

BAB II

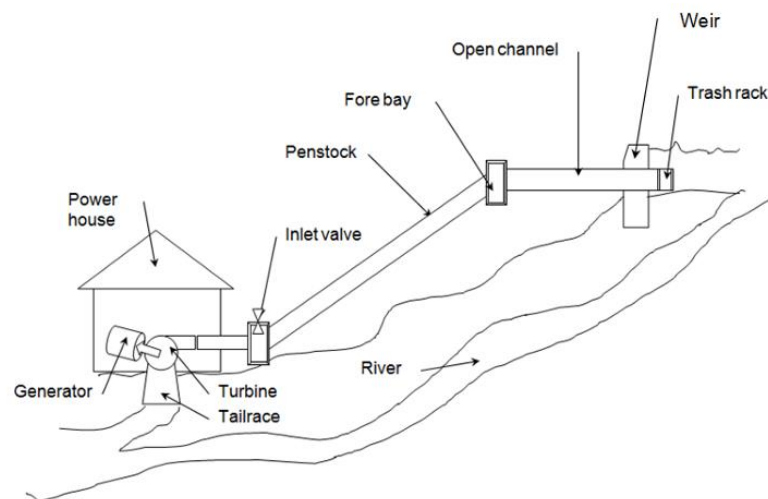
TINJAUAN PUSTAKA

Turbin Pelton adalah jenis turbin air yang digunakan pada tinggi air jatuh (*head*) yang tinggi dikarenakan jenis turbin air ini menggunakan *nozzle* sebagai pemancar semburan air dan menghasilkan energi listrik. Turbin Pelton memiliki *runner* berbentuk pelak dengan sudu yang berbentuk *bucket* di sekelilingnya (M. Riski, 2020). Energi potensial dari ketinggian fluida dirubah menjadi energi mekanik pada pipa *penstock* sistem pembangkit, kemudian dipancarkan oleh *nozzle* menuju *runner* turbin Pelton sehingga menghasilkan energi mekanik. Optimasi kinerja turbin Pelton merupakan fungsi kompleks dari berbagai parameter-parameter desain dan operasional yang saling berkaitan. Studi parametrik yang telah dilakukan (Rai and Kumar, 2019) mengungkapkan bahwa optimasi jumlah sudu dan geometrinya dapat meningkatkan efisiensi total hingga 12%, sementara dalam operasi turbin Pelton menyerap energi potensial air yang disebarkan oleh *nozzle* menjadi parameter kritis pada aspek jarak antara *nozzle* dan sudu turbin Pelton. Jarak minimum antara semburan air dengan *bucket*, yang dikenal sebagai “*nozzle-to-bucket clearance*” menjadi peran vital dalam mencegah *losses* antara semburan air dan *runner* yang berputar.

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Salah satu sumber energi alternatif yang mengalami perkembangan teknologi signifikan adalah pembangkit listrik tenaga air. Dalam konteks pengembangan pembangkit listrik tenaga air, (Yah, Oumer and Idris, 2017) mengklasifikasikan

pembangkit berdasarkan kapasitas dayanya, mulai dari skala besar yang mampu menghasilkan daya di atas 100 MW hingga *pico-hidro* dengan kapasitas maksimum 5 kW. Pembangkit listrik tenaga air ini memanfaatkan turbin sebagai pengubah energi kinetik pancaran air menjadi energi mekanik berupa putaran, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Studi kasus yang dilakukan oleh (Pratama, 2020) menjelaskan bahwa implementasi pembangkit listrik tenaga air memerlukan dua parameter utama, yaitu ketersediaan debit air yang memadai dan adanya beda ketinggian air jatuh (*head*), dimana kedua faktor ini menjadi penentu utama dalam menghitung potensi energi yang dapat dihasilkan. Faktor-faktor tersebut menjadi pertimbangan utama dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga air.

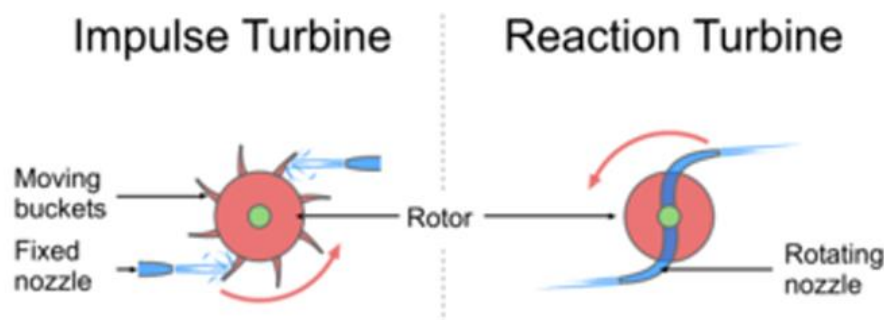


Gambar 2.1 Skema pembangkit listrik tenaga air

Sumber: (Park, 2016)

Turbin air adalah salah satu mesin penggerak dengan memanfaatkan fluida air yang menghasilkan kerja berupa putaran. Turbin memanfaatkan tekanan air untuk diubah menjadi energi mekanik berupa putaran sehingga dapat menghasilkan listrik. Contoh turbin air yang umum digunakan yaitu turbin Pelton, turbin Francis,

dan turbin Kaplan (Handayani, 2014). Turbin air dapat dibedakan menjadi 2 (dua) berdasarkan perubahan energinya yaitu turbin impuls dan turbin reaksi (Umurani, Siregar and Al-Amin, 2020). Pada turbin jenis impuls berputar dengan memanfaatkan gaya aksi air ketika mengenai *runner* turbin, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2. Energi tekanan air akan diubah menjadi energi kinetik dengan mengalirkan air pada *nozzle* sehingga kecepatannya meningkat.



Gambar 2.2 Prinsip kerja turbin impuls dan turbin reaksi
sumber: (Handayani, 2014)

2.2. Turbin Pelton

Turbin Pelton merupakan pengembangan dari turbin impuls yang ditemukan oleh S.N. Knight pada tahun 1872 dan N.J. Colena pada tahun 1873 dengan pasang mangkok-mangkok pada roda turbin (Simamora, 2012). Salah satu turbin yang memanfaatkan energi kinetik air yaitu turbin Pelton atau turbin impuls dimana turbin ini menggunakan pancaran air dari *nozzle* dan mengubahnya menjadi energi mekanik berupa putaran pada roda turbin yang tersambung dengan poros dan diteruskan alternator untuk menghasilkan tenaga listrik (Simbolon, Junaidi and Kurniawan, 2020). Turbin Pelton memiliki beberapa komponen diantaranya yaitu pipa *penstock*, *nozzle*, *runner*, *bucket*, dan *tailrace*.

Turbin Pelton memanfaatkan *nozzle* sebagai pengatur arah aliran untuk menggerakkan putaran sudu turbin. Putaran sudu turbin tersebut dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti jarak *nozzle*, posisi *nozzle*, diameter *nozzle*, jumlah *nozzle*, serta bentuk geometri sudu turbin. Efisiensi menjadi parameter kritis dalam evaluasi kinerja turbin Pelton pada berbagai skala. Studi eksperimental yang dilakukan (Pita and Gaonnwe, 2022) mengatakan bahwa turbin Pelton sangat efisien untuk aplikasi aliran dengan *head* tinggi, serta potensi efisiensi melebihi 75% pada saat kondisi optimal. Turbin Pelton memiliki beberapa konfigurasi penggerak poros yaitu poros vertikal dan poros horizontal.

2.2.1. Turbin Pelton Poros Vertikal

Pada turbin Pelton poros vertikal, air langsung menumbuk sudu pada setengah bagian roda turbin sedangkan setengah bagian yang lain juga mendapat tumbukan tetapi tidak sebesar setengah bagian yang pertama sehingga turbin masih bisa berputar (Pietersz, R., Soekono, R., & Wahyudi, 2013). Turbin dengan poros vertikal memerlukan luasan *powerhouse* yang lebih kecil, namun untuk pemeliharaan dan perbaikan turbin cenderung lebih sulit. Untuk menghasilkan daya turbin yang tinggi atau besar maka turbin pelton poros vertikal dilengkapi dengan jumlah *nozzle* 4 (empat) sampai 6 (enam) buah. Sedangkan untuk penggunaan pipa *penstock* dapat disesuaikan dengan kebutuhan atau tergantung pada keadaan tempat dan biaya pengadaannya.

2.2.2. Turbin Pelton Poros Horizontal

Penggunaan turbin Pelton poros horizontal biasanya digunakan untuk memanfaatkan energi pada muka air yang tinggi. Turbin Pelton poros horizontal memiliki ukuran lebih kecil. Turbin dengan poros horizontal lebih mudah dalam pemeliharaan dan perbaikan, namun memerlukan luasan *powerhouse* yang lebih besar (Handayani, 2014). Kekuatan putaran pada *runner* dapat ditingkatkan dengan menggunakan lebih dari 1 (satu) *nozzle*. Susunan 2 (dua) *nozzle* umum digunakan untuk turbin Pelton konfigurasi poros horizontal. Terkadang 2 (dua) *runner* terpisah dipasang pada satu poros yang menggerakkan satu generator listrik.

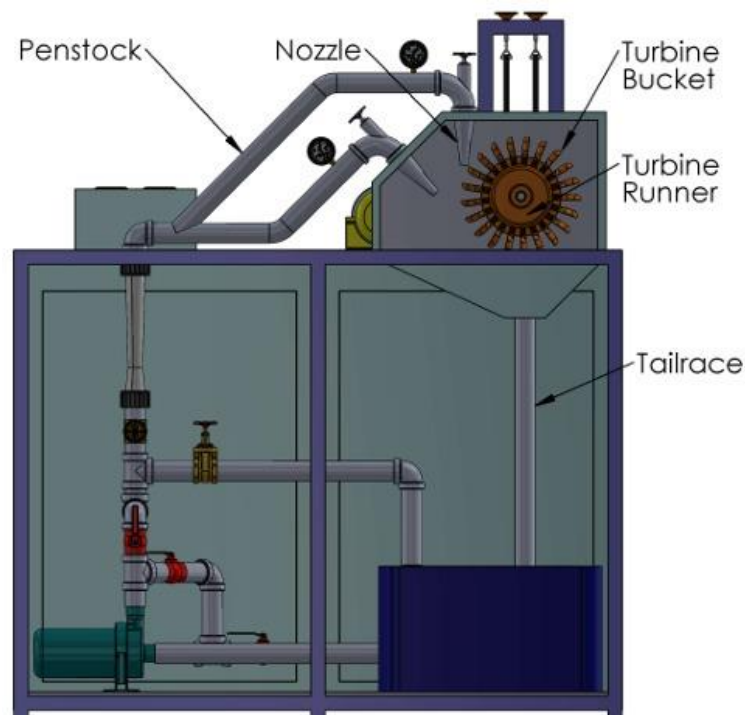
2.3. Test Bed

Test bed adalah suatu alat yang berisi perangkat keras, instrumentasi, simulator, perangkat lunak, dan elemen pendukung lain yang diperlukan untuk melakukan pengujian (IEEE, 1990). *Test bed* digunakan sebagai bukti konsep apabila sebuah modul baru diuji, atau sebuah pengembangan dari suatu sistem, dalam hal ini *test bed* juga disebut sebagai alat uji.

2.4. Rancang Bangun Test Bed Turbin Pelton

Rancang bangun *test bed* turbin Pelton merupakan perencanaan dan penggambaran sarana pengujian, percobaan, dan analisis terkait turbin air. Dalam rancang bangun *test bed* turbin Pelton diperlukan berbagai data untuk mendapatkan hasil *test bed* yang optimal dan dapat berfungsi dengan baik. Rancang bangun *test bed* turbin Pelton dibuat agar dapat bermanfaat sebagai alat uji dalam pembelajaran

ilmu konversi energi atau turbin Pelton itu sendiri. Prototipe ini merupakan alat media yang prinsip kerjanya merupakan gambaran dari sistem PLTMH turbin Pelton (Asrori, Adikusuma and Yudiyanto, 2022). Untuk desain turbin Pelton, *head* pada sisi tekanan dan laju aliran merupakan dua parameter mendasar. Parameter tersebut menentukan pasokan daya hidrolik yang tersedia dan menjadi parameter untuk menentukan ukuran turbin. Desain turbin Pelton dimulai dengan menentukan dimensi, pemilihan kecepatan putar, dan penentuan jumlah *nozzle* (Zhang, 2016).



Gambar 2.3 Skema *test bed* turbin Pelton

Pada Gambar 2.3 menunjukkan skema *test bed* turbin Pelton yang terdiri dari beberapa komponen utama. Aliran air dimulai dari reservoir yang dipompa menuju pipa penyalur (*penstock*) dengan ketinggian air jatuh (H) tertentu untuk menciptakan tekanan yang dibutuhkan. Air kemudian mengalir melalui *nozzle* yang berfungsi mempercepat aliran dan mengarahkannya ke *bucket* pada *runner* turbin

Pelton. *Bucket* pada *runner* menangkap energi kinetik air dan mengubahnya menjadi energi mekanik untuk memutar turbin. Setelah melewati turbin, air dibuang ke saluran pembuangan (*tailrace*) untuk dikembalikan ke reservoir. Sistem ini memungkinkan pengukuran parameter seperti debit, tekanan, torsi, serta keluaran listrik yang dihubungkan dengan generator guna mengevaluasi performa dan efisiensi konversi energi pada turbin Pelton.

2.5. Dasar Perhitungan Turbin Pelton

2.5.1. Kecepatan Aliran Fluida

Fluida adalah zat yang dapat bergerak ketika dikenai gaya serta dapat berubah bentuk dan bersifat tidak permanen (Jalaluddin *et al.*, 2019). Fluida mengalir dengan perantara wadah yang tertutup seperti pipa. Kecepatan aliran fluida dapat diukur berdasarkan jarak tempuh per satuan waktu. Kecepatan fluida dapat ditentukan dengan Persamaan (2.1) berikut ini (Dietzel and Sriyono, 1988).

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

Dimana :

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

Q = Debit fluida (m³/s)

A = Luas penampang fluida (m²)

2.5.2. Head Loss Pipa

Kerugian *head* pada sistem perpipaan merupakan hal yang penting untuk dilakukan perhitungan pada saat mendesain suatu lajur aliran fluida. Kerugian

head dikelompokkan menjadi 2 (dua) jenis yaitu *head loss major* dan *head loss minor* (Achour and Amara, 2019). *Head loss major* merupakan kerugian instalasi yang diakibatkan oleh panjang pipa, sedangkan untuk *head loss minor* merupakan kerugian instalasi perpipaan yang diakibatkan oleh belokan, *fiittings*, katup, dan aksesoris lainnya (Silowash, 2010). Kerugian-kerugian ini dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti bilangan *Reynold*, debit, diameter pipa, kekasaran permukaan pipa, panjang pipa, dan aksesoris yang akan dipasang pada sistem instalasi perpipaan. Bilangan *Reynold* akan menentukan jenis aliran fluida tersebut sesuai perhitungan. Bilangan *Reynold* kurang dari 2300 merupakan aliran laminar, bilangan *Reynold* antara 2300 sampai dengan 4000 merupakan aliran transisi, sedangkan bilangan *Reynold* lebih dari 4000 merupakan aliran turbulen. Berikut ini merupakan perhitungan dari kerugian instalasi pipa menggunakan Persamaan (2.2) (Silowash, 2010).

A. Bilangan *reynold*

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (2.2)$$

Dimana :

Re = Bilangan *reynold*

ρ = Massa jenis fluida/air (kg/m³)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

D_h = Diameter pipa (m)

μ = Viskositas dinamik (Kg/m-s)

B. Head Loss Major (Hazen-Williams Formula)

$$h_f = \frac{C_f \cdot L \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (2.3)$$

Dimana :

h_f = Kerugian *head* (m)

C_f = Faktor konversi unit (10,67 untuk SI)

L = Panjang instalasi pipa (m)

D = Diameter pipa (m)

C = Hazen-Williams C-faktor

C. Head Loss Belokan

$$h_f = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.4)$$

Dimana :

h_f = Kerugian *head* (m)

K = Koefisien resisten

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

D. Head Loss Minor

$$h_f = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.5)$$

Dimana :

h_f = Kerugian *head* (m)

K = Koefisien resisten

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

2.5.3. *Head* Total Instalasi

Head total instalasi harus disediakan untuk mengalirkan air menuju sistem *test bed* turbin Pelton, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Jumlah aliran air ini dapat ditentukan dan direncanakan sesuai kondisi instalasi pada *test bed* tersebut. Pembuatan desain ukuran *runner* turbin Pelton dipengaruhi oleh *head* ketersediaan dari pompa. *Head* ketersediaan diperoleh dari selisih *head* pompa dengan *head* instalasi seperti pada Persamaan (2.7). Tinggi aliran jatuh atau *head* total instalasi pompa (H_i) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3 dapat dihitung dengan Persamaan (2.6) berikut (Sularso, 2000).

$$H_i = h_a + \Delta h_p + h_l + \frac{v^2}{2g} \quad (2.6)$$

$$H = H_o - H_i \quad (2.7)$$

Dimana :

H_i = *Head* instalasi (m)

H_o = *Head nameplate* (m)

H = *Head* efektif total (m)

h_a = Head statis pompa (m)

h_a = $h_{da} - h_{sa}$ (m)

Δh_p = Perbedaan *head* tekanan yang bekerja pada kedua permukaan (m)

h_l = Kerugian *head* pada instalasi (m)

$\frac{v^2}{2g}$ = Head kecepatan keluar (m)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

d = Diameter pipa (m)

2.5.4. Head Pressure Gauge

Head pressure gauge merupakan perhitungan tinggi air jatuh (*head*) aktual yang diukur dengan menggunakan manometer. *Head pressure gauge* ini diukur dari bagian *nozzle* turbin Pelton untuk mengetahui seberapa besar *head* air yang menumbuk turbin Pelton. *Head* ini dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.9) berikut (Fahrudin and Mulyadi, 2018).

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (2.8)$$

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (2.9)$$

Dimana :

P = Tekanan manometer sisi *inlet nozzle* (N/m²)

ρ = Massa jenis fluida/air (kg/m³)

g = Gravitasi (m^3/s)

H = *Head*/tinggi air jatuh (m)

2.5.5. Perhitungan Daya Hidrolis

Daya hidrolis merupakan daya yang dihasilkan oleh air dari suatu ketinggian. Ketinggian air jatuh ini dengan mengasumsikan kondisi aliran yang tidak dapat dimampatkan serta mengabaikan gesekan melalui pipa dan *nozzle*. Dalam hal ini daya hidrolis yang dihasilkan oleh pompa dapat diperoleh dengan Persamaan (2.10) sebagai berikut (Zhang, 2016).

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.10)$$

Dimana :

P_0 = Daya hidrolis (watt)

ρ = Massa jenis fluida/air (kg/m^3)

g = Gravitasi (m^3/s)

Q = Debit aliran (m^3/s)

H = *Head*/tinggi air jatuh (m)

2.5.6. Kecepatan Putar Turbin Pelton

Dalam menentukan kecepatan putar turbin Pelton, kecepatan spesifik harus ditentukan nilainya dengan dibatasi pada $n_q < 0,13$ dan juga mempertimbangkan laju aliran serta jumlah *nozzle*, maka dapat ditulis dengan Persamaan (2.11) sebagai berikut (Zhang, 2016).

$$n = \frac{n_q \cdot H^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{\frac{Q}{Z_{jet}}}} \quad (2.11)$$

Dimana :

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

H = *Head* sistem (m)

Q = Debit aliran (m³/s)

Z_{jet} = Jumlah *nozzle*

2.5.7. Pasangan Kutub Generator

Dalam menentukan pasangan kutub dan kecepatan putar disinkronkan ke generator terdekat, maka dapat ditulis pada Persamaan (2.12) berikut (Zhang, 2016).

$$p = \frac{f}{n} \quad (2.12)$$

Dimana :

p = Jumlah pasang kutub magnet

f = Frekuensi (50 Hz)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

2.5.8. Kecepatan Sinkron Putar Turbin Pelton

Jumlah pasang kutub magnet yang dibulatkan keatas digunakan untuk menghitung ulang kecepatan putar turbin yang disinkronasikan ke generator terdekat dengan Persamaan (2.13) sebagai berikut (Zhang, 2016).

$$N = \frac{f}{p} \times 60 \quad (2.13)$$

Dimana :

N = Kecepatan sinkron putaran turbin (rpm)

p = Jumlah pasangan kutub magnet

f = Frekuensi (50 Hz)

2.5.9. Rekalkulasi Kecepatan Spesifik

Desain parameter dimulai dengan penentuan kecepatan spesifik $n_q = 0,12$. Setelah sinkronasi kecepatan rotasi, kecepatan spesifik dihitung ulang dengan Persamaan (2.14) berikut ini (Zhang, 2016).

$$n_q = n \times \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{Z_{jet}} \cdot H^{\frac{3}{4}}} \quad (2.14)$$

Dimana :

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

H = *Head* sistem (m)

Q = Debit aliran (m³/s)

$$Z_{jet} = \text{Jumlah nozzle}$$

2.5.10. Perhitungan Torsi Aktual

Jika turbin terhubung dengan generator menggunakan *belt* yang berputar maka penentuan nilai torsi optimum menjadi parameter pemilihan generator *test bed* turbin Pelton. Torsi dapat dihitung dengan Persamaan (2.15) (Khurmi and Gupta, 2005).

$$T = \Delta F \times r \quad (2.15)$$

Dimana :

$$T = \text{Torsi (Nm)}$$

$$\Delta F = \text{Gaya total (Newton)}$$

$$r = \text{Diameter pulley (m)}$$

2.5.11. Perhitungan Kecepatan Sudut Turbin

Kecepatan sudut adalah laju perubahan kecepatan sudut terhadap waktu (Tanti, Su'udi and Nugroho, 2014). Kecepatan sudut ini sering dikatakan sebagai kecepatan rotasi dan besaran skalarnya adalah laju rotasi. Di dalam satuan standar internasional kecepatan sudut ini memiliki satuan (rad/s). Kecepatan sudut ini dapat dihitung dengan Persamaan (2.16) berikut (Wicaksana and Istiqlaliyah, 2023).

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \quad (2.16)$$

Dimana :

ω = Kecepatan sudut (rad/s)

N = Putaran turbin (rpm)

2.5.12. Perhitungan Daya Turbin

Daya yang dihasilkan turbin dari torsi yang diukur menggunakan neraca newton dan dikombinasikan dengan kecepatan putar diperoleh dari *tachometer*, maka Persamaan (2.17) digunakan untuk menghitung daya turbin sebagai berikut (Khurmi and Gupta, 2005).

$$P_t = T \times \omega \quad (2.17)$$

Dimana :

P_t = Daya turbin (watt)

T = Torsi (Nm)

ω = Kecepatan sudut (rad/s)

2.5.13. Perhitungan Daya Aktual

Daya aktual merupakan hasil konversi energi dari daya turbin menjadi arus listrik yang dihasilkan oleh generator. Daya aktual ini sudah memperhitungkan faktor seperti gesekan, efisiensi mekanik, dan kehilangan energi yang terjadi di generator. Daya aktual biasanya lebih kecil dari daya teoritis karena beberapa faktor kerugian-kerugian tersebut. Berikut ini merupakan Persamaan (2.18) yang digunakan untuk mengetahui daya listrik yang dihasilkan oleh generator (A. Imran, 2024).

$$P_g = V \times I \quad (2.18)$$

Dimana :

P_g = Daya generator (watt)

V = Tegangan listrik (volt)

I = Kuat arus (ampere)

2.5.14. Perhitungan Efisiensi

Efisiensi hidrolik (η_h) merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin dengan daya hidrolik yang dimiliki oleh air pada sisi *inlet*. Perhitungan ini mengukur seberapa efisien turbin mengubah energi dari air menjadi energi mekanik berupa putaran turbin Pelton dengan Persamaan (2.19) sebagai berikut (Handayani, 2014).

$$\eta_h = \frac{P_t}{P_0} \times 100 \quad (2.19)$$

Dimana :

P_t = Daya turbin (watt)

P_0 = Daya hidrolik (watt)

η_h = Efisiensi hidrolik (%)

Efisiensi mekanis (η_m) merupakan perbandingan antara daya generator dengan daya mekanis turbin sehingga menunjukkan seberapa efektif energi mekanik yang diterima dari turbin dikonversi menjadi energi listrik. Perhitungan ini menggunakan Persamaan (2.20) sebagai berikut (Handayani, 2014).

$$\eta_m = \frac{P_g}{P_t} \times 100 \quad (2.20)$$

Dimana :

P_g = Daya generator (watt)

P_t = Daya turbin (watt)

η_m = Efisiensi mekanis (%)

Efisiensi energi (η) merupakan keseluruhan efisiensi dari perbandingan daya generator dengan daya hidrolis sehingga menunjukkan seberapa efektif energi yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Perhitungan ini menggunakan Persamaan (2.21) sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_g}{P_h} \times 100 \quad (2.21)$$

Dimana :

P_g = Daya generator (watt)

P_h = Daya hidrolis (watt)

η = Efisiensi energi (%)

2.5.15. Rasio Transmisi

Transmisi merupakan komponen yang berfungsi untuk mengatur daya *input* dan *output* dari suatu poros roda yang bergerak (Sianturi and Sutantra, 2021). Transmisi yang umum digunakan pada elemen mesin seperti *gear box*, *sprocket chain*, *pulley*, dan lain-lain. Transmisi ini memiliki perbandingan rasio untuk menaikkan dan menurunkan putaran sehingga torsi yang digerakkan oleh poros

dapat diatur sesuai perbandingan. Berikut ini merupakan Persamaan (2.22) dari perbandingan rasio kecepatan dari transmisi (Khurmi and Gupta, 2005).

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad (2.22)$$

Dimana :

N_1 = Putaran *pulley* 1 (rpm)

N_2 = Putaran *pulley* 2 (rpm)

d_1 = Diameter *pulley* 1 (m)

d_2 = Diameter *pulley* 2 (m)

2.6. Desain Dimensi Turbin Pelton

Dimensi *runner* turbin Pelton juga disesuaikan dengan kecepatan rotasi maksimum sesuai dengan generator, sehingga menghasilkan operasi yang aman dan efisien. Penentuan parameter geometris dari dimensi turbin Pelton sangatlah menentukan bagaimana momentum dialirkan ke *runner* turbin sehingga mencapai efisiensi hidrolik dan mekanis yang maksimal. Desain geometris yang tepat memastikan bahwa aliran air mengalir dengan maksimal sehingga mengurangi kehilangan energi dan memaksimalkan efisiensi sistem turbin Pelton. Berikut ini merupakan parameter-parameter dimensi yang ditentukan untuk merancang *runner* turbin Pelton.

2.6.1. Diameter *Shaft* Turbin Pelton

Dalam menentukan diameter *shaft* turbin Pelton dibutuhkan parameter daya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin Pelton. Daya turbin Pelton dirubah menjadi

torsi kemudian dapat ditentukan desain ukuran diameter *shaft* tersebut. Torsi atau momen puntir adalah ukuran kemampuan momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal (Tuwanakotta and Bernard, 2022). Besaran torsi merupakan besaran turunan yang digunakan untuk menghitung energi yang dihasilkan dari benda yang berputar terhadap poros (Sya'bani, Dantes and Wiratmaja, 2022). Berikut ini merupakan Persamaan (2.23) dan (2.24) untuk menentukan torsi serta diameter *shaft* sebagai berikut (Khurmi and Gupta, 2005).

$$T = \frac{P_0}{2\pi \times \frac{N}{60}} \quad (2.23)$$

Dimana :

T = Torsi (Nm)

P_0 = Daya hidrolis (watt)

N = Putaran turbin (rpm)

$$d = \sqrt[3]{\frac{T \times 16}{\pi \times \tau}} \quad (2.24)$$

Dimana :

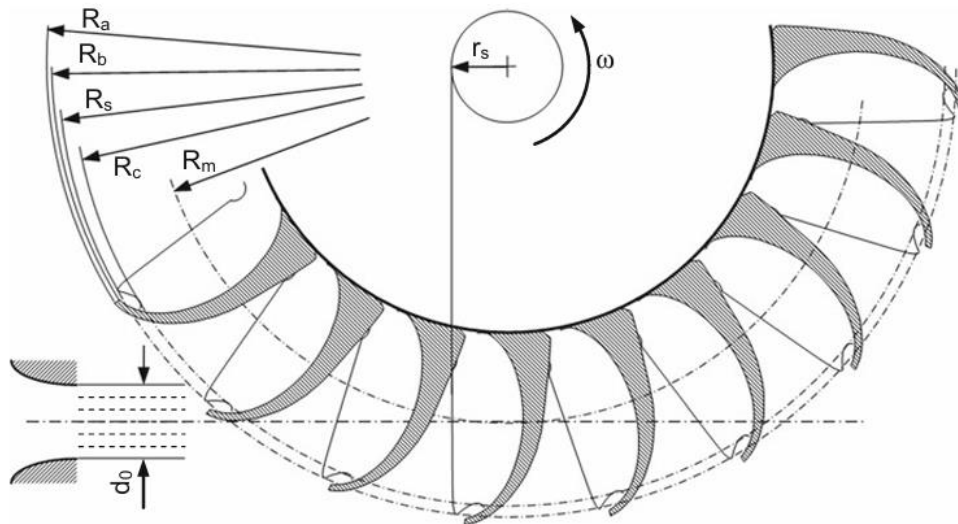
T = Torsi (N-mm)

d = Diameter *shaft* (mm)

τ = Tegangan geser ijin (N/mm²)

2.6.2. Diameter Lingkaran *Pitch*

Dalam perancangan diameter lingkaran *pitch* ini sangat menentukan berbagai parameter geometri dan operasional turbin. Diameter ini adalah diameter pada roda turbin tempat semburan air pertama kali mengenai *bucket* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4. Secara matematis, diameter ini berhubungan dengan kecepatan *peripheral* roda turbin dan efisiensi energi, diameter lingkaran *pitch* dapat ditulis dengan Persamaan (2.25) sebagai berikut (Zhang, 2016).



Gambar 2.4 Geometri *runner* turbin Pelton

$$D_m = \frac{K_m \sqrt{2gH}}{\pi \cdot n} \quad (2.25)$$

Dimana :

D_m = Diameter lingkaran *pitch* roda Pelton (m)

K_m = Koefisien kecepatan *peripheral* (0,475)

H = Head sistem (m)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

n = Kecepatan putar turbin (1/s)

2.6.3. Radius Lingkaran *Pitch*

Radius lingkaran *pitch* atau jari-jari lingkaran *pitch* merupakan bagian yang ideal sebagai tempat semburan air dari *nozzle* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Sehingga dimensi radius lingkaran *pitch* dapat diperoleh dengan membagi dua terhadap nilai diameter lingkaran *pitch*. Berikut ini merupakan Persamaan (2.26) yang digunakan (Zhang, 2016).

$$R_m = \frac{1}{2} \times D_m \quad (2.26)$$

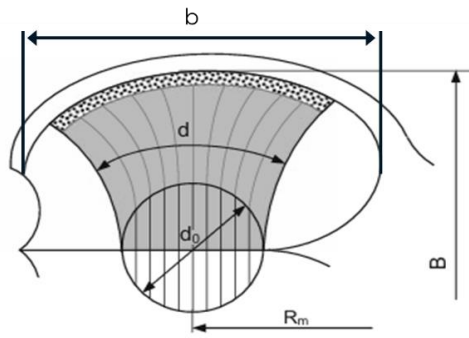
Dimana :

R_m = Radius lingkaran *pitch* (m)

D_m = Diameter lingkaran *pitch* pada roda Pelton (m)

2.6.4. Diameter *Nozzle*

Pada Gambar 2.5 ditunjukkan bahwa penentuan diameter *nozzle* merupakan parameter kunci untuk memastikan bahwa energi kinetik air terkonsentrasi dengan baik saat mengenai *bucket* turbin Pelton. Diameter *nozzle* dan dimensi *bucket* harus memiliki kesesuaian antara satu dengan yang lain, sehingga kinerja turbin nantinya dapat optimal. Ukuran diameter *nozzle* dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.27) berikut (Zhang, 2016).



Gambar 2.5 Parameter geometri *bucket* turbin Pelton

$$d_0 = 0,81 \times n_q \times D_m \quad (2.27)$$

Dimana :

d_0 = Diameter *nozzle* (m)

D_m = Diameter lingkaran *pitch* pada roda Pelton (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

2.6.5. Lebar *Bucket*

Dalam menentukan ukuran maksimum *bucket* pada arah transversal terhadap aliran semburan air. Lebarnya harus cukup besar untuk menangkap semburan air yang menabrak *bucket* turbin Pelton seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5. Dimensi lebar *bucket* dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.28) berikut ini (Zhang, 2016).

$$B = 2,5 \times n_q \times D_m \quad (2.28)$$

Dimana :

B = Lebar *bucket* (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

D_m = Diameter lingkaran *pitch* roda Pelton (m)

2.6.6. Panjang *Bucket*

Pada Gambar 2.5 ukuran panjang *bucket* dipengaruhi oleh dimensi lebar *bucket*. Kesesuaian antara keduanya sangat berpengaruh dalam penentuan area antara kontak *nozzle* dan *bucket* serta mengatur cara aliran air menyebar di dalam *bucket*. Untuk memperoleh ukuran panjang *bucket*, pengaruh tersebut dijelaskan dalam Persamaan 2.29 berikut ini (Zhang, 2016).

$$b = 0,85 \times B \quad (2.29)$$

Dimana :

b = Panjang *bucket* (m)

B = Lebar *bucket* (m)

2.6.7. Jumlah *Bucket*

Secara praktikal jumlah *bucket* yang diperlukan dalam suatu turbin Pelton dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.30) sebagai berikut (Zhang, 2016).

$$Z_b = 15 + \frac{0,62}{n_q} \quad (2.30)$$

Dimana :

Z_b = Jumlah *bucket*

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

2.6.8. Radius Lingkaran Tepi Potongan *Bucket*

Penentuan radius lingkaran tepi potong *bucket* sangat penting karena parameter ini mampu mengarahkan aliran secara halus agar aliran tidak sepenuhnya mengenai sisi belakang *bucket* seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Sudut posisi *bucket* merupakan sudut di mana potongan *bucket* tepat memotong lapisan semburan air pada sumbu *nozzle*. Dimensi radius tepi potongan lingkaran atau diameter pada *cutout* dapat diperoleh dengan Persamaan 2.31 berikut ini (Zhang, 2016).

$$R_c = \frac{R_m}{\cos \alpha_0} \quad (2.31)$$

Dimana :

R_c = Radius lingkaran tepi potongan *bucket* (m)

R_m = Radius lingkaran *pitch* (m)

$\cos \alpha_0$ = Sudut posisi *bucket* (α°)

2.6.9. Kedalaman *Bucket*

Kedalaman *bucket* atau kedalaman cekungan sudu turbin memiliki keterkaitan dengan ukuran lebar *bucket*. Kedalaman tersebut dapat diperoleh dengan perhitungan menggunakan Persamaan (2.32) berikut ini (Zhang, 2016).

$$h_2 = 0,28 \times B \quad (2.32)$$

Dimana :

h_2 = Kedalaman *bucket* (m)

B = Lebar *bucket* (m)

2.6.10. Radius Roda

Radius roda adalah jarak dari titik pusat turbin sampai ujung *bucket* terluar. Radius roda ini merupakan ukuran keseluruhan dari turbin Pelton seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Ukuran radius roda dapat ditentukan dengan Persamaan (2.33) berikut (Eisenring, 1991).

$$R_a = R_m + \frac{3}{5} b \quad (2.33)$$

Dimana :

R_a = Radius roda (m)

R_m = Panjang lingkaran *pitch* (m)

b = Panjang *bucket* (m)

2.6.11. Diameter Roda

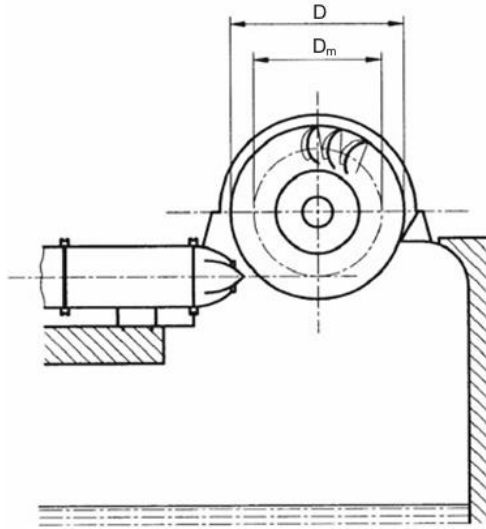
Pada Gambar 2.6 diameter roda yang dimaksud adalah diameter keseluruhan turbin Pelton. Diameter roda ini merupakan dua kali radius roda turbin Pelton sehingga dapat diperoleh dengan Persamaan (2.34) berikut (Zhang, 2016).

$$D_a = 2 \times R_a \quad (2.34)$$

Dimana :

D_a = Diameter roda (m)

R_a = Radius roda (m)



Gambar 2.6 Parameter dimensi pada turbin Pelton poros horizontal

2.6.12. Radius Ujung *Splitter*

Radius ujung *splitter* merupakan jarak antara titik pusat turbin sampai ke bagian ujung *splitter* yang ada di tengah *bucket* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4. Radius ujung *splitter* dapat ditentukan dengan Persamaan (2.35) berikut ini (Eisenring, 1991).

$$R_s = R_m + (1,2 \times d_0) \quad (2.35)$$

Dimana :

R_s = Radius ujung *splitter* (m)

R_m = Radius lingkaran *pitch* (m)

d_0 = Diameter *nozzle* (m)

2.6.13. Diameter Ujung *Splitter*

Diameter ujung *splitter* merupakan jarak terjauh antara ujung *splitter* di kedua sisi turbin. Diameter ujung *splitter* ini merupakan dua kali ukuran dari

radius ujung *splitter* sehingga dapat ditentukan dengan Persamaan (2.36) berikut (Zhang, 2016).

$$D_s = 2 \times R_s \quad (2.36)$$

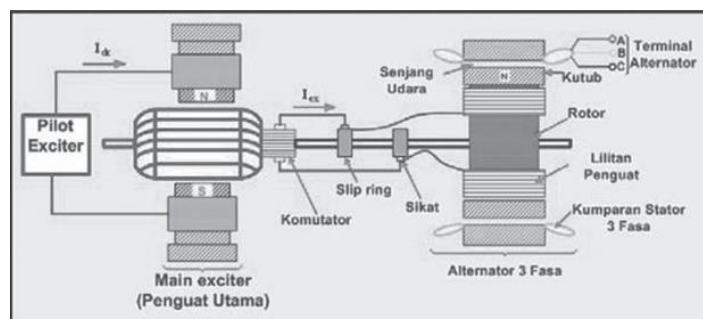
Dimana :

D_s = Diameter ujung *splitter* (m)

R_a = Radius ujung *splitter* (m)

2.7. Generator

Generator adalah alat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik (Ricky and Windarta, 2020). Generator menggunakan prinsip induksi elektromagnetik sebagai penghasil gaya gerak listriknya. Generator terbagi menjadi 2 (dua) yaitu generator *alternating current* (AC) dan *direct current* (DC). Pada pembangkit listrik tenaga air, generator akan dihubungkan dengan turbin air sehingga dapat berputar sesuai putaran yang diinginkan. Komponen utama dari generator listrik yaitu bagian yang berisi kumparan pada *casing* generator (*stator*) dan bagian yang berputar (*rotor*). Poros rotor akan dihubungkan dengan transmisi turbin sehingga dapat menghasilkan putaran.



Gambar 2.7 Prinsip kerja generator

Sumber: (Sunarlik, 2017)