BAB II
LANDASAN TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro merupakan salah satu jenis dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Ada 6 (enam) jenis pembangkit listrik tenaga air, yaitu piko hidro; mikro hidro; mini hidro; PLTA skala kecil; PLTA skala sedang; PLTA skala besar (Wiranto,2018). Pembangkit Listrik Tenaga Air dibedakan menjadi (Asmara,2016):

a) *Large-hydro* : lebih dari 100 MW
b) *Medium-hydro* : antara 15 – 100 MW
c) *small-hydro* : antara 1- 15 MW
d) *Mini-hydro* : daya diatas 100 kW, tetapi dibawah 1 MW
e) *Micro-hydro* : antara 5 kW – 100 Kw
f) *Pico-hydro* : daya yang dikeluarkan kurang dari 5 kW

PLTMH adalah sistem pembangkitan listrik dari tenaga air yang kecil (Davis, 2013:1 dalam skripsi Wiranto,2018). Walaupun kecil, tenaga air secara kontinu menjadi memuaskan dan hemat biaya dalam menghasilkan listrik secara terbarukan (*renewable*). Dalam hal komponen, PLTMH memerlukan turbin, dan generator. Fungsi turbin sebagai alat konversi aliran air menjadi energi mekanis, sedangkan generator berfungsi untuk menghasilkan listrik sesuai hukum elektromagnetik dengan memanfaatkan energi mekanis dari turbin (Wiranto,2018).

Secara garis besar, tidak ada perbedaan komponen yang digunakan pada PLTMH dan kategori PLTA lainnya. Seandainya terdapat perbedaan, hal ini terletak pada ukurannya. Sebagai contoh, turbin yang digunakan pada PLTMH memiliki ukaran lebih kecil ketimbang ukuran turbin pada kategori PLTA yang lebih besar.

Dalam merancang PLTMH, perlu diketahui terlebih dahulu potensi di lokasi yang dituju. Dalam menaksir potensi ini, ada 2 (dua) hal yang wajib diketahui, yakni ketinggian jatuh air dan debit air tersebut. Interaksi antara kedua hal ini tergambar lewat formulasi sebagai berikut (Wiranto,2018):

$$P = \rho \times g \times Q \times H \quad (2.1)$$

Keterangan:

P = potensi keluaran daya (W)

ρ = masa jenis air (1000 kg/m^3)

Q = debit air (m^3/s)

H = tinggi jatuh air (m)

g = gravitasi (m/s^2)

2.2 Debit Aliran

Debit aliran adalah laju aliran air (dalam bentuk volume air) yang melewati suatu penampang melintang sungai per-satuan waktu. Sistem satuan SI besaran debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per-detik (m^3/s). Dalam laporan-laporan teknis debit biasa ditunjukkan dalam bentuk hidrograf aliran. Bagi seorang hidrologis, yang mengalir pada suatu penampang basah persatuan waktu (m^3/s) atau sering disebut dengan debit (Haidi,2016).

Pengukuran suatu debit aliran seperti debit aliran sungai harus diukur dengan teliti dan dalam jangka waktu yang panjang. Untuk melakukan pengukuran tersebut ada beberapa cara antara lain (Haidi,2016):

- Kecepatan rata-rata dari aliran sungai pada suatu bagian dari penampang diukur, kemudian dikalikan dengan luas penampang pada bagian itu. Hasil perkalian luas penampang dengan kecepatan tersebut adalah debit sungai.
- Debit aliran seperti sungai diperoleh dari pengamatan tinggi permukaan air, dengan mempergunakan lengkung debit tinggi air di gardu pengukur.

Pada umum-nya cara kedua dipergunakan di gardu-gardu pengamatan. Cara lain adalah yang disebut metode sekat (*weir*) yang hanya dipakai pada, sungai sungai yang kecil. Pengukuran cara pertama dan kedua dilakukan ditempat dimana aliran sungai seragam dan tidak menyebabkan kerusakan pada stasiun pengamat tersebut.

Kapasitas PLTMH didapatkan dari nilai debit air yang dapat diandalkan, singkatnya adalah debit andalan. Debit andalan adalah debit minimum (terkecil) yang masih dimungkinkan untuk keamanan operasional suatu bangunan air. Umumnya, debit andalan adalah debit yang terjadi sebanyak 80% dari serangkaian pengukuran (Wiranto,2018).

2.3 Perancangan *Intake*

Bangunan ambil air, atau lebih dikenal dengan *intake building*, adalah fasilitas yang dipakai untuk mengambil air lansung dari sungai atau dari tempat penyimpanan (waduk) ke dalam saluran air. Mengacu pada pengertian tersebut, *intake* berperan sebagai penyalur air di bagian awal PLTMH. Air ini akan disalurkan menuju saluran penstock, setiap sistem mikrohidro mempunyai *intake*, tempat air mengalir menuju penstock dari sumber alami (Wiranto,2018).

Dalam pembangunan *intake*, seyogianya diperhatikan lokasi tempat *intake* akan dibangun. Perhatian khusus layak diberikan saat menentukan dan menganalisis tempat *intake* karena mempunyai pengaruh terhadap perkembangan proyeksi ekonomi (Department of Energy, 2009: 4-6). Perhatian diberikan kepada 8 (delapan) hal mengenai lokasi *intake*, yakni:

a. Bentuk Aliran Sungai

   Aliran sungai yang hendak dimanfaatkan untuk PLTMH sebaiknya berbentuk garis lurus dengan maksud agar aliran air lancar dan konstan debitnya.

b. Stabilitas Kelandaian Bagian Hulu

   Kelandaian saluran menuju *intake* yang tidak beraturan dapat menyebabkan terhambatnya saluran air oleh sedimen akibat erosi atau longsoran. Oleh karenanya, pertimbangan yang cukup harus diberikan stabilitas kelandaian sisi hulu sebagai bagian dari proses seleksi lokasi *intake*.

c. Penggunaan Bangunan Yang Sudah Ada

   Ketika ada fasilitas untuk irigasi atau jenis lain untuk pertanian pada tempat yang hendak dibangun saluran *intake*, tidak menjadi masalah jika di lokasi yang sama dibangun saluran *intake*, malahan hal demikian dapat mengurangi biaya.

d. Penggunaan Fitur Topografi Alami

   Pengunaan tempat yang secara alamiah berbentuk kolam untuk dijadikan saluran *intake* dapat memangkas biaya pembangunan PLTMH, dan juga menjaga lingkungan di sekitarnya, termasuk lanskap dan ekosistem pinggir sungai. Penggunaan kolam alami ini perlu disiapkan solusi terkait 2 (dua) hal, yaitu (Wiranto,2018):

1) Pemeliharaan kolam alami
2) Cara membersihkan sedimen-sedimen.

e. Volume *Intake* dan Ketinggian Air Banjir

Secara umum, lokasi *intake* yang dibuat dalam satu garis lurus dengan sungai demi mengurangi biaya konstruksi. Akan tetapi, tidak sepenuhnya pembangunan *intake* dengan cara demikian berdampak baik karena alasan ketinggian air banjir pada bagian itu dipastikan meningkat.

f. Kondisi Wilayah untuk Bak Penenang dan Saluran Pembawa

Dalam mempertimbangkan lokasi *intake*, pertimbangkan juga wilayah yang nantinya dibangun bak penenang dan saluran pembawa dengan aspek topografi dan geologi.

g. Pengurangan Keberadaan Air Sungai

Saluran *intake* yang akan dibangun harus mempertimbangkan saluran untuk pertanian, jika sudah terbuat sebelumnya. Saluran *intake* tidak boleh mempengaruhi keberadaan air sungai untuk pertanian, dalam artian tidak ada perubahan.

h. Fitur Yang Sudah Ada Pada Bagian Terpencil Sungai

Fitur yang sudah ada, seperti jalan, dan lahan pertanian di bagian lebih rendah harus diperhatikan saat menentukan lokasi *intake*. Jika ternyata *intake* mempengaruhi pada bagian tersebut, perlu perhitungan jelas mengenai aspek geografis pada bagian itu ditambah pembuatan drainase dalam rangka melindungi jalan atau lahan pertanian yang sudah ada.

Setelah memperhatikan lokasi, ada hal lain yang patut diperhatikan pada *intake*, mengingat *intake* adalah bagian rapuh dan acap kali menimbulkan masalah dalam proses pembangkitan listrik (Leyland, 2014: 13 as cited in Wiranto,2018). *Intake* perlu dipastikan menyaring bebatuan, sampah, dan sedimen-sedimen agar tidak terbawa hingga menuju turbin. Jika bebatuan atau benda lainnya tidak tersaring dan terbawa sampai ke turbin, akan terjadi kerusakan pada turbin dan penurunan keluaran daya listrik pada PLTMH.

Ukuran *intake* perlu disesuaikan dengan besaran debiat sungai yang dimanfaatkan menjadi pembangkit listrik. Untuk studi kasus kali ini, aliran air yang dimanfaatkan sebanyak 90%, sehingga ukuran saluran *intake* besarnya adalah 90%

dari ukuran kedalaman sungai dikali dengan lebar sungai. Secara jelasnya dinyatakan dalam formulasi sebagai berikut (Wiranto,2018):

Ukuran Intake = 90% x Dth x ℓ .....(2.2)

Keterangan :

Dth = kedalaman sungai (m)

ℓ = lebar sungai (m)

2.4 Bak Penenang (*Forebay*)

Bak penenang (*forebay*) terletak diujung saluran pembawa. Fungsi bak penenang secara kasar ada dua jenis (Wicaksana,2016):

a. Mengontrol perbedaan debit dalam penstock dan sebuah saluran pembawa karena fluktuasi beban.
b. Pemindahan sampah terakhir (tanah dan pasir, kayu yang mengapung, dll.)

Dalam air yang mengalir Struktur bak penenang terdiri dari bak pengendap (setting basin), saluran pelimpah (*spillway*), trashrack, dan bak penenang sendiri. Bangunan ini sering kali dikenal dengan istilah head tank sebagai reservoir air yang terletak pada sisi atas untuk aliran ke unit turbin yang terletak dibagian bawah. Beda jatuh air ini yang dikenal head. Kapasitas bak penenang didefinisikan sebagai kedalaman air dan panjang bak penenang. Untuk menentukan kapasitas dari bak penenang digunakan persamaan yaitu (Wiranto,2018):

$$L \geq \sqrt{\frac{Q}{U\ x\ 0{,}125}} \quad \text{.....(2.3)}$$

$$\ell = {}^{1}\!/_{8} \text{ x } L \quad \text{.....(2.4)}$$

$$D_{th} = \frac{L\ x\ U}{V} \quad \text{.....(2.5)}$$

Keterangan :

L = Panjang bak penenang (m)

V = Kecepatan air melewati bak penenang (m/s)

U = Kecepatan pengendapan (0.1 m/s)

Dth = Kedalaman bak penenang (m)

Q = Debit air (m^3/s)

ℓ = Lebar bak penenang (m)

Mengacu pada rangkaian formulasi (2.3), (2.4), dan (2.5) dapat diketahui ukuran bak penenang (panjang, lebar, dan kedalaman) dipengaruhi oleh kecepatan air yang melewati bak penenang, kecepatan pengendapan, dan debit air. Perlu diketahui bahwa lebar bak penenang ini tidak boleh lebih dari 1/8 panjang bak penenang (Wiranto,2018).

2.5 Pipa Pesat

Pipa pesat (*penstcok*) adalah salah satu bagian pada pembangkit listrik bertenaga air yang berfungsi untuk mengalirkan air dari bendung atau bendungan atau juga bisa dari bak penenang (*forebay tank*) menuju tempat pembangkit untuk digunnakan sebagai energi pemutar turbin. Penggunaan pipa pesat harus memeperhatikan beberapa aspek yaitu sebagai berikut (Haidi,2016):

a. Material, dimana yang sering digunnakan adalah material baja, besi ataupun paralon (PVC) yang mampu menahan tekanan tinggi dari air.
b. Diameter dari pipa pesat, dimana nilai tersebut ditentukan dari debit aliran air yang akan mengalir kedalam pipa pesat agar tingkat rugi-rugi yang disebakan oleh pipa pesat terhadap energi pada debit air bisa ditekan seminimal mungkin (Haidi,2016).

Dalam formulasi diameter pipa *penstock*, Perhitungan diameter pipa berdasarkan persamaan Gordon-Penman, berikut ini (Mahendra, dkk, 2013).

$$D = 0{,}72\ (Q^{0,5}) \qquad \text{.....(2.6)}$$

Dimana:

D = diameter pipa pesat (m)

Q = debit aliran(m^3/s)

2.6 Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran fluida yang mengalir di dalam pipa dapat di klasifikasikan ke dalam dua tipe aliran yaitu “laminar” dan “turbulen”. Aliran dikatakan laminar jika partikel-partikel fluida yang bergerak mengikuti garis lurus yang sejajar pipa dan bergerak dengan kecepatan sama. Aliran dikatakan turbulen jika tiap partikel fluida bergerak mengikuti lintasan sembarang di sepanjang pipa dan hanya gerakan rata-ratanya saja yang mengikuti sumbu pipa.

Dari hasil eksperimen diperoleh bahwa gesekan untuk pipa silindris merupakan fungsi dari bilangan Reynold (Re). dalam menganalisia aliran didalam saluran tertutup, sangatlah penting untuk mengetahui tipe aliran yang meengalir dalam pipa tersebut. Untuk itu harus dihitung besarnya bilangan Reynold dengan mengetahui parameter-parameter yang diketahui besarnya. Besarnya Reynold (Re) menurut Gupta S.Ram, 1989 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7 berikut (as cited in Aqfa, 2011):

$$Re = \frac{Dv}{\mu} \qquad \text{.....(2.7)}$$

Dimana :

μ = viskositas dinamik 20 °C = l,02xl0-6 m^2/s

D = diameter dalam pipa (m)

v = kecepatan aliran dalam fluida (m/s)

Re = Reynold number

Aliran akan laminar jika bilangan Reynold kurang dari 2000 dan akan turbulen jika bilangan Reynold lebih besar dari 4000. Jika bilangan Reynold terletak antara 2000-4000 maka aliran disebut aliran transisi.

2.7 Kehilangan Tinggi Tekanan (Head Losses)

2.7.1 Kehilangan Tinggi Tekanan Mayor (Mayor Losses)

Aliran fluida yang melalui pipa akan selalu mengalami kerugian head. Hal ini disebabkan oleh gesekan yang terjadi antara fluida dengan dinding pipa atau perubahan kecepatan yang dialami oleh aliran fluida (kerugian kecil). Kerugian *head* akibat gesekan dapat dihitung dengan menggunakan salah satu dari dua rumus berikut, yaitu (Aqfa, 2011):

Menurut Ram Gupta S, 1989. Persamaan Darcy-Weisbach (1845) (as cited in Aqfa, 2011) adalah formula umum yang banyak diaplikasikan dialiran pipa. Aliran fluida yang mengalir melalui pipa akan selalu mengalami kerugian *head*. Hal ini disebabkan oleh gesekan yang terjadi antara fluida dengan dinding pipa. Persamaan Darcy-Weisbach adalah sebagai berikut:

$$hf = f.\frac{L.V^2}{D.2g} \qquad \text{.....(2.8)}$$

Dimana:

hf = kerugian head karena gesekan (m)

f = faktor gesekan (diperoleh dari diagram Moody)

D = diameter pipa (m)

L = panjang pipa (m)

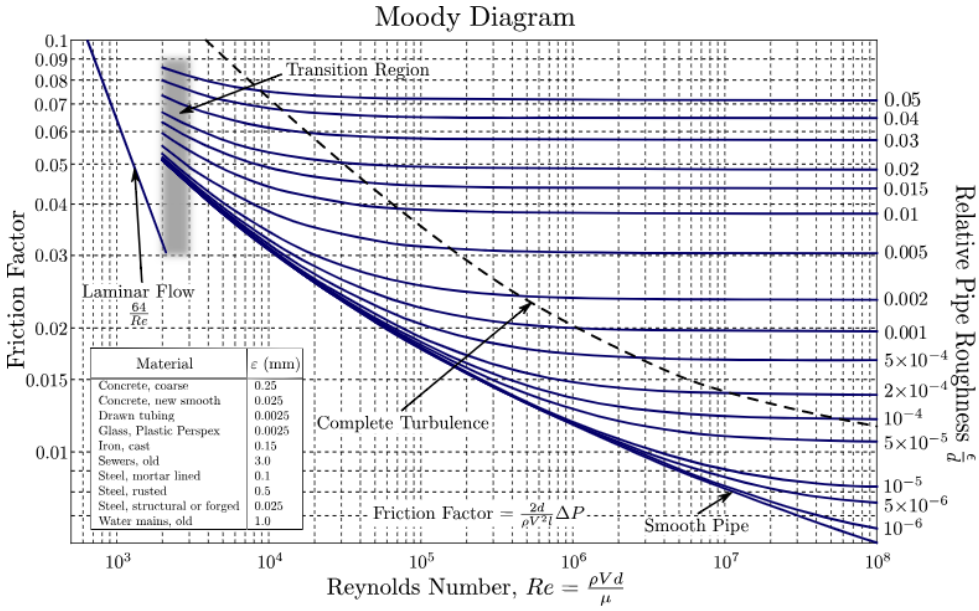
v = kecepatan aliran fluida dalam pipa (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Dimana faktor gesekan (f) dapat dicari dengan menggunakan diagram Moody (Gambar 2.1). Moody(1944) menyediakan diagram untuk mendapatkan faktor gesekan dengan menggunakan bilangan Reynold dan kekasaran relatif. Untuk mengaplikasikan diagram Moody, kecepatan aliran dan diameter pipa harus diketahui maka bilangan reynold dapat diketahui. Kemudian tarik garis vertikal sampai batas garis kekasaran relatif (ε/D) sehingga didapatkan koefisien kekasaran(*f*).

Menurut Hagen-Poiseuille untuk aliran laminar (Re<2000), faktor gesekan adalah hanya fungsi bilangan Reynolds saja. Seperti terlihat pada persamaan 2.10 berikut:

$$f = \frac{64}{Re} \qquad \text{.....(2.9)}$$



Gambar 2.1 Diagram moody (Munson, etc, 2016)

Nilai kekasaran untuk beberapa jenis pipa dapat disajikan pada tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 : Nilai kekerasan dinding untuk berbagai pipa komersil

Bahan	**Kekasaran (ε)**	
	Mm	**Ft**
Brass	0.015	0.000005
Concrete		
-Steel forms, smooth	0.18	0.0006
-Good joints, average	0.36	0.0012
-Rough, visible form mark	0.6	0.002
Copper	0.0015	0.000005
Corrugated metal (CMP)	45	0.15
Iron		
-Asphalted lined	0.12	0.0004
-Cast	0.26	0.00085
-Ductile; DIP-Cement mortar lined	0.12	0.0004
-Galvanized	0.15	0.0005
-Wrought	0.045	0.00015
Polyvinyl chloride (PVC)	0.0015	0.000005
Polyethylene,high density (HDPE)	0.0015	0.000005
Steel		
-Enamel coated	0.0048	0.000016
-Riveted	0.9 ~ 9.0	0.003-0.03
-Seamless	0.004	0.000013
-Commercial	0.045	0.00015

Sumber: Robert J.Houghtalen, Ned H. C. Hwang, A. Osman Akan. "Fundamental of Hydraulic Engineering Systems Fourth Edition". Pearson. New Jersey. 2010. Hal. 83 (as cited in Aqfa,2011).

2.7.2 Perhitungan Minor Losses

a. Kehilangan Energi Pada Saringan

Kehilangan energi pada saringan sangat tergantung pada bentuk dan sudut kemiringan saringan-saringan itu sendiri. Dihitung dengan

menggunakan persamaan menurut, O. Krischmer, (as cited in Patty,1995, Hal:40):

$$\Delta h_r = \varphi[\frac{s}{b}]^{4/3} \frac{v^2}{2.g} \sin \alpha \quad .....(2.10)$$

Dimana :

Δh_r= kehilangan energi pada saringan (m)

Φ= koefisien kehilangan energi karena bentuk kisi

s = tebal kisi (0,006 m) ditentukan berdasarkan kondisi di lapangan

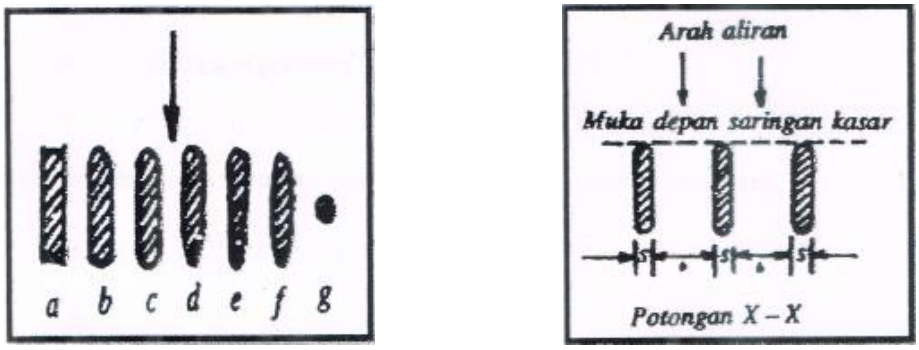
b = jarak kisi (0,03 m) ditentukan berdasarkan kondisi di lapangan

α = sudut pemasangan thrasrack

v = kecepatana aliran dalam pipa pesat (m/det)

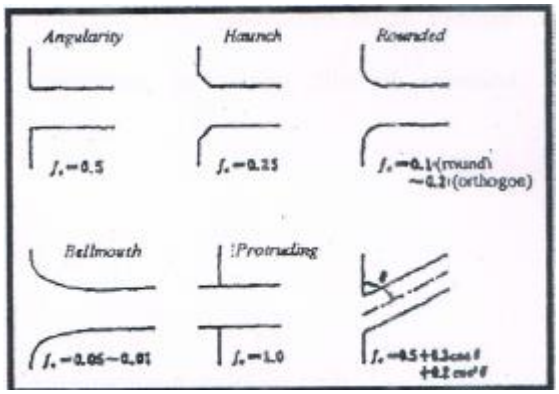
Tabel 2.2 Besaran Kehilangan Energi Pada Saringan Kasar *(Trashrack)*

Profil	A	B	C	D	E	F	G
Φ	2,42	1,83	1,67	1,03	0,92	0,76	1,76



Gambar 2.2 Bentuk Serta Jenis Saringan Kasar *(Trashrack)* (Patty, 1995)

b. Kehilangan Energi Pada Sisi Masuk Pipa Pesat/Penstock



Gambar 2.3 Bentuk dan koefisien gesekan sisi masuk Penstock

Sumber: (Patty, 1995)

Bentuk sisi masuk pada pipa pesat sangat menentukan besarnya koefisien kehilangan energi (*f*), untuk menentukan agar koefisien kehilangan energi sekecil mungkin, pada perencanaan ini digunakan sisi masuk bentuk *bellmouth* dengan K = 0,05 selanjutnya besarnya kerugian minor akibat adanya kelengkapan pipa dirumuskan sebagai berikut (Aqfa, 2011):

$$Hm = \Sigma\, k \frac{V^2}{2g} \qquad \text{.....(2.11)}$$

dimana:

Hm	= kehilangan energi pada sisi masuk penstock (m)
K	= koefisien entransce losses
g	= percepatan grafitasi (9,81 m/s^2)
v	= kecepatan aliran air dalam pipa pesat (m/s)

Untuk pipa yang panjang (L/d >>> 1000), minor losses dapat diabaikan tanpa kesalahan yang cukup berarti tetapi menjadi penting pada pipa yang pendek.

2.8 Tinggi Jatuh Efektif

Tinggi jatuh efektif didapatkan dengan mengurangi tinggi jatuh total (yaitu tinggi dari permukaan air pada pengambilan sampai permukaan air saluran bawah) dengan kehilangan tinggi pada saluran air. Tinggi jatuh penuh (*full head*) adalah tingggi air yang bekerja efektif pada turbin yang sedang berjalan.

Untuk jenis saluran air, bila diketahui permukaan air pada bangunan pengambilan dan pada saluran bawah serta debit air, maka tinggi jatuh efektif kemudian dapat ditentukan dengan dasar pertimbangan ekonomis. Misal-nya bila kehilangan tinggi jatuh air dapat dikurangi dengan memperbesar penampang pada saluran air atau memperkecil kemiringannya, maka tinggi jatuh dapat dimanfaatkan dengan efektif.

Dalam hal ini biaya akan bertambah besar, sedang dalam hal sebaliknya, biaya lebih kecil, tetapi kehilangan tenaga menjadi lebih besar. Oleh karena itu, kemiringan saluran air, luas penampang melintangnya dan luas penampang pipa pesat harus dibandingkan dengan biaya konstruksinya. Dengan demikian tinggi jatuh efektif ditentukan berdasarkan atas biaya konstruksi yang paling ekonomis.

Lalu ada beberapa hal yang perlu diperhatikan ketika naik turunnya air sangatlah besar, yaitu sebagai berikut (Haidi,2016):

- Tinggi jatuh normal

  Ini adalah tinggi jatuh efektif yang dipakai sebagai dasar untuk menentukan tenaga yang dihasilkan atau efisiensi maksimal pada tinggi jatuh ini. Tinggi jatuh normal dipilih dengan cara coba-coba, sehingga tenaga yang dihasilkan setahun mencapai maksimum atas dasar lengkung operasi dari bendung atau bendungan.

- Perubahan Tinggi jatuh

  Kapasitas efektif, naik turunnya permukaan air bendung atau bendungan ditentukan berdasarkan atas daya puncak yang dihasilkan dan lamanya hal ini berlangsung, hal ini disesuaikan dengan hubungan antara penyediaan dan kebutuhan tenaga, rencana penyediaan tenaga pada musim kemarau, pemananfaatan air banjir, dan lain-lain. Jika variasi dari tinggi jatuh menjadi terlalu besar, maka karakteristik turbin akan menjadi tidak menguntungkan. Oleh karena itu harus diperhatikan hal-hal tersebut terdahulu dalam menetukan naik-turunnya permukaan air pada bendung atau bendugan.

Untuk menghitung head efektif ini digunakan persamaan sebagai berikut (Mahendra, dkk, 2013):

$$H_{effektif} = H_{tersedia} - h_{loss} \qquad \text{.....(2.12)}$$

2.9 Turbin Air

Turbin air adalah salah satu komponen yang sangat penting pada sistem pembangkit listrik bertenaga air. Turbin air berfungsi mengubah energi fluida (energi potensial dan energi kinetis air) pada aliran air menjadi energi mekanis untuk memutar rotor (kincir), oleh karena itu turbin air termasuk kedalam kelompok mesin-mesin fluida.

2.9.1 Jenis-jenis Turbin Air

Turbin air memiliki berbagai jenis yang dikelompokan berdasarkan cara kerja turbin air tersebut merubah energi fluida (energi potensial dan energi kinetis air) pada air menjadi energi mekanis, dimana sebagai berikut (Haidi,2016):

A. Tubin Impuls

Turbin Impuls adalah salah satu pengelompokan jenis turbin yang memiliki cara kerja merubah seluruh energi pada air menjadi energi kinetis untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi mekanis. Pada kelompok turbin ini rotor (*runner*) akan bekerja dengan pengaruh aliran air dengan memanfaatkan perbedaan tinggi pada aliran air yang akan dirubah menjadi kecepatan. Pada kelompok tubin impuls ini tidak ada perubahan tekanan sepanjang rotor (*runner*) saat air masuk dan keluar dari turbin. Berikut contoh dari kelompok turbin impuls :

1 Turbin Pelton

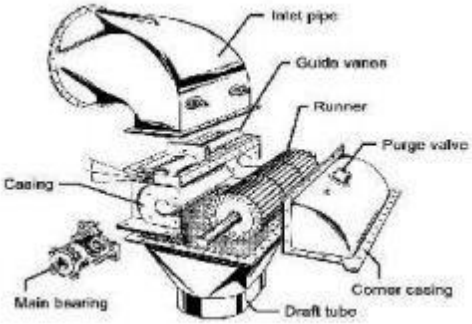
Turbin Pelton pertama kali diperkenalkan oleh Lester Allen Pelton. Cara kerja dari turbin ini, yaitu bagian mulut-mulut pancaran (*nozzles*) akan mengeluarkan air, kemudian air tersebut akan memukul ember-ember (*buckets*) yang terdapat pada sekeliling roda putar (*runner),* sehingga *runner* dapat berputar.

Gambar 2.4 Turbin Pelton

Turbin Pelton sendiri biasa dipakai untuk tinggi terjun (*head*) yang tinggi, menjadikan turbin tersebut sangat cocok dan efisiensi untuk digunnakan.

2 Turbin Crossflow

Turbin ini ditemukan oleh Michell-Banki. Prinsip kerja dari turbin ini, yaitu aliran air mengalir masuk pada inlet adapter yang ada kemudian akan diatur banyak aliran yang masuk oleh *guide vane* (distributor). Aliran air sendiri masuk dari atas sudu jalan (*blades*) dan mendorong sudu jalan bergerak sehingga air turun dan kembali mendorong sudu bagian bawah dan turbin akan berputar.



Gambar 2.5 Turbin Crossflow

Turbin ini biasa dipakai untuk tinggi terjun (*head*) yang tinggi, lebih tinggi dari turbin kaplan dimana batas tinggi terjun sampai pada batas tinggi terjun mengah dari turbin Francis.

B. Turbin Reaksi

Turbin reaksi adalah jenis pengelompokan turbin selain pengelompokan turbin impuls yang memiliki cara kerja dengan merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi mekanis. Pada turbin kelompok ini, perubahan energi potensial menjadi energi kinetis berlangsung pada guide dan pada rotor atau roda putar (*runner*), hal tersebut menyebabkan penurunan tekanan (*pressure drop*) ketika air melewati *runner*. Berikut contoh dari kelompok turbin reaksi (Haidi,2016):

1 Turbin Kaplan

Turbin Kaplan (*Propeler*) ditemukan oleh Viktor Kaplan adalah salah satu jenis turbin yang termasuk dalam kelompok turbin reaksi memiliki aliran aksial. Turbin ini tersusun seperti *propeller* pada perahu. *Propeller* tersebut biasa mempunyai tiga hingga enam sudu.

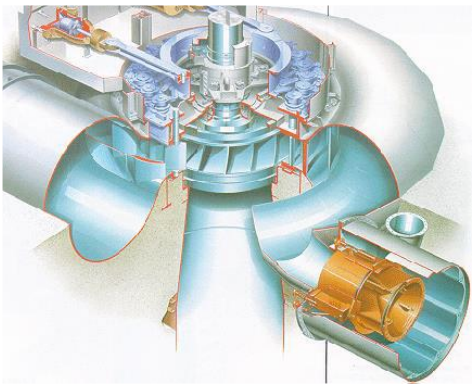
Gambar 2.6 Turbin Kaplan

Turbin Kaplan biasa digunnakan untuk tinggi terjun yang rendah. Kontruksi sudu bilah rotor dari turbin Kaplan sendiri dibagi menjadi dua, yaitu kontruksi sudu bilah rotor tetap dan kontruksi sudu bilah rotor yang dapat digerakkan secara otomatsi dengan bantuan sistem hidrolik. Kegunaan dari kontruksi tersebut adalah

aga turbin dapat bekerja dengan daya guna (*efficiency*) yang tinggi ketika beroprasi.

2 Turbin Francis

Tubin Francis yang ditemukan oleh James B. Francis, termasuk jenis kelompok turbin reaksi selain turbin kaplan. Turbin ini biasa dipasang diantara sumber air dengan tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluaran. Turbin Francis sendiri mempunyai sudu pengarah air masuk secara tangensial. Sudu pengarah ini dapat beupa sudu pengarah yang tetap maupun yang dapat diatur sama dengan sudu bilah rotor pada turbin Kaplan.



Gambar 2.7 Turbin Francis

Turbin Francis sendiri dipakai pada daerah atau lokasi dengan tinggi terjun menengah (*medium head*). Rumah siput (*scroll case*) pada turbin Francis dibuat dari plat baja, baja cor atau baja besi cor, disesuaikan dengan tinggi terjun dan kapasitasnya dan bertugas menahan bagian terbesar dari beban tekanan hidrolik yang diterima oleh turbin. Tekanan selebihnya ditahan oleh sudu kukuh (*stay vane*) atau cincin kukuh (*stay ring*). Sudu-sudu antar (*guide vane*) diatur disekeliling luar rotor (*runner*) dan mengatur daya-keluar (*output*) turbin dengan mengubah-ubah bukaannya sesuai dengan perubahan beban, melalui suatu mekanisme pengatur.

2.9.2 Kriteria Pemilihan Jenis Turbin Air

Pemilihan jenis turbin dapat ditentukan berdasarkan kelebihan dan kekurangan dari jenis-jenis turbin, khususnya untuk suatu desain yang sangat spesifik. Pada tahap awal, pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan parameter-parameter khusus yang mempengaruhi sistem operasi turbin, yaitu (Kurniawati,2017):

A. Faktor tinggi jatuhan air efektif (*Net Head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin merupakan faktor utama yang mempengaruhi pemilihan jenis turbin, sebagai contoh : turbin pelton efektif untuk operasi pada head tinggi, sementara turbin proppeller sangat efektif beroperasi pada head rendah.
B. Faktor daya (*Power*) yang diinginkan berkaitan dengan head dan debit yang tersedia.
C. Kecepatan (*Putaran*) turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Seabagi contoh untuk sistem transmisi direct couple antara generator dengan turbin pada head rendah, sebuah turbin reaksi (*propeller*) dapat mencapai putaran yang diinginkan, sementara turbin pelton dan crossflow berputar sangat lambat (*low speed*) yang akan menyebabkan sistem tidak beroperasi.

Ketiga faktor di atas seringkali diekspresikan sebagai ”kecepatan spesifik, Ns”, yang didefenisikan dengan formula (Pratilastiarso,2012):

$$N_s = \frac{N\sqrt{Pt}}{H^{\frac{5}{4}}} \qquad \text{.....(2.13)}$$

Dimana:

N_s = Kecepatan spesifik (1/menit)

N = Putaran turbin

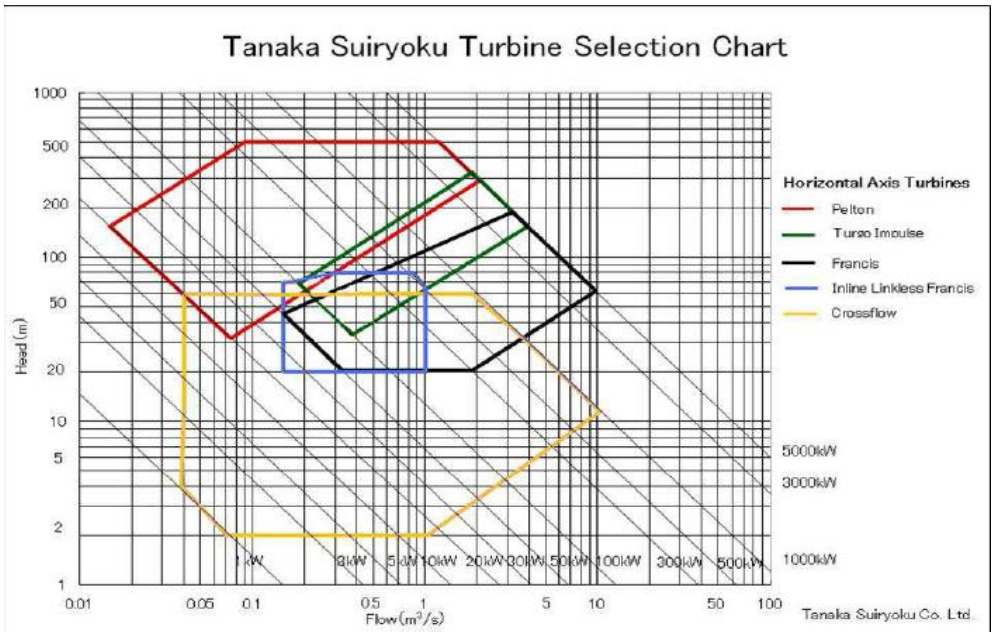
Pt = Daya keluaran turbin

H = Tinggi air jatuh, m

Kecepatan spesifik setiap turbin memiliki kisaran (*range*) tertentu berdasarkan data eksperimen. Kisaran kecepatan spesifik beberapa turbin air adalah sebagai berikut :

1	Turin Pelton.	12 ≤ Ns 25
2	Turbin Francis	60 ≤ Ns 300
3	Turbin Crossflow	40 ≤ Ns 200
4	Turbin Propeller	250 ≤ Ns 1000

Dalam pemilihan turbin air dapat dilakukan dengan menggunakkan grafik antara debit aliran air dan tinggi terjun (*head*) sebagai berikut (Pratilastiarso,2012):



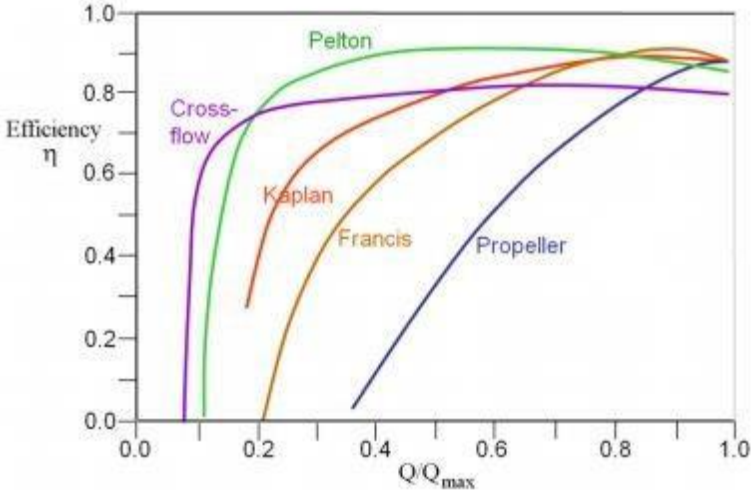
Gambar 2.8 Grafik pemilihan jenis turbin

2.9.3 Nilai Efisiensi Turbin Air

Masing-masing jenis turbin memiliki kurva efisiensi yang berbeda tergantung dari jumlah debit aliran yang ada. Sebuah turbin biasa-nya didesain untuk beroperasi di dekat titik efisiensi terbaiknya (*best operating point*) yaitu terletak pada laju aliran air (debit) yang memiliki nilai efisiensi sebesar 80 %.

Jika turbin beroperasi pada debit aliran yang lebih rendah atau lebih tinggi dari titik efisiensi terbaik-nya maka nilai efisiensi turbin tersebut akan turun. Hal tersebut bisa berdampak kepada jumlah nilai daya yang dihasilkan suatu pembangkit tenaga air.

Dalam mencari nilai efisiensi turbin air dapat dilakukan dengan menggunakkan grafik nilai efisiensi turbin berikut.



Gambar 2.9 Grafik nilai efisiensi turbin

Dimana:

Q = Debit air yang digunakan (m^3/s)

Qmax = Debit air maksimum di daerah tersebut (m^3/s)

η = Efisiensi maksimum (%, tetapi sebuah desimal digunakan dalam perhitungan)(Kurniawati,2017):

η = 82 % untuk Turbin Pelton

η = 84 % untuk Turbin Francis

η = 77 % untuk Turbin *Crossflow* *

η = 84 % untuk Turbin Tubular S-type

Kurva efisiensi turbin tersebut menunjukkan hubungan antara nilai efisiensi yang dimiliki oleh sebuah turbin dengan dengan nilai debit aliran yang digunakan berbanding dengan nilai debit aliran maksimum.

2.9.4 Daya Turbin

Daya turbin adalah daya yang dihasilkan oleh poros turbin setelah dikurangi kerugian-kerugian, daya turbin dapat ditulis sebagai berikut (Fritz Dietzel,1993; hal: 2):

$$P = Q.\ \rho\ .\ g.\ H_{ef}.\ \eta_t \qquad \text{.....(2.14)}$$

Dimana:

P = Daya turbin, Kw

Q = kapasitas air, m^3/dt

ρ = berat jenis air, 1000 kg/m^3

g = gaya gravitasi, 9,81 m/dt^2

H_{ef} = ketinggian air jatuh efektif, m

η_t = efisiensi turbin cross flow 79% atau 0,79

2.9.5 Perhitungan Diameter Turbin

a. Diameter luar turbin (D_1) dan Lebar sudu turbin

Diameter luar dan lebar sudu turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Pratilastiarso,2012):

$$LD = \frac{2{,}627\ Q}{\sqrt{H}} \quad \text{.....(2.15)}$$

b. Diameter dalam turbin (D_2)

$$D_2 = \frac{2}{3} D \quad \text{.....(2.16)}$$

2.9.6 Perhitungan Kecepatan Runner Turbin dan Kecepatan Spesifik

a. Kecepatan maksimal runner turbin (N) (Pratilastiarso,2012):

$$N = \frac{39{,}81\ \sqrt{H}}{D} \quad \text{.....(2.17)}$$

b. Kecepatan Spesifik (Ns)

$$N_s = \frac{N\ \sqrt{Pt}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad \text{.....(2.18)}$$

2.9.7 Ketebalan Semburan / Lebar Nozzle

$$s = 0{,}22\ \frac{Q}{L\ \sqrt{H}} \quad \text{.....(2.19)}$$

2.9.8 Perancangan Sudu Turbin

a. Jarak Antar sudu (t) (Pratilastiarso,2012):

$$t = 0{,}174\ D \quad \text{.....(2.20)}$$

b. Jari-jari kelengkungan sudu

$$\rho = 0{,}163D \quad \text{.....(2.21)}$$

c. Jumlah sudu

$$n = \frac{\pi D}{t} \qquad \text{.....(2.22)}$$

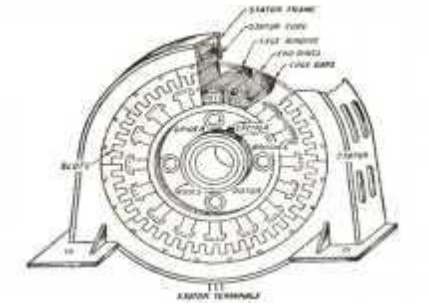
2.10 Generator AC Tiga Fasa

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (alternator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis di peroleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula *(prime mover)*, sedangkan energi listrik di peroleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya (Eugene C. Luster 1993 : 78 as cited in Asmara,2016).

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang di putar dengan penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut.

Generator sinkron sering kita jumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya, pada PLTA, PLTU, PLTD dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, kita mengenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut Generator Set atau generator cadangan. Generator sinkron mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator.

Pada Gambar 2.12 dapat dilihat bentuk penampang sederhana dari sebuah generator sinkron.



Gambar 2.10 Konstruksi Generator Sinkron

Besarnya kapasitas yang digunakan bergantung pada besarnya keluaran listrik yang dihasilkan PLTMH bersangkutan, dan daya keluar dari turbin. Pertama-tama, kita perlu mengetahui daya keluar dari turbin melalui formulasi sebagai berikut (Wiranto, 2018):

$$Pt = Q.\ \rho\ .\ g.\ H_{ef}.\ \eta_t \qquad \text{.....(2.23)}$$

Keterangan :

Pt = daya keluar dari turbin (kW)

ρ = masa jenis air (1000 kg/m^3)

g = gravitasi (m/s^2)

H_{ef} = tinggi jatuh air effektif (m)

Q = debit air (m^3/s)

η_t = efisiensi turbin

Setelah mengetahui daya yang keluar dari turbin, kemudian perlu diketahui keluaran listrik dari PLTMH bersangkutan. Besarnya keluaran listrik ini ditentukan melalui formulasi sebagai berikut (Febriansyah,2013):

$$P_g = \eta g \text{ x } Pt \qquad \text{.....(2.24)}$$

Keterangan :

P_g = daya listrik yang keluar dari generator (kW)

η_g = efisiensi generator (90%)

Ketika data besarnya daya keluar dari turbin, dan keluaran listrik dari PLTMH bersangkutan diperoleh, dapatlah kemudian ditentukan kapasitas generator yang hendak dipilih. Memperimbangkan keawetan dari generator, maka kapaistas generator harus lebih besar, paling tidak 20%, dari pembangkitan listrik yang

dilakukan. Oleh karenanya, nilai kapasitas generator didapat melalui rumus sebagai berikut (Febriansyah,2013):

$P_{g\ terpasang} = (P_{gen\ out})+(P_{gen\ out}\ x\ 20\%)$ .....(2.25)

2.11 *Pulley*

Menurut Mott dalam buku *Machine Element in Mechanical Design* (Mott, 2004: 265 dalam skripsi Wiranto,2018), *pulley* merukapan bagian dari penggerak sabuk (*belt drives*). *Pulley* merupakan komponen mekanik berbentuk bulat sebanyak dua buah yang terhubung melalui sebuah sabuk demi menghubungkan motor atau sumber gerakan dengan beban. Keterhubungan sumber gerakan dengan beban bertujuan mengirimkan gerekan dengan nilai torsi tertentu.

Terdapat dua jenis fungsi *pulley* dalam menghubungkan sumber gerakan dengan beban. Fungsi pertama ialah menurunkan kecepatan putar namun meningkatkan nilai torsi. Perlu diketahui sebelumnya bahwa semakin cepat sebuah motor berputar, maka ia memiliki nilai torsi yang semakin kecil sehingga nilai torsi yang kecil ini belum tentu memadai untuk menggerakan beban. Demi terpenuhinya nilai torsi untuk menggerakan beban, *pulley* memainkan peran untuk menurunkan kecepatan putar dari sumber gerakan dengan tujian nilai torsinya meningkat sesuai dengan karakteristik beban.

Fungsi kedua dari *pulley* adalah menurunkan nilai torsi namun meningkatkan kecepatan putar. Umumnya, *pulley* digunakan dengan cara ini ketika yang diperlukan adalah kecepatan putarnya karena beban lebih memerlukan kecepatan putar ketimbang torsi. Selain torsi beban rendah, umumnya penggunaan *pulley* sesuai fungsi kedua ketika sumber gerakan mempunyai nilai torsi besar sekali sehingga tidak menjadi masalah ketika nilai torsinya dikurangi demi memenuhi kebutuhan kecepatan (Wiranto,2018).

Dalam perancangan *pulley*, hal yang dirancang adalah diameternya dengan mempertimbangkan kecepatan dari masing-masing bagian. mengacu pada penelitian dari Muhammad Iswar,dkk (2016), formulasi yang digunakan untuk mengetahui besarnya diameter *pulley* yang dibutuhkan sebagai berikut (Iswar,2016):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_p}{d_p} \quad \text{.....(2.26)}$$

Dimana:

n_1 = Putaran pulli penggerak (rpm)

n_2 = Putaran pulli yang digerakkan (rpm)

d_p = Diameter pulli penggerak (m)

D_p = Diameter pulli yang menggerakkan (m)

2.12 Perhitungan Analisis Ekonomi Teknik

Pelaksanaan studi kelayakan harus membandingkan antara output dan biaya sehingga prinsip *cost effectiveness* bisa dicapai. Awal dari perencanaan finansial adalah proses penganggaran. Perencanaan itu berupa analisis biaya, analisis kemampuan bayar, analisis pendapatan. Aspek finansial meliputi aspek pembiayaan, penganggaran, pendapatan, dan biaya, penilaian dengan demikian aspek finansial.

Berdasarkan hasil pekerjaan perencanaan akan dilakukan estimasi biaya proyek dan dilakukan analisis ekonomi. Analisis tersebut meliputi analisis *Benefit cost ratio, Economic Internal Rateof return, Net Present Value* (Kurniawati,2017):

A. Analisis *Benefit Cost Ratio*

Merupakan perbandingan antara nilai *equivalen* manfaat dengan nilai *equivalen* biaya pada suatu titik yang sama. Nilai manfaat meliputi seluruh nilai tambah yang diperoleh setelah didirikannya PLTM, antara lain nilai jual listrik dan nilai produk yang didapat dari sarana kelistrikan. Biaya yang dikeluarkan dalam analisis ini mencakup biaya operasi dan pemeliharaan teknis serta manajemen. Apabila nilai BCR > 1 maka proyek dapat dijalankan, namun bila nilai BCR < 1 maka proyek harus dibatalkan atau direkayasa pendahuluan untuk pendapatkan kelayakan yang sesuai.

$$B/C_{Rasio} = \sum \frac{\frac{N}{K=0} B}{\frac{N}{K=0} C} \quad \text{.....(2.27)}$$

B. Analisis *Net Present Value*

Merupakan nilai jumlah dari keseluruhan manfaat dikurangi dengan biaya keluar pada titik yang sama, misalkan *present worth*, *future worth* atau *annual worth*. Nilai ekonomi selalu berubah-ubah untuk itu diperlukan waktu tertentu

agar dapat perbandingan, nilai manfaat dan biaya pada waktu tersebut. Bila NPV > 0 maka proyek layak untuk dijalankan, namun bila NPV < 0 maka proyek harus dibatalkan atau direkayasa pemda hukum untuk mendapatkan kelayakan yang sesuai.

$NPV = PWB - PWC$ .....(2.28)

Dengan:

NPV = net present value

PWB = present worth of benefit

PWC = present worth of cost

C. Analisis *Economic Internal Rate of Return*

Merupakan tingkat suku bunga dimana nilai sekarang dari manfaat kotor suatu kontsruksi PLTM sama dengan nilai sekarang. Bila hasil EIRR > suku bunga yang ditetapkan Bank Indonesia, maka proyek dapat dijalankan. Bila EIRR < suku bunga maka proyek harus dibatalkan atau direkayasa pendahuluan untuk pendapatkan kelayakan yang sesuai.

IRR $= (iNPV_{+}) + \left(\frac{NPV_{+}}{NPV_{+} - NPV_{-}}\right)$ x $(iNPV_{-} - iNPV_{+})$ .....(2.29)

D. *Payback period*

Analisis *payback period* pada dasarnya adalah untuk mengetahui seberapa lama durasi (periode) investasi akan dapat dikembalikan saat terjadinya kondisi pulang pokok persamaan yang digunakan adalah (Hakim, 2017):

$K_{PBP} = \frac{Investasi}{Annual\ Benefit}$ x Periode Waktu .....(2.30)

Dengan:

K_{PBP} = periode pengembalian

Investasi = jumlah biaya investasi yang dikeluarkan

Annual benefit = keuntungan per tahun (dikurangi O&P, bila ada)

Periode waktu = lama periode (1 tahun)