

Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro pada Bendung Gerak Waru Turi

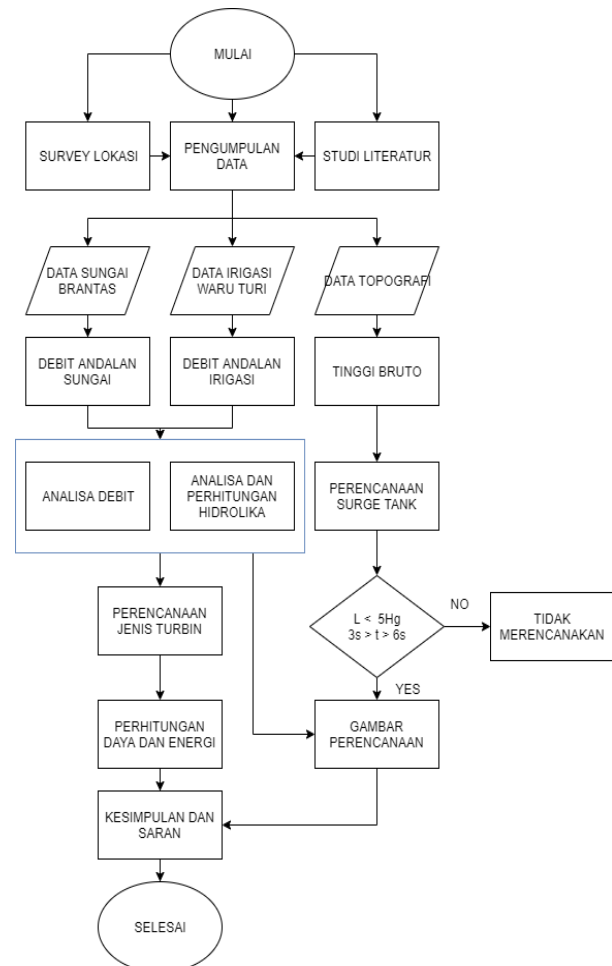
Nadira Fildzah Tasya Hutagalung, Wasis Wardoyo, dan Mohamad Bagus Ansori
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: bagus_ansori@ce.its.ac.id

Abstrak—Bendung Gerak Waru Turi yang dilintasi oleh Sungai Brantas memiliki fungsi utama sebagai irigasi pesawahan, air baku, pengendali air dan pariwisata edukasi. Bendung tersebut mensuplai air irigasi pada Warujayeng menuju Ponorogo dengan debit inflow maksimal sebesar $18.36 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan Turi Tunggoro yang menuju Mojokerto memiliki debit inflow maksimal sebesar $18.90 \text{ m}^3/\text{detik}$. Pada saluran irigasi Waru dan Turi terdapat debit intake melimpah dan beda tinggi yang belum dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik untuk keperluan operasional bendung tersebut. Sehingga dibutuhkan perencanaan pembangkit listrik yang baik untuk keperluan Bendung Gerak Waru Turi dan sekitar. Untuk mencapai tujuan ini, langkah-langkah yang diambil adalah menghitung debit andalan Sungai Brantas dan debit andalan saluran irigasi untuk mendapatkan debit perencanaan PLTA. Perhitungan beda tinggi pada hulu bendung ke hilir dilakukan dan diolah untuk mencari perhitungan Analisa daya dan energi yang dihasilkan, sehingga dapat merencanakan komponen-komponen PLTA seperti intake, saluran pengarah, kolam tampung, pipa pesat dan rumah turbin. Hasil dari studi ini adalah pembangkit listrik pada saluran irigasi Waru menghasilkan daya sebesar 1158.57 kW selama satu tahun dengan debit sebesar $10.67 \text{ m}^3/\text{detik}$, sedangkan saluran irigasi Turi menghasilkan daya sebesar 1119.24 kW selama satu tahun dengan debit sebesar $10.44 \text{ m}^3/\text{detik}$. Sehingga jenis pembangkit listrik dapat dikategorikan pembangkit listrik mini-hidro yang dapat mengurangi biaya tagihan listrik dengan memanfaatkan listrik yang ada sehingga dana dapat dialokasikan ke pengembangan lainnya.

Kata Kunci—Bendung Gerak Waru Turi, Debit Andalan, Listrik, PLTMH.

I. PENDAHULUAN

SUNGAI Brantas adalah sungai terpanjang kedua di Pulau Jawa yang bersumber di Sumber Brantas, Kecamatan Bumiaji, Kota Batu dan mengalir melewati Malang, Blitar, Tulungagung, Kediri, Jombang dan Mojokerto. Sungai Brantas melewati Bendung Gerak Waru Turi, Kediri berfungsi sebagai pengontrol air sebelum menuju Surabaya dan Mojokerto, pengalir air irigasi ke Warujayeng dan Turi Tunggoro, air baku sekitar dan tempat pariwisata edukasi. Bendung Gerak Waru Turi memiliki lebar 159.8 m dan Panjang 74.5 m dengan debit *inflow* maksimal yang mengalir pada Bendung ini sebesar $436.17 \text{ m}^3/\text{detik}$. Pada Bendung Gerak Waru Turi terdapat beda tinggi sekitar 15.68 m sampai 16 m dan melimpahnya debit Sungai Brantas. Hal ini berpotensi sebagai pembangkit listrik tenaga air yang belum dimanfaatkan. Pembangkit listrik tenaga air memiliki klasifikasinya berdasarkan besar daya yang dihasilkan. Perencanaan pembangkit listrik yang baik pada Bendung Gerak Waru Turi bertujuan untuk membantu kebutuhan operasional listrik, sehingga dapat mengembangkan fasilitas yang ada. Perencanaan meliputi pengambilan titik intake yang tidak mengganggu debit irigasi, Analisa dan perhitungan hidrolika, perhitungan kehilangan energi *major*

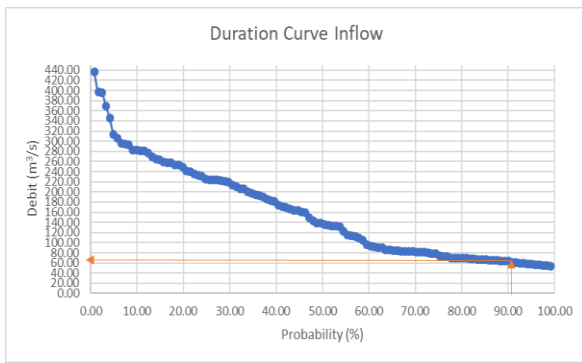


Gambar 1. Flowchart pengerjaan studi.

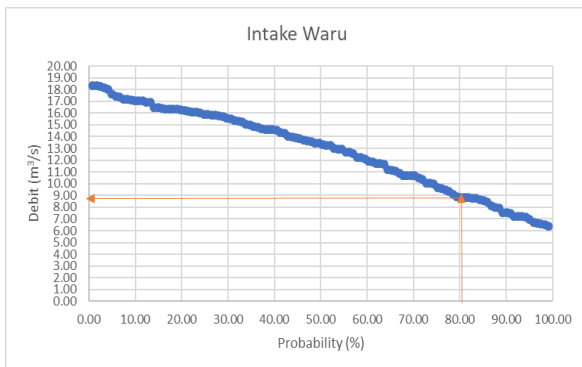
dan *minor*, penentuan jenis turbin dan perhitungan daya dan energi yang dihasilkan. Perencanaan tersebut dilakukan guna menghasilkan daya yang cukup memadai untuk kebutuhan operasional listrik terutama di Bendung Gerak Waru Turi.

II. METODOLOGI

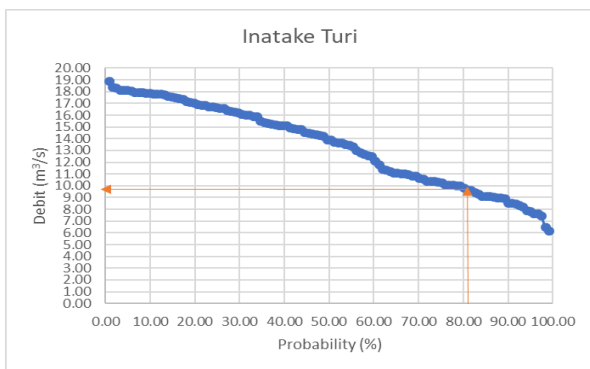
Dalam tahapan pengerjaannya dimulai dengan mengumpulkan data, melakukan survey lokasi dan studi literatur. Jenis data yang dibutuhkan adalah data Sungai Brantas, data Irigasi Waru Turi dan data topografi. Pada data sungai dan irigasi dicari debit andalannya yang selanjutnya akan digunakan untuk Analisa dan perhitungan hidrolika. Data topografi digunakan sebagai data penunjang dalam penentuan kebutuhan *surge tank*. Hasil dari olahan ketiga data tersebut digunakan sebagai perencanaan pembangkit listrik tenaga minihidro pada Bendung Gerak Waru Turi. Secara rinci dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 2. Grafik *Duration Curve* Sungai Brantas.



Gambar 3. Grafik *Duration Curve* Irigasi Waru.



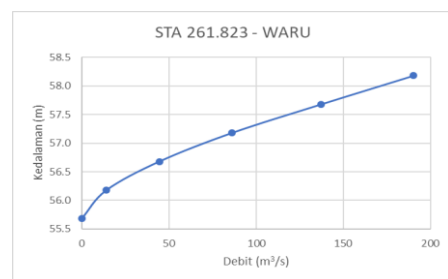
Gambar 4. Grafik *Duration Curve* Irigasi Turi.

Tabel 1.
Hasil Perhitungan *Rating Curve* Waru

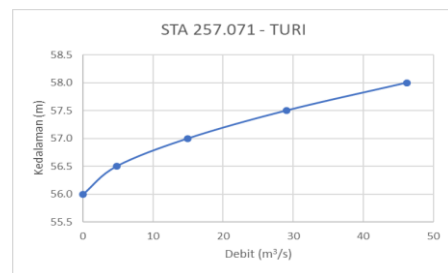
| No. | Kedalaman (m) | Area (m ²) | P (m) | R (m) | V (m/s) | Q (m ³ /s) |
|-----|---------------|------------------------|-------|---------|---------|-----------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (3)/(4) | (5) | (3)*(5) |
| 0 | 55.70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 56.20 | 9.28 | 38.11 | 0.24 | 1.53 | 14.20 |
| 2 | 56.70 | 18.60 | 39.22 | 0.47 | 2.39 | 44.43 |
| 3 | 57.20 | 27.98 | 40.32 | 0.69 | 3.08 | 86.12 |
| 4 | 57.70 | 37.41 | 41.43 | 0.90 | 3.67 | 137.24 |
| 5 | 58.20 | 45.94 | 42.43 | 1.08 | 4.14 | 190.24 |

Tabel 2.
Hasil Perhitungan *Rating Curve* Turi

| No. | Kedalaman (m) | Area (m ²) | P (m) | R (m) | V (m/s) | Q (m ³ /s) |
|-----|---------------|------------------------|-------|---------|---------|-----------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (3)/(4) | (5) | (3)*(5) |
| 0 | 56.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 56.50 | 11.25 | 46.00 | 0.24 | 0.43 | 4.78 |
| 2 | 57.00 | 22.50 | 47.00 | 0.48 | 0.67 | 14.97 |
| 3 | 57.50 | 33.75 | 48.00 | 0.70 | 0.86 | 29.02 |
| 4 | 58.00 | 45.00 | 49.00 | 0.92 | 1.03 | 46.23 |



Gambar 5. *Rating Curve* Waru.



Gambar 6. *Rating Curve* Turi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa dan Perhitungan

1) Analisa Debit Andalan Sungai

Analisa dan perhitungan debit andalan didapatkan dengan menggunakan rumus probabilitas *Weibull*. Debit Sungai Brantas yang dihitung adalah debit bulanan selama 10 tahun yaitu dari tahun 2005-2014. Digunakan debit andalan Sungai Brantas Q100% sebesar 53.32 m³/detik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

2) Analisa Debit Andalan Irigasi Waru dan Turi

Debit Irigasi Waru dan Turi yang dihitung adalah debit bulanan selama 10 tahun yaitu dari tahun 2005-2014. Analisa dan perhitungan debit andalan didapatkan dengan menggunakan rumus probabilitas *Weibull*. Untuk debit irigasi diambil sebesar 80% untuk kedua sisi. Sehingga didapatkan debit andalan Irigasi Waru sebesar 8.86 m³/detik dan Debit andalan Irigasi Turi sebesar 9.83 m³/detik seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Dari Gambar 3 dan 4 *duration curve* yang dibuat, dapat direncanakan debit rencana yang digunakan sebagai pembangkit listrik. Pada penelitian ini menggunakan Q₂₀

dengan hitungan sebagai berikut:

$$Q_{PLTMH} \text{ Waru} = 20\% \times (Q_{\text{sungai}} - Q_{\text{irigasi}}) \\ = 20\% \times (53.32 - 8.86) \\ = 10.67 \text{ m}^3/\text{detik}$$

$$Q_{PLTMH} \text{ Turi} = 20\% \times (Q_{\text{sungai}} - Q_{\text{irigasi}}) \\ = 20\% \times (53.32 - 9.83) \\ = 10.44 \text{ m}^3/\text{detik}$$

3) Analisa Elevasi

Analisa elevasi didapatkan dari data sekunder Bendung Gerak Waru Turi dan dihitung *rating curve* sehingga mengetahui elevasi air pada saluran irigasi. Penampang yang diambil adalah penampang pada stasiun yang terdekat dengan pintu kantong lumpur seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2 serta pada Gambar 5 dan 6.

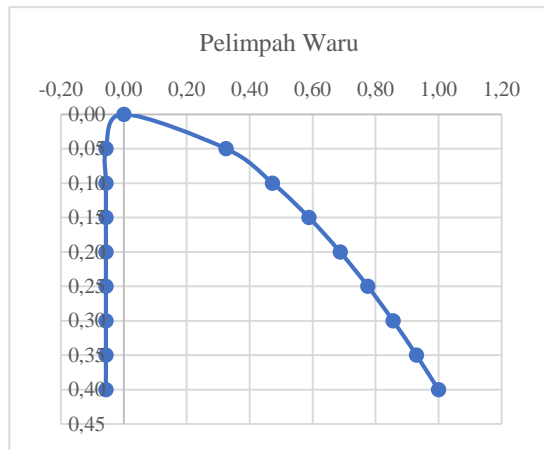
Ketersediaan lahan yang dapat digunakan untuk membangun komponen PLTMH dapat dicari menggunakan bantuan aplikasi *Google Earth* didapatkan ketersediaan lahan pada sisi Waru sebesar 68.50 m dan ketersediaan lahan Turi sebesar 114 m. Akurasi *Google Earth* belum pasti 100% sesuai dengan kondisi eksisting sehingga dilakukan pembulatan kebawah dalam penelitian ini.

4) Analisa Bukaian Pintu pada Kantong Lumpur

Pengambilan titik *intake* yang berdekatan dengan pintu

Tabel 3.
Perencanaan Spillway Waru

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|-----------------|-------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.67 | m ³ /detik |
| Lebar mercu | 21 | m |
| Lebar pintu | 3.4 | m |
| Jumlah pintu | 5 | buah |
| Lebar pilar | 1 | m |
| Jumlah pilar | 4 | buah |
| Tinggi spillway | 0.40 | meter |



Gambar 7. Pelimpah Waru

kantong lumpur, sehingga diperlukan peninjauan bukaan pintu dari *waterway* irigasi menuju kantong lumpur sebagai dasar pengoperasian bukaan pintu pada Bendung Waru Turi. Berikut cara menghitung dan hasil perhitungan.

Bukaan pintu Kantong Lumpur sisi Waru

$$a = \frac{Q}{\mu * b * \sqrt{2gz}} = \frac{8.86}{0.7 * 6.75 * \sqrt{2 * 9.81 * 0.20}} = 0.12 \text{ m (perpintu)}$$

Bukaan pintu Kantong Lumpur sisi Turi

$$a = \frac{Q}{\mu * b * \sqrt{2gz}} = \frac{9.83}{0.7 * 6.75 * \sqrt{2 * 9.81 * 0.2}} = 0.14 \text{ m (perpintu)}$$

5) *Analisa Tinggi Air pada Saluran*

Untuk mengetahui ketinggian air yang tersedia pada saluran dapat dihitung dengan menginterpolasi hasil perhitungan *Rating Curve*. Didapatkan hasil interpolasi tinggi air dari penjumlahan debit irigasi dan debit rencana pembangkit, sehingga tidak mengganggu debit irigasi.

Debit pada saluran Irigasi Waru

$$Q \text{ pada saluran} = Q_{80 \text{ Irigasi}} + Q_{PLTA}$$

$$Q \text{ pada saluran} = 8.86 + 10.67$$

$$Q \text{ pada saluran} = 19.53 \frac{m^3}{detik}$$

Dari hasil interpolasi didapatkan dengan debit sebesar 19.53m³/s memiliki tinggi air sebesar 0.60 m dengan tinggi elevasi 56.28 m.

Debit pada saluran Irigasi Turi

$$Q \text{ pada saluran} = Q_{80 \text{ Irigasi}} + Q_{PLTA}$$

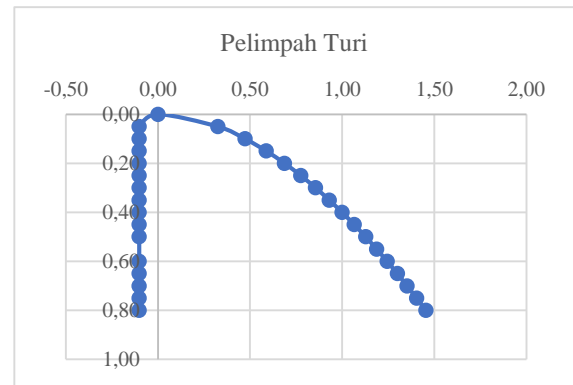
$$Q \text{ pada saluran} = 9.83 + 10.44$$

$$Q \text{ pada saluran} = 20.27 \frac{m^3}{detik}$$

Dari hasil interpolasi didapatkan dengan debit sebesar 20.27 m³/s memiliki tinggi air sebesar 1.18 m dengan tinggi elevasi 57.18 m.

Tabel 4.
Perencanaan Spillway Turi

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|-----------------|-------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.44 | m ³ /detik |
| Lebar mercu | 18 | m |
| Lebar pintu | 2.80 | m |
| Jumlah pintu | 5 | buah |
| Lebar pilar | 1 | m |
| Jumlah pilar | 4 | buah |
| Tinggi spillway | 0.80 | meter |



Gambar 8. Pelimpah Turi

B. *Perencanaan Bangunan Pembangkit*

1) *Perencanaan Spillway*

Pada penelitian ini intake yang digunakan berupa pelimpah bentuk Ogee yang dilengkapi dengan pintu *emergency*. Perhitungan pelimpah dimulai dengan merencanakan pintu dan melakukan iterasi untuk menghitung tinggi air dan tinggi energi diatas pelimpah. Dalam penelitian ini tahapan-tahapan pengerjaannya dengan diawali merencanakan jumlah pintu dan pilar serta lebarnya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.

Setelah merencanakan komponen pintu menghitung lebar efektif dimana memiliki komponen nilai tinggi energi diatas mercu. Untuk mendapatkan nilai tinggi energi diatas mercu digunakan cara iterasi dan *trial error* untuk mendapatkan nilai tinggi air diatas mercu, tinggi energi air diatas mercu dan kecepatan aliran. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 5 dan 6.

Dari hasil yang didapatkan kita dapat bias melihat gambaran bentuk pelimpah dengan menggunakan rumus dari (KP-04) [1] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.

2) *Perencanaan Kolam Olak*

Kolam Olak adalah saluran yang berfungsi meredam energi [2]. Kriteria utama yang harus dipenuhi agar kolam olak dapat berfungsi dengan baik adalah energi harus dapat diredam secara efisien di dalam air sehingga dasar sungai di sebelah hilir tidak akan tergerus terlalu dalam atau rusak berat sehingga usaha perbaikannya akan berada di luar jangkauan pekerjaan pemeliharaan biasa. Dalam perencanaan kolam olak didapatkan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Pada perencanaan kolam olak sisi Waru didapatkan bahwa kecepatan awal dari spillway menuju kolam olak sebesar 3.36 m/detik dengan tinggi air awal sebesar 0.31 meter dan akhir sebesar 0.33 meter. Angka Froude yang didapatkan sebesar 2.76 menurut peraturan nilai Froude antara 2.5 – 4.5 tipe kolam Olak USBR IV seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Pada perencanaan kolam olak sisi Waru didapatkan bahwa kecepatan awal dari spillway menuju kolam olak sebesar 4.42 m/detik dengan tinggi air awal sebesar 0.13 meter dan akhir sebesar 0.26 meter. Angka Froude yang didapatkan sebesar

Tabel 5.
Tabel Perhitungan Kolam Olak Waru

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|-----------------------|---------|---------|
| Kecepatan | 3.36 | m/detik |
| Tinggi air awal (y1) | 0.31 | meter |
| Tinggi air akhir (y2) | 0.33 | meter |
| Bilangan Froude (Fr) | 2.76 | |
| Panjang kolam (Lj) | 3.61 | meter |
| Jenis Kolam Olak | USBR IV | |

Tabel 6.
Tabel Perhitungan Kolam Olak Turi

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|-----------------------|---------|---------|
| Kecepatan | 4.42 | m/detik |
| Tinggi air awal (y1) | 0.13 | meter |
| Tinggi air akhir (y2) | 0.26 | meter |
| Bilangan Froude (Fr) | 3.89 | |
| Panjang kolam (Lj) | 2.10 | meter |
| Jenis Kolam Olak | USBR IV | |

Tabel 7.
Hasil Perencanaan dan Perhitungan bukaan pintu pada Waru

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|---------------------|-------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.67 | m ³ /detik |
| Lebar saluran | 21 | meter |
| Tinggi air | 0.60 | meter |
| Jumlah pilar | 4 | buah |
| Lebar pilar | 1 | meter |
| Lebar pintu | 3.4 | meter |
| Jumlah pintu | 5 | buah |
| Tinggi bukaan pintu | 0.08 | meter |

Tabel 8.
Hasil Perencanaan dan Perhitungan bukaan pintu pada Turi

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|---------------------|-------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.44 | m ³ /detik |
| Lebar saluran | 18 | meter |
| Tinggi air | 1.18 | meter |
| Jumlah pilar | 4 | buah |
| Lebar pilar | 1 | meter |
| Lebar pintu | 2.80 | meter |
| Jumlah pintu | 5 | buah |
| Tinggi bukaan pintu | 0.5 | meter |

3.89 menurut peraturan nilai Froude antara 2.5 – 4.5 tipe kolam Olak USBR IV.

3) Perencanaan Pintu pada Pelimpah

Perencanaan pintu pada pelimpah Waru dan Turi bertujuan sebagai salah satu cara untuk menghindari hal-hal yang tidak diinginkan. Sehingga jika ada keperluan untuk menutup air masuk ke pipa dapat dengan menutup pintu. Langkah perencanaan dimulai dari merencanakan jumlah pintu untuk mencari lebar pintu sehingga kita dapat mencari besar bukaan pintu yang diperlukan untuk PLTMH beroperasi. Hasil perencanaan pintu ditunjukkan pada Tabel 9 dan 10.

Dari hasil perhitungan, didapatkan pintu dibuka sebesar 0.08 meter dalam pengoperasiannya. Pintu memiliki dimensi sebesar 2.5 meter x 3.4 meter dengan tebal pintu 0.8 meter dan diameter stang sebesar 1.10 cm.

Dari hasil perhitungan, didapatkan pintu dibuka sebesar 0.5 meter dalam pengoperasiannya. Pintu memiliki dimensi sebesar 2.1 meter x 2.80 meter dengan tebal pintu 0.1 meter dan diameter stang sebesar 0.96 cm.

4) Perencanaan Headrace

Saluran pembawa (*Headrace*) memiliki fungsi sebagai penyalur air dari intake menuju kolam penenang [1], pada penelitian ini *headrace* tidak menuju kolam penenang melainkan langsung menuju pipa sehingga perencanaan dimensinya sudah sesuai untuk menampung debit yang akan dialirkan ke pipa. Dalam penelitian ini menggunakan saluran

Tabel 9.
Hasil Perencanaan Headrace pada Waru

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|------------------------|--------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.67 | m ³ /detik |
| Lebar atas (B) | 21 | meter |
| Lebar bawah (b) | 18.20 | meter |
| Kemiringan sisi (m) | 1 | |
| Tinggi air (h) | 1.40 | meter |
| Kemiringan saluran (i) | 0.0001 | |
| Kecepatan air (v) | 0.39 | m/detik |
| Panjang saluran (L) | 55.30 | meter |

Tabel 10.
Hasil Perencanaan Headrace pada Turi

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|------------------------|--------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.44 | m ³ /detik |
| Lebar atas (B) | 18 | meter |
| Lebar bawah (b) | 15.20 | meter |
| Kemiringan sisi (m) | 1 | |
| Tinggi air (h) | 1.40 | meter |
| Kemiringan saluran (i) | 0.0002 | |
| Kecepatan air (v) | 0.45 | m/detik |
| Panjang saluran (L) | 53.80 | meter |

Tabel 11.
Hasil Perhitungan Trashrack Waru dan Turi

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|------------------------|-----------------|--------|
| Jumlah trashrack | 5 | buah |
| Dimensi | 3 X 2 | meter |
| Jenis bahan | Besi Pejal | |
| Tebal kisi (δ) | 10 | mm |
| Bentuk | Persegi panjang | |
| Kemiringan (Θ) | 75 ^o | |
| Jarak antar jeruji (ε) | 100 | mm |
| Koefisien profil (β) | 2.42 | |

Tabel 12.
Perhitungan Tinggi Pipa Pesat Waru

| Keterangan (satuan dalam meter) | Nilai |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Tinggi Bruto (Hg) | (1) 15.68 |
| Intake menuju spillway (HL1) | (2) 0.15 |
| Spillway (HL2) | (3) 0.59 |
| Kolam Olak (HL3) | (4) 0.31 |
| Saluran pengarah (HL4) | (5) 0.008 |
| Trash rack (HL5) | (6) 0.001 |
| Tinggi jagaan diatas pipa (HL6) | (7) 0.40 |
| Tinggi pipa pesat (Hp) | (1)-(2)-(3)-(4)-(5)-(6)-(7) 14.22 |

berbentuk trapezium dengan lebar atas disesuaikan dengan ukuran lebar saluran pembangkit berikut hasil perhitungan perencanaan *headrace*: (Tabel 11 dan 12)

Dari perencanaan Tabel 11 didapatkan panjang saluran sebesar 55.30 meter dengan kemiringan saluran 0.0001 berbentuk trapezium.

Dari perencanaan Tabel 12 didapatkan panjang saluran sebesar 55.80 meter dengan kemiringan saluran 0.0002 berbentuk trapezium.

5) Perencanaan Trashrack

Trashrack atau saringan sampah adalah peralatan yang berfungsi mencegah sampah masuk ke kolam air atau saluran yang dapat dioperasikan secara mekanik atau manual [3]. Tipe trashrack terdapat dua yaitu tipe saringan permanen dan tipe saringan tidak permanen, dapat diangkat. Dalam penelitian ini direncanakan trashrack seperti yang ditunjukkan pada Tabel 13.

Aliran air yang mengalir melalui trashrack akan mengalami kehilangan energi. Kehilangan energi dibutuhkan untuk menghitung tinggi pipa pesat (*penstock*) dan diameternya. Berikut perhitungan kehilangan energi pada saluran Waru dan Turi:

Tabel 13.

Perhitungan Tinggi Pipa Pesat Turi

| Keterangan (satuan dalam meter) | Nilai |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Tinggi Bruto (Hg) | (1) 16.00 |
| Intake menuju spillway (HL1) | (2) 0.03 |
| Spillway (HL2) | (3) 1.03 |
| Kolam Olak (HL3) | (4) 0.26 |
| Saluran pengarah (HL4) | (5) 0.01 |
| Trash rack (HL5) | (6) 0.001 |
| Tinggi jagaan diatas pipa (HL6) | (7) 0.40 |
| Tinggi pipa pesat (Hp) | (1)-(2)-(3)-(4)-(5)-(6)-(7) 14.28 |

Tabel 14.

Rekapan Perhitungan Pnjang Pipa Pesat

| Keterangan | Nilai (satuan dalam meter) | |
|----------------------------|----------------------------|-------|
| | Waru | Turi |
| Panjang pipa vertical (Hp) | 14.45 | 14.27 |
| Panjang pipa horizontal | 17.20 | 16.98 |
| Panjang pipa miring | 22.50 | 22.23 |

Tabel 15.

Hasil Perhitungan Diameter Pipa Waru

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|--------------------------|-------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.67 | m ³ /detik |
| Tinggi Vertikal (Hp) | 14.22 | meter |
| Nilai manning pipa | 0.012 | |
| Panjang pipa (L pipa) | 22.15 | meter |
| Jumlah pipa (n) | 4 | Buah |
| Kecepatan pada pipa (Vp) | 5.25 | m/detik |
| Diameter pipa (ESHA) | 0.80 | meter |

$$hf = \beta * \left(\frac{S}{b}\right)^{\frac{4}{3}} * \sin \theta * \frac{v^2}{2g}$$

$$= 2.42 * \left(\frac{10}{100}\right)^{\frac{4}{3}} * \sin(65) * 0.01$$

$$hf = 0.001 m$$

6) Perencanaan Pipa Pesat

Pipa pesat adalah pipa yang berfungsi mengalirkan air dari kolam menuju turbin air sehingga turbin dapat bekerja dan menghasilkan listrik [4]. Dasar perancangan pipa pesat adalah sama dengan perancangan tangka dan vessel, akan tetapi karena governor control dan katup operasi turbin dapat mengakibatkan tekanan tiba-tiba seperti *water hammer* maka perencanaan perlu diperhatikan. Sebelum merencanakan diameter pipa pesat dibutuhkan tinggi pipa pesat didapatkan dari tinggi jatuh kotor dikurangi kehilangan energi air dari awal hingga menuju pipa. Perhitungan tinggi pipa pesat ditunjukkan pada Tabel 14 dan 15.

Dari hasil perhitungan didapatkan tinggi pipa pesat untuk Waru sebesar 14.22 meter dan tinggi pipa pesat Turi sebesar 14.28 meter. Kehilangan energi pada poin (1) sampai (7) menggunakan rumus kehilangan umum yaitu

$$\Delta H = \frac{v^2}{2 * g}$$

Dalam penelitian ini digunakan pipa dengan bahan baja. Jumlah pipa yang digunakan sebanyak empat buah. Perencanaan diameter pipa menggunakan rumus ESHA dan panjang pipa secara horizontal dan panjang miring didapatkan dari perhitungan *phytagoras* dengan sudut 40⁰ sehingga didapatkan jarak-jarak pipa seperti yang ditunjukkan pada Tabel 16, 17, dan 18.

7) Perencanaan Surge Tank

Pada suatu instalasi pembangkit listrik tenaga air dapat memungkinkan terjadi bahaya seperti *water hammer* akibat penutup katup secara cepat. *Water hammer* ini dapat menimbulkan peningkatan tekanan pada saluran pipa

Tabel 3.

Rekapan Perhitungan Pnjang Pipa Pesat

| Keterangan | Nilai (satuan dalam meter) | |
|----------------------------|----------------------------|-------|
| | Waru | Turi |
| Panjang pipa vertical (Hp) | 14.45 | 14.27 |
| Panjang pipa horizontal | 17.20 | 16.98 |
| Panjang pipa miring | 22.50 | 22.23 |

Tabel 4.

Hasil Perhitungan Diameter Pipa Waru

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|--------------------------|-------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.67 | m ³ /detik |
| Tinggi Vertikal (Hp) | 14.22 | meter |
| Nilai manning pipa | 0.012 | |
| Panjang pipa (L pipa) | 22.15 | meter |
| Jumlah pipa (n) | 4 | Buah |
| Kecepatan pada pipa (Vp) | 5.25 | m/detik |
| Diameter pipa (ESHA) | 0.80 | meter |

Tabel 5.

Hasil Perhitungan Diameter Pipa Turi

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|--------------------------|-------|-----------------------|
| Debit rencana | 10.44 | m ³ /detik |
| Tinggi Vertikal (Hp) | 14.28 | meter |
| Nilai manning pipa | 0.012 | |
| Panjang pipa (L pipa) | 22.15 | meter |
| Jumlah pipa (n) | 4 | Buah |
| Kecepatan pada pipa (Vp) | 5.22 | m/detik |
| Diameter pipa (ESHA) | 0.80 | meter |

sehingga dapat menyebabkan pecahnya pipa apabila tekanan yang terjadi melebihi kekuatan maksimum dari pipa[6]. Dalam perencanaan pipa peredam memiliki beberapa parameter antara lain waktu air mengalir berlangsung lebih dari 3 detik dan 6 detik dibutuhkan perencanaan tangki peredam. Panjang pipa pesat tidak boleh melebihi 5 x Tinggi Bruto, jika melebihi maka diperlukan perencanaan tangka peredam. Hasil perhitungan tangki peredam ditunjukkan pada Tabel 19.

8) Perhitungan Kehilangan Energi dan Elevasi

Estimasi kehilangan energi dalam perencanaan PLTMH dibagi menjadi dua bagian, yaitu *major* dan *minor*. Kehilangan *major* adalah kehilangan energi yang disebabkan oleh gesekan dengan bantuan bilangan reynolds, sedangkan *minor* adalah kehilangan energi ketika aliran mengalami perubahan ukuran penampang atau belokan. Berikut hasil perhitungan kehilangan energi pada Waru dan Turi:

1. Waru

Major

$$hf = \frac{fL v^2}{2gD} = 0.0125 * \frac{(22.50 * 5.25^2)}{2 * 9.81 * 0.80} = 0.49 m$$

Minor

Inlet Pipa

$$hL = kL * \frac{V^2}{2g} = 0.04 * \frac{5.25^2}{2 * 9.81} = 0.05 m$$

Belokan pipa

$$hf = kb * \frac{v^2}{2 * g} = 0.14 * \frac{5.25}{2 * 9.81} = 0.19 m$$

Outlet Pipa

$$hf = \frac{v^2}{2 * g} = \frac{5.25^2}{2 * 9.81} = 1.40 m$$

2. Waru

Major

$$hf = \frac{fL v^2}{2gD} = 0.001 * \frac{(22.23 * 5.22^2)}{2 * 9.81 *} = 0.48 m$$

Minor

Tabel 19.
Kisaran Tinggi Jatuh Air untuk Jenis Turbin

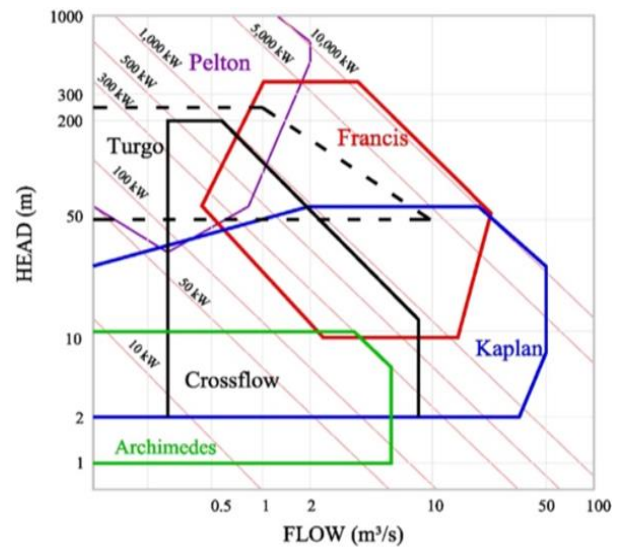
| Turbine type | Head range in Meters |
|----------------------|-------------------------|
| Kaplan and Propeller | 2<H _n <40 |
| Francis | 25<H _n <350 |
| Pelton | 50<H _n <1300 |
| Crosflow | 5<H _n <200 |
| Turgo | 50<H _n <250 |

Tabel 20.
Rekapan Debit dan Tinggi Efektif

| Sisi | Waru | Turi |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Debit rencana | 10.67 m ³ /detik | 10.44 m ³ /detik |
| Tinggi efektif | 12.08 meter | 12.15 meter |

Tabel 21.
Kisaran Tinggi Jatuh Air untuk Jenis Turbin

| Turbine type | Head range in metres |
|----------------------|-------------------------|
| Kaplan and Propeller | 2<H _n <40 |
| Francis | 25<H _n <350 |
| Pelton | 50<H _n <1300 |
| Crossflow | 5<H _n <200 |
| Turgo | 50<H _n <250 |



Gambar 9. Grafik Tinggi Jatuh Air dan Debit untuk Menentukan Jenis Turbin

- Inlet Pipa

$$hL = kL * \frac{v^2}{2g} = 0.04 * \frac{5.22^2}{2 * 9.81} = 0.05m$$

- Belokan pipa

$$hf = kb * \frac{v^2}{2 * g} = 0.14 * \frac{5.22^2}{2 * 9.81} = 0.20m$$

- Outlet Pipa

$$hf = \frac{v^2}{2 * g} = \frac{5.22^2}{2 * 9.81} = 1.39 m$$

Dari kehilangan energi yang dihitung dapat dijumlahkan sebagai pengurang tinggi pipa pesat sebagai tinggi efektif yang akan digunakan untuk menghitung kehilangan energi. Berikut perhitungan tinggi efektif :

A) Waru

$$\begin{aligned} \Sigma hf_{Total} &= hf_{mayor} + \Sigma hf_{minor} \\ \Sigma hf_{Total} &= 0.49 + 0.05 + 0.19 + 1.40 = 2.15 m \\ Heff &= H_p - \Sigma hf \\ Heff &= 14.22 - 2.15 = 12.08 m \end{aligned}$$

B) Turi

$$\begin{aligned} \Sigma hf_{Total} &= hf_{mayor} + \Sigma hf_{minor} \\ \Sigma hf_{Total} &= 0.48 + 0.05 + 0.20 + 1.39 = 2.12 m \\ Heff &= H_p - \Sigma hf \\ Heff &= 14.28 - 2.12 = 12.15 m \end{aligned}$$

9) Perencanaan Jenis Turbin

Dari hasil perencanaan komponen PLTMH, kita telah mendapatkan debit aliran yang mengalir untuk memutar turbin serta tinggi efektifnya. Kedua data ini dapat menentukan jenis turbin yang digunakan dengan bantuan grafik. Rekapan debit dan tinggi efektif masing-masing sisi ditunjukkan pada pada Tabel 20, Gambar 8. Sedangkan untuk kisaran kisaran tinggi jatuh air untuk jenis turbin, ditunjukkan pada Tabel 21. Gambar 9 Grafik tinggi jatuh air dan debit menentukan jenis turbin.

Setelah menentukan jenis turbin yang digunakan maka dilanjutkan dengan perhitungan energi dan daya yang akan dihasilkan oleh pembangkit yang direncanakan.

A) Waru

$$\begin{aligned} P &= \eta * \rho * g * Heff * Q \\ P &= 90\% * 1000 * 9.81 * 12.08 * 10.67 \\ P &= 1138043.368 watt = 1138.04 kW \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= P * t = 672.40 * 24 jam * 365 hari \\ E &= 1138.04 * 8760 jam = 9969259.90 kWh \\ E &= 9969259.90 * 80\% = 7975407.92 kWh \end{aligned}$$

B) Turi

$$\begin{aligned} P &= \eta * \rho * g * Heff * Q \\ P &= 90\% * 1000 * 9.81 * 12.15 * 10.44 \\ P &= 1119246.85 watt = 1119.24 kW \\ E &= P * t = 1119.24 * 24 jam * 365 hari \\ E &= 679.95 * 8760 jam = 9804602.45 kWh \\ E &= 5956448.74 * 80\% = 7843681.96 kWh \end{aligned}$$

Digunakan turbin dengan efisiensi 90% dengan jam bekerja 24 jam. Namun, dengan pertimbangan akan diperlukannya kemungkinan untuk mematikan turbin sementara maka hasil perhitungan energi dikalikan 80%. Energi yang dihasilkan pada sisi Waru sebesar 7975407.92 kWh dan pada sisi Turi sebesar 7843681.96 kWh.

IV. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Hasil dari penelitian ini didapatkan kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah sebagai berikut:

- 1) Debit Sungai Brantas yang dimanfaatkan sebesar 53.32 m³/detik.
- 2) Pada sisi Waru dimanfaatkan debit sebesar 10.67 m³/detik dan tinggi efektif sebesar 12.03 m. Untuk sisi Turi dimanfaatkan debit sebesar 10.44 m³/detik dan tinggi efektif sebesar 12.15 m.
- 3) Jenis turbin yang digunakan pada kedua sisi adalah Turbin Kaplan dengan efisiensi 90%
- 4) Desain pembangkit listrik terdiri atas spillway bentuk Ogee, Headrace, pipa pesat, turbin dan rumah pembangkit. Pipa yang digunakan berdiameter 80 cm.
- 5) Daya yang dihasilkan pada PLTMH Waru sebesar 1138.04 kW dan pada PLTMH Turi sebesar 1119.24 kW

B. Saran

Dalam perencanaan PLTMH dengan kondisi lahan kecil namun potensi tinggi dan debit besar, dapat digunakan PLTA dengan mode lain seperti dengan tower atau lainnya sehingga tidak memakan banyak lahan dan dapat memanfaatkan lebih banyak debit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pekerjaan Umum, "Standar Perencanaan Irigasi. In D. J. Air, Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan KP-04," Jakarta, 2013.
- [2] Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Direktorat Irigasi dan Rawa, "Sumber Daya Air Direktorat Irigasi dan Rawa. (2013). Standar Perencanaan Irigasi. In D. I. Rawa. Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP 02," Jakarta, 2013.
- [3] CINK-Hydro Energy, "Trashrack," *CINK Hydro Energy*, 2013. [Online]. Available: <https://cink-hydro-energy.com/id/sampah-rak-mesin-pembersih/>.
- [4] Kajian Pustaka, "Kajian Pustaka. (2016, Oktober 17). Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)," *KajianPustaka.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.kajianpustaka.com/2016/10/pembangkit-listrik-tenaga-mikro-hidro.html>.