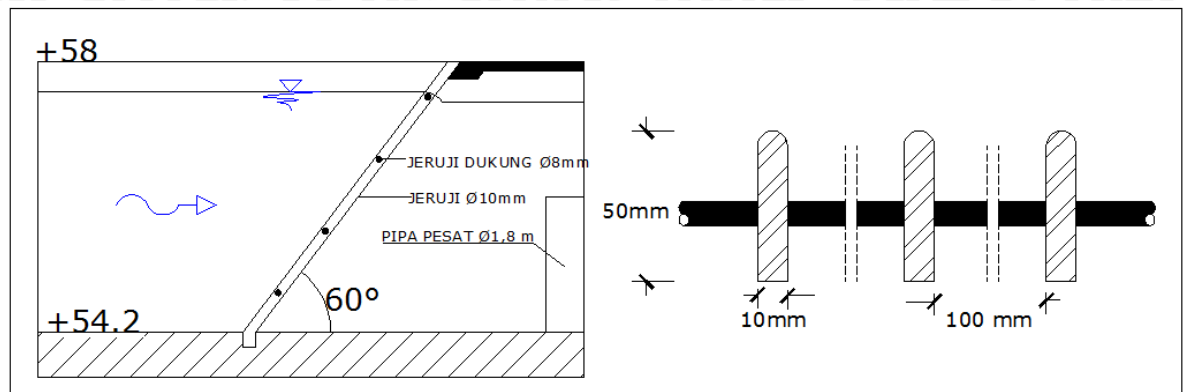
Dengan data teknis rencana diatas maka dapat direncanakan:

#### **Penyaring (Screen)**

Untuk menghindari muatan sampah dan sedimen masuk kedalam turbin maka harus direncanakan penyaring halus (*screen*), penyaring halus memiliki jarak antar jeruji yang lebih rapat sehingga akan lebih efektif dalam menghalau sedimen, *screen* direncanakan dengan data perencanaan berikut:

|                            |   |
|----------------------------|---|
| jenis bahan                | : besi  |
| bentuk jeruji              | : tipe bulat memanjang                            |
| kemiringan trashrack       | : $60^\circ$                                      |
| tebal jeruji (s)           | : 10 mm   |
| jarak antar jeruji (b)     | : 100 mm  |
| kecepatan masuk ( $V_0$ )  | : 0,74 m/s (kecepatan aliran pada bak penenang)   |
| jumlah jeruji              | : 199 jeruji                                      |
| kecepatan pada <i>rack</i> | : $v = 1,5 - 2V_0 \frac{(s+b)}{b}$                |
|                            | : $1,75 - 0,74 \frac{(0,01+0,1)}{0,1}$            |
|                            | : 1,42 m/dt (kecepatan masuk ke inlet pipa pesat) |
|                            | disarankan antara 0,7 – 1,5 m/dt)                 |





Gambar 4.30. Desain screen PLTMH Mrican

### Diameter Pipa Pesat

Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kecepatan maksimum dan minimum, menurut mosonyi kecepatan ideal pada pipa baja adalah 2,5 – 7 m/dt. Untuk menentukan diameter pipa pesat dapat digunakan persamaan empiris dan dengan melakukan cara coba coba dengan melakukan perbandingan beberapa parameter pipa. Dalam studi ini persamaan empiris yang dipergunakan adalah persamaan sarkaria dan persamaan pipa ekonomis dalam ESHA.

Persamaan sarkaria:

$$D = 3,55 \cdot \left( \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot H} \right)^{0,25}$$

$$D = 3,55 \cdot \left( \frac{12,1^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 8} \right)^{0,25}$$

D = 3,49 m, maka:

$$A = 9,56 \text{ m}^2$$

V = 1,27 m/dt (tidak memenuhi syarat kecepatan minimum)

Persamaan diameter ekonomis ESHA (Penche,2004):

Jika tinggi tekan karena gesekan pipa direncanakan 4% dari gross head maka:

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

$$D = 2,69 \left( \frac{0,014^2 \cdot 12,1^2 \cdot 8}{8} \right)^{0,1875}$$

D = 1,67 m, maka:

$$A = 2,12 \text{ m}^2$$

V = 5,72 m/dt (memenuhi syarat kecepatan maksimum)

Dari kedua persamaan diketahui bahwa metode ESHA bisa dipergunakan namun perlu dilakukan analisa pengaruh diameter terhadap beberapa faktor seperti kehilangan energi, biaya pipa sampai dengan keamanan terhadap vortex. Maka selanjutnya diameter dihitung dengan pendekatan kecepatan berdasarkan mosonyi, maka:

Kecepatan potensial aliran pada pipa pesat berdasarkan tinggi jatuh:

$$V = \sqrt{2gH}$$

$$V = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 8}$$

$$V = 12,55 \text{ m/dt}$$

Kecepatan yang bisa dicapai oleh pipa pesat berdasarkan tinggi jatuh mencapai 12,55 sehingga kecepatan maksimum masih bisa dicapai oleh pipa pesat ( $V_{\text{maks}} = 7 \text{ m/dt}$ )

$$V_{\text{maksimum}} = 7 \text{ m/dt}$$

$$Q = V \times A$$

$$D = \sqrt{\frac{Q}{(V \frac{1}{4} \pi)}}$$

$$D = \sqrt{\frac{12,1}{(7 \frac{1}{4} \pi)}}$$

$$D = 1,48 \text{ m}$$

$$V_{\text{minimum}} = 2,5 \text{ m/dt}$$

$$Q = V \times A$$

$$D = \sqrt{\frac{Q}{(V \frac{1}{4} \pi)}}$$

$$D = \sqrt{\frac{12,1}{(2,5 \frac{1}{4} \pi)}}$$

$$D = 2,48 \text{ m}$$

Maka kisaran nilai diameter pipa pesat adalah 1,48 – 2,48 meter

Untuk memilih diameter pipa pesat maka perlu dilakukan analisa coba coba dengan perbandingan parameter biaya pipa pesat, kehilangan tinggi tekan, daya bangkitan dan faktor keamanan terhadap *vorticity* (*vortex*).

### **Kehilangan Tinggi Tekan Pada Pipa pesat**

Kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat meliputi kehilangan akibat inlet, outlet, belokan dan gesekan. Kehilangan tinggi pada dihitung dengan persamaan berikut:

Kehilangan pada inlet:

$$hf = f \frac{V^2}{2g}$$

dimana:

$$f = 0,3 \text{ (inlet berbentuk bell mouth)}$$

$$V = 2,68 \text{ m/dt ( untuk } D = 2,4 \text{ m)}$$

Maka kehilangan pada inlet pipa pesat:

$$hf = 0,3 \frac{2,68^2}{2 \cdot 9,81} = 0,109 \text{ m}$$

kehilangan pada outlet (sebelum turbin) biasanya diasumsikan 0,1 m

kehilangan akibat belokan:

$$hf = f \frac{V^2}{2g}$$

$$f = 0,2 \text{ untuk sudut belokan } 30^\circ \text{ lihat gambar 2.27.}$$

$$V = 2,68 \text{ m/dt ( untuk } D = 2,4 \text{ m)}$$

Maka kehilangan pada inlet pipa pesat:

$$hf = 0,2 \frac{2,68^2}{2 \cdot 9,81} = 0,073 \text{ m}$$

kehilangan akibat gesekan dihitung dengan persamaan darcy weisbach:

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

dimana:

$f$  = nilai koefisien dilihat dari diagram moody gambar 2.24 dengan pertimbangan nilai bilangan reynold ( $Re$ ) dan kekasaran relatif ( $e$ )

$$\text{dimana bilangan reynold : } Re = \frac{V D}{\nu} = \frac{2,368 \cdot 2,4}{10^{-6}} = 6,42 \times 10^6$$

$$\text{kekasaran relatif : } e = \epsilon/D, \epsilon = 0,25 \text{ (baja cast iron)} = 0,25/2400 = 0,0001$$

maka dari diagram moody didapatkan  $f = 0,014$

$$L = 20 \text{ meter}$$

$$D = 2,4 \text{ meter}$$

$$V = 2,68 \text{ m/dt}$$

$$hf = 0,014 \frac{16}{2,4} \frac{2,68^2}{2 \cdot 9,81} = 0,043 \text{ m}$$

Maka kehilangan tinggi tekan total adalah: 0,287 meter atau 3,57% dari tinggi tekan ( $H$ ), selanjutnya perhitungan ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.19. Perhitungan Kehilangan Tinggi Tekan Akibat Diameter Pipa Pesat**

| No. | Diameter | Kecepatan | Re       | e       | f     | Hf 1  | Hf 2  | Hf 3  | hf 4 | Hf total | % of H | Heff |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|------|----------|--------|------|
|     | (m)      | (m/dt)    |          |         |       | (m)   | (m)   | (m)   | (m)  | (m)      | (%)    | (m)  |
| 1   | 1,5      | 6,85      | 1,03E+07 | 0,00017 | 0,015 | 0,475 | 0,478 | 0,718 | 0,1  | 1,771    | 22,16  | 6,22 |
| 2   | 1,6      | 6,02      | 9,63E+06 | 0,00016 | 0,015 | 0,340 | 0,370 | 0,554 | 0,1  | 1,363    | 17,06  | 6,63 |



| No. | Diameter | Kecepatan | Re       | e       | f     | Hf 1  | Hf 2  | Hf 3  | hf 4 | Hf total | % of H | Heff |
|-----|----------|-----------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|------|----------|--------|------|
|     | (m)      | (m/dt)    |          |         |       | (m)   | (m)   | (m)   | (m)  | (m)      | (%)    | (m)  |
| 3   | 1,7      | 5,33      | 9,07E+06 | 0,00015 | 0,015 | 0,247 | 0,290 | 0,435 | 0,1  | 1,072    | 13,41  | 6,92 |
| 4   | 1,8      | 4,76      | 8,56E+06 | 0,00014 | 0,015 | 0,186 | 0,231 | 0,346 | 0,1  | 0,863    | 10,79  | 7,13 |
| 5   | 1,9      | 4,27      | 8,11E+06 | 0,00013 | 0,014 | 0,137 | 0,186 | 0,279 | 0,1  | 0,702    | 8,78   | 7,29 |
| 6   | 2        | 3,85      | 7,71E+06 | 0,00013 | 0,014 | 0,107 | 0,151 | 0,227 | 0,1  | 0,585    | 7,32   | 7,41 |
| 7   | 2,1      | 3,50      | 7,34E+06 | 0,00012 | 0,015 | 0,086 | 0,125 | 0,187 | 0,1  | 0,497    | 6,22   | 7,50 |
| 8   | 2,2      | 3,18      | 7,01E+06 | 0,00011 | 0,014 | 0,066 | 0,103 | 0,155 | 0,1  | 0,425    | 5,31   | 7,57 |
| 9   | 2,3      | 2,91      | 6,70E+06 | 0,00011 | 0,014 | 0,053 | 0,087 | 0,130 | 0,1  | 0,369    | 4,62   | 7,62 |
| 10  | 2,4      | 2,68      | 6,42E+06 | 0,00010 | 0,014 | 0,043 | 0,073 | 0,109 | 0,1  | 0,326    | 4,07   | 7,67 |

Sumber: perhitungan

Hf1 : kehilangan akibat gesekan

Hf2 : kehilangan akibat belokan

Hf3 : kehilangan akibat inlet

Hf4 : kehilangan akibat outlet

### Perbandingan Antara Daya Bangkitan Dengan Biaya Pipa Pesat

Daya bangkitan akibat desain pipa pesat dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P = 9,81 \times Q \times H \times \text{eff}$$

$$P = 9,81 \times 11 \times (8 - 326) \times 0,93 \times 0,96 = 810 \text{ kW} = 0,81 \text{ MW}$$

Jadi dengan diameter pipa pesat 2,4 m akan menghasilkan daya 0,81 MW

Nilai manfaat yang dihasilkan adalah berupa penjualan daya bangkitan dengan harga jual Rp.1000 sebagai pendekatan awal. Dengan usia guna bangunan adalah selama 35 tahun tanpa memperhitungkan faktor bunga bank maupun inflasi.

Biaya yang dipergunakan adalah biaya pipa dan biaya pemasangan pipa, biaya pipa dihitung dengan persamaan:

$$C1 = 20 n_p^{0,95} W^{0,88}$$

Dimana:

Berat pipa pesat (W):  $(24,7 d_p l_p t_{ave})$

$d_p$ : diameter pipa pesat = 2,4 m

$l_p$ : panjang pipa pesat = 20 m

$t_{ave}$ : 9 mm

$$W = 24,7 \times 2,4 \times 20 \times 9 = 9781,2 \text{ kg}$$

$$C1 = 20 \times 1^{0,95} \times 9781,2^{0,88} = 775,44 \text{ juta rupiah}$$

Sedangkan biaya pemasangan dihitung dengan persamaan:

$$C2 = 5 W^{0,88}$$

$$C2 = 5 \cdot 9781,2^{0,88} = 193,86 \text{ juta rupiah}$$

Maka biaya yang dibutuhkan adalah 0,97 milyar rupiah

Perhitungan selanjutnya ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.20. Perbandingan Antara Daya Bangkitan Dengan Biaya Pipa**

| No. | Diameter (M) | Daya (MW) | Berat (Kg) | Cost (Milyar Rupiah) | Benefit (Milyar Rupiah) | D/MW | D/Cost | D/Benefit |
|-----|--------------|-----------|------------|----------------------|-------------------------|------|--------|-----------|
| 1   | 1,5          | 0,66      | 6669,00    | 0,64                 | 196,32                  | 2,27 | 2,34   | 0,0076    |
| 2   | 1,6          | 0,70      | 7113,60    | 0,68                 | 209,19                  | 2,28 | 2,36   | 0,0076    |
| 3   | 1,7          | 0,73      | 7558,20    | 0,72                 | 218,37                  | 2,32 | 2,38   | 0,0078    |
| 4   | 1,8          | 0,76      | 8002,80    | 0,75                 | 224,99                  | 2,38 | 2,39   | 0,0080    |
| 5   | 1,9          | 0,77      | 8447,40    | 0,79                 | 230,07                  | 2,46 | 2,41   | 0,0083    |
| 6   | 2            | 0,79      | 8892,00    | 0,83                 | 233,74                  | 2,55 | 2,42   | 0,0086    |
| 7   | 2,1          | 0,79      | 9336,60    | 0,86                 | 236,51                  | 2,64 | 2,44   | 0,0089    |
| 8   | 2,2          | 0,80      | 9781,20    | 0,90                 | 238,80                  | 2,74 | 2,45   | 0,0092    |
| 9   | 2,3          | 0,81      | 10225,80   | 0,93                 | 240,56                  | 2,85 | 2,46   | 0,0096    |
| 10  | 2,4          | 0,81      | 10670,40   | 0,97                 | 241,93                  | 2,95 | 2,48   | 0,0099    |

Sumber: perhitungan

#### Faktor Keamanan Terhadap Vortex

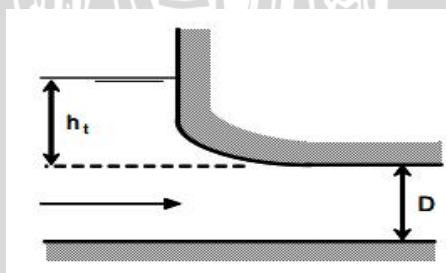
Fenomena vortex dianalisa berdasarkan perencanaan inlet pipa pesat terkait dengan kedalaman tenggelam minimum operasi (LWL). kedalaman tenggelam harus lebih besar dari nilai "s" dimana nilai s dihitung dengan persamaan:

$$H_t > s$$

$$S = c V \sqrt{D}$$

Dimana:

C = 0,7245 untuk inlet asimetris dan 0,5434 untuk inlet simetris



**Gambar 4.31. Skema Inlet Pada Pipa Pesat**

Dengan data teknis diatas maka:

$$h_t = \text{LWL} - \text{elv dasar pipa pesat} - \text{diameter pipa pesat}$$

$$h_t = 57,3 - 54,2 - 2,4 = 0,7 \text{ meter}$$



$$S = c V \sqrt{D}$$

direncanakan inlet masuk simetris (lingkaran) maka  $c = 0,5434$

$$s = 0,5434 \cdot 1,42 \cdot \sqrt{2,4}$$

$$s = 1,2 \text{ m}$$

maka  $ht < s$ ,  $0,7 < 1,2$  (tidak aman)

maka untuk selanjutnya perhitungan ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.21. Perbandingan Analisa Vortex Terhadap Diameter Pipa**

| No. | Diameter<br>(m) | Ht<br>(m) | s    | Keamanan<br>Thp Vortex | Elv Min MA<br>(m) | Rasio<br>Keamanan | Keamanan<br>Thd LWL* |
|-----|-----------------|-----------|------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
|     |                 |           |      |                        |                   |                   |                      |
| 2   | 1,6             | 1,50      | 0,98 | aman                   | 56,78             | 1,94              | aman                 |
| 3   | 1,7             | 1,40      | 1,01 | aman                   | 56,91             | 1,82              | aman                 |
| 4   | 1,8             | 1,30      | 1,04 | aman                   | 57,04             | 1,72              | aman                 |
| 5   | 1,9             | 1,20      | 1,07 | aman                   | 57,17             | 1,63              | aman                 |
| 6   | 2               | 1,10      | 1,09 | aman                   | 57,29             | 1,55              | aman                 |
| 7   | 2,1             | 1,00      | 1,12 | vortex                 | 57,42             | 1,48              | tidak aman           |
| 8   | 2,2             | 0,90      | 1,15 | vortex                 | 57,55             | 1,41              | tidak aman           |
| 9   | 2,3             | 0,80      | 1,17 | vortex                 | 57,67             | 1,35              | tidak aman           |
| 10  | 2,4             | 0,70      | 1,20 | vortex                 | 57,80             | 1,29              | tidak aman           |

Sumber: perhitungan

\*LWL : +57,3

Dengan memperhatikan aspek aspek diatas maka dipilih diameter pipa pesat sebesar 1,8 meter dengan kecepatan aliran didalam pipa 4,68 m/dt.

#### Tebal Pipa Pesat

Ketebalan pipa perlu direncanakan sedemikian rupa agar pipa pesat memiliki kekuatan untuk menahan pengaruh tekanan air yang ada pada pipa pesat, tebal pipa dihitung dengan persamaan berikut:

- Tebal pipa menurut ASME,1995:

$$t = (2.5 \times D) + 1.2$$

dimana diameter pipa (D) dalam satuan meter dan tebal pipa (t) dalam milimeter

$$t = (2.5 \times 1,8) + 1.2 = 5,7 \text{ mm} + 3 \text{ mm} = 8,7 \text{ mm}$$

- Tebal pipa menurut USBR:

$$t = (D + 508) / 400$$

dimana diameter pipa (D) dalam satuan millimeter dan tebal pipa (t) dalam milimeter

$$t = (1800 + 508) / 400 = 5,77 \text{ mm} + 3 \text{ mm} = 8,77 \text{ mm}$$

- Tebal pipa menurut ESHA:



$$e = \frac{PD}{2\sigma k f} + e_s$$

dimana:

- e : tebal pipa (mm)
- P : tekan hidrostatik dalam pipa (kN/mm<sup>2</sup>)
- D : diameter pipa (mm)
- $\sigma$  : tegangan ijin pipa (1400 kN/mm<sup>2</sup>)
- k : efisiensi ketahanan (k = 1 untuk pipa utuh)
- e<sub>s</sub> : tebal jagaan untuk sifat korosif (mm)

perhitungan tekanan hidrostatik untuk pipa perlu memperhatikan pengaruh pukulan air terhadap pipa, dimana kenaikan air akibat pukulan air dihitung dengan persamaan allevi:

$$\Delta P = P_0 \left( \frac{N}{2} \pm \sqrt{\frac{N^2}{4} + N} \right)$$

$$N = \left( \frac{LV}{gP_0 T} \right)^2$$

$$T = 2L/C$$

$$C = \sqrt{\frac{10^{-3}k}{\left(1 + \frac{kD}{Et}\right)}}$$

dimana:

- P<sub>0</sub> = tekanan hidrostatik akibat tinggi jatuh (*head*)
- V = kecepatan (m/dt)
- L = panjang pipa pesat
- T = waktu penutupan katup atau *wicket gate* (detik)
- k = modulus air (2,1 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>)
- E = modulus elastis bahan pipa (78,5 x 10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup> untuk pipa baja *cast iron*)

Maka perhitungan pukulan air adalah:

Digunakan tebal pipa untuk pendekatan menggunakan tebal pipa dari perhitungan metode USBR : 5,77 mm

$$\text{Kecepatan rambat tegangan (C)} : \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^9}{\left(1 + \frac{2,1 \cdot 10^9 \cdot 1800}{7,85 \cdot 10^6 \cdot 5,77}\right)}} = 474,04 \text{ m/dt}$$

$$\text{Waktu penutupan kritis (T)} : 2L/C : 2 \times 20 / 474,04 = 0,084 \text{ detik}$$

Umumnya waktu penutupan adalah sekitar 5 detik sehingga ( $5 > 0,084$  detik) sehingga pengaruh pukulan air terhadap tegangan pipa dihitung dengan persamaan allevi:

$$N = \left( \frac{LV}{gPoT} \right)^2 = \left( \frac{20,468}{9,81 \cdot 8028 \cdot 0,084} \right)^2 = 0,0002$$

Kenaikan akibat pukulan air:

$$\Delta P = 8000 \left( \frac{0,0002}{2} \pm \sqrt{\frac{0,0002^2}{4} + 0,0002} \right) = 0,002 \text{ m}$$

Sehingga tekanan hidrostatik total pada pipa:

$$P = 8 + 0,002 = 8,002 \text{ N/m}^2 \text{ (pengaruh pukulan air diabaikan karena terlalu kecil)}$$

Maka tebal pipa :

$$e = \frac{PD}{2\sigma kf} + es$$

$$e = \frac{8,002 \cdot 1,8}{214001} + 3$$

$$e = 8,16 \text{ mm}$$

Tebal pipa menurut barlow:

$$H = \frac{0,002 + \sigma x t}{D + 0,002 t}$$

Maka:

$$8 = \frac{0,002 + 1400 x t}{1400 + 0,002 t}$$

Dengan trial dan error didapatkan ketebalan baja sebesar 10,32 mm

Maka dari hasil perhitungan tebal pipa untuk tiap metode adalah:

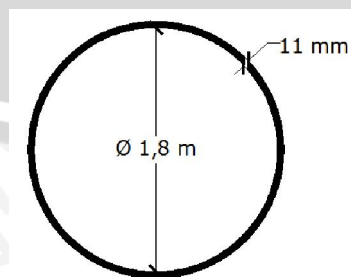
ASME : 8.7 mm

USBR : 8.77 mm

Penche : 8.16 mm

Barlow : 10,32 mm

Direncanakan tebal pipa pesat adalah 11 mm (tebal pipa terbesar dari analisa diatas)



**Gambar 4.32. Desain Diameter dan Tebal Pipa Pesat**

### Kebutuhan Terhadap Tangki Gelombang (*Surge Tank*)

Pipa pesat membutuhkan tangki gelombang bila  $L > 4H$ , dalam studi ini panjang pipa pesat ( $L$ ) adalah 20 meter sedangkan tinggi jatuh ( $H$ ) adalah 8,03 meter maka:

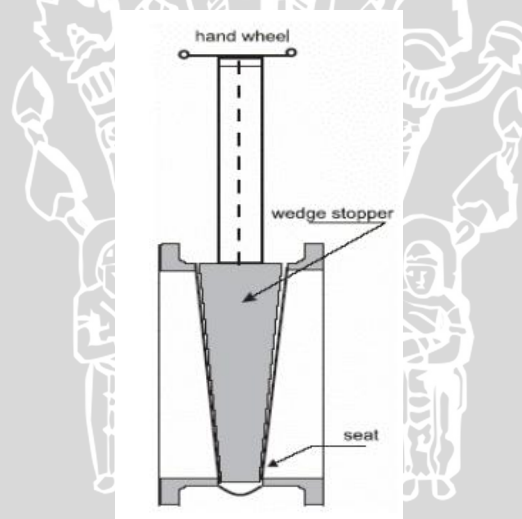
$L > 4H = 20 < 32,11$ . Sehingga pipa pesat tidak membutuhkan adanya tangki gelombang (*surge tank*).

### Sistem Pengambilan Melalui Pipa Pesat (*Intake*)

Sistem pengambilan pada mulut pipa pesat perlu diperhitungkan dengan tujuan untuk mengatur sistem regulasi debit air yang masuk ke dalam turbin baik saat kondisi operasional maupun kondisi perawatan, intake pipa pesat biasanya didesain dengan menggunakan sistem katup (*valve*), Tipe katup yang sering diaplikasikan adalah :

- Gate valve
- Butterfly valve
- Needle valve

Berdasarkan tipe valve tersebut diatas, maka tipe katup yang dipergunakan dalam studi ini adalah katup pintu (*gate valve*) dengan pertimbangan bahwa katup jenis ini lebih mudah digunakan dan sering digunakan sebagai intake regulasi untuk pipa pesat.



**Gambar 4.33. Bentuk Tipikal Katup pintu (*gate valve*)**

Gambar desain perencanaan dapat dilihat pada lampiran.

#### 4.4.4. Perencanaan Saluran Pembuang (*Tailrace Cannal*)

Saluran *tailrace* berfungsi untuk membuang aliran setelah melewati turbin menuju sungai, dalam studi ini dikarenakan aliran air dari turbin akan dikembalikan ke sungai Brantas maka direncanakan saluran *tailrace* dengan sistem pengaturan / regulasi pada bagian akhir dari *draft tube* berupa pintu atau katup kemudian debit air akan



dialirkan melalui saluran terbuka dimana diujung saluran akan direncanakan ambang lebar sebagai kontrol elevasi muka air (TWL). Dalam perencanaan saluran pembuang digunakan data teknis rencana sebagai berikut:

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Debit rencana             | : 44 m <sup>3</sup> /dt   |
| Elv dasar saluran rencana | : +48,53                  |
| Lebar saluran             | : 40 meter (direncanakan) |
| Bentuk saluran            | : persegi                 |
| Jenis pasangan            | : beton                   |
| Koefisien manning         | : 0,012                   |

Saluran pembuang direncanakan akan menyatu dengan ujung saluran penguras dari terjunan miring sehingga tidak dibutuhkan adanya dua saluran pembuangan menuju sungai Brantas. Aliran air dari saluran pembuang akan dialirkan melalui ambang (*weir*) pada ujung saluran dengan data perencanaan:

|                     |   |
|---------------------|---|
| Bentuk ambang       | : ogee tipe I   |
| Lebar ambang        | : 40 meter  |
| Tinggi ambang       | : 0,5 meter   |
| Elevasi ambang      | : +49,03  |
| Elevasi dasar       | : +48,53 (direncanakan)   |
| Koefisien debit (C) | : 1,7 m <sup>1/2</sup> /dt (diasumsikan untuk aliran tenggelam) |

Analisa elevasi muka air pada ambang dipergunakan sebagai acuan *tail water level* (TWL) untuk referensi tinggi efektif, elevasi muka air pada ambang dihitung dengan persamaan:

$$Q = C B H^{1,5}$$

Dimana:

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Q | : debit melalui ambang              |
| B | : lebar ambang (40 meter)           |
| C | : koefisien debit (1,7)             |
| H | : tinggi muka air diatas ambang (m) |

Dari persamaan tersebut dapat dihitung lengkung kapasitas ambang untuk tiap variasi ketinggian air, untuk tinggi muka air 0,1 meter maka:

$$Q = C B H^{1,5}$$

$$Q = 1,7 \cdot 40 \cdot 0,1^{1,5}$$

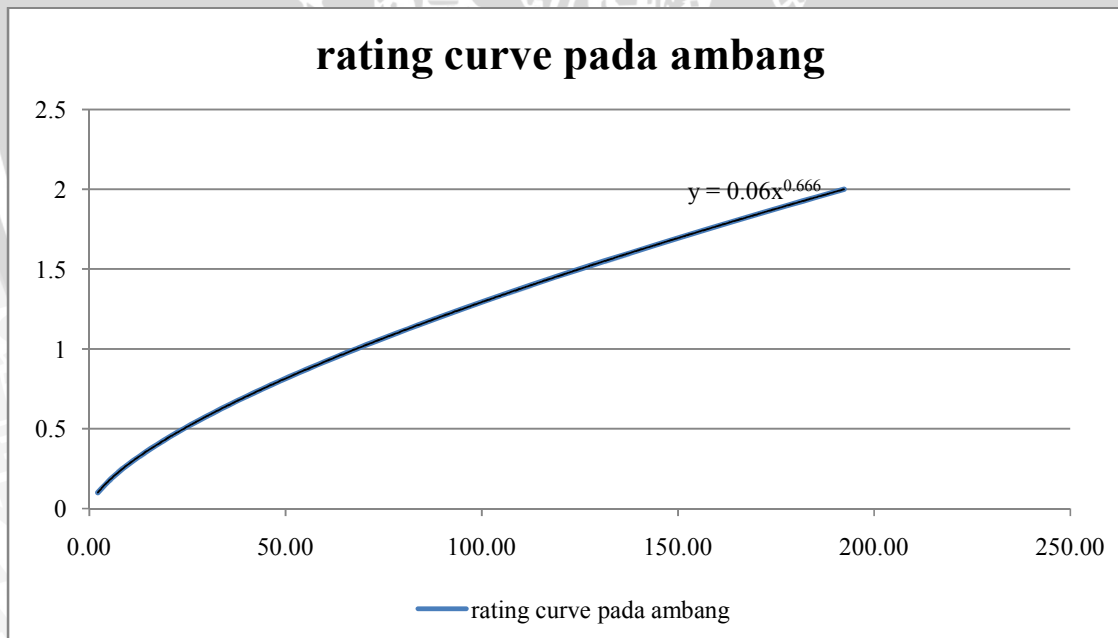
$$Q = 2,15 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Selanjutnya perhitungan ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.22. Perhitungan Tinggi Muka Air Diatas Ambang

| No | Elv MA | H (m) | Q (m <sup>3</sup> /dt) |
|----|--------|-------|------------------------|
| 1  | 49,13  | 0,1   | 2,15                   |
| 2  | 49,23  | 0,2   | 6,08                   |
| 3  | 49,33  | 0,3   | 11,17                  |
| 4  | 49,43  | 0,4   | 17,20                  |
| 5  | 49,53  | 0,5   | 24,04                  |
| 6  | 49,63  | 0,6   | 31,60                  |
| 7  | 49,73  | 0,7   | 39,83                  |
| 8  | 49,83  | 0,8   | 48,66                  |
| 9  | 49,93  | 0,9   | 58,06                  |
| 10 | 50,03  | 1     | 68,00                  |
| 11 | 50,13  | 1,1   | 78,45                  |
| 12 | 50,23  | 1,2   | 89,39                  |
| 13 | 50,33  | 1,3   | 100,79                 |
| 14 | 50,43  | 1,4   | 112,64                 |
| 15 | 50,53  | 1,5   | 124,92                 |
| 16 | 50,63  | 1,6   | 137,62                 |
| 17 | 50,73  | 1,7   | 150,72                 |
| 18 | 50,83  | 1,8   | 164,22                 |
| 19 | 50,93  | 1,9   | 178,09                 |
| 20 | 51,03  | 2     | 192,33                 |

Sumber: perhitungan



Gambar 4.34. Rating Curve Pada Ambang

Setelah diketahui *rating curve* pada amabng maka dapat diketahui tinggi muka air pada saluran pembuang yang akan dipergunakan sebagai referensi perhitungan *tail*

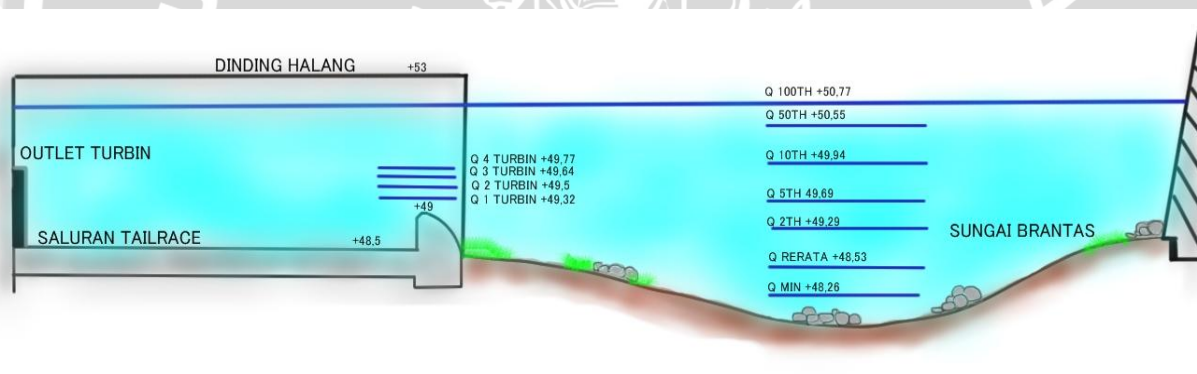
*water level* berdasarkan debit operasional turbin, elevasi muka air untuk tiap debit operasional ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.23. Perhitungan Tinggi Muka Air Diatas Ambang**

| No | Debit Operasi (m <sup>3</sup> /dt) | Jumlah Turbin | H MA (m) | Elevasi TWL (m) |
|----|------------------------------------|---------------|----------|-----------------|
| 1  | 11                                 | 1             | 0.30     | 49.32           |
| 2  | 22                                 | 2             | 0.47     | 49.50           |
| 3  | 33                                 | 3             | 0.62     | 49.64           |
| 4  | 44                                 | 4             | 0.75     | 49.77           |

Sumber: perhitungan

Desain hidrolis mercu direncanakan sama seperti perencanaan pelimpah samping dengan acuan tinggi muka air (hd) adalah 0,75 m (debit operasional 4 turbin), dan direncanakan dinding halang untuk menghindari bahaya banjir pada sungai Brantas, pada analisa tail water level pada sungai brantas diketahui elevasi muka air debit banjir kala ulang 100 tahun adalah +50,77 maka dinding direncanakan pada elevasi +53 atau setinggi 4,5 meter, bentuk mercu dan elevasi *tail water level* ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 4.35. Sketsa Kondisi Muka Air Pada Saluran Tailrace**

Dari analisa tersebut maka referensi ketinggian muka air pada saluran pembuang adalah setinggi 1,25 meter atau pada elevasi +49,77, maka saluran pembuang direncanakan dengan tipe saluran terbuka sebagai berikut:

$$\text{Luas saluran (A)} \quad : A = b \times h = 40 \times 1,25 = 50 \text{ m}^2$$

$$\text{Keliling basah (P)} \quad : P = (b + 2h) = (40 + 2 \times 1,25) = 42,5 \text{ m}$$

$$\text{Radius hidrolis (R)} \quad : R = A/P = 50/42,5 = 1,17$$

$$\text{Slope saluran (S)} \quad : S = \left( \frac{44 \times 0,012}{40 \times 1,17^{2/3}} \right)^2 = 0,00014$$

$$\text{Kecepatan saluran (V)} \quad : V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} = \frac{1}{0,012} \times 1,17^{2/3} \times 0,00014^{1/2}$$



$$= 0,88 \text{ m/dt}$$

Kapasitas saluran (Q) :  $Q = A \times V = 50 \times 0,88 = 44 \text{ m}^3/\text{dt}$

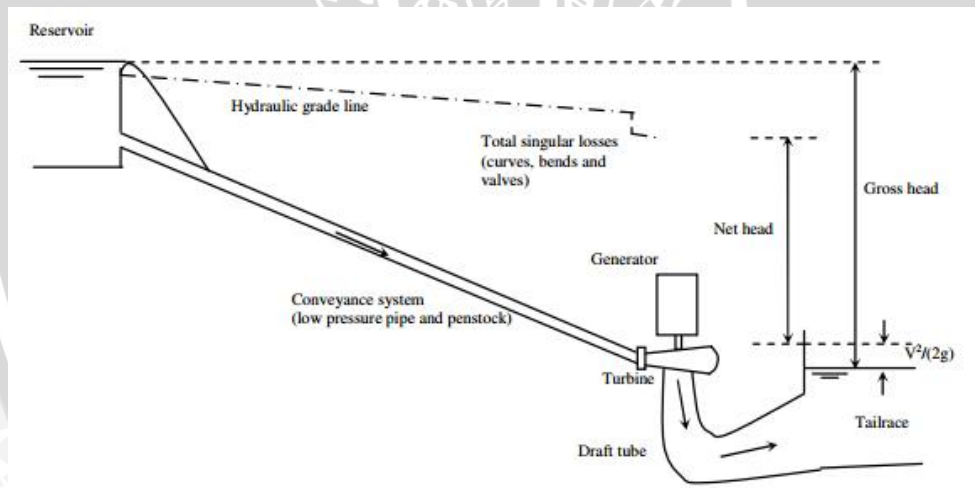
Gambar desain perencanaan dapat dilihat pada **lampiran**.

#### 4.5. Tinggi Jatuh Efektif

Tinggi jatuh efektif dalam studi ini mencakup berdasarkan elevasi muka air pada hulu bendung gerak Mrican dan elevasi muka air pada hilir bendung gerak Mrican. Dimana elevasi muka air pada hulu menggunakan ketetapan aturan operasi bendung gerak Mrican yaitu + 57,8 dan elevasi pada hilir ditentukan berdasarkan analisa *tail water level* pada analisa sebelumnya yakni +49,77 sehingga tinggi jatuh kotor (*gross head*) adalah 8 meter.

##### 4.4.1. Kehilangan Tinggi Tekan

Kehilangan tinggi tekan adalah gejala kehilangan tinggi energi dikarenakan perubahan aliran maupun adanya rintangan atau gesekan dari media tempat pengaliran, dalam studi ini kehilangan tekan yang dihitung adalah kehilangan pada: intake PLTMH, pipa pesat dan bak penangkap sedimen.



**Gambar 4.36. Skema Kehilangan Tinggi Tekan**

##### a. Kehilangan pada intake PLTMH

Kehilangan tinggi tekan pada intake PLTMH meliputi kehilangan pada:

- Inlet masuk

Kehilangan tinggi tekan pada inlet masuk menggunakan persamaan (2-34) dimana:

$$hf = f \frac{V^2}{2g}$$

dimana:

$f = 0,1$  (inlet direncanakan berbentuk tipe *round*, gambar 2.28)

$V = 1,19$  m/dt (kecepatan pada saluran irigasi Turitunggorono)

$$hf = 0,1 \frac{1,19^2}{2 \cdot 9,81}$$

$hf = 0,0072$  meter

- Penyaring

Kehilangan tinggi tekan pada penyaring dihitung dengan persamaan:

$$hf = Kt \left( \frac{t}{b} \right)^{4/3} \left( \frac{V_0}{2g} \right) \sin \theta$$

dimana:

$Kt = 1,8$  (bentuk jeruji tipe bulat)

$t = 10$  mm

$b = 500$  mm

$V = 1,91$  m/dt (kecepatan pada saluran irigasi Turitunggorono)

$\theta = 45^\circ$

$$hf = 1,8 \left( \frac{10}{500} \right)^{4/3} \left( \frac{1,91}{2 \cdot 9,81} \right) \sin 45$$

$hf = 0,00064$  m

b. Kehilangan pada bak penangkap sedimen

Kehilangan tinggi tekan pada bak penangkap sedimen adalah kehilangan tinggi tekan pada slauran transisi dari intake ke bak :

$$hf = \frac{0,3}{2g} (V_{in}^2 - V_{out}^2)$$

dimana:

$V_{in} = 1,56$  m/dt

$V_{out} = 0,74$  m/dt

$$hf = \frac{0,3}{2g} (1,56^2 - 0,74^2) = 0,029$$
 m

c. Kehilangan pada pipa pesat

Kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat meliputi kehilangan pada:

- Inlet

Kehilangan tinggi tekan pada inlet masuk menggunakan persamaan:

$$hf = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

dimana:

$$\xi = 0,3 \text{ (bell mouth type)}$$

$$V = 4,68 \text{ m/dt (kecepatan masuk pipa pesat)}$$

$$hf = 0,3 \frac{4,68^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$hf = 0,109 \text{ m}$$

- Penyaring

Kehilangan tinggi tekan pada penyaring dihitung dengan persamaan:

$$hf = Kt \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \left(\frac{V_0}{2g}\right) \sin\theta$$

dimana:

$$Kt = 1,8 \text{ (bentuk jeruji tipe bulat)}$$

$$t = 10 \text{ mm}$$

$$b = 100 \text{ mm}$$

$$V = 0,74 \text{ m/dt (kecepatan masuk pipa pesat)}$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$hf = 1,8 \left(\frac{10}{100}\right)^{4/3} \left(\frac{0,74}{2 \cdot 9,81}\right) \sin 30$$

$$hf = 0,0027 \text{ m}$$

- Gesekan dalam pipa pesat

Kehilangan tinggi tekan akibat gesekan dihitung dengan persamaan darcy weisbach:

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

dimana:

$$L = 20 \text{ m}$$

$$D = 1,8 \text{ m}$$

$$V = 4,76 \text{ m/dt}$$

nilai  $f$  didapat dari pembacaan diagram moody dengan parameter:

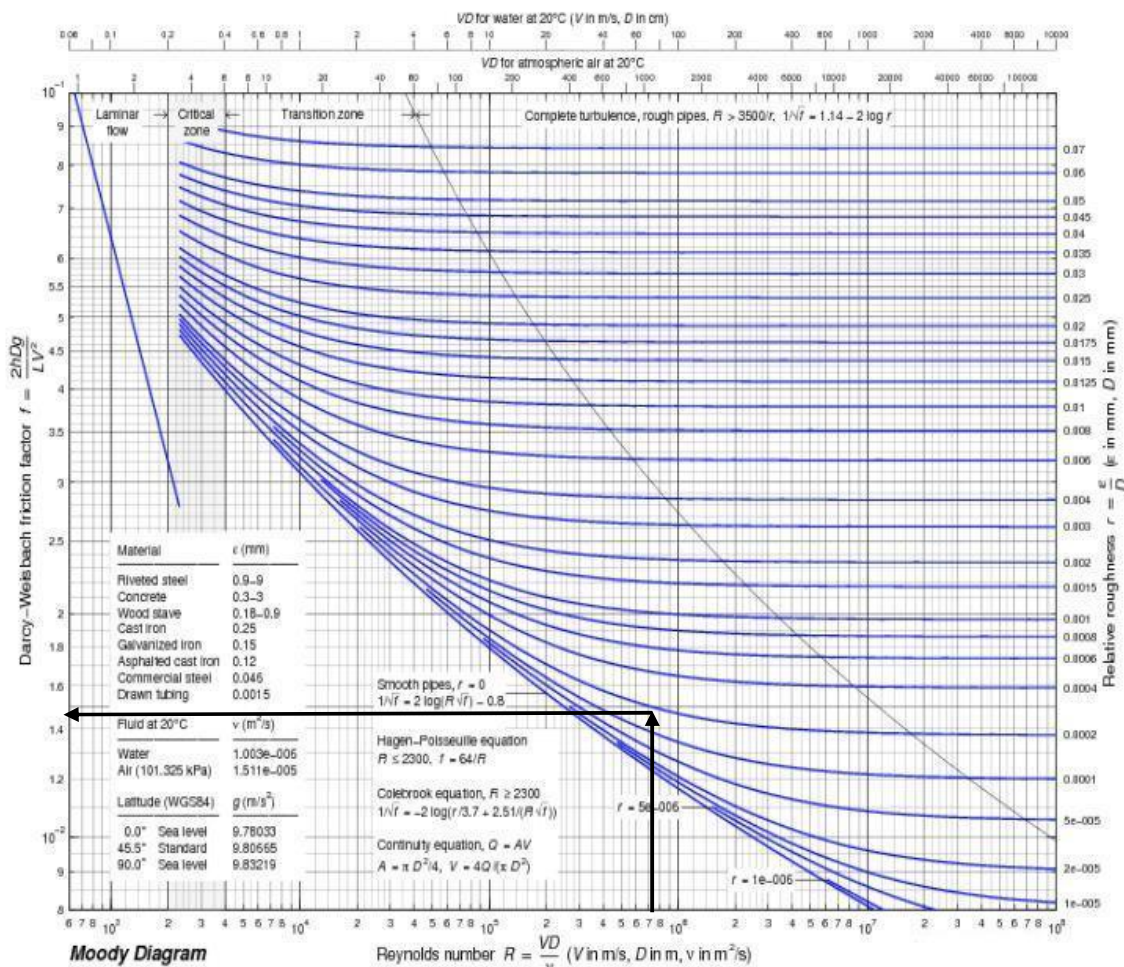
bilangan reynold

$$Re = VD/v = 4,76 \cdot 1,8/10^{-6} = 8,56 \times 10^6$$

kekasaran relatif

$$r = e/D = 0,25/1,8 = 0,00014 \text{ (nilai e didapat dari kekasaran material jenis baja cast iron)}$$





Gambar 4.37. Diagram moody

sehingga didapatkan nilai  $f = 0,015$ .

$$hf = 0,015 \frac{20}{1,8} \frac{4,76^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$hf = 0,186 \text{ m}$$

d. Kehilangan pada turbin diasumsikan sebesar 0,1 m

Untuk selanjutnya perhitungan kehilangan tinggi dan tinggi jatuh efektif ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.24. Perhitungan kehilangan tinggi dan tinggi jatuh efektif

| Paremeter Tinggi Tekan                       | Hf      |
|--|---------|
| <b>Kehilangan Pada Bangunan Pengambilan</b>  |         |
| Inlet  | 0,00722 |
| Trashrack                                    | 0,00064 |
| <b>Kehilangan Pada Bak Penangkap Sedimen</b> |         |
| Transisi                                     | 0,03538 |
| <b>Kehilangan Pada Pipa Pesat</b>            |         |

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| Gesekan                          | 0,10672      |
| Trashrack                        | 0,00273      |
| Belokan                          | 0,22706      |
| Inlet                            | 0,15137      |
| <b>Kehilangan Sebelum Turbin</b> |              |
| Diasumsikan                      | 0,1          |
| <b>Total Kehilangan</b>          | <b>0,547</b> |
| <b>Elevasi TWL</b>               |              |
| Debit 1 Turbin                   | 49,3         |
| Debit 2 Turbin                   | 49,5         |
| Debit 3 Turbin                   | 49,6         |
| Debit 4 Turbin                   | 49,8         |
| Debit Banjir                     | 50,8         |
| <b>Elevasi Muka Air Di Hulu</b>  |              |
| Debit 1 Turbin                   | 57,1         |
| Debit 2 Turbin                   | 57,3         |
| Debit 3 Turbin                   | 57,6         |
| Debit 4 Turbin                   | 57,8         |
| <b>Tinggi Jatuh (Head)</b>       |              |
| Net Head (1 Turbin)              | 7,11         |
| Net Head (2 Turbin)              | 7,19         |
| Net Head (3 Turbin)              | 7,28         |
| Net Head (4 Turbin)              | 7,36         |
| Net Head (Banjir)                | 5,67         |
| Gross Head                       | 7,99         |

Sumber: perhitungan

#### 4.6. Perencanaan Peralatan Hidromekanik dan Elektrik

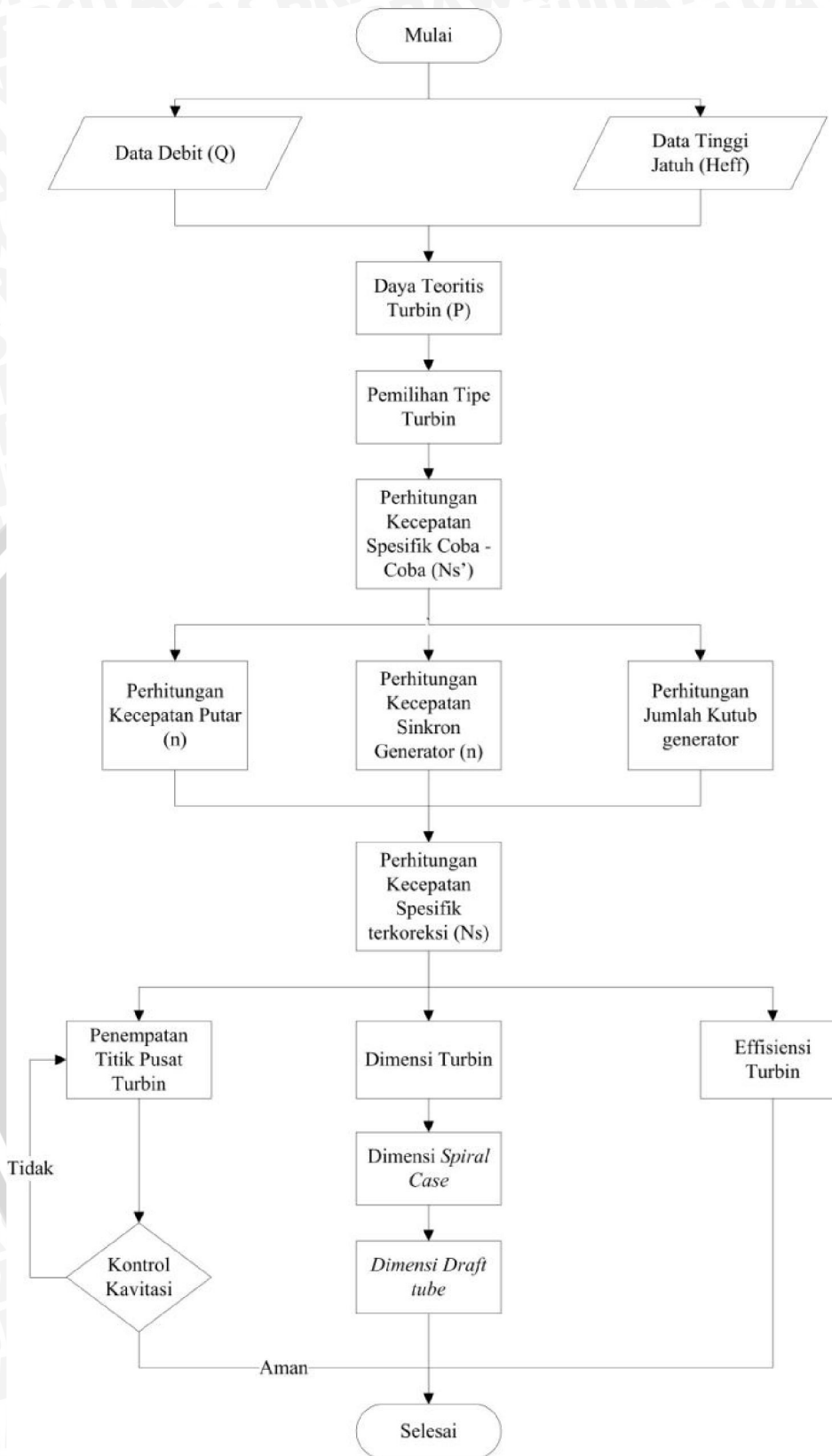
Kajian perencanaan peralatan Hidromekanik dalam studi ini meliputi perencanaan turbin, perencanaan peralatan elektrik dan rumah pembangkit.

##### 4.6.1. Turbin Hidraulik

Perencanaan turbin meliputi: pemilihan tipe turbin, analisa karakteristik turbin, titik pusat turbin, kavitasi dan dimensi turbin, dalam studi ini digunakan beberapa metode dalam merencanakan turbin hidraulik, metode yang digunakan adalah metode Amerika (USBR) dalam *engineering monograph* no.20, metode yang dikembangkan oleh *European small hydropower association* (ESHA) dalam Penche,2004 dan simulasi program TURBNPRO V3.

Tata cara perencanaan turbin hidraulik ditunjukkan pada diagram alir berikut:





Gambar 4.38. Diagram Alir Perencanaan Turbin Hidraulik





#### 4.6.1.1. Metode Amerika (USBR)

##### Pemilihan Tipe Turbin

Turbin dipilih berdasarkan karakteristik yang sesuai dengan jenis turbin yang digunakan, turbin biasanya ditentukan berdasarkan besarnya debit, tinggi jatuh, potensi daya bangkitan dan kecepatan spesifik turbin. dengan data rencana:

Debit desain (Q) : 11 m<sup>3</sup>/dt (direncanakan terdapat 4 buah turbin)

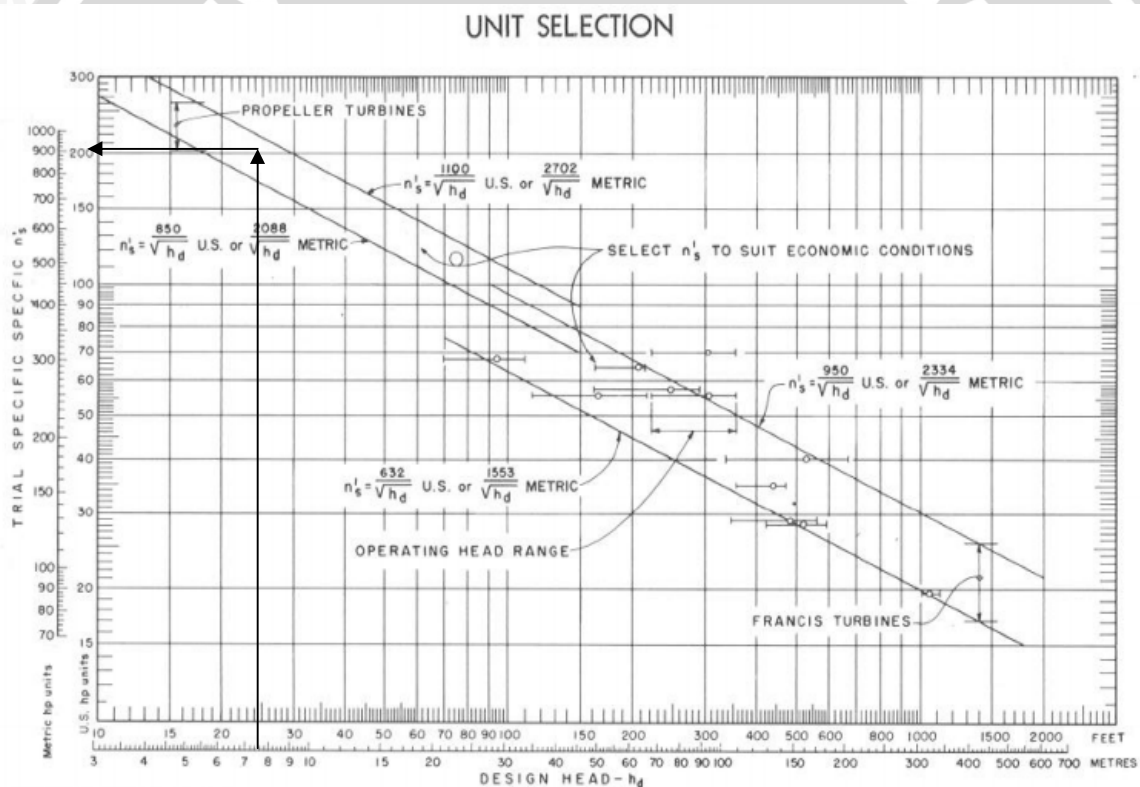
Net head (H) : 7,36 m

Daya teoritis (P) : 9,81 x Q x H

: 9,81 x 11 x 7,36

: 794,5 kW atau 0,8 MW atau 683 HP

Dengan mengetahui besarnya tinggi jatuh efektif (net head) turbin dapat ditentukan dengan pertimbangan kecepatan spesifik turbin seperti pada grafik pemilihan turbin yang disarankan oleh USBR sebagai berikut:



**Gambar 4.39. Grafik Pemilihan Tipe Turbin Yang Disarankan Menurut USBR**

Dengan tinggi jatuh sebesar 7,48 m maka dari grafik diatas didapatkan putaran spesifik coba coba ( $N_s'$ ) sebesar 900 atau dapat digunakan persamaan dari grafik diatas:

$$N_s' = \frac{2395}{\sqrt{H}} = \frac{2395}{\sqrt{7,36}} = 882,6 \text{ mkW}$$

Kemudian cek kecepatan putar turbin dengan persamaan:

$$n = \frac{Ns' H^{1,25}}{\sqrt{P}} = \frac{882,6 \cdot 7,36^{1,25}}{\sqrt{683}} = 409,5 \text{ rpm}$$

Turbin direncanakan dengan menggunakan generator tipe sinkron dengan frekuensi 50 Hz maka kecepatan sinkron generator sama dengan kecepatan putar turbin maka kecepatan sinkron generator:

$$\begin{aligned} n &= \frac{120 f}{P} \\ 409,5 &= \frac{120 \cdot 50}{P} \\ P &= 14,65 \end{aligned}$$

Dikarenakan nilai kutub generator (p) harus memiliki nilai genap dan tidak berbentuk bilangan desimal maka dipilih alternatif jumlah kutub yang mendekati nilai coba coba tersebut sehingga dapat diketahui kecepatan putar yang akan digunakan dan dapat dihitung besarnya kecepatan spesifik terkoreksi, perhitungan ditunjukkan pada tabel berikut :

**Tabel 4.25. Alternatif Pemilihan Jumlah Kutub Terhadap Kecepatan Spesifik**

| Alternatif | Kutub Generator (Buah) | Kecepatan Sinkron (rpm) | Kecepatan Spesifik Terkoreksi (mkW) | Kecepatan Putar Digunakan (rpm) | $\Delta n$ |
|------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------|
| 1          | 14                     | 429                     | 923,68                              | 429                             | 0,00       |
| 2          | 16                     | 375                     | 808,22                              | 375                             | 0,00       |
| 3          | 18                     | 333                     | 718,42                              | 333                             | 0,00       |

*Sumber: perhitungan*

Dari hasil tersebut dipilih alternatif 1 dengan 14 kutub generator dengan kecepatan spesifik terkoreksi adalah 923,68 mkW, pemilihan alternatif dilakukan berdasarkan jumlah kutub generator dikarenakan jumlah kutub generator yang kecil akan menghasilkan desain turbin yang lebih kecil (ekonomis).

Sehingga rasio kecepatan putaran dan kecepatan spesifik adalah  $n/Ns = 0,46$

Selain itu dapat ditentukan rasio kecepatan ( $\phi$ ) dan diameter *runner* maksimum (Dm), ratio kecepatan dihitung dengan persamaan:  $0,023 Ns^{2/3}$  dan diameter maksimum

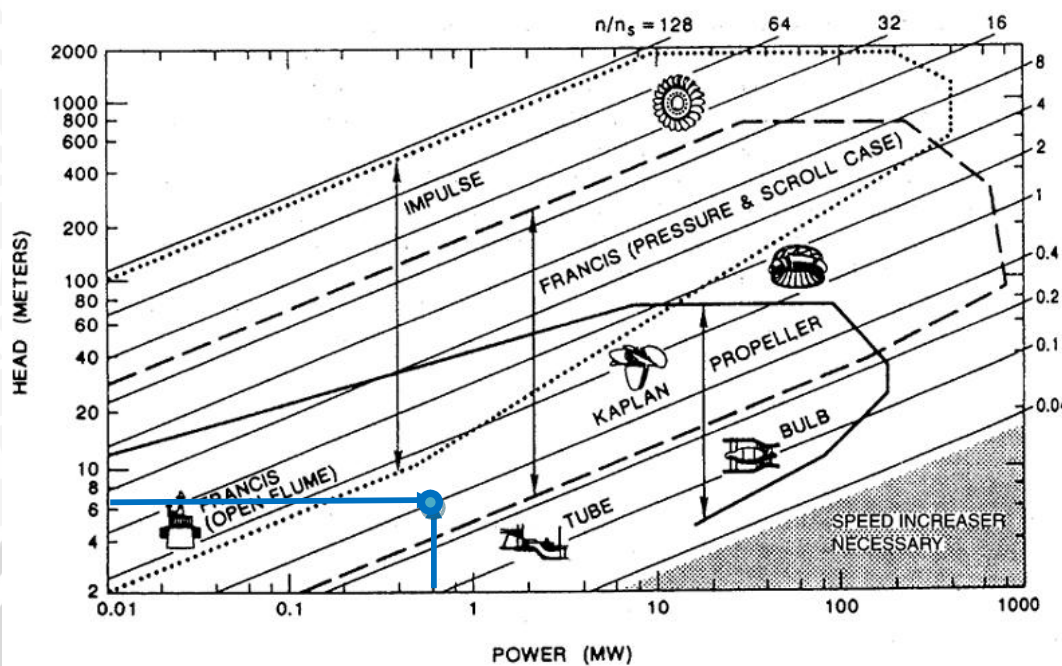
dihitung dengan persamaan :  $\frac{84,4 \phi H^{0,5}}{n}$  maka:

$$\phi = 0,023 Ns^{2/3} = 0,023 \cdot 923,68^{2/3} = 2,21 \text{ m/dt}$$

$$Dm = \frac{84,4 \cdot 2,21 \cdot 7,36^{0,5}}{429} = 1,18 \text{ meter direncanakan } 1,2 \text{ meter}$$



Dan untuk memilih tipe turbin dapat digunakan grafik hubungan antara tinggi jatuh, daya dan rasio kecepatan sebagai berikut:



**Gambar 4.40. Grafik Pemilihan Tipe Turbin**

Dari grafik tersebut dengan data teknis diatas turbin yang bisa digunakan berada pada daerah turbin baling - baling, maka dapat dipilih turbin jenis Kaplan. Turbin Kaplan memiliki keunggulan seperti pada tabel 2.6 dengan kecepatan putaran (N) yang tinggi antara 250 – 750 rpm sehingga membutuhkan tipe generator yang kecil dan dapat mengakomodasi debit (Q) tinggi antara 3 – 50 m<sup>3</sup>/dt dan cocok untuk tinggi jatuh rendah 2 – 20 meter juga memiliki efisiensi yang tinggi 90% – 93%. sehingga turbin Kaplan direkomendasikan untuk studi ini.

#### Titik Pusat Turbin

Analisa titik pusat turbin sangat berpengaruh terhadap gejala kavitasi, penempatan turbin yang tidak tepat akan menyebabkan kavitasi terjadi pada turbin. data perencanaan sebagai berikut:

Elevasi lokasi studi : +58 meter dpl

Tinggi jatuh efektif (H) : 7,36 m

Kecepatan spesifik (Ns) : 923,68 m-kW

Suhu Air : 20°

Maka dengan persamaan :  $Z = TWL + H_s + b$

Dimana:



TWL : +49,77 meter

Hs : Tinggi hisap turbin, dihitung dengan persamaan :

$$H_s = H_a + H_w - \sigma_c H$$

Dimana:

H<sub>a</sub> : tekanan atmosfer : 10,29 (berdasarkan tabel 2.6 untuk +58 dpl)

H<sub>w</sub> : tekanan uap air : 0,24 (berdasarkan tabel 2.6 untuk suhu air 20°)

σ<sub>c</sub> : koefisien thoma kritis, USBR merekomendasikan koefisien thoma kritis

untuk turbin tipe Kaplan dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_c = \frac{N_s^{1.64}}{50327}$$

$$\sigma_c = \frac{923,68^{1.64}}{50327} = 1,45$$

maka:

$$H_s = 10,29 + 0,24 - 1,45 \cdot 7,36$$

$$H_s = -0,66 \text{ m, dimana kavitasasi akan terjadi jika nilai tinggi hisap (H}_s\text{)}$$

berada pada nilai diatas -0,62 m jadi untuk keamanan direncanakan -1,16 m

b = perbedaan tinggi antar pusat turbin dengan outlet *runner*, USBR merekomendasikan b = 0,4 Dm, sehingga b = 0,4 x 1,2 = 0,49 m, namun dikarenakan nilai H<sub>s</sub> adalah minus maka nilai b harus diabaikan karena turbin dalam keadaan tenggelam, sehingga titik pusat turbin adalah:

$$Z = 49,77 + (-1,16)$$

$$Z = +48,65 \text{ direncanakan pada } +48,6$$

### Kontrol Gejala Kavitasasi

Kavitasasi adalah fenomena dimana terdapat gelembung udara pada turbin yang akan membentur dinding *runner* sehingga akan mengakibatkan korosi. Dengan data perhitungan sebelumnya diketahui sebagai berikut:

Tekanan atmosfer : 10,29

Tekanan uap : 0,24

σ<sub>kritis</sub> : 1,45

tinggi hisap : -1,16 m

tinggi jatuh efektif : 7,36 m

$$\sigma_{\text{aktual}} = \frac{H_a - H_w - H_s}{H}$$

$$\sigma_{\text{aktual}} = \frac{10,29 - 0,24 - (-1,16)}{7,36}$$

$$\sigma_{\text{aktual}} = 1,52$$

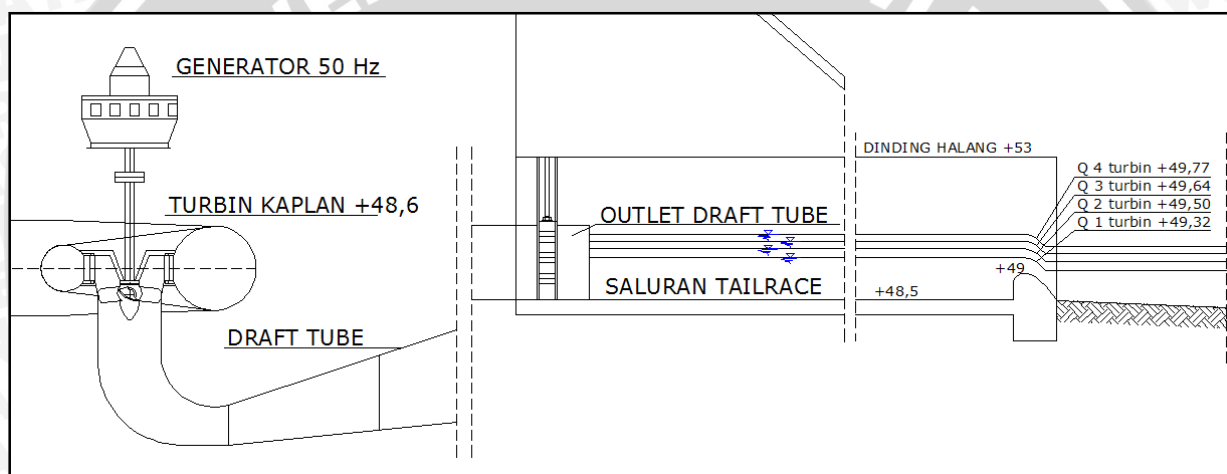
kavitasi terjadi jika  $\sigma_{\text{aktual}} < \sigma_{\text{kritis}}$  sehingga dari perhitungan diatas  $1,52 > 1,45$  atau  $\sigma_{\text{aktual}} > \sigma_{\text{kritis}}$  maka desain turbin aman terhadap gejala kavitasi.

Kepekaan gejala kavitasi juga ditentukan berdasarkan perubahan *tail water level* pada sungai Brantas, maka perlu untuk dianalisa kepekaan gejala kavitasi dikarenakan perubahan TWL. Analisa kepekaan kavitasi ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 4.26. Analisa Kepekaan Kavitasi Terhadap Elv TWL (USBR)**

| No | debit operasi (m <sup>3</sup> /dt) | TWL   | Hs    | $\sigma$ | ket  |
|----|------------------------------------|-------|-------|----------|------|
| 1  | 11                                 | 49,32 | -1,20 | 1,52     | aman |
| 2  | 22                                 | 49,50 | -1,37 | 1,55     | aman |
| 3  | 33                                 | 49,64 | -1,52 | 1,57     | aman |
| 4  | 44                                 | 49,77 | -1,65 | 1,58     | aman |
| 5  | Q banjir                           | 50,77 | -2,64 | 1,72     | aman |

Sumber: perhitungan



**Gambar 4.41. Tipikal Penentuan Titik Pusat Turbin Terhadap TWL**

#### Dimensi turbin

Berdasarkan kajian pustaka maka dimensi turbin yang harus direncanakan dalam studi ini meliputi: dimensi *runner*, dimensi *Guide vane*, dimensi rumah siput (*spiral case*) dan dimensi *draft tube*. Parameter utama dari perencanaan dimensi turbin terletak pada nilai kecepatan spesifik ( $N_s$ ) dan kecepatan putaran ( $n$ ).

Dimana pada analisa sebelumnya:

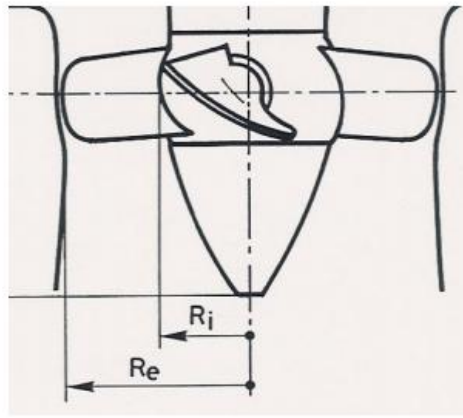
Kecepatan spesifik : 23,8 mkW

Kecepatan dasar : 429 rpm

Tinggi jatuh efektif : 7,36 m

a. Dimensi *runner* turbin

Diameter *runner* turbin Kaplan terdiri dari 2 bagian yaitu *runner* bagian luar dan *runner* bagian dalam seperti pada gambar berikut:



**Gambar 4.42. Bentuk Tipikal Diameter Turbin Kaplan**

Diameter *runner* bagian luar ( $R_e$ ):

Diameter *runner* bagian luar direncanakan sama dengan diameter maksimum turbin ( $D_m$ ) yaitu: 1,2 meter.

Diameter *runner* bagian dalam ( $R_i$ ):

USBR merekomendasikan *runner* bagian dalam adalah sebesar 0,5  $D_m$  sehingga diameter bagian dalam adalah  $R_i : 0,5 R_e : 0,5 \times 1,2 : 0,6$  meter.

b. Dimensi *guide vane* turbin

Dimensi *guide vane* turbin Kaplan dihitung dengan persamaan:

Tinggi *guide vane*:

$$B_g = (0.45 - 31.8 / N_s) D_M$$

$$B_g = (0.45 - 31.8 / 923,8) 1,2$$

$$B_g = 0,5 \text{ m}$$

Lebar ruang *whirl*:

$$H_g = 0.2 D_M$$

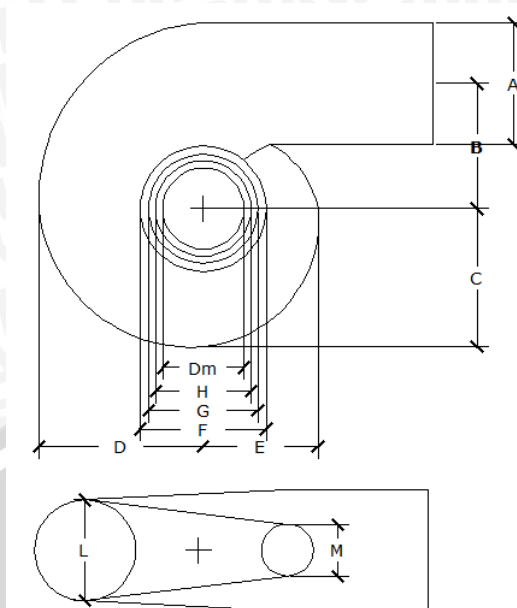
$$H_g = 0.2 \times 1,2$$

$$H_g = 0,24 \text{ m} = 24 \text{ cm}$$

c. Dimensi rumah siput

Dimensi rumah siput turbin Kaplan dihitung dengan persamaan (2-65) sampai (2-76). Untuk mempermudah perhitungan maka perhitungan akan ditabelkan sebagai berikut:





**Gambar 4.43. Penjelasan Tiap Section Rumah Siput**

**Tabel 4.27. Perhitungan Dimensi Rumah Siput Turbin**

| Section | Persamaan                                | Dimensi (m) |
|---------|--|-------------|
| A       | $= D_M 0,4Ns^{0,2}$                      | 1,88        |
| B       | $= D_M (1,26 + 3,79 \times 10^{-4} Ns)$  | 1,93        |
| C       | $= D_M (1,46 + 3,24 \times 10^{-4} Ns)$  | 2,11        |
| D       | $= D_M (1,59 + 5,74 \times 10^{-4} Ns)$  | 2,54        |
| E       | $= D_M (1,21 + 2,71 \times 10^{-4} Ns)$  | 1,75        |
| F       | $= D_M (1,45 + 72,17/ Ns)$               | 1,84        |
| G       | $= D_M (1,29 + 41,63/ Ns)$               | 1,61        |
| H       | $= D_M (1,13 + 31,86/ Ns)$               | 1,4         |
| I       | $= D_M (0,45 - 31,80/ Ns)$               | 0,5         |
| L       | $= D_M (0,74 + 8,7 \times 10^{-4} Ns)$   | 1,85        |
| M       | $= D_M / (2,06 - 1,2 \times 10^{-3} Ns)$ | 1,25        |

Sumber: perhitungan

Dimana tiap section dijelaskan pada gambar berikut:

Kecepatan didalam rumah siput:

$$V = 488/Ns^{0,44}$$

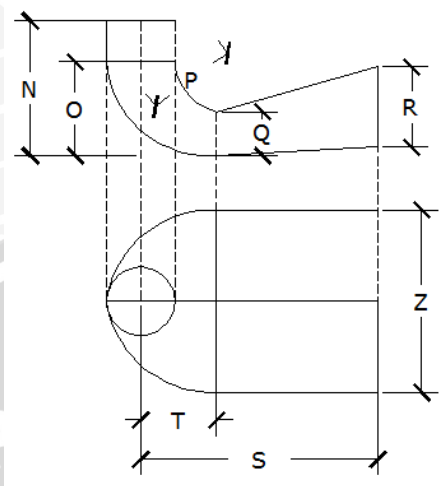
$$V = 488/923,8^{0,44}$$

$$V = 24,19 \text{ m/dt}$$

Dimana syarat kecepatan > 12 m/dt, jadi desain rumah siput memenuhi syarat kecepatan.

d. Dimensi *draft tube*

Dimensi *draft tube* turbin Kaplan dihitung dengan persamaan (2-77) sampai (2-85). perhitungan akan ditabelkan sebagai berikut:



**Gambar 4.44.** Penjelasan Tiap Section *Draft Tube*

**Tabel 4.28.** Perhitungan Dimensi *Draft Tube* Turbin

| section | persamaan                                | Dimensi (m) |
|---------|--|-------------|
| N       | $= D_M (2 - 2,14 \times 10^{-6} N_s)$    | 2,4         |
| O       | $= D_M (1,4 - 1,67 \times 10^{-5} N_s)$  | 1,67        |
| P       | $= D_M (1,26 - 16,35 / N_s)$             | 1,5         |
| Q       | $= D_M (0,66 - 18,4 / N_s)$              | 0,77        |
| R       | $= D_M (1,25 - 7,98 \times 10^{-5} N_s)$ | 1,42        |
| S       | $= D_M (4,26 - 201,51 / N_s)$            | 4,85        |
| T       | $= D_M (1,2 + 5,12 \times 10^{-4} N_s)$  | 2,01        |
| Z       | $= D_M (2,58 + 102,66 / N_s)$            | 3,24        |

Sumber: perhitungan

Kecepatan pada inlet *draft tube* dihitung dengan persamaan :

$$V = 8.74 + 2.48/N_s$$

$$V = 8.74 + 2.48/923,8$$

$$V = 9,01 \text{ m/dt}$$

#### Effisiensi Turbin

Effisiensi turbin dapat diketahui berdasarkan persamaan (2-86) namun effisiensi turbin hanya bisa diketahui melalui percobaan lapangan atau model dikarenakan daya aktual tidak bisa diketahui secara langsung.

Effisiensi turbin biasanya dikeluarkan oleh perusahaan manufaktur untuk tiap spesifikasi turbin tertentu, maka dipergunakan gambar 2.36 untuk mengetahui kisaran effisiensi turbin, dalam studi ini debit yang dipergunakan untuk PLTMH relatif stabil maka nilai effisiensi dapat menggunakan effisiensi maksimum, untuk turbin tipe Kaplan effisiensi 100% atau  $Q/Q_{\max} = 1$  adalah 0,93 atau 93%.

#### 4.6.1.2. Metode Eropa (ESHA)

##### Pemilihan Tipe Turbin

Menurut Penche turbin dapat dipilih berdasarkan data teknis seperti debit, tinggi jatuh dan variasi penerimaan debit serta tinggi jatuh, dengan data teknis sebagai berikut:

Debit desain (Q) : 11 m<sup>3</sup>/dt (direncanakan terdapat 4 buah turbin)

Net head (H) : 7,36 m

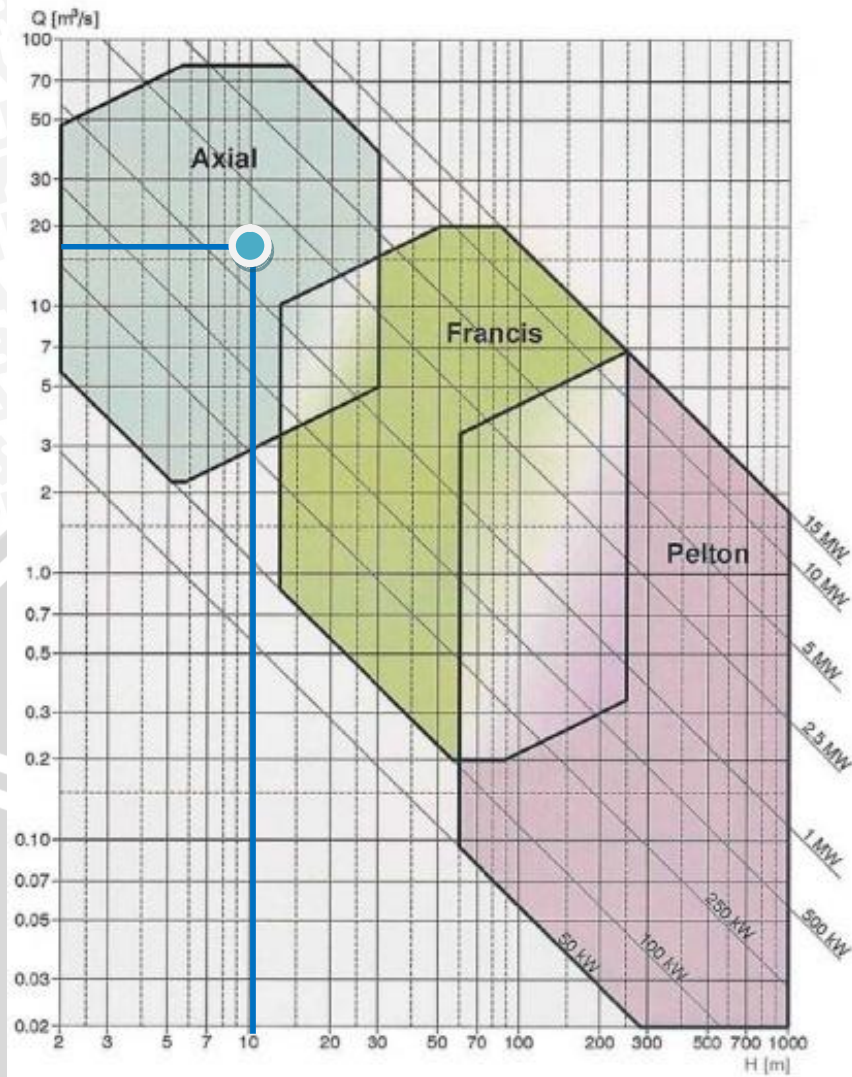
Dengan mengetahui besarnya tinggi jatuh efektif (net head) dan debit desain turbin dapat ditentukan turbin berdasarkan tabel jangkauan tinggi jatuh operasional dan pada grafik pemilihan turbin yang disarankan oleh ESHA sebagai berikut:

**Tabel 4.29. Klasifikasi turbin berdasarkan tinggi jatuh (Hn)**

| Tipe Turbin                | Jangkauan tinggi jatuh (Hn)<br>(m) |
|----------------------------|------------------------------------|
| Kaplan dan Baling - Baling | $2 < H_n < 40$                     |
| Francis                    | $25 < H_n < 350$                   |
| Pelton                     | $50 < H_n < 1300$                  |
| Crossflow                  | $5 < H_n < 200$                    |
| Turgo                      | $50 < H_n < 250$                   |

Sumber: Penche, 2004





**Gambar 4.45. Grafik Pemilihan Tipe Turbin Yang Disarankan Menurut ESHA**

Berdasarkan gambar diatas maka jenis turbin yang bisa digunakan adalah turbin tipe *axial*, turbin *axial* terdiri atas beberapa jenis turbin yaitu : turbin Kaplan, turbin bulb dan turbin baling baling. Dengan memperhatikan variasi regulasi debit dan tinggi jatuh pada lokasi studi maka dipertimbangkan jenis turbin Kaplan sebagai pilihan dikarenakan variasi penerimaan debit dan tinggi jatuh yang tinggi seperti pada tabel berikut:

**Tabel 4.30. Kepekaan Turbin Terhadap Variasi Debit Dan Tinggi Jatuh**

| Tipe Turbin | Penerimaan terhadap variasi tinggi jatuh | Penerimaan terhadap variasi debit |
|-------------|--|-----------------------------------|
| Pelton      | rendah                                   | Tinggi                            |
| Francis     | Rendah                                   | sedang                            |

| Tipe Turbin             | Penerimaan terhadap variasi tinggi jatuh | Penerimaan terhadap variasi debit |
|-------------------------|--|-----------------------------------|
| Kaplan regulasi ganda   | Tinggi                                   | Tinggi                            |
| Kaplan regulasi tunggal | Sedang                                   | Tinggi                            |
| Baling – Baling         | rendah                                   | rendah                            |

Sumber: Penche,2004

Maka dipilih turbin Kaplan dengan regulasi ganda dikarenakan sistem PLTMH tidak menggunakan waduk untuk pengaturan regulasi debit sehingga debit dan tinggi jatuh akan bervariasi.

Setelah penentuan jenis turbin maka harus dihitung besarnya kecepatan spesifik turbin karena kecepatan spesifik turbin adalah parameter yang mendasari karakteristik turbin hidraulik. Menurut Schweiger dan Gregory dalam Penche,2004 kecepatan spesifik coba coba (*trial specific speed*) turbin Kaplan dihitung dengan persamaan:

$$N_{QE}' = \frac{2.294}{H^{0.486}} = \frac{2.294}{7,36^{0,486}} = 0,87$$

Kemudian cek kecepatan putaran turbin dengan persamaan:

$$n = \frac{N_{QE} E^{0,75}}{\sqrt{Q}}$$

dimana:

n : kecepatan putaran turbin (t/s)

E : energi potensial (Hg)

Q : debit operasional (m<sup>3</sup>/dt)

$$n = \frac{0,87 (736 \times 9,81)^{0,75}}{\sqrt{11}} = 6,49 \text{ t/dt atau } 389 \text{ rpm}$$

Turbin direncanakan dengan menggunakan generator tipe sinkron dengan frekuensi 50 Hz maka kecepatan sinkron generator sama dengan kecepatan putar turbin maka kecepatan sinkron generator:

$$n = \frac{120 f}{P}$$

$$389 = \frac{120 \cdot 50}{P}$$

$$P = 15,4$$

Dikarenakan nilai kutub generator (p) harus memiliki nilai genap dan tidak berbentuk bilangan desimal maka dipilih alternatif jumlah kutub yang mendekati nilai coba coba tersebut sehingga dapat diketahui kecepatan putar yang akan digunakan dan



dapat dihitung besarnya kecepatan spesifik terkoreksi, perhitungan ditunjukkan pada tabel berikut :

**Tabel 4.31. Alternatif Pemilihan Jumlah Kutub Terhadap Kecepatan Spesifik**

| Alternatif | Kutub Generator (Buah) | Kecepatan Sinkron (rpm) | Kecepatan Spesifik Terkoreksi ( $N_{QE}$ ) | Kecepatan Putar Digunakan (rpm) | $\Delta n$ |
|------------|------------------------|-------------------------|--|---------------------------------|------------|
| 1          | 14                     | 429                     | 0,96                                       | 429                             | 0,00       |
| 2          | 16                     | 375                     | 0,84                                       | 375                             | 0,00       |
| 3          | 18                     | 333                     | 0,74                                       | 333                             | 0,00       |

Sumber: perhitungan

Dimana kecepatan spesifik turbin Kaplan berada pada kisaran 0,19 – 1,55. Dari hasil tersebut dipilih alternatif 1 dengan 14 kutub generator dengan kecepatan spesifik terkoreksi adalah 0,96, pemilihan alternatif dilakukan berdasarkan jumlah kutub generator dikarenakan jumlah kutub generator yang kecil akan menghasilkan desain turbin yang lebih kecil (ekonomis).

Selain itu dapat ditentukan rasio kecepatan ( $\phi$ ) dan diameter *runner* maksimum ( $D_m$ ), ratio kecepatan dihitung dengan persamaan:  $2,11 N_{QE}$  dan diameter maksimum dihitung dengan persamaan :  $D_m = 84.5 (0.79 + 1.603 \times N_{QE}) \frac{\sqrt{Hn}}{60n}$  maka:

$$\phi = 2,11 \cdot 0,96^{2/3} = 2 \text{ m/dt}$$

$$D_m = 84.5 (0.79 + 1.603 \times 0,96) \frac{\sqrt{7,36}}{429} = 1,24 \text{ meter direncanakan } 1,3 \text{ meter}$$

#### Titik Pusat Turbin

Analisa titik pusat turbin sangat berpengaruh terhadap gejala kavitasi, penempatan turbin yang tidak tepat akan menyebabkan kavitasi terjadi pada turbin. data perencanaan sebagai berikut:

Elevasi lokasi studi : +58 meter dpl

Tinggi jatuh efektif (H) : 7,48 m

Kecepatan spesifik ( $N_{QE}$ ) : 0,95

Suhu Air : 20°

Maka dengan persamaan :  $Z = TWL + H_s + b$

Dimana:

TWL : +49,77 meter

$H_s$  : Tinggi hisap turbin, dihitung dengan persamaan :



$$H_s = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + \sigma \cdot H$$

Dimana:

$P_{atm}$  : tekanan atmosfer (100506,6 Pa untuk ketinggian +58 dpl)

$P_v$  : tekanan uap air (2300 Pa untuk suhu air 20°)

$\rho$  : berat jenis air (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : percepatan gravitasi (9,81 m/dt<sup>2</sup>)

$V$  : kecepatan setelah *runner* (Penche merekomendasikan  $V = 2m/dt$  untuk pendekatan)

$H$  : tinggi jatuh efektif (m)

$\sigma_c$  : koefisien thoma kritis, Penche merekomendasikan koefisien thoma kritis untuk turbin tipe Kaplan dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_c = 1,5241 \cdot N_{QE}^{1,46} \frac{V^2}{2gH}$$

$$\sigma_c = 1,5241 \cdot 0,96^{1,46} \frac{2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 7,48} = 1,46$$

maka:

$$H_s = \frac{100506,6 - 2300}{1000 \cdot 9,81} + \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} + 1,46 \cdot 7,36$$

$H_s = -0,5$  m, dimana kavitasi akan terjadi jika nilai tinggi hisap ( $H_s$ ) berada pada nilai diatas -0,5 m jadi untuk keamanan direncanakan -1 m

$b$  = perbedaan tinggi antar pusat turbin dengan outlet *runner*, Penche merekomendasikan  $b = 0,41$  Dm, sehingga  $b = 0,41 \times 1,3 = 0,53$  m, namun dikarenakan turbin memiliki nilai tinggi hisap minus maka turbin berada pada kondisi tenggelam sehingga nilai  $b$  dapat diabaikan, sehingga titik pusat turbin adalah:

$$Z = 49,77 + (-1)$$

$$Z = +48,77 \text{ direncanakan pada } +48,8$$

### Kontrol Gejala Kavitasi

Kavitasi adalah fenomena dimana terdapat gelembung udara pada turbin yang akan membentur dinding *runner* sehingga akan mengakibatkan korosi. Dengan data perhitungan sebelumnya diketahui sebagai berikut:

$$\text{Tekanan atmosfer} : P_{atm}/\rho g = 100506,6/(1000 \times 9,81) = 10,24$$

$$\text{Tekanan uap} : P_v/\rho g = 2300/(1000 \times 9,81) = 0,23$$

$$\sigma_{kritis} : 1,46$$

$$\text{tinggi hisap} : -1 \text{ m}$$

$$\text{tinggi jatuh efektif} : 7,36 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{aktual}} &= \frac{H_a - H_w - H_s}{H} \\ \sigma_{\text{aktual}} &= \frac{10,24 - 0,23 - (-1)}{7,36} \\ \sigma_{\text{aktual}} &= 1,5\end{aligned}$$

kavitasi terjadi jika  $\sigma_{\text{aktual}} < \sigma_{\text{kritis}}$  sehingga dari perhitungan diatas  $1,5 > 1,46$  atau  $\sigma_{\text{aktual}} > \sigma_{\text{kritis}}$  maka desain turbin aman terhadap gejala kavitasi.

Kepekaan gejala kavitasi juga ditentukan berdasarkan perubahan tail water level pada sungai Brantas, maka perlu untuk dianalisa kepekaan gejala kavitasi dikarenakan perubahan TWL. Analisa kepekaan kavitasi ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 4.32. Analisa Kepekaan Kavitasi Terhadap Elv TWL (ESHA)**

| No | Debit Operasi (m <sup>3</sup> /dt) | TWL   | Hs    | $\sigma$ | Keterangan |
|----|------------------------------------|-------|-------|----------|------------|
| 1  | 11                                 | 49,32 | -1,06 | 1,51     | aman       |
| 2  | 22                                 | 49,50 | -1,24 | 1,53     | aman       |
| 3  | 33                                 | 49,64 | -1,38 | 1,55     | aman       |
| 4  | 44                                 | 49,77 | -1,51 | 1,57     | aman       |
| 5  | Q banjir                           | 50,77 | -2,51 | 1,70     | aman       |

Sumber: perhitungan

### Dimensi turbin

Berdasarkan kajian pustaka maka dimensi turbin yang harus direncanakan dalam studi ini meliputi: dimensi *runner*, dimensi *Guide vane*, dimensi rumah siput (*spiral case*) dan dimensi *draft tube*. Parameter utama dari perencanaan dimensi turbin terletak pada nilai kecepatan spesifik ( $N_{QE}$ ) dan kecepatan putaran ( $n$ ).

Dimana pada analisa sebelumnya:

Kecepatan spesifik ( $N_{QE}$ ) : 0,96

Kecepatan dasar ( $n$ ) : 429 rpm

Tinggi jatuh efektif : 7,36 m

Kesetaraan antara  $N_{QE}$  dan  $N_s$ ,  $N_s : 995N_{QE}$

Jadi  $N_s = 995 \times 0,96 = 940$  mkW

#### a. Dimensi *runner* turbin

Diameter *runner* turbin Kaplan terdiri dari 2 bagian yaitu *runner* bagian luar dan *runner* bagian dalam:

Diameter *runner* bagian luar ( $R_e$ ):

Diameter *runner* bagian luar direncanakan sama dengan diameter maksimum turbin ( $D_m$ ) yaitu: 1,3 meter.

Diameter *runner* bagian dalam ( $R_i$ ):

$$R_i = \left(0,25 + \frac{0,0951}{N_{QE}}\right) \cdot Re$$

$$R_i = \left(0,25 + \frac{0,0951}{0,96}\right) \cdot 1,3$$

$R_i = 0,41$  direncanakan 0,5 meter

b. Dimensi *guide vane* turbin

Dimensi *guide vane* turbin Kaplan dihitung dengan persamaan:

Tinggi *guide vane*:

$$B_g = (0,45 - 31,8 / N_s) \text{ DM}$$

$$B_g = (0,45 - 31,8 / 940) \cdot 1,3$$

$$B_g = 0,5 \text{ m}$$

Lebar ruang *whirl*:

$$H_g = 0,2 \text{ DM}$$

$$H_g = 0,2 \times 1,3$$

$$H_g = 0,26 \text{ m} = 26 \text{ cm}$$

c. Dimensi rumah siput

Dimensi rumah siput turbin Kaplan dihitung dengan persamaan (2-65) sampai (2-76). Perhitungan akan ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.33. Perhitungan Dimensi Rumah Siput Turbin**

| Section | Persamaan                                 | Dimensi (m) |
|---------|---|-------------|
| A       | $= D_M 0,4 N_s^{0,2}$                     | 1,96        |
| B       | $= D_M (1,26 + 3,79 \times 10^{-4} N_s)$  | 2,01        |
| C       | $= D_M (1,46 + 3,24 \times 10^{-4} N_s)$  | 2,2         |
| D       | $= D_M (1,59 + 5,74 \times 10^{-4} N_s)$  | 2,65        |
| E       | $= D_M (1,21 + 2,71 \times 10^{-4} N_s)$  | 1,83        |
| F       | $= D_M (1,45 + 72,17 / N_s)$              | 1,9         |
| G       | $= D_M (1,29 + 41,63 / N_s)$              | 1,66        |
| H       | $= D_M (1,13 + 31,86 / N_s)$              | 1,45        |
| I       | $= D_M (0,45 - 31,80 / N_s)$              | 0,52        |
| L       | $= D_M (0,74 + 8,7 \times 10^{-4} N_s)$   | 1,94        |
| M       | $= D_M / (2,06 + 1,2 \times 10^{-3} N_s)$ | 1,34        |

Sumber: perhitungan

Kecepatan didalam rumah siput:

$$V = 488 / N_s^{0,44}$$

$$V = 488 / 940^{0,44}$$



$$V = 23,99 \text{ m/dt}$$

Dimana syarat kecepatan  $> 12 \text{ m/dt}$ , jadi desain rumah siput memenuhi syarat kecepatan.

d. Dimensi *draft tube*

Dimensi *draft tube* turbin Kaplan dihitung dengan persamaan (2-77) sampai (2-85). Untuk mempermudah perhitungan maka perhitungan akan ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.34. Perhitungan Dimensi *Draft Tube* Turbin**

| section | persmaan                                 | Dimensi (m) |
|---------|--|-------------|
| N       | $= D_M (2 - 2,14 \times 10^{-6} N_s)$    | 2,49        |
| O       | $= D_M (1,4 - 1,67 \times 10^{-5} N_s)$  | 1,73        |
| P       | $= D_M (1,26 - 16,35 / N_s)$             | 1,55        |
| Q       | $= D_M (0,66 - 18,4 / N_s)$              | 0,8         |
| R       | $= D_M (1,25 - 7,98 \times 10^{-5} N_s)$ | 1,47        |
| S       | $= D_M (4,26 - 201,51 / N_s)$            | 5,03        |
| T       | $= D_M (1,2 + 5,12 \times 10^{-4} N_s)$  | 2,1         |
| Z       | $= D_M (2,58 + 102,66 / N_s)$            | 3,35        |

Sumber: perhitungan

Kecepatan pada inlet *draft tube* dihitung dengan persamaan :

$$V = 8.74 + 2.48/N_s$$

$$V = 8.74 + 2.48/940$$

$$V = 9 \text{ m/dt}$$

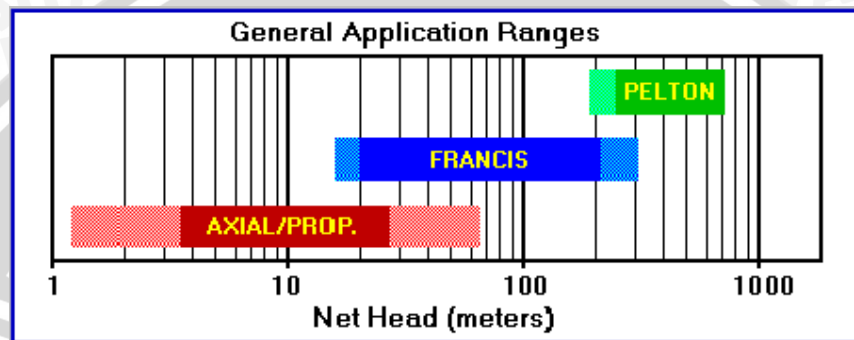
**Effisiensi Turbin**

Effisiensi turbin dapat diketahui berdasarkan persamaan (2-86) namun effisiensi turbin hanya bisa diketahui melalui percobaan lapangan atau model dikarenakan daya aktual tidak bisa diketahui secara langsung.

Effisiensi turbin biasanya dikeluarkan oleh perusahaan manufaktur untuk tiap spesifikasi turbin tertentu, maka dipergunakan gambar 2.36 untuk mengetahui kisaran effisiensi turbin, dalam studi ini debit yang dipergunakan untuk PLTMH relatif stabil maka nilai effisiensi dapat menggunakan effisiensi maksimum, untuk turbin tipe Kaplan effisiensi 100% atau  $Q/Q_{max} = 1$  adalah 0,93 atau 93%.

#### 4.6.1.3. Simulasi TURBNPRO V3

TURBNPRO V3 merupakan salah satu perangkat lunak (*software*) dalam mendesain turbin hidraulik, dari simulasi software ini dapat dihasilkan beberapa parameter atau spesifikasi desain antara lain: dimensi turbin, sifat mekanis turbin, analisa kavitasi turbin, jenis dan tipe turbin dan *hill curve*. TURBNPRO V3 menyediakan analisa untuk 3 jenis turbin yaitu : turbin pelton, turbin francis dan turbin axial/ baling – baling. Sebelum melakukan simulasi maka harus ditentukan jenis turbin yang akan didesain, pemilihan tipe turbin pada TURBN PRO didasarkan pada tinggi jatuh efektif (Heff) sesuai pada grafik berikut:



Gambar 4.46. Grafik Pemilihan Tipe Turbin Menurut TURBNPRO V3

Dengan data teknis pada analisa sebelumnya maka dipilih jenis turbin axial untuk simulasi selanjutnya, setelah menentukan tipe turbin maka dilakukan *entry* data seperti pada gambar berikut:

The screenshot shows the "TURBNPRO 3: Axial/Propeller Turbine Sizing Routine (Data Entry Form)" window. It contains several input fields with their respective values and "Limits" buttons. The data is as follows:

| Label | Parameter                            | Value  | Unit              |
|-------|--------------------------------------|--------|-------------------|
| A     | Rated Discharge                      | 11     | m <sup>3</sup> /s |
| B     | Net Head at rated discharge          | 7.5000 | meters and < 67   |
| C     | Site Gross Head                      | 8      | meters            |
| D     | Site Elevation                       | 50     | meters            |
| E     | Water Temperature                    | 20     | degrees C         |
| F     | Desired setting to tailwater         | 0.0000 | meters            |
| G     | Efficiency Priority at max output    | 9      | 0 to 10           |
| I     | Ratio of rated head to best eff head | 0.9000 | 0.7 to 1.0        |
| J     | System Frequency                     | 50     | Hz                |
| K     | Minimum Net Head                     | 6.5000 | meters            |

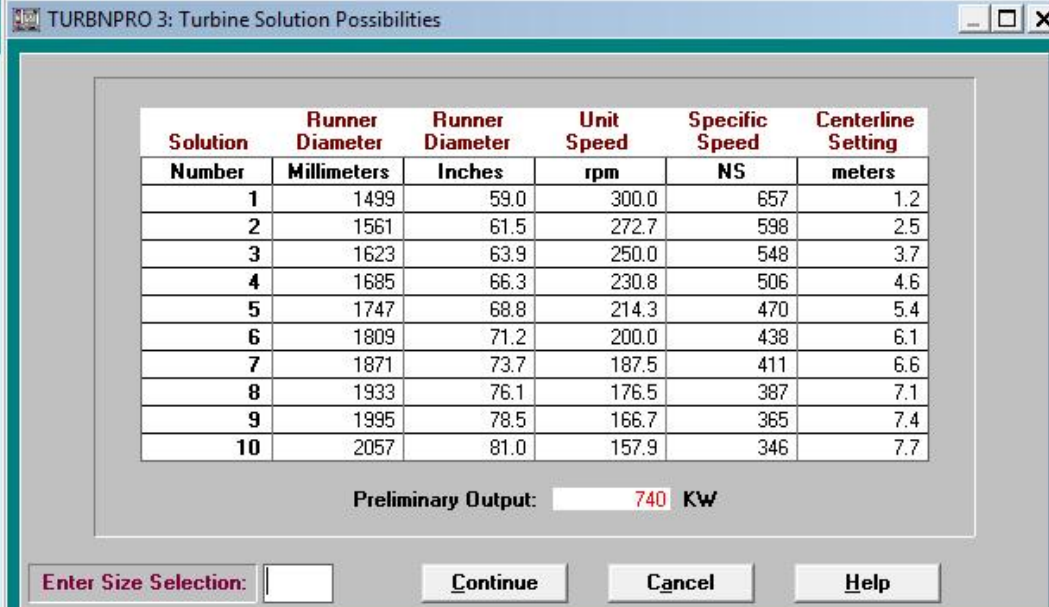
Gambar 4.47. Tampilan Entry Data Pada TURBNPRO V3



Berikut adalah penjelasan pengisian data pada TURBNPRO V3:

- A. Diisikan debit operasi rencana, digunakan  $11 \text{ m}^3/\text{dt}$ .
- B. Diisikan tinggi jatuh efektif, digunakan 7,5 m.
- C. Diisikan tinggi jatuh kotor, digunakan 8 m.
- D. Diisikan elevasi turbin rencana, digunakan +52.
- E. Diisikan temperatur air, digunakan  $20^\circ$
- F. Diisikan tinggi hisap rencana ( $H_s$ ), digunakan 0 m.
- G. Diisikan prioritas efisiensi, digunakan 9 (rekomendasi TURBNPRO untuk turbin axial).
- H. Diisikan rasio tinggi efektif dengan efisiensi turbin, digunakan 90% (rekomendasi TURBNPRO untuk turbin axial).
- I. Diisikan sistem frekuensi generator, digunakan 50Hz.
- J. Diisikan tinggi jatuh efektif minimum yang mungkin terjadi, digunakan 6,5 m.

Setelah melakukan *entry* data seperti diatas maka TURBNPRO akan memberikan beberapa parameter solusi yang akan digunakan selanjutnya seperti pada gambar berikut:



| Solution Number | Runner Diameter Millimeters | Runner Diameter Inches | Unit Speed rpm | Specific Speed NS | Centerline Setting meters |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|
| 1               | 1499                        | 59.0                   | 300.0          | 657               | 1.2                       |
| 2               | 1561                        | 61.5                   | 272.7          | 598               | 2.5                       |
| 3               | 1623                        | 63.9                   | 250.0          | 548               | 3.7                       |
| 4               | 1685                        | 66.3                   | 230.8          | 506               | 4.6                       |
| 5               | 1747                        | 68.8                   | 214.3          | 470               | 5.4                       |
| 6               | 1809                        | 71.2                   | 200.0          | 438               | 6.1                       |
| 7               | 1871                        | 73.7                   | 187.5          | 411               | 6.6                       |
| 8               | 1933                        | 76.1                   | 176.5          | 387               | 7.1                       |
| 9               | 1995                        | 78.5                   | 166.7          | 365               | 7.4                       |
| 10              | 2057                        | 81.0                   | 157.9          | 346               | 7.7                       |

Preliminary Output:  KW

Enter Size Selection:

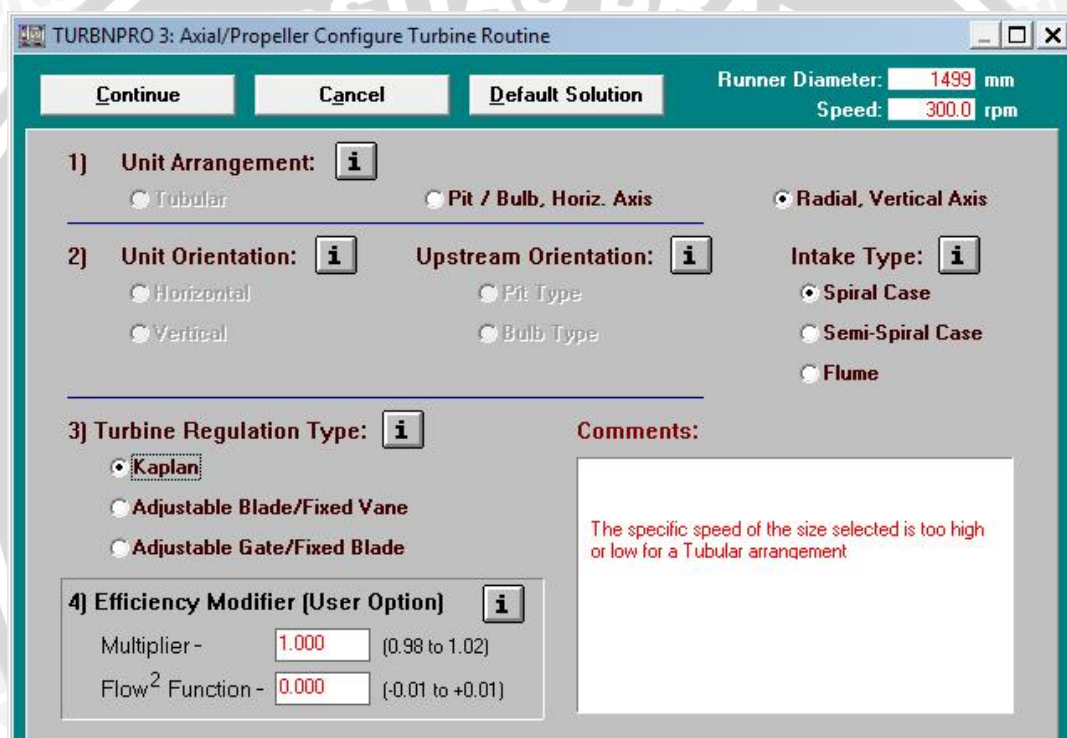
**Gambar 4.48. Tampilan pemilihan solusi Pada TURBNPRO V3**

Kemudian dapat dilakukan pemilihan solusi yang akan menghasilkan spesifikasi desain yang berbeda untuk tiap solusi, dalam studi ini dipilih solusi no.1



karena solusi tersebut memiliki parameter yang lebih ekonomis terlihat dari diameter *runner* dan kecepatan putar turbin.

Setelah itu dilakukan analisa konfigurasi turbin tentang pengaturan unit turbin, jenis intake dan sistem regulasi didalam turbin, dalam simulasi ini pengaturan unit yang bisa digunakan adaah sistem *horizontal axis* atau *vertical axis*, melihat kondisi lokasi studi maka digunakan *vertical axis orientation* sebagai sistem pengaturan unit turbin, jenis intake yang digunakan adalah sistem *spiral case* (rumah siput) dengan pertimbangan bahwa sistem *spiral case* telah sering digunakan di Indonesia dan sistem regulasi yang digunakan adalah sistem regulasi ganda (*adjustable blade and vane*) karena sistem regulasi ganda memiliki penerimaan variasi debit dan tinggi jatuh yang sangat baik. Konfigurasi turbin ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 4.49.** Tampilan Konfigurasi Turbin Pada TURBNPRO V3

Setelah itu maka simulasi telah berhasil dijalankan dan akan didapatkan spesifikasi desain turbin berupa rangkuman (*summary*) dan *hill curve*, hasil simulasi ditampilkan pada gambar berikut:

TURBNPRO 3: Axial/Propeller Solution Summary (Page 1)

Solution File Name: c:\turbnpro\adi **Turbine Performance Data - Typical**

Close Next Page Print Report Display Input Definitions

**Regulation: KAPLAN**  
Performance at rated net head of: 7.5 meters

| m <sup>3</sup> /s | % Eff | KW  | % Rated |
|-------------------|-------|-----|---------|
| 13.05             | 92.2  | 886 | 118.7   |
| 11.00             | 93.3  | 755 | 100.0   |
| 10.41             | 93.4  | 715 | 94.7    |
| 8.25              | 92.7  | 563 | 75.0    |
| 5.50              | 90.3  | 365 | 50.0    |
| 2.75              | 83.8  | 170 | 25.0    |

At maximum net head of 8.0 m At minimum net head of 6.5 m

933 KW 759 KW  
92.6 % Eff 91.5 % Eff  
12.84 m<sup>3</sup>/s 13.00 m<sup>3</sup>/s  
1.255  $\sigma$  allow 1.544  $\sigma$  allow

Runner Diameter: 1499 mm  
Speed: 300.0 rpm

Efficiency Modifiers: Multiplier: 1.0000 Flow<sup>2</sup> Function: 0.0000

$\sigma$  allowable at 100% KW and Rated Net Head: 1.053  
 $\sigma$  plant at 100% KW and Rated Net Head: 1.339

Maximum Runaway Speed: 828 rpm (at the Maximum Net Head above)  
Flow at Runaway Speed: 28.9 m<sup>3</sup>/s (at Rated Net Head and 100% Gate)  
Site Atmospheric Pressure minus Vapor Pressure (H<sub>atm</sub> - H<sub>vp</sub>): 10.04 meters  
Best Efficiency Net Head: 8.3 meters

Runner Centerline to T.W.: 0.0 meters

Specific Speed under Rated Net Head:  
646.5 at Peak Efficiency  
664.4 at 100% Output

TURBNPRO 3: Axial/Propeller Solution Summary (Page 2)

Solution File Name: c:\turbnpro\adi **Turbine Dimensional Data - Typical**

Previous Page Next Page Close Display Input Definitions

Runner Diameter: 1499 mm Orientation: VERTICAL

**Intake Type - SPIRAL CASE**

Inlet Diameter: 2.13 meters  
Inlet Offset: 2.19 meters  
Centerline to Inlet: 2.35 meters  
Outside Radius A: 3.26 meters  
Outside Radius B: 3.02 meters  
Outside Radius C: 2.63 meters  
Outside Radius D: 2.18 meters

**Draft Tube Type - ELBOW**

Length: 8.00 meters  
Exit Width: 4.23 meters  
Exit Height: 1.65 meters  
Centerline to Invert: 3.15 meters  
Velocity at Draft Tube Exit: 1.58 m/sec (at Rated head and Discharge)

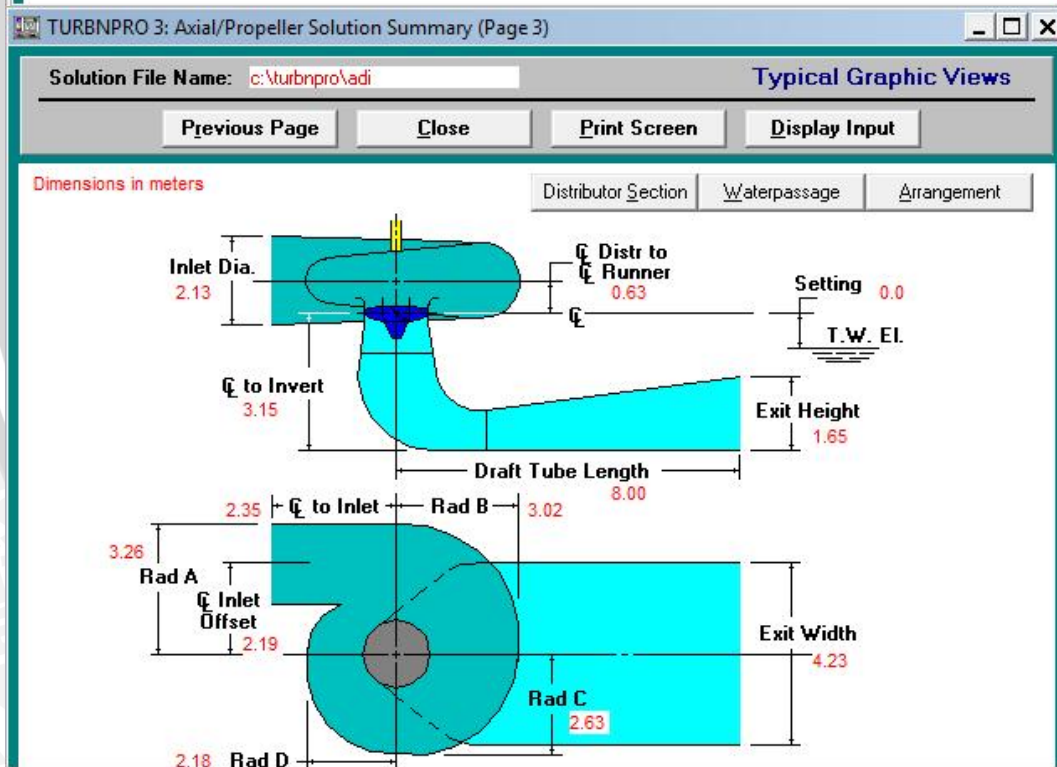
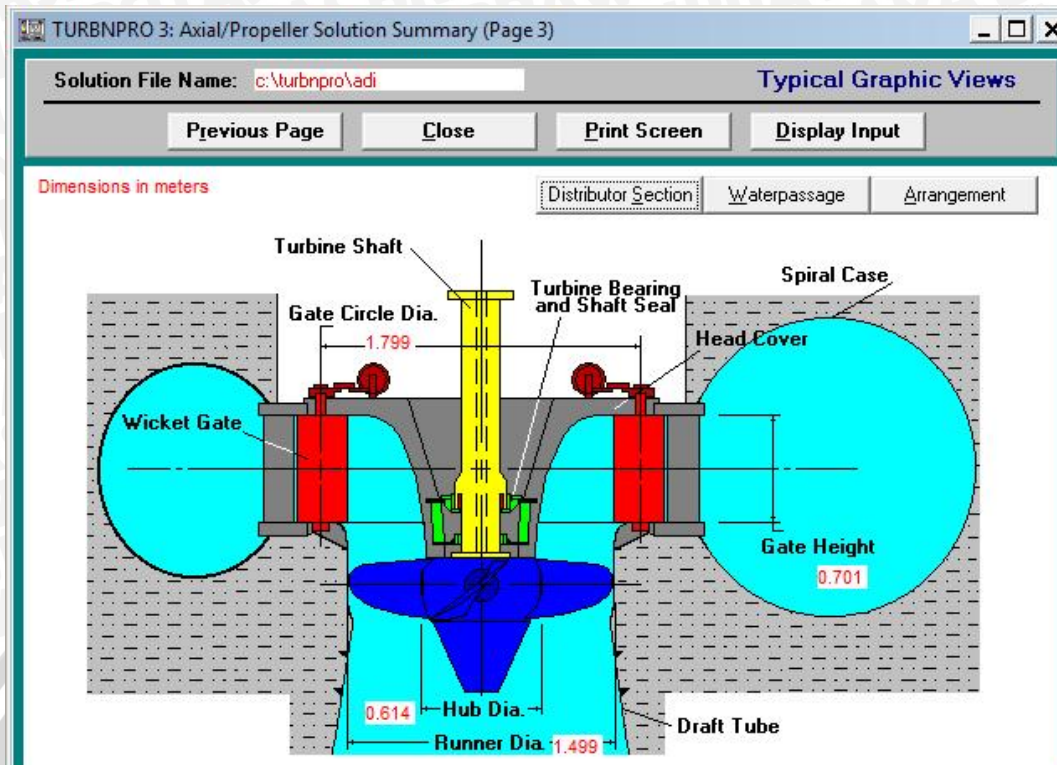
**Typical Runner Data -**

Number of Runner Blades: 4  
Hub Diameter: 614 mm  
Runner and Shaft Weight: 1628 kg  
Centerline to Shaft Coupling: 3324 mm  
Runner to Distributor Centerline: 630 mm

**Miscellaneous -**

Wicket Gate Height: 701 mm  
Gate Circle Diameter: 1799 mm  
Turbine Shaft Diameter: 167 mm  
Maximum Hydraulic Thrust: 2676 kg (under the Maximum Net Head)  
Reverse Hydraulic Thrust: 3158 kg (under the Maximum Net Head)





Gambar 4.50. Tampilan Hasil Simulasi Pada TURBNPRO V3



Dengan hasil simulasi tersebut maka desain turbin Kaplan bisa digunakan, untuk menyingkat hasil simulasi tersebut maka data yang perlu diketahui adalah sebagai berikut:

- Kecepatan Spesifik (Ns) : 664,4 mkW
- Kecepatan putar (n) : 300 rpm
- Jumlah kutub generator (p) : 20 buah
- Diameter Maksimum (Dm) : 1,5 m
- Tinggi hisap turbin (Hs) : 0 m
- Batas Kavitasasi ( $\sigma$ ) : 1,053
- Kavitasasi aktual ( $\sigma$ ) : 1,339
- Effisiensi turbin ( $\eta$ ) : 93% atau 0,93
- Daya (P) : 755 kW

Untuk bisa melakukan kontrol hasil dari hasil simulasi maka hasil tersebut harus dibandingkan dengan metode manual perencanaan turbin, parameter yang dibandingkan dalam studi ini adalah: kecepatan spesifik, kecepatan putar dan diameter runner turbin.

Kecepatan putar turbin (n):

$$n = \frac{120f}{p}$$

$$n = \frac{120 \cdot 50}{20}$$

$$n = 300 \text{ rpm (sesuai dengan model simulasi TURBNPRO)}$$

kecepatan spesifik (Ns):

$$N_s = \frac{n \sqrt{P}}{H^{1,25}}$$

$$N_s = \frac{300 \sqrt{755}}{7,5^{1,25}}$$

$$N_s = 644 \text{ mkW (sesuai dengan model simulasi TURBNPRO)}$$

Diameter runner turbin (Dm):

$$D_m = 84.5 (0.79 + 1.603 \times N_{QE}) \frac{\sqrt{Hn}}{60n}$$

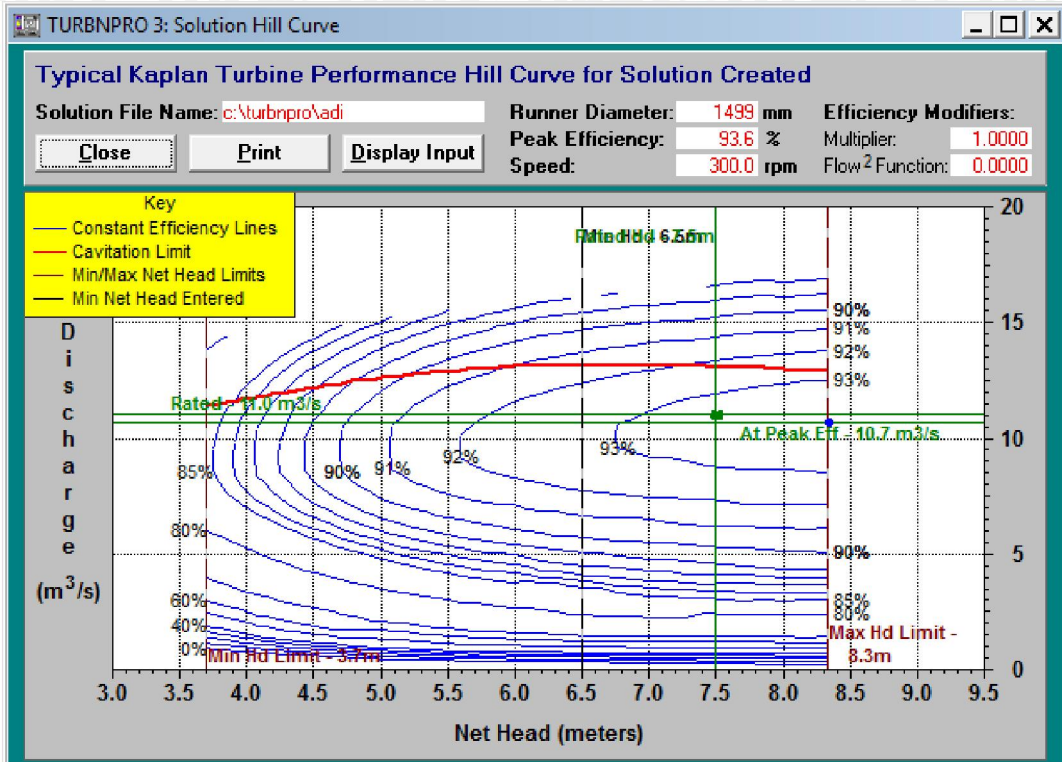
$$N_{QE} = (1/995) N_s = (1/995) 644 = 0.64$$

$$D_m = 84.5 (0.79 + 1.603 \times 0,64) \frac{\sqrt{7,5}}{300}$$

$$D_m = 1,41 \text{ m} = 1,5 \text{ m (sesuai dengan model simulasi TURBNPRO)}$$

Maka hasil simulasi TURBNPRO dapat diterima atau dapat disesuaikan dengan metode manual perencanaan turbin.

Selain spesifikasi turbin juga didapatkan grafik *hill curve* grafik ini digunakan untuk mengetahui besarnya efisiensi turbin pada saat terjadi perubahan variasi debit dan tinggi jatuh selain itu grafik ini juga menunjukkan batas kavitasi pada operasi turbin tertentu, grafik *hill curve* ditampilkan pada gambar berikut:



**Gambar 4.51. Tampilan *Hill Curve* Pada TURBNPRO V3**

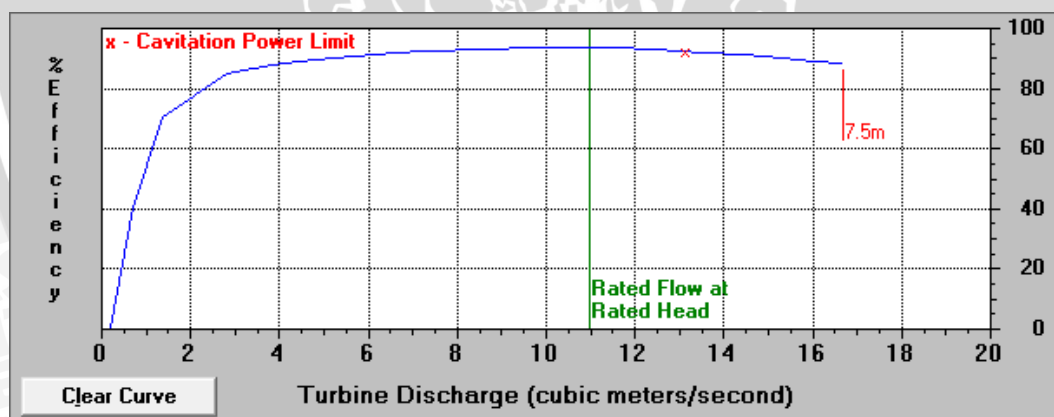
TURBNPRO V3 juga dapat mensimulasikan performa turbin dengan memasukkan besarnya tinggi jatuh efektif yang digunakan saat operasi turbin, dengan memasukkan tinggi jatuh efektif sebesar 7,5 meter maka didapatkan tabel dan grafik performa turbin sebagai berikut:



Tabel 4.35. Hasil Simulasi Performa Turbin Pada  $H_{eff} = 7,5$  m

| Power (KW) | Efficiency (%) | Discharge (m <sup>3</sup> /s) | Notes  |
|------------|----------------|-------------------------------|--|
| 1081       | 87.9           | 16.71                         | Cavitating Operation !                         |
| 1041       | 89.2           | 15.88                         | Cavitating Operation !                         |
| 999        | 90.3           | 15.04                         | Cavitating Operation !                         |
| 953        | 91.2           | 14.21                         | Cavitating Operation !                         |
| 905        | 92.0           | 13.37                         | Cavitating Operation !                         |
| 891        | 92.2           | 13.13                         | Cavitation Power Limit                         |
| 855        | 92.7           | 12.53                         | Additional Output Capability                   |
| 801        | 93.1           | 11.70                         | Additional Output Capability                   |
| 755        | 93.3           | 11.00                         | Rated Flow/Head Condition                      |
| 746        | 93.4           | 10.86                         | -  |
| 715        | 93.4           | 10.41                         | Best Efficiency Condition                      |
| 689        | 93.3           | 10.03                         | -  |
| 630        | 93.2           | 9.19                          | -  |
| 570        | 92.8           | 8.36                          | -  |
| 510        | 92.2           | 7.52                          | -  |
| 450        | 91.5           | 6.68                          | -  |
| 390        | 90.6           | 5.85                          | -  |
| 331        | 89.7           | 5.01                          | -  |
| 271        | 88.3           | 4.18                          | -  |
| 211        | 86.0           | 3.34                          | -  |
| 150        | 81.4           | 2.51                          | -  |
| 90         | 73.1           | 1.67                          | -  |
| 28         | 45.5           | 0.84                          | Low efficiency; not used in energy calculation |

Sumber: simulasi TURBNPRO V3

Gambar 4.52. Kurva Performa Turbin Pada  $H_{eff} = 6,45$  m

#### 4.6.1.4. Desain Turbin Yang Digunakan

Berdasarkan analisa perencanaan turbin dengan menggunakan ketiga metode diatas maka dapat dirangkum spesifikasi turbin untuk tiap metode yang digunakan, acuan dasar untuk menentukan metode perhitungan turbin yang akan digunakan adalah



dengan memperhatikan rasio energi yang dihasilkan dengan biaya turbin, biaya turbin dihitung dengan persamaan:

$$CT = 0,27 n^{0,96} J_t K_t d^{1,47} (1,17 H_g^{0,12} + 2) \times 10^6$$

Dimana:

CT : biaya turbin Kaplan (dalam dolar Kanada)

n : jumlah turbin (per 1 unit)

J<sub>t</sub> : Faktor peningkatan tinggi jatuh (1 jika H < 25m, 1,1 jika H > 25m)

K<sub>t</sub> : faktor penurunan diameter kecil (0,9 jika d < 1,8m, 1 jika d > 1,8m)

d : diameter runner turbin (m)

M<sub>w</sub> : kapasitas daya tiap turbin (Megawatt)

Maka biaya turbin untuk turbin Kaplan dengan metode ESHA adalah:

$$CT = 0,27 \cdot 1^{0,96} \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,24^{1,47} (1,17 \cdot 7,48^{0,12} + 2) \times 10^6$$

$$CT = 11979,12 \text{ juta rupiah}$$

Sedangkan biaya pemasangan turbin didapatkan dari 0,15 CT, sehingga biaya pemasangan turbin adalah:

$$CP = 0,15 \times 11979,12$$

$$CP = 5989,56 \text{ juta rupiah}$$

Sehingga biaya total turbin Kaplan adalah 17968,67 juta rupiah atau 17,9 milyar rupiah. Untuk selanjutnya dapat ditentukan desain turbin yang akan digunakan, rangkuman spesifikasi teknis turbin ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.36. Rangkuman Spesifikasi Turbin Untuk Tiap Metode**

| No. | uraian  | metode Eropa (ESHA) |        | Metode Amerika (USBR) |        | Simulasi TURBNPRO V3 |        |
|-----|---|---------------------|--------|-----------------------|--------|----------------------|--------|
|     |   | nilai               | satuan | nilai                 | satuan | nilai                | satuan |
|     | tipe turbin                                   | Kaplan              |        | Kaplan                |        | Kaplan               |        |
| 1   | frekuensi generator                           | 50                  | Hz     | 50                    | Hz     | 50                   | Hz     |
| 2   | kutub generator (p)                           | 14                  | buah   | 14                    | buah   | 20                   | buah   |
| 3   | kecepatan sinkron                             | 428,57              | rpm    | 428,57                | rpm    | 300,00               | rpm    |
| 4   | kecepatan putar (n)                           | 428,57              | rpm    | 428,57                | rpm    | 300,00               | rpm    |
| 5   | kecepatan spesifik (Ns)                       | 952,12              | mkW    | 923,68                | mkW    | 664,4                | mkW    |
| 6   | faktor kecepatan                              | 2,02                |        | 2,21                  |        |                      |        |
| 7   | diameter maksimum                             | 1,24                | m      | 1,18                  | m      | 1,50                 | m      |
| 8   | koefisien kavitasasi kritis (σ <sub>c</sub> ) | 1,46                |        | 1,45                  |        | 1,05                 |        |
| 9   | tinggi hisap kritis (H <sub>s</sub> )         | -0,50               | m      | -0,66                 | m      | 0,00                 | m      |
| 10  | tinggi hisap rencana (H <sub>s</sub> ')       | -1,00               | m      | -1,16                 | m      | 0,00                 | m      |

| No. | uraian                                 | metode Eropa (ESHA) |         | Metode Amerika (USBR) |         | Simulasi TURBNPRO V3 |         |
|-----|--|---------------------|---------|-----------------------|---------|----------------------|---------|
|     |  | nilai               | satuan  | nilai                 | satuan  | nilai                | satuan  |
| 11  | jarak dasar turbin ke pusat (de)       | 0,51                | m       | 0,48                  | m       | 0.63                 | m       |
| 12  | elv pusat turbin (Z)                   | 48,77               | m       | 48,61                 | m       | 49.77                | m       |
| 13  | koefisien kavitasi aktual ( $\sigma$ ) | 1,50                |         | 1,52                  |         | 1.34                 |         |
| 14  | kontrol kavitasi                       | aman                |         | aman                  |         | aman                 |         |
| 15  | lebar total spiral case                | 5,19                | m       | 4,91                  | m       | 5.37                 | m       |
| 16  | diameter intake spiral case            | 1,96                | m       | 1,85                  | m       | 2.13                 | m       |
| 17  | tinggi draft tube                      | 2,48                | m       | 2,36                  | m       | 3.15                 | m       |
| 18  | panjang draft tube                     | 5,03                | m       | 4,78                  | m       | 8.00                 | m       |
| 19  | biaya perunit turbin (juta rupiah)     | 12897,55            | juta Rp | 11979,12              | juta Rp | 17019.80             | juta Rp |
| 20  | biaya pemasangan turbin (juta rupiah)  | 6448,77             | juta Rp | 5989,56               | juta Rp | 2552.97              | juta Rp |
| 21  | biaya total turbin (juta rupiah)       | 19346,32            | juta Rp | 17968,67              | juta Rp | 19572.77             | juta Rp |
| 22  | Install Capacity                       | 794,52              | kW      | 794,52                | kW      | 807.29               | kW      |
| 23  | Rp/kW                                  | 24,35               |         | 22,62                 |         | 24.25                |         |
| 24  | Output energi                          | 19,07               | MWh     | 19,07                 | MWh     | 19.37                | MWh     |
| 25  | Rp/MWh                                 | 1014,58             |         | 942,33                |         | 1010.21              |         |

Sumber: perhitungan dan simulasi

Dari hasil perencanaan turbin hidraulik dengan menggunakan tiap metode pada tabel diatas digunakan desain turbin dengan metode Amerika (USBR) dikarenakan dari hasil perencanaan didapatkan nilai rasio daya dengan biaya yang rendah sehingga desain tersebut merupakan desain yang ekonomis.

#### 4.6.2. Peralatan Elektrik

Perencanaan peralatan elektrik meliputi perencanaan generator, pengatur kecepatan (*governor*), peningkat kecepatan (*speed increaser*), transformator (travo), peralatan pengatur electric (*switch gear equipment*), dan aksesori kelengkapan elektrik (*electric auxiliary*). Dalam studi ini tidak direncanakan secara mendetail tentang peralatan elektrik untuk sistem PLTMH.

##### Generator

Generator direncanakan dengan menggunakan tipe generator yang biasa digunakan untuk PLTMH di Indonesia, generator yang digunakan adalah generator sinkron 3 fasa dengan frekuensi 50 Hz, generator sinkron harus memiliki kecepatan



putaran dasar yang sama dengan turbin, pada analisa sebelumnya kecepatan dasar turbin yang dipergunakan adalah 428 rpm dengan melihat tabel 2.8 maka jumlah kutub yang harus digunakan adalah 14 buah. Dan dengan melihat daya teoritis pada analisa sebelumnya maka efisiensi generator berdasarkan tabel 2.7 adalah 0,955 diambil 96%.

Daya keluar generator dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_g = \frac{P_t \eta_g}{P_f}$$

Dimana:

$P_g$  : rating keluaran generator

$P_t$  : rating keluaran turbin (kW) = 808 kW

$\eta_g$  : efisiensi generator = 96%

$P_f$  : faktor tenaga, digunakan 0,9

$P_g = (808 \cdot 0,96) / 0,9 = 862 \text{ KVA}$ .

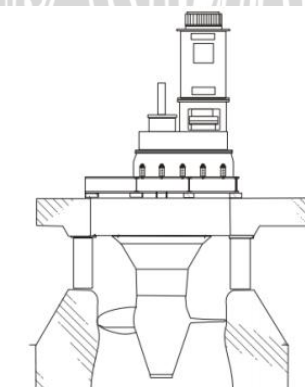
Untuk mengatur tegangan yang keluar dari generator agar dapat distabilkan maka perlu direncanakan pengatur tegangan (*exciter*), terdapat 2 jenis exciter yang biasanya digunakan untuk generator yaitu:

- *Brush type exciters*
- *Brushless type exciter*

Untuk PLTMH mini *brushless type* lebih direkomendasikan karena kemudahan penggunaan.

#### **Peningkat Kecepatan (*Speed Increaser*)**

Peningkat kecepatan dibutuhkan untuk PLTMH dengan tinggi jatuh rendah untuk meningkatkan kecepatan turbin agar daya yang dibangkitkan menjadi maksimal, peningkat kecepatan didesain dengan tipe *parallel shaft with helical gear* dengan desain mengacu pada standar internasional (AGMA 2001, B88 atau DIN3990).



**Gambar 4.53. Desain Tipikal *Parallel Shaft Speed Increaser* (Penche,2004)**



### Pengatur Kecepatan (*Governor*)

pengatur kecepatan dibutuhkan untuk pengaturan kecepatan pada turbin dengan mengatur *guide vane* sehingga didapatkan kecepatan yang masih diijinkan oleh turbin untuk beroperasi, pengatur kecepatan memiliki tiga jenis tipe yakni: hidro – mekanik, mekanik – elektrik dan hidro – elektrik. Dalam studi ini direncanakan pengatur kecepatan menggunakan sistem hidro – elektrik dengan pertimbangan bahwa sistem ini telah sering dipergunakan dalam sistem PLTMH.

Analisa kestabilan pada governor, Penche merekomendasikan bahwa  $t_m/t_w > 4$  dimana  $t_w$  adalah karakteristik aliran pada pipa pesat dan  $t_m$  adalah bagian inersia yang berputar. Analisa kestabilan governor adalah sebagai berikut:

$$T_m : \frac{\Omega R^2 n^2}{5086P}$$

$$T_w : \frac{\sum LV}{gH}$$

Dimana:

$T_m$  : waktu bagian inersia yang berputar (*machine time constant*) (detik)

$T_w$  : waktu mulai aliran (detik)

$\Omega R$  : keseluruhan bagian unit yang berputar (rpm) = 12 rpm

$n$  : kecepatan sinkron turbin (rpm) = 429 rpm

$P$  : daya keluaran turbin (kW) = 807,3 kW

$L$  : panjang jalan aliran (pipa pesat) (m) = 20 m

$V$  : kecepatan aliran (m/dt) = 4,76 m/dt

$H$  : tinggi jatuh (m) = 7,36 m

Maka:

$$T_m : \frac{12^2 429^2}{5086 \cdot 807,3} = 6,54 \text{ detik}$$

$$T_w : \frac{20 \cdot 4,76}{9,81 \cdot 7,36} = 1,31 \text{ detik}$$

Sehingga  $t_m/t_w = 4,96 > 4$  jadi desain *governor* stabil terhadap regulasi aliran.

### Transformer (*Travo*)

Transformer direncanakan dengan desain yang biasa diterapkan pada lapangan sesuai dengan standar nasional atau standar PLN, dalam studi ini tidak membahas perencanaan transformer secara teknis.

### **Peralatan Pengatur Kelistrikan (*Switchgear Equipment*)**

*Switchgear* merupakan kombinasi antara saklar pemutus, *fuse* dan pemutus aliran (*circuit breaker*). *Switchgear* difungsikan untuk melindungi generator dan transformator utama dari bahaya kelebihan kapasitas (*overcapacity*).

Dalam studi ini tidak direncanakan adanya *switchgear* dikarenakan sistem distribusi listrik menggunakan sistem central grid sehingga langsung akan disambungkan ke *switchgear* milik PLN.

### **Aksesoris Pelengkap (*Auxiliary Equipment*)**

Dalam studi ini aksesoris atau pelengkap kelistrikan meliputi:

- a Genset minyak  
untuk keperluan mendadak atau tiba tiba seandainya dibutuhkan energi cadangan pada PLTMH.
- b Peralatan pemadam kebakaran (*exhaust extinguisher*)  
Untuk keperluan bahaya sewaktu waktu jika terjadi kebakaran.
- c Peralatan angkat  
Untuk keperluan perawatan turbin dan generator.
- d Baterai penyimpanan (*Battery Supply*)  
Digunakan untuk penyimpanan listrik dan digunakan sebagai cadangan energi bila PLTMH dan genset padam.
- e Pompa air  
Digunakan untuk pengurasan jika terjadi kebocoran pada rumah pembangkit dan pengurasan air *draft tube*.
- f Pengukur muka air (*meter gauge*)  
Digunakan untuk pengukuran muka air pada saluran *tailrace* hal ini bertujuan untuk memantau elevasi *tail water level*.

### **4.6.3. Perencanaan Rumah Pembangkit**

Rumah pembangkit merupakan tempat atau *shelter* peralatan mekanik dan elektrik serta aksesorisnya, dalam studi ini rumah pembangkit direncanakan berbentuk persegi seperti *bunker* yang tertanam dalam tanah dengan data perencanaan sebagai berikut:

- Bentuk *Power house* : tipe dalam tanah (*underground type*)  
Tinggi : 12,8 meter  
Lebar : 30 meter

Panjang : 53 meter  
 Material rumah : beton  
 Tebal dinding rumah : 0.3 meter  
 Kedalaman pondasi : 1.5 meter  
 Gambar desain perencanaan dapat dilihat pada **lampiran**.

#### 4.7. Analisa Pembangkitan Energi

Analisa pembangkitan energi dihitung berdasarkan alternatif debit desain yang dipergunakan pada pembahasan sebelumnya, data teknis yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

##### Data operasional

Debit desain : 44 m<sup>3</sup>/dt  
 Jumlah turbin : 4 buah turbin  
 Debit tiap turbin : 11 m<sup>3</sup>/dt  
 Effisiensi turbin : 93%  
 Effisiensi generator : 96%  
 Sistem operasi : *central grid*

##### Data bangunan

elv dasar *power intake* : +54,2  
 elv muka tanah : +58  
 elv turbin : +48,6  
 elv *tailrace* : +48,5  
 elv ambang *tailrace* : +49  
*Headloss* total : 0,55 m  
*Head* efektif:  
 1 unit turbin : 7,11 m  
 2 unit turbin : 7,19 m  
 3 unit turbin : 7,28 m  
 4 unit turbin : 7,36 m  
 head potensial : 8,77 m

Beberapa asumsi atau aturan operasi yang dipergunakan dalam analisa pembangkitan energi adalah sebagai berikut:

- Sistem PLTMH tidak memiliki tampungan andalan.



- b. Operasi dilakukan selama 24 jam tanpa memperhatikan operasi *peak load* dan *base load*.
- c. Terdapat 12 hari untuk perawatan bangunan dalam satu tahun.
- d. Jumlah hari operasi pembangkitan memperhatikan faktor hidrologi.
- e. Tinggi jatuh bervariasi tergantung besarnya debit operasional.
- f. Memperhatikan pengaruh muka air banjir akibat debit banjir rancangan
- g. Pembangkitan energi tahunan dihitung berdasarkan tiap alternatif debit desain (terdapat 4 alternatif).

Berdasarkan analisa hidrologi pada pembahasan sebelumnya didapatkan kurva durasi aliran pada sungai Brantas di lokasi studi, dari kurva tersebut dapat diketahui besarnya potensi tenaga air yang dapat dikembangkan, daya yang dapat dihasilkan berdasarkan besarnya debit bisa dihitung dengan menghitung tinggi jatuh efektifnya kemudian dihitung besarnya daya dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P : 9,81 \times Q \times H \times \eta$$

Berikut contoh perhitungan untuk debit dengan probabilitas 50%:

Diketahui:

$$Q : 88,85 \text{ m}^3/\text{dt}$$

$$\eta : 89\%$$

$$Hl : 0,5 \text{ m (asumsi)}$$

tinggi jatuh bisa didapatkan dengan persamaan *rating curve* pada ambang *tailrace* yaitu:

$$H : H_{\text{potensial}} - 0,06Q^{0,666} - Hl$$

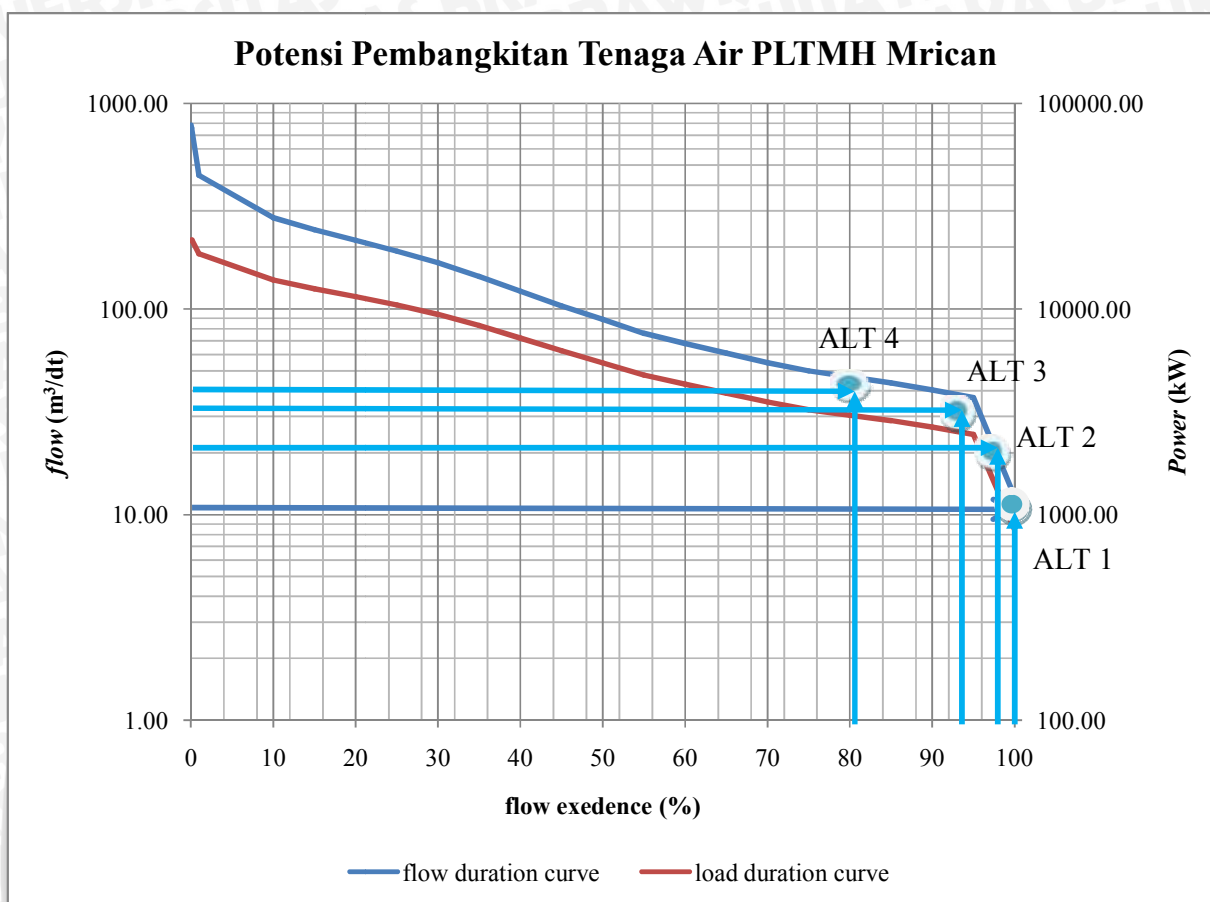
$$H : 8,77 - 0,06 \cdot 88,85^{0,666} - 0,5$$

$$H : 7,03 \text{ m}$$

$$P : 9,81 \times 88,85 \times 7,03 \times 0,89$$

$$P : 5471,47 \text{ kW}$$

sehingga berdasarkan analisa didapatkan kurva potensi energi dalam bentuk *load duration curve* sebagai berikut:



**Gambar 4.54. Potensi Tenaga Air Pada Sungai Brantas Di Lokasi Studi**

Dari kurva tersebut dengan menggunakan debit maksimum akan menghasilkan energi sebesar 21011 kW dan dengan debit terendah akan menghasilkan energi sebesar 833 kW, namun berdasarkan hasil analisa dengan memperhatikan kapasitas bangunan serta aspek hidrologi baik keandalan debit dan pengaruh keamanan akibat peluang kejadian banjir dimana berdasarkan analisa *tail water level* pada sungai brantas diketahui saluran *tailrace* akan mengalami kondisi tenggelam pada debit banjir dengan kala ulang 10 tahun sehingga kemungkinan kejadian debit tersebut adalah sebesar  $1/10 \times 100 = 10\%$  atau 36 hari, maka jumlah operasi untuk tiap alternatif adalah:

**Tabel 4.37. Jumlah Hari Operasi Tiap Alternatif Berdasarkan Probabilitasnya**

| Alternatif | Debit<br>m <sup>3</sup> /dt | Keandalan<br>(%) | Jumlah<br>Hari<br>Terlampau | Jumlah<br>Hari<br>Gagal | Jumlah<br>Hari<br>Operasional | Unit<br>Turbin |
|------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1          | 11,00                       | 100              | 317                         | 36                      | 7                             | 1              |
| 2          | 22,00                       | 98               | 310                         | 43                      | 11                            | 2              |
| 3          | 33,00                       | 95               | 299                         | 54                      | 39                            | 3              |
| 4          | 44,00                       | 84               | 261                         | 92                      | 261                           | 4              |

Sumber: perhitungan

Dengan debit desain tersebut dapat diketahui karakteristik hidrolisnya berupa elevasi muka air pada power intake dan *tail water level* pada saluran *tailrace* sebagai berikut:

**Tabel 4.38. Tinggi Jatuh Effektif Berdasarkan Alternatif Debit**

| No. | debit operasi (m <sup>3</sup> /dt) | Elv Ma Hulu (m) | Elv TWL (m) | Net Head (m) |
|-----|------------------------------------|-----------------|-------------|--------------|
| 1   | 11,00                              | 57,1            | 49,32       | 7,11         |
| 2   | 22,00                              | 57,3            | 49,50       | 7,19         |
| 3   | 33,00                              | 57,6            | 49,64       | 7,28         |
| 4   | 44,00                              | 57,8            | 49,77       | 7,36         |

*Sumber: perhitungan*

Sehingga energi yang dapat dihasilkan berdasarkan debit desain untuk satu unit turbin dan generator dalam waktu 1 hari adalah:

$$E = 9,8 \times H \times Q \times \eta_g \times \eta_t \times n$$

$$E = 9,8 \times 7,11 \times 11 \times 0,96 \times 0,93 \times 24$$

$$E = 16449,27 \text{ kWh}$$

Energi yang dihasilkan pada PLTMH Mrican tiap satu hari operasi ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.39. Hasil Pembangkitan Energi harian Tiap Alternatif**

| No | Debit Operasi (m <sup>3</sup> /dt) | Jumlah Turbin (buah) | Eff (%) | Elv Ma (m) | Elv TWL (m) | Net Head (m) | Lama Operasi (jam) | g (m/dt <sup>2</sup> ) | Energi harian (kWh) |
|----|------------------------------------|----------------------|---------|------------|-------------|--------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| 1  | 11,00                              | 1                    | 89,28   | 57,1       | 49,32       | 7,11         | 24                 | 9,81                   | 16449,27            |
| 2  | 22,00                              | 2                    | 89,28   | 57,3       | 49,50       | 7,19         | 24                 | 9,81                   | 33266,64            |
| 3  | 33,00                              | 3                    | 89,28   | 57,6       | 49,64       | 7,28         | 24                 | 9,81                   | 50486,93            |
| 4  | 44,00                              | 4                    | 89,28   | 57,8       | 49,77       | 7,36         | 24                 | 9,81                   | 68097,05            |

*Sumber: perhitungan*

Berdasarkan analisa tersebut dapat ditentukan kapasitas terpasang (*installed capacity*) untuk tiap alternatif, analisa kapasitas terpasang untuk tiap alternatif ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 4.40. Analisa Kapasitas Terpasang Berdasarkan Tiap Alternatif**

| Alternatif | Rated Capacity (kW) | Installed Capacity |
|------------|---------------------|--------------------|
|            | 1                   |                    |
| 2          | 1386                | 2 x 700 kW         |
| 3          | 2104                | 3 x 700 kW         |
| 4          | 2837                | 4 x 700 kW         |

*Sumber: perhitungan*



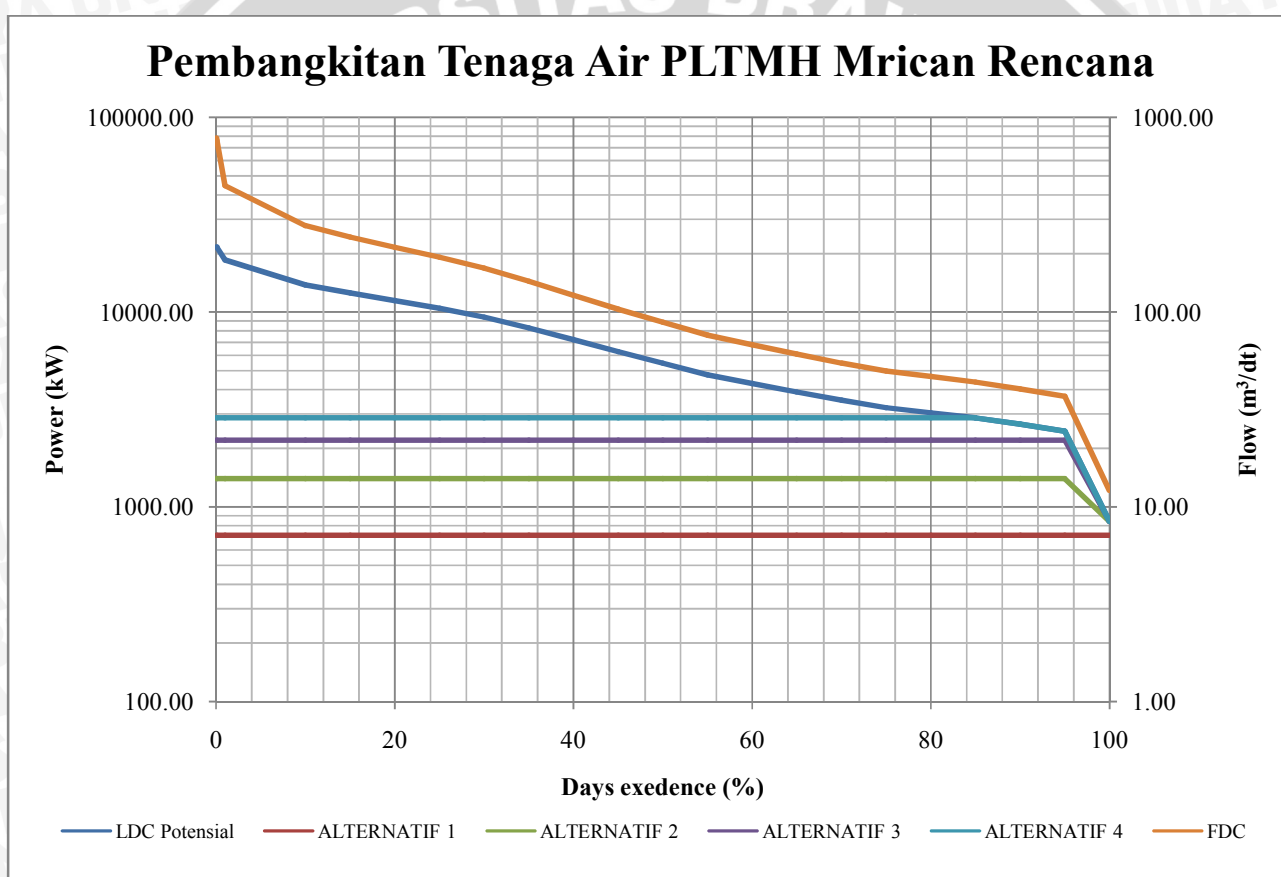
Sehingga pembangkitan energi yang diperoleh dalam waktu satu tahun (*annual generation*) berdasarkan masing masing alternatif adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.41. Hasil Pembangkitan Energi Tahunan (*Annual Generation*)**

| Alternatif | Unit Turbin | Debit Desain         | Hari Operasional | Energi Tahunan |
|------------|-------------|----------------------|------------------|----------------|
|            | (unit)      | (m <sup>3</sup> /dt) | (hari)           | (MWh)          |
| 1          | 1           | 11                   | 317              | 5214           |
| 2          | 2           | 22                   | 317              | 10427          |
| 3          | 3           | 33                   | 317              | 15582          |
| 4          | 4           | 44                   | 317              | 20169          |

Sumber: perhitungan

Berdasarkan Sehingga dari perhitungan tersebut akan menghasilkan kurva durasi beban berdasarkan alternatif debit desain sebagai berikut:



#### 4.8. Analisa Reduksi Gas Karbon (GHG) dan CER

Analisa reduksi gas karbon digunakan apabila sumber pembangkitan energi berasal dari sumber energi bersih dan terbarukan, sumber energi yang tergolong sumber

energi bersih adalah: tenaga air (*hydro*), angin (*wind*), surya (*solar*), panas bumi (*geothermal*), pasang surut (*wave*) dan arus laut (*tidal*).

Reduksi gas karbon dihitung dengan persamaan (2-102):

$$\Delta_{\text{GHG}} : (e_{\text{base}} - e_{\text{prop}}) E_{\text{prop}} (1 - \lambda_{\text{prop}})$$

Dimana:

$E_{\text{prop}}$  : hasil produksi bangkitan energi (MW)

$E_{\text{prop}}$  : 20169 MW

$e_{\text{base}}$  : faktor emisi gas karbon dari sumber tidak terbarukan (lihat tabel 2.11)

$e_{\text{base}}$  : 0,754 untuk sumber minyak bumi

$e_{\text{prop}}$  : faktor emisi gas karbon dari sumber terbarukan ( $e_{\text{prop}} = 0$  untuk tenaga air)

$\lambda_{\text{prop}}$  : kehilangan energi pada jaringan grid (direncanakan 10%)

maka:

$$\Delta_{\text{GHG}} : (0,754 - 0) 20169 (1 - 0,1)$$

$$\Delta_{\text{GHG}} : 13687 \text{ ton/tahun}$$

Dari hasil reduksi gas karbon maka PLTMH berhak mendapatkan kompensasi dana dari badan internasional karena telah menerapkan energi bersih dalam bentuk CER, besarnya dana dari CER dihitung berdasarkan berapa ton gas karbon yang bisa tereduksi dengan harga tiap ton adalah 11 euro atau setara dengan Rp.172.429,2 (konversi euro – rupiah per bulan januari 2014). Maka penghasilan dari CER dengan menggunakan alternatif 4 adalah:

$$\text{CER} = \Delta_{\text{GHG}} \times \text{Rp } 172.429,2$$

$$\text{CER} = 13687 \times 172.429,2$$

$$\text{CER} = 2,36 \text{ milyar rupiah pertahun.}$$

**Tabel 4.42. Ringkasan Reduksi GHG Untuk Tiap Jenis Bahan Bakar**

| Alternatif | Jenis Bahan Bakar (Sumber Energi) | Kg CO2/kWh | Energi Bersih Tahunan MWh | Nilai Reduksi/Tahun t CO2 | Nilai CER/Tahun Milyar Rp |
|------------|-----------------------------------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1          | Minyak                            | 0,754      | 4693                      | 3539                      | 0,61                      |
|            | Diesel                            | 0,764      | 4693                      | 3585                      | 0,62                      |
|            | Batu Bara                         | 0,94       | 4693                      | 4411                      | 0,76                      |
|            | Gas Alam                          | 0,581      | 4693                      | 2727                      | 0,47                      |
| 2          | Minyak                            | 0,754      | 9384                      | 7076                      | 1,22                      |
|            | Diesel                            | 0,764      | 9384                      | 7169                      | 1,24                      |
|            | Batu Bara                         | 0,94       | 9384                      | 8821                      | 1,52                      |
|            | Gas Alam                          | 0,581      | 9384                      | 5452                      | 0,94                      |

| Alternatif | Jenis Bahan Bakar (Sumber Energi) | Kg CO <sub>2</sub> /kWh | Energi Bersih Tahunan MWh | Nilai Reduksi/Tahun t CO <sub>2</sub> | Nilai CER/Tahun Milyar Rp |
|------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 3          | Minyak                            | 0,754                   | 14024                     | 10574                                 | 1,82                      |
|            | Diesel                            | 0,764                   | 14024                     | 10714                                 | 1,85                      |
|            | Batu Bara                         | 0,94                    | 14024                     | 13182                                 | 2,27                      |
|            | Gas Alam                          | 0,581                   | 14024                     | 8148                                  | 1,40                      |
| 4          | Minyak                            | 0,754                   | 18153                     | 13687                                 | 2,36                      |
|            | Diesel                            | 0,764                   | 18153                     | 13869                                 | 2,39                      |
|            | Batu Bara                         | 0,94                    | 18153                     | 17063                                 | 2,94                      |
|            | Gas Alam                          | 0,581                   | 18153                     | 10547                                 | 1,82                      |

Sumber: perhitungan

#### 4.9. Analisa Ekonomi

Dalam analisa ekonomi maka harus ditentukan besarnya nilai manfaat (*benefit*) dan nilai pembayaran (*cost*). Dalam studi ini komponen manfaat dari pembangunan PLTMH adalah:

- nilai jual listrik yang dihasilkan (*tangible benefit*)
- nilai CER dari reduksi gas karbon (*tangible benefit*)
- terbantunya pemerintah dalam menambah suplai tenaga listrik (*intangible benefit*)

sedangkan komponen biaya dari pembangunan PLTMH adalah biaya modal dan biaya operasional pemeliharaan (OP). biaya modal meliputi biaya langsung dan biaya tak langsung, biaya langsung adalah biaya konstruksi sedangkan biaya tak langsung meliputi biaya *engineering* dan biaya *contingencies*.

##### 4.9.1. Pendekatan yang dipergunakan

Pendekatan atau asumsi yang dipergunakan pada analisa ekonomi dalam studi ini adalah:

- Suku bunga bank yang digunakan adalah 7,5% (suku bunga BI rate januari 2014)
- Nilai tukar \$1 dolar Amerika ke rupiah adalah Rp 12,195 (nilai tukar bulan januari 2014)
- Nilai tukar \$1 dolar kanada ke rupiah adalah Rp. 11,059 (nilai tukar bulan januari 2014).
- Usia PLTMH adalah 35 tahun.
- Biaya contingencies adalah 10% dari biaya langsung.



- 6) Biaya OP adalah 1% dari biaya langsung tiap tahun.
- 7) Nilai depresiasi hanya mengacu pada peralatan hidromekanik dengan metode *straight line method* dengan usia guna 35 tahun dengan nilai pengembalian Rp. 0.
- 8) Harga jual listrik mengikuti Peraturan Menteri ESDM no.4 tahun 2012. Tentang harga pembelian listrik oleh PT PLN dari pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan skala kecil dan menengah.
- 9) Terdapat kenaikan biaya dan pendapatan sebesar 20% setiap 5 tahun.
- 10) Pendapatan dari CER diambil dari konversi jenis bahan bakar minyak

#### 4.9.2. Estimasi Biaya (*Cost*)

Estimasi biaya dihitung mulai dari besarnya biaya langsung (biaya konstruksi) dengan menggunakan data desain bangunan pada analisa sebelumnya, perhitungan estimasi biaya dihitung berdasarkan persamaan (2-104) sampai (2-127). Parameter estimasi biaya berbeda untuk tiap alternatif namun perbedaan hanya terletak pada parameter utama (debit, tinggi jatuh, *rated capacity*, jumlah unit turbin dan jumlah pipa pesat) berikut adalah parameter estimasi biaya tiap alternatif :

| Parameter Desain                                | Simbol | Alt 4   | Alt 3   | Alt 2   | Alt 1   |
|---|--------|---------|---------|---------|---------|
| Debit Desain Total (m <sup>3</sup> /dt)         | Qd     | 44,00   | 33,00   | 22,00   | 11,00   |
| Tinggi Jatuh Efektif (m)                        | Hg     | 7,36    | 7,28    | 7,19    | 7,11    |
| Daya Total (MW)                                 | MW     | 2,84    | 2,10    | 1,39    | 0,69    |
| <i>Engginering Cost Factor</i>                  | E      | 0,67    | 0,67    | 0,67    | 0,67    |
| Jumlah Turbin                                   | n      | 4       | 3       | 2       | 1       |
| <i>Grid Connected Factor</i>                    | G      | 0,9     | 0,9     | 0,9     | 0,9     |
| <i>Lower Cost Generator Factor</i>              | Cg     | 0,75    | 0,75    | 0,75    | 0,75    |
| <i>Higher Cost Vertical Axis Turbin Factor</i>  | jt     | 1       | 1       | 1       | 1       |
| <i>Lower Cost Horizontal Axis Turbin Factor</i> | kt     | 0,9     | 0,9     | 0,9     | 0,9     |
| Diameter Runner Turbin (m)                      | d      | 1,18    | 1,18    | 1,18    | 1,18    |
| Tingkat Kesulitan Jaringan Transmisi            | D      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| <i>Transmision Line Wood Pole Vs Steel</i>      | P      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Panjang Jalur Transmisi (Km)                    | Lt     | 2       | 2       | 2       | 2       |
| Voltase Transmisi (KV)                          | V      | 115     | 115     | 115     | 115     |
| <i>Civil Cost Factor</i>                        | C      | 0,44    | 0,44    | 0,44    | 0,44    |
| <i>Rock Factor</i>                              | R      | 1,05    | 1,05    | 1,05    | 1,05    |
| Jarak Borrow Pit (km)                           | Lb     | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Lebar Bendung Baru (m)                          | Ld     | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Berat Pipa Pesat (Kg)                           | W      | 8002,80 | 8002,80 | 8002,80 | 8002,80 |

| Parameter Desain                     | Simbol | Alt 4    | Alt 3    | Alt 2    | Alt 1    |
|--------------------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| Jumlah Pipa Pesat                    | np     | 4        | 3        | 2        | 1        |
| Slope (°)                            | Ss     | 0,02     | 0,02     | 0,02     | 0,02     |
| Panjang Saluran                      | Lcs    | 200      | 200      | 200      | 200      |
| Suku Bunga ( <i>Loan Interest</i> )* | i      | 7,50%    | 7,50%    | 7,50%    | 7,50%    |
| <i>Transfer rate CAD to IDR</i> **   |        | 11059,15 | 11059,15 | 11059,15 | 11059,15 |
| Harga Jual Listrik Per Kwh***        | Rp/kwh | 1004     | 1004     | 1004     | 1004     |
| Transfer Rate USD to IDR**           |        | 12195,12 | 12195,12 | 12195,12 | 12195,12 |
| Inflasi IDR 2013****                 |        | 4,28%    | 4,28%    | 4,28%    | 4,28%    |
| <i>Escalation factor (CAD)</i> ***** |        | 1,14     | 1,14     | 1,14     | 1,14     |

Sumber: perhitungan dan rencana

\* : nilai diambil dari BI rate januari 2014

\*\* : tingkat nilai tukar per januari 2014

\*\*\* : harga berdasarkan Permen ESDM no.4 tahun 2012

\*\*\*\* : nilai diambil dari world bank februari 2014

\*\*\*\*\* : nilai diambil dari bank of Canada februari 2014

Hasil perhitungan akan bernilai dalam mata uang dollar kanada dengan *base rate* tahun 2005 sehingga harus diperhatikan faktor eskalasi perubahan nilai mata uang tersebut sehingga hasil estimasi harus dikonversikan menjadi nilai mata uang dollar kanada dengan *base rate* tahun 2014. Berikut ini adalah contoh perhitungan estimasi biaya untuk alternatif 1 :

#### 1. Biaya Engineering

$$C1 : 0,37 n^{0,1} E \left( \frac{MW}{Hg^{0,3}} \right)^{0,54} \times 10^6$$

$$C1 : 0,37 1^{0,1} 0,67 \left( \frac{0,69}{7,11^{0,3}} \right)^{0,54} \times 10^6$$

$$C1 : 147,109 \text{ dollar kanada (2005)}$$

$$C1 : 167,704 \text{ dollar kanada (2014) dan senilai dengan 1,854,662,565 rupiah}$$

#### 2. Peralatan Hidromekanik

$$C2 : CG + CT$$

$$CG : 0,82 n^{0,96} G Cg \left( \frac{MW}{Hg^{0,28}} \right)^{0,9} \times 10^6$$

$$CG : 0,82 1^{0,96} 0,9 0,75 \left( \frac{0,69}{7,11^{0,28}} \right)^{0,9} \times 10^6$$

$$CG : 240,284 \text{ dollar kanada (2005)}$$

$$CG : 273,934 \text{ dollar kanada (2014) dan senilai dengan 3,029,367,837 rupiah}$$

$$CT : 0,27 n^{0,96} Jt Kt d^{1,47} (1,17 Hg^{0,12} + 2) \times 10^6$$

$$CT : 0,27 1^{0,96} 1 0,9 1,2^{1,47} (1,17 7,11^{0,12} + 2) \times 10^6$$



CT : 1,081,286 dollar kanada (2005)

CT : 1,232,666 dollar kanada (2014) dan senilai 13,632,233,144 rupiah

Maka C2 : 3,029,367,837 + 13,632,233,144: 16,661,600,981 rupiah

### 3. Pemasangan Hidromekanik

C3 : C2 0,15

C3 : 16,661,600,981 0,15 : 2,499,240,147 rupiah

### 4. Pemasangan Jalur Transmisi

C4 : 0,0011 D P Lt<sup>0,95</sup> V x 10<sup>6</sup>

C4 : 0,0011 1 1 2<sup>0,95</sup> 115 x 10<sup>6</sup>

C4 : 244,382 dollar kanada (2005)

C4 : 278,595 dollar kanada (2014) dan senilai 3,081,027,831 rupiah

### 5. Travo Dan Substansi

C5 : (0,025 n<sup>0,95</sup> + 0,002 (n+1)  $\left(\frac{MW}{0,95}\right)^{0,9}$  x V<sup>0,3</sup>) x 10<sup>6</sup>

C5 : (0,025 1<sup>0,95</sup> + 0,002 (1+1)  $\left(\frac{0,69}{0,95}\right)^{0,9}$  x 115<sup>0,3</sup>) x 10<sup>6</sup>

C5 : 14,878 dollar kanada (2005)

C5 : 16,961 dollar kanada (2014) dan senilai 187,576,788 rupiah

### 6. Pemasangan Travo Dan Substansi

C6 : 0,15 C5

C6 : 187,576,788 0,15 : 28,136,518 rupiah

### 7. Sipil

C7 : 1,97 n<sup>-0,04</sup> C R  $\left(\frac{MW}{Hg^{0,3}}\right)^{0,82}$  (1 + 0,001Lb) (1 + 0,005  $\frac{Ld}{Hg}$ ) x 10<sup>6</sup>

C7 : 1,97 1<sup>-0,04</sup> 0,44 1,05  $\left(\frac{0,69}{7,11^{0,3}}\right)^{0,82}$  (1 + 0,001 1) (1 + 0,005  $\frac{0}{7,11}$ ) x 10<sup>6</sup>

C7 : 416,174 dollar kanada (2005)

C7 : 474,439 dollar kanada (2014) dan senilai 5,246,888,563 rupiah

### 8. Pipa Pesat

C8 : 20 np<sup>0,95</sup> W<sup>0,88</sup>

C8 : 20 1<sup>0,95</sup> 8002.80<sup>0,88</sup>

C8 : 54,436 dollar kanada (2005)

C8 : 62,057 dollar kanada (2014) dan senilai 686,292,928 rupiah

### 9. Pemasangan Pipa Pesat

C9 : 5 W<sup>0,88</sup>



$$C9 : 5\,8002.80^{0.88}$$

$$C9 : 171,573,232 \text{ rupiah}$$

## 10. Saluran

$$C10 : 20 ((1,5 + 0,01Ss^{1.5}) Qd Lcs)^{0.9}$$

$$C10 : 20 ((1,5 + 0,01 \cdot 0.07^{1.5}) 11\,200)^{0.9}$$

C10 : 29,356 dollar kanada (2005) atau 33,466 dollar kanada (2014) dan senilai 370,104,859 rupiah

## 11. Lain Lain

$$C11 : 0,25 i Qd^{0.35} \times 1,1 \Sigma C1 \text{ to } C10 + 0,1 \Sigma C1 \text{ to } C10$$

$$C11 : 0,25 \cdot 7,5\% \cdot 11^{0.35} \times 1,1 \Sigma C1 \text{ to } C10 + 0,1 \Sigma C1 \text{ to } C10$$

$$C11 : 360,778 \text{ dollar kanada (2005)}$$

$$C11 : 411,287 \text{ dollar kanada (2014) dan senilai } 4,548,482,744 \text{ rupiah}$$

## 12. Biaya Contingencies

$$C12 : 10\% \Sigma C1 \text{ to } C11$$

$$C12 : 35,686,140,998 \cdot 10\% : 3,533,558,297.50 \text{ rupiah}$$

## 13. Capital Cost

$$C13 : \Sigma C1 \text{ to } C12$$

$$C13 : 38,869,141,272 \text{ rupiah}$$

## 14. Biaya O &amp; P

$$C14 : 1\% \Sigma C1 \text{ to } C11$$

$$C14 : 353,355,829.75 \text{ rupiah}$$

## 15. Biaya Pajak (PPN 10%)

$$C15 : 10\% C13$$

$$C15 : 10\% \cdot 38,869,141,272 : 3,886,914,127.25 \text{ rupiah}$$

## 16. Total Cost

$$C16 : C15 + C13$$

$$C16 : 3,886,914,127.25 + 38,869,141,272 : 42,756,055,399.74 \text{ rupiah}$$

Dari estimasi biaya tersebut dapat diketahui rasio perbandingan antara energi dengan besarnya biaya (Rp/kWh) :  $42,756,055,399.74 / 5214000 : 8,2$ . Dengan cara yang sama maka didapatkan rincian estimasi biaya untuk tiap alternatif:

Tabel 4.43. Hasil Perhitungan Estimasi Biaya Tiap Alternatif

| No. | Item Pekerjaan                 | Biaya (Milyar Rupiah) |              |              |              |
|-----|--------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
|     |                                | Alternatif 1          | Alternatif 2 | Alternatif 3 | Alternatif 4 |
| 1   | Biaya Engineering              | 1,85                  | 2,90         | 4,56         | 4,56         |
| 2   | Peralatan Hidromekanik         | 16,66                 | 37,61        | 62,91        | 92,50        |
| 3   | Pemasangan Hidromekanik        | 2,50                  | 5,64         | 9,44         | 13,87        |
| 4   | Pemasangan Jalur Transmisi     | 3,08                  | 3,08         | 3,08         | 3,08         |
| 5   | Travo Dan Substansi            | 0,19                  | 0,50         | 0,95         | 1,52         |
| 6   | Pemasangan Travo Dan Substansi | 0,03                  | 0,08         | 0,14         | 0,23         |
| 7   | Sipil                          | 5,25                  | 9,07         | 12,52        | 15,78        |
| 8   | Pipa Pesat                     | 0,69                  | 1,33         | 1,95         | 2,56         |
| 9   | Pemasangan Pipa Pesat          | 0,17                  | 0,17         | 0,17         | 0,17         |
| 10  | Saluran                        | 0,37                  | 0,69         | 0,99         | 1,29         |
| 11  | Lain Lain                      | 4,55                  | 9,82         | 16,45        | 24,07        |
| 12  | Biaya Contingencies            | 3,53                  | 7,09         | 11,32        | 15,96        |
| 13  | Biaya O & P                    | 0,35                  | 0,71         | 1,13         | 1,60         |
| 14  | Capital Cost                   | 38,87                 | 77,98        | 124,49       | 175,59       |
| 15  | PPN 10%                        | 3,89                  | 7,80         | 12,45        | 17,56        |
| 16  | Total Cost                     | 42,76                 | 85,78        | 136,94       | 193,15       |
| 17  | Rasio Rp/Kwh                   | 8,200                 | 8,227        | 8,788        | 9,577        |

Sumber: perhitungan

Biaya operasional dan perawatan PLTMH Mrican diadopsi dari laporan studi kelayakan pengembangan sungai brantas sebagai pembangkit listrik Perum JASA TIRTA I tahun 2009, kegiatan O&P meliputi:

Tabel 4.44. Kegiatan inspeksi dan pemeliharaan PLTMH Mrican

| no | siklus inspeksi | hari yang dibutuhkan | jenis inspeksi  |
|----|-----------------|----------------------|---|
| 1  | tiap 1 bulan    | 1 hari               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• penggelontoran sedimen</li> </ul>  |
| 2  | tiap 1 tahun    | 1-2 hari             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• mengganti oli</li> <li>• pengecekan oli pada <i>speed increaser</i></li> <li>• pengecatan bangunan metal</li> </ul>  |
| 3  | tiap 3 tahun    | 3-4 hari             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengganti oli samping dan oli <i>speed increaser</i></li> <li>• Membongkar dan membersihkan generator</li> <li>• Mengganti minyak gemuk pada generator</li> </ul>  |
| 4  | tiap 5 tahun    | 5-6 hari             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Membongkar dan membersihkan turbin serta generator</li> <li>• Mengganti <i>mechanical seal</i></li> <li>• Mengganti penyangga generator</li> </ul>   |
| 5  | tiap 10 tahun   | 10 hari              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Membongkar dan membersihkan generator, turbin dan <i>speed increaser</i></li> <li>• Pemeriksaan semua bagian peralatan</li> <li>• Mengganti penyangga generator</li> <li>• Mengganti gigi pada <i>speed increaser</i></li> </ul> |



|   |               |         |   |
|---|---------------|---------|---|
|   |               |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengganti <i>mechanical seal</i></li> <li>• mengganti oli pada semua peralatan</li> </ul>          |
| 6 | tiap 30 tahun | 1 tahun | <ul style="list-style-type: none"> <li>• mengganti turbin, generator dan perangkat mekanik elektrik lainnya (<i>reequipment</i>)</li> </ul> |

**Tabel 4.45. rancangan jenis pekerjaan dan pekerja PLTMH Mrican**

| No. | Nama                             | Rasio | Jumlah Pekerja | Waktu Kerja |
|-----|----------------------------------|-------|----------------|-------------|
| 1   | Operating Manajer                | 1     | 1              | Full Time   |
| 2   | Operator                         | 1     | 1              | Full Time   |
| 3   | Security                         | 0.7   | 4              | Full Time   |
| 4   | Electrical Engineering           | 0.25  | 1              | Part Time   |
| 5   | Civil And Mechanical Engineering | 0.25  | 1              | Part Time   |

#### 4.9.3. Estimasi Manfaat (*benefit*)

Berdasarkan peraturan menteri ESDM no.4 tahun 2012 maka harga jual listrik yang harus dibeli PT PLN adalah Rp. 1004/Kwh. Maka nilai manfaat dari penjualan listrik adalah: harga jual x hasil bangkitan energi listrik :  $1,004 \times 5214 \text{ MW} = 5,24$  milyar pertahun ditambah dengan pendapatan dari CER sebesar 0,61 milyar pertahun maka total pendapatan pertahun adalah 5,85 milyar untuk alternatif 1, dengan cara yang sama maka estimasi manfaat untuk tiap alternatif adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.46. Estimasi Manfaat Untuk Tiap Alternatif**

| No | Alternatif | Harga Jual Listrik (Rp/Kwh) | Pembangkitan Tahunan (Mwh) | Pendapatan (Milyar Rp) | CER (Milyar Rp) | Total (Milyar Rp) |
|----|------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------|-------------------|
| 1  | 1          | 1004                        | 5214                       | 5,24                   | 0,61            | 5,85              |
| 2  | 2          | 1004                        | 10427                      | 10,47                  | 0,62            | 11,09             |
| 3  | 3          | 1004                        | 15582                      | 15,64                  | 0,76            | 16,40             |
| 4  | 4          | 1004                        | 20169                      | 20,25                  | 0,47            | 20,72             |

*Sumber: perhitungan*

#### 4.9.4. Analisa Kelayakan Ekonomi

##### 4.9.4.1. Analisa Ekuivalensi Terhadap Kelayakan Ekonomi

Analisa ekuivalensi yang dipergunakan adalah penggunaan nilai sekarang (*present value*) terhadap semua elemen dana termasuk biaya total, biaya O&P, manfaat energi dan CER data yang dipergunakan adalah data suku bunga pinjaman (*loan interest*), dan usia guna. Berikut ini adalah contoh perhitungan ekuivalensi untuk alternatif 1:



Nilai sekarang untuk total biaya langsung:

Total biaya langsung : Rp. 42,756,055,399.74

Suku bunga pinjaman : 7,5 %

Tahun ke : 0

Present value (P/F) :  $42,756,055,399.74 / (1+7,5\%)^0$  : Rp. 42,756,055,399.74

(nilai tetap karena biaya langsung merupakan nilai masa sekarang)

Nilai sekarang untuk biaya O&P:

Biaya O&P : Rp. 353,355,829.75

Suku bunga pinjaman : 7,5 %

Tahun ke : 1

Present value (P/F) :  $353,355,829.75 / (1+7,5\%)^1$  : Rp. 328,703,097.44

Nilai sekarang untuk manfaat energi:

Manfaat energi : Rp. 610,141,613.87

Suku bunga pinjaman : 7,5 %

Tahun ke : 1

Present value (P/F) :  $610,141,613.87 / (1+7,5\%)^1$  : Rp. 567,573,594.30

Hasil nilai ekuivalensi untuk tiap alternatif dapat dilihat pada tabel *cash flow*.

#### 4.9.4.2. Analisa Kelayakan Ekonomi Menggunakan Aliran Dana (*Cash Flow*)

Aliran dana (*cash flow*) disusun berdasarkan tiap alternatif selama 35 tahun, dalam tabel *cash flow* masing masing parameter dihitung dalam bentuk nilai ekuivalensinya (P/V) untuk tiap parameter. Kemudian akan dianalisa kelayakan ekonominya dalam bentuk *benefit cost ratio* (BCR), *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR) dan *paid back period*. Berikut tabel *cash flow* untuk tiap alternatif: