

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Turbin air adalah turbin yang menggunakan fluida kerja air. Air mengalir dari tempat tinggi ke tempat rendah, membawa energi potensial yang berubah menjadi energi kinetik selama aliran dalam pipa. Di dalam turbin, energi kinetik ini diubah menjadi energi mekanis melalui putaran roda turbin (Dietzel dan Sriyono, 1988). Studi eksperimental oleh (Elgammi dan Hamad, 2022) serta (Wisnaningsih dan Tarmizi, 2021) menegaskan bahwa Turbin Pelton efektif mengonversi energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik. Salah satu contoh jenis PLTMH yang banyak digunakan adalah kincir air, turbin *crossflow*, dan Turbin Pelton (Effendi, Rosyidin dan Maulana, 2020). Komponen utama Turbin Pelton meliputi sistem pompa, *nozzle*, dan *runner*. *Nozzle* meningkatkan efisiensi dengan mengonversi energi tekanan menjadi jet air berkecepatan tinggi, didukung *head* besar yang menciptakan tekanan tinggi (Setyawan *et al.*, 2024). Daya turbin bergantung pada *head*, kapasitas aliran, dan putaran (Soplanit, Maluegha dan Ulaan, 2021). Turbin Pelton tergolong turbin impuls dengan desain khusus untuk *head* besar dan kecepatan tinggi, ideal untuk daerah berkemiringan curam (Suyesh *et al.*, 2019). Aliran air dari *nozzle* yang diarahkan secara tangensial menumbuk *bucket* dengan kecepatan maksimum, meningkatkan performa turbin (Montagut, 2019). Semburan ini menggerakkan *runner*, menghasilkan efisiensi 82-85% (laboratorium) hingga 96% secara teoritis (Suyesh *et al.*, 2019).

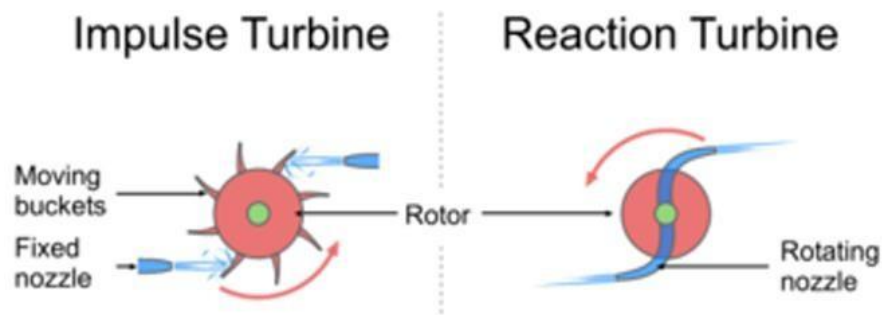
Dalam studi komprehensif, (Egusquiza *et al.*, 2018) mengidentifikasi kelelahan material pada *bucket runner* sebagai masalah kritis. Gaya jet air yang

kontak terus-menerus dengan sudu turbin menciptakan siklus beban berulang yang menghasilkan tegangan kelelahan, memicu deformasi dan penurunan daya turbin (Ji-qing, Myat dan Saw, 2017). (Montagut, 2019) menegaskan bahwa Turbin Pelton mengonversi energi kinetik air tanpa perbedaan tekanan inlet-outlet. Investigasi (Egusquiza *et al.*, 2018) menyebutkan penyebab *fatigue* antara lain desain *runner* suboptimal, operasi di luar kondisi desain, atau ketidaksesuaian *bucket*-semburan air yang menyebabkan pembebanan aksial tidak seimbang dan keretakan. Optimasi kinerja turbin bergantung pada parameter desain dan operasional yang saling terkait. (Rai dan Kumar, 2019) membuktikan bahwa optimasi jumlah dan geometri sudu dapat meningkatkan efisiensi hingga 12%, sementara jarak *nozzle*-sudu ("*nozzle-to-bucket clearance*") menjadi parameter kritis dalam operasi Turbin Pelton (Miyani, 2024). Jarak ini mencegah interferensi semburan air dengan *bucket* dan memastikan transfer energi efektif tanpa kerusakan sistem.

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (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 dan 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. Salah satu contoh jenis PLTMH yang biasanya banyak digunakan yaitu kincir air, tubin *crossflow*, dan Turbin Pelton (Effendi, Rosyidin dan Maulana, 2020). Studi kasus yang dilakukan (Pratama, 2020) mengungkapkan bahwa implementasi pembangkit listrik tenaga air memerlukan dua parameter

fundamental, yaitu ketersediaan debit air yang memadai dan adanya beda ketinggian (*head*), dimana Peningkatan ketinggian turbin memberikan efek positif pada efisiensi sistem (Hasanzadeh *et al.*, 2021). kedua faktor ini menjadi penentu utama dalam menghitung potensi energi yang dapat dihasilkan. Syarat teknis ini menjadi pertimbangan esensial dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang berkelanjutan.



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Turbin Impuls dan Turbin Reaksi

Turbin air adalah salah satu mesin penggerak yang mana fluida kerjanya adalah air. Berdasarkan perubahan energi turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi (Umurani, Siregar dan Al-Amin, 2020). Pada turbin impuls berputar dengan memanfaatkan gaya aksi air ketika mengenai roda turbin seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. 1. Energi tekanan air akan diubah menjadi energi kinetik dengan cara mengalirkan air pada *nozzle* sehingga kecepatannya meningkat. Air dengan kecepatan tinggi akan menumbuk *runner* sehingga dapat berputar, contohnya yaitu Turbin Pelton, turbin banki, dan turbin *crossflow*. Pada turbin reaksi roda turbin akan berputar akibat adanya gaya reaksi air ketika keluar dari celah roda turbin. Turbin memanfaatkan tekanan air untuk dirubah menjadi energi kinetik, dinamakan juga jenis turbin tekanan lebih, contohnya yaitu turbin francis dan turbin kaplan (Handayani, 2014).

2.2. Turbin Pelton

Efisiensi menjadi parameter kritis dalam evaluasi kinerja turbin air pada berbagai skala. Studi eksperimental yang dilakukan (Cobb, 2011) mengungkapkan bahwa Turbin Pelton konvensional umumnya mencapai efisiensi sekitar 70%, dengan pencapaian puncak efisiensi sebesar 73% pada pengujian spesifik. Dalam konteks operasional, kinerja turbin dipengaruhi oleh berbagai parameter teknis seperti kecepatan putaran, tekanan aliran, dan karakteristik generator. Lebih lanjut, penelitian tersebut mengidentifikasi bahwa turbin skala besar dapat mencapai efisiensi di atas 90%, sementara untuk aplikasi pico-hydro, turbin turgo menunjukkan performa yang mengesankan dengan efisiensi mencapai 85%. Optimasi sistem menjadi kunci utama, mengingat kecepatan optimal antara turbin (1400 rpm) dan generator (800 rpm) yang berbeda dapat mengakibatkan penurunan efisiensi keseluruhan sistem dari 55% menjadi kurang dari 50%. Salah satu turbin yang memanfaatkan energi kinetik aliran air yaitu Turbin Pelton atau turbin implus dimana turbin ini menggunakan *head* melalui pancaran air dari *nozzle* dan meneruskan tenaga menjadi energi mekanik berupa putaran roda turbin yang tersambung dengan poros dan diteruskan alternator untuk menghasilkan tenaga listrik (Simbolon, Junaidi dan Kurniawan, 2020). Turbin Pelton yang berfungsi mengubah energi potensial berupa energi kecepatan oleh *nozzle* menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros turbin, untuk mendapatkan energi listrik maka poros turbin dikopel dengan generator (Rosmiati *et al.*, 2017). Turbin Pelton memanfaatkan *nozzle* sebagai pengatur arah aliran air untuk menggerakkan putaran sudu turbin. Putaran sudu turbin tersebut dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu jarak *nozzle*, posisi *nozzle*, diameter *nozzle*, jumlah *nozzle*, dan bentuk geometri

sudu turbin. Turbin Pelton memiliki beberapa konfigurasi penggerak poros yaitu Turbin Pelton poros horizontal dan turbin poros vertikal.

2.2.1 Turbin Pelton Poros Horizontal

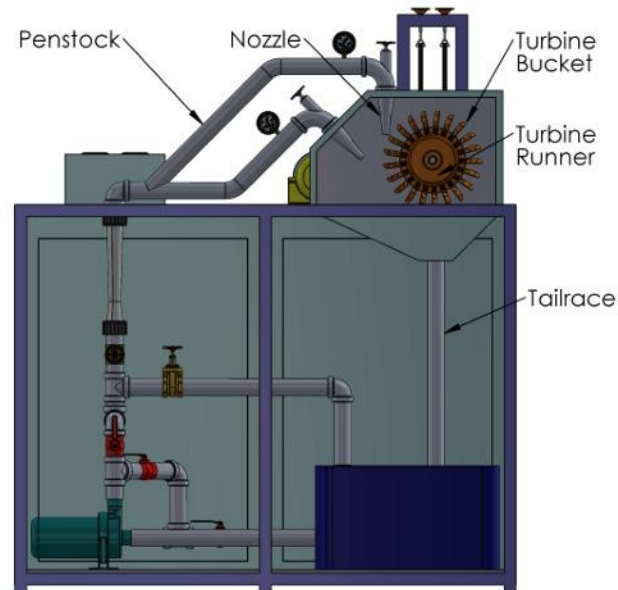
Penggunaan Turbin Pelton poros horizontal biasanya digunakan untuk memanfaatkan energi air pada muka air yang tinggi. Turbin Pelton yang berukuran lebih kecil cenderung berorientasi horizontal. Turbin dengan poros horizontal lebih mudah dalam pemeliharaan dan perbaikan, namun memerlukan luasan *powerhouse*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

2.2.2 Turbin Pelton Poros Vertikal

Pada turbin kinetik 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 cenderung lebih sulit. Untuk menghasilkan daya turbin yang tinggi atau besar maka Turbin Pelton poros vertikal dilengkapi dengan jumlah sudu 4 sampai dengan 6 buah nosel. Sedangkan untuk penggunaan pipa saluran air dapat disesuaikan dengan kebutuhan atau tergantung kepada keadaan tempat dan biaya pengadaannya.

2.3. 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. Sistem *test bed* Turbin Pelton merupakan rangkaian komponen yang terintegrasi untuk simulasi dan pengujian performa turbin. Rancang bangun *test bed* Turbin Pelton dibuat agar dapat bermanfaat sebagai alat uji dalam pembelajaran ilmu konversi energi atau Turbin Pelton itu sendiri. *Test bed* telah dirancang untuk memungkinkan pengembangan teknologi manufaktur cerdas (Helu dan Hedberg, 2015). Prototipe ini merupakan alat atau media yang prinsip kerjanya merupakan gambaran dari sistem PLTMH dengan Turbin Pelton (Asrori, Adikusuma dan Yudiyanto, 2022). *Test bed* dirancang untuk menjadi lingkungan industri representatif dari teknologi terintegrasi" (Helu dan Hedberg, 2015). Untuk desain Turbin Pelton, Optimasi desain turbin berdasarkan karakteristik aliran dan kondisi operasional spesifik dapat menghasilkan peningkatan signifikan dalam efisiensi keseluruhan sistem. *head* pada sisi tekanan dan laju aliran merupakan dua parameter mendasar. Parameter tersebut menentukan pasokan daya hidrolik yang tersedia dan karenanya menentukan ukuran turbin. Desain Turbin Pelton dimulai dengan penentuan dimensi, pemilihan kecepatan putar, dan penentuan jumlah *nozzle* (Zhang, 2016).



Gambar 2. 2 Skema *Test bed* Turbin Pelton

Pada Gambar 2. 2 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 jatuh air (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 Turbin Pelton.

2.4. Dasar Perhitungan Turbin Pelton

2.4.1. Kecepatan Aliran Fluida

Kecepatan aliran fluida merupakan parameter kunci dalam menentukan kinerja Turbin Pelton. Kecepatan ini menunjukkan laju aliran air yang melewati penampang pipa sebelum mencapai nosel. Semakin tinggi kecepatan aliran, semakin besar energi kinetik yang dapat ditransfer ke sudu turbin. Rumus ini memastikan desain pipa sesuai dengan kapasitas aliran untuk memaksimalkan efisiensi sistem. Kecepatan fluida dapat ditentukan dengan Persamaan (2.1) berikut (Dietzel dan Sriyono, 1988) :

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

Dimana :

Q = Laju aliran volumetrik (m³/s)

A = Luas penampang pipa (m²)

v = Kecepatan Aliran Fluida (m/s)

2.4.2. Head Loss Pipa

a) Reynold Number

Reynold Number (Re) adalah bilangan tak berdimensi yang menentukan jenis aliran fluida (laminar, transisi, atau turbulen). Analisis Re membantu memahami karakteristik aliran sebelum memilih metode perhitungan *head loss*. Batasan nilai

Reynolds yaitu $Re < 2300$ untuk aliran laminar, batasan nilai *Reynolds* yaitu $2300 < Re < 4000$ untuk aliran transisi sedangkan batasan nilai *Reynolds* yaitu $Re > 4000$ untuk aliran turbulen, maka dari itu nilai Re dapat diperoleh dari Persamaan (2.2) sebagai berikut (Silowash, 2009) :

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

Dimana :

ρ = Densitas Fluida (kg/m^3)

v = Kecepatan Aliran Fluida (m/s)

d = Diameter pipa (m)

μ = Dinamik Viskositas (kg/m-s)

b) *Major Losses*

Kerugian mayor disebabkan karena faktor gesekan fluida dengan dinding pipa. *Major losses* dihitung menggunakan persamaan Hazen-Williams yang mempertimbangkan koefisien kekasaran pipa (C), panjang ekuivalen pipa (L), dan diameter dalam pipa (D), maka dari itu nilai *major losses* dapat dihitung dengan Persamaan (2.3) sebagai berikut (Silowash, 2009) :

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

Dimana :

C = Koefisien Hazen Williams

Q = Laju Aliran (m^3/s)

Cf = Faktor Konversi (4,72 untuk satuan imperial, 10,67 untuk SI)

L = Panjang Ekuivalen dari pipa (m)

D = Diameter dalam (m)

c) *Minor Losses*

Kerugian minor terjadi akibat turbulensi lokal pada belokan, katup atau perubahan diameter pipa. Kerugian ini dihitung menggunakan koefisien resistansi (K) yang bergantung pada *fitting* yang digunakan seperti terlihat pada Persamaan (2.4) berikut (Silowash, 2009) :

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

Dimana :

K = Koefisien Resistansi

v = Kecepatan Aliran Fluida (m^2/s)

g = Gravitasi ($9,81 \text{ m}^2/\text{s}$)

2.4.3. *Head* Efektif Instalasi

Head efektif instalasi pompa harus disediakan untuk mengalirkan jumlah air seperti direncanakan. *Head* efektif harus mempertimbangkan dari kinerja pompa dengan faktor *head losses* total atau gesekan yang terjadi pada pipa yaitu mayor losses dan minor losses. *Head* efektif ditentukan dari kondisi instalasi yang akan dilayani oleh pompa seperti yang tampilkan pada Gambar 2. 2 bersimbolkan H.

Berikut adalah Persamaan (2.5) perhitungan untuk mencari *head losses* total dan Persamaan (2.6) untuk *head* efektif (Sularso dan Tahara, 1983) :

$$H_{LT} = h_a + \Delta h_p + h_l + \frac{v^2}{2g} \quad (2.5)$$

$$H = H_p - H_{LT} \quad (2.6)$$

Dimana :

H = *Head* Efektif (m)

H_p = *Head* Nameplate Pompa (m)

H_{LT} = *Head* Losses Total (m)

h_a = *Head* Statis Total (m)

$h_a = h_{da} - h_{sa}$

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

h_l = Kerugian *head* di pipa, katup, belokan, dll (m)

$\frac{v^2}{2g}$ = *Head* kecepatan keluar

g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

2.4.4. Head Pressure Gauge

Head yang terukur oleh pressure gauge merepresentasikan ketinggian kolom fluida ekuivalen dengan tekanan yang terukur. Nilai H inilah yang digunakan sebagai *head* efektif yang mendorong aliran melalui nosel ke *runner* turbin, maka nilai H dapat diperoleh dari Persamaan (2.7) sebagai berikut (Fahrudin dan

Mulyadi, 2018) :

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (2.7)$$

Dimana :

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

P = Pressure (N/m²)

ρ = Massa Jenis fluida (kg/m³)

g = Gravitasi (m/s²)

2.4.5. Daya Hidrolis

Daya hidrolis merupakan daya yang dihasilkan oleh air yang mengalir dari suatu ketinggian. Dengan mengasumsikan kondisi aliran yang tidak dapat dimampatkan dan mengabaikan gesekan melalui pipa dan *nozzle*. Dalam hal ini diperoleh daya hidrolis yang dihasilkan oleh pompa dengan persamaan (2.8) (Zhang, 2016) :

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.8)$$

Dimana :

P_0 = Daya hidrolis (watt)

ρ = Massa jenis fluida/air (kg/m³)

g = Gravitasi (m/s²)

Q = Debit air (m³/s)

H = *Head* Efektif (m)

2.4.6. Kecepatan Putar Turbin

Dalam menentukan kecepatan putaran turbin, kecepatan spesifik harus diterapkan dengan dibatasi pada nilai $n_q < 0,13$ dan mempertimbangkan laju aliran dan jumlah *nozzle*, maka dapat ditulis dengan Persamaan (2.9) sebagai berikut (Zhang, 2016):

$$n = \frac{n_q \cdot H^{3/4}}{\sqrt{\frac{Q}{Z_{jet}}}} \quad (2.9)$$

Dimana :

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

H = *Head* efektif (m)

Q = Debit (m³/s)

Z_{jet} = Jumlah nosel

2.4.7. Pasangan Kutub Generator

Dalam menentukan pasangan kutub dan kecepatan putaran disinkronkan ke generator terdekat, maka dapat ditentukan pada Persamaan (2.10) berikut (Zhang, 2016) :

$$p = \frac{f}{n} \quad (2.10)$$

Dimana :

p = Jumlah pasangan kutub magnet

f = Frekuensi (50 Hz)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

2.4.8. Kecepatan Sinkron Putar Turbin Pelton

Jumlah pasangan kutub magnet yang dibulatkan keatas digunakan untuk menghitung ulang kecepatan putaran turbin yang disinkronkan ke generator terdekat dengan Persamaan (2.11) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$n = \frac{f}{p} \times 60 \quad (2.11)$$

Dimana :

n = Kecepatan putaran turbin (1/min)

p = Jumlah pasangan kutub magnet

f = Frekuensi (50 Hz)

2.4.9. Rekalkulasi Kecepatan Spesifik

Desain parameter dimulai dengan kecepatan spesifik $n_q = 0,12$. Setelah sinkronisasi kecepatan rotasi, kecepatan spesifik dihitung ulang dengan Persamaan (2.11) berikut ini (Zhang, 2016) :

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{Z_{jet}} \cdot H^{3/4}} \quad (2.12)$$

Dimana :

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

$H = \text{Head efektif (m)}$

$Q = \text{Debit (m}^3/\text{s)}$

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

2.4.10. Perhitungan Torsi Aktual

Untuk mengetahui berapa besar daya yang mampu dihasilkan oleh suatu turbin maka perlu dilakukan pengujian torsi dan putaran pada penggerak Turbin Pelton. Metode pengujian torsi turbin dilakukan dengan menggunakan sistem pengeremen pada tali pengait dan pulley yang terhubung langsung pada pembacaan neraca newton, maka torsi dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.13) berikut (Mafruddin dan Irawan, 2020) :

$$T = F \times r \quad (2.13)$$

Dimana :

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

$F = \text{Gaya yang bekerja pada Neraca Newton (N)}$

$r = \text{Jari-jari pulley (m)}$

2.4.11. Perhitungan Kecepatan Sudut Turbin

Kecepatan sudut turbin menunjukkan laju putaran rotor dalam satuan radian per detik. Parameter ini berkaitan langsung dengan kecepatan putaran turbin dalam RPM dan digunakan untuk menghitung daya mekanik yang dihasilkan, maka dapat ditentukan dengan Persamaan (2.14) sebagai berikut (Khurmi dan Gupta, 2005) :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (2.14)$$

Dimana :

ω = Kecepatan Sudut Turbin rad/s

N = Putaran Turbin (rpm)

2.4.12. Perhitungan Daya Turbin

Daya dihasilkan turbin dari torsi yang diukur menggunakan neraca newton dan dikombinasikan dengan kecepatan putar diperoleh dari tachometer, maka dapat ditentukan dengan Persamaan (2.15) berikut (Khurmi dan Gupta, 2005) :

$$P_t = T \times \omega \quad (2.15)$$

Dimana :

P_t = Daya Turbin (Watt)

T = Torsi (Nm)

ω = Kecepatan Keliling (rad/s)

2.4.13. Perhitungan Daya Aktual

Daya aktual listrik yang diserap oleh generator saat *test bed* dapat dihitung langsung dari pengukuran tegangan (V) dan arus (I). Nilai ini mencerminkan input listrik ke sistem, yang kemudian dibandingkan dengan daya mekanis turbin untuk evaluasi performa dan efisiensi konversi, maka dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.15) sebagai berikut (Mafruddin dan Irawan, 2020) :

$$P = V \cdot I \quad (2.16)$$

Dimana :

P = Daya Input (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.4.14. Perhitungan Efisiensi

Efisiensi hidrolis (η_h) merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin dengan daya yang dimiliki air pada sisi inlet. Perhitungan ini mengukur seberapa efisien turbin mengubah energi dari air menjadi energi di dalam turbin, dapat ditentukan dan dihitung dengan Persamaan (2.17) sebagai berikut (Handayani, 2014) :

$$\eta_h = \frac{P_t}{P_0} \times 100 \% \quad (2.17)$$

Dimana :

P_t = daya turbin (watt)

P_0 = daya hidrolis (watt)

η_h = Efisiensi Hidrolis (%)

Efisiensi mekanis (η_m) merupakan perbandingan antara daya yang menunjukkan seberapa efektif energi mekanik yang diterima dari turbin dikonversi menjadi energi listrik. Perhitungan ini ditentukan dengan Persamaan (2.18) sebagai berikut (Handayani, 2014) :

$$\eta_m = \frac{P_g}{P_t} \times 100 \% \quad (2.18)$$

Dimana :

P_g = daya generator (watt)

P_t = daya turbin (watt)

η_m = Efisiensi Mekanis (%)

Efisiensi Energi (η_e) merupakan perbandingan antara daya elektrik yang dapat dimanfaatkan dengan daya hidrolis masukan. Pehitungan ini menjadi parameter efektivitas test bed secara keseluruhan di dalam sistem, maka dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.19) sebagai berikut (Handayani, 2014) :

$$\eta_e = \frac{P_g}{P_0} \times 100 \% \quad (2.19)$$

Dimana :

P_g = daya generator (watt)

P_0 = daya hidrolis (watt)

η_e = Efisiensi Energi (%)

2.4.15. Rasio Transmisi

Rasio transmisi menentukan hubungan antara kecepatan putaran poros turbin dan generator berdasarkan diameter pulley. Rasio ini memastikan sinkronisasi antara putaran turbin dan generator untuk menghasilkan frekuensi listrik yang stabil, maka dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.20) sebagai berikut (Khurmi dan Gupta, 2005) :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad (2.20)$$

Dimana :

N_1 = Putaran pada Turbin (RPM)

N_2 = Putaran pada Generator (RPM)

d_1 = Diameter Pulley Turbin (mm)

d_2 = Diameter Pulley Generator (mm)

2.5. Desain Dimensi Turbin Pelton

Dimensi Turbin Pelton 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 hidrolis 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 Turbin Pelton.

2.5.1. Diameter *Shaft* Turbin Pelton

Diameter poros turbin dirancang untuk menahan torsi maksimal tanpa mengalami deformasi. Dengan menggunakan teori tegangan geser maksimum, diameter poros dihitung berdasarkan material yang digunakan. Berikut ini merupakan Persamaan (2.21) dan (2.23) untuk menentukan torsi serta diameter *shaft* sebagai berikut (Khurmi dan Gupta, 2005) :

$$T = \frac{P_0}{2\pi \times \frac{n}{60}} \quad (2.21)$$

$$T = \frac{\pi}{16} \tau d^3 \quad (2.22)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 T}{\pi \tau}} \quad (2.23)$$

Dimana :

T = Torsi (N-mm)

P_0 = Daya Hidrolis (watt)

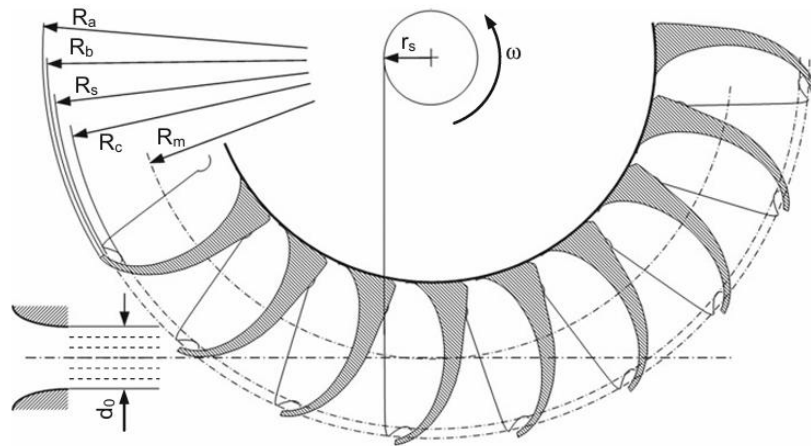
n = Putaran Turbin (rpm)

d = Diameter perencanaan shaft Turbin Pelton (mm)

τ = Tegangan Ijin material yang digunakan (N/mm²)

2.5.2. Diameter Lingkaran *Pitch*

Dalam menentukan diameter lingkaran *pitch* ini sangat menentukan berbagai parameter geometri dan operasional turbin. Diameter ini adalah diameter pada roda Turbin Pelton tempat air jet pertama kali mengenai *bucket* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. 3. Secara matematis, diameter ini berhubungan dengan kecepatan perifer roda turbin dan efisiensi energi, diameter lingkaran *pitch* dapat ditulis dengan Persamaan (2.24) sebagai berikut (Zhang, 2016) :



Gambar 2. 3 Parameter Turbin Pelton

$$D_m = \frac{K_m \sqrt{2gH}}{\pi \cdot n} \quad (2.24)$$

Dimana :

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

K_m = Koefisien kecepatan perifer (0,475)

g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

H = *Head* efektif (m)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

2.5.3. Radius Lingkaran *Pitch*

Radius lingkaran *pitch* atau jari-jari lingkaran *pitch* merupakan bagian yang ideal yang akan dilalui oleh semburan air dari *nozzle* seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 2. 3. Sehingga dimensi ini dapat diperoleh dengan membagi dua nilai diameter lingkaran *pitch* dengan Persamaan (2.25) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$R_m = \frac{1}{2} \times D_m \quad (2.25)$$

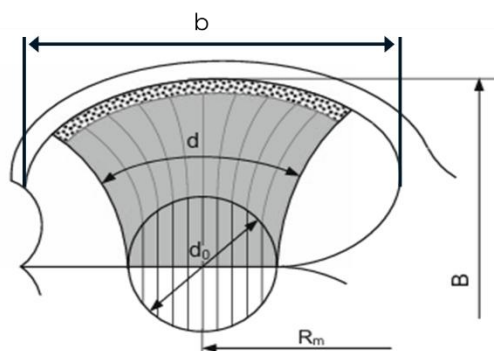
Dimana :

R_m = Radius Lingkaran *Pitch* (m)

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

2.5.4. Diameter *Nozzle*

Pada Gambar 2. 4 ditunjukkan bahwa penentuan diameter jet merupakan parameter kunci untuk memastikan bahwa energi kinetik air terkonsentrasi dengan baik saat mengenai *bucket* Turbin Pelton. Diameter jet dan dimensi *bucket* harus memiliki kesesuaian antara satu dengan yang lain, sehingga kinerja turbin nantinya dapat optimal. Ukuran diameter jet dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.26) sebagai berikut (Zhang, 2016) :



Gambar 2. 4 *Bucket* Turbin Pelton

$$d_0 = 0,81 \times n_q \times D_m \quad (2.26)$$

Dimana :

d_0 = Jet Diameter (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

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

2.5.5. Lebar *Bucket*

Dalam menentukan ukuran maksimum *bucket* pada arah transversal terhadap aliran semburan air. Lebarnya harus cukup besar untuk menangkap aliran semburan air yang menabrak *bucket* Turbin Pelton seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. 4. Dimensi lebar *bucket* dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.27) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$B = 2.5 \times n_q \times D_m \quad (2.27)$$

Dimana :

B = Lebar *Bucket* (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

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

2.5.6. Panjang *Bucket*

Pada Gambar 2. 4 ukuran panjang *bucket* dipengaruhi oleh dimensi lebar *bucket*. Kesesuaian antara keduanya sangat berpengaruh dalam penentuan area kontak antara jet dan *bucket* serta mengatur cara aliran air menyebar di dalam

bucket. Untuk memperoleh ukuran panjang *bucket*, pengaruh tersebut diterjemahkan dalam Persamaan (2.28) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$b = 0.85 \times B \quad (2.28)$$

Dimana :

b = Panjang *Bucket* (m)

B = Lebar *Bucket* (m)

2.5.7. Jumlah *Bucket*

Secara praktikal jumlah *bucket* yang diperlukan dalam suatu Turbin Pelton, dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.29) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$N = 15 + \frac{0,62}{n_q} \quad (2.29)$$

Dimana :

N = Jumlah *Bucket* (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

2.5.8. Radius Lingkaran Tepi Potongan *Bucket*

Penentuan Radius Lingkaran Tepi Potongan *Bucket* sangat penting karena parameter ini mampu mengarahkan aliran secara halus agar aliran tidak sepenuhnya mengenai sisi belakang *bucket* seperti terlihat pada Gambar 2. 3. Sudut posisi *bucket* merupakan sudut di mana potongan *bucket* tepat memotong lapisan jet pada sumbu jet. Dimensi radius tepi potongan lingkaran atau diameter pada *cutout* dapat

diperoleh dengan perhitungan menggunakan Persamaan (2.30) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$R_c = \frac{R_m}{\cos \alpha_0} \quad (2.30)$$

Dimana :

R_c = Radius Lingkaran Tepi Potongan *Bucket* (m)

R_m = Radius Lingkaran *Pitch* (m)

$\cos \alpha_0$ = Sudut Posisi *Bucket* (α°)

2.5.9. Kedalaman *Bucket*

Kedalaman *bucket* atau dalam cekungan sudu turbin memiliki keterkaitan dengan ukuran lebar *bucket*. Kedalaman tersebut dapat diperoleh dengan perhitungan menggunakan Persamaan (2.31) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$h_2 = 0,28 \times B \quad (2.31)$$

Dimana :

h_2 = Kedalaman *Bucket*

B = Lebar *Bucket* (m)

2.5.10. 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. 3. Ukuran radius roda dapat ditentukan dengan Persamaan (2.32) sebagai berikut (Eisenring, 1991) :

$$R_a = R_m + \frac{3}{5} b \quad (2.32)$$

Dimana :

R_a = Radius Roda (m)

R_m = Radius Lingkaran *Pitch* (m)

b = Panjang *Bucket* (m)

2.5.11. Diameter Roda

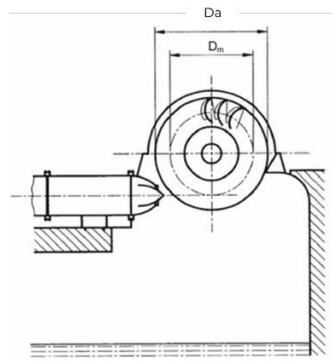
Pada Gambar 2. 5 diameter roda yang dimaksud adalah diameter keseluruhan Turbin Pelton. Diameter roda ini merupakan dua kali dari radius roda Turbin Pelton sehingga dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (2.33) sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$D_a = 2 \times R_a \quad (2.33)$$

Dimana :

D_a = Diameter Roda (m)

R_a = Radius Roda (m)



Gambar 2. 5 Posisi *nozzle* dan *bucket*

2.5.12. 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. 3. Radius ujung *splitter* dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.34) sebagai berikut (Eisenring, 1991) :

$$R_s = R_m + (1,2 \times d_0) \quad (2.34)$$

Dimana :

R_s = Radius Ujung *Splitter* (m)

R_m = Radius Lingkaran Pitch (m)

d_0 = Jet Diameter (m)

2.5.13. Diameter Ujung *Splitter*

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

ujung *splitter* sehingga dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.35) berikut (Zhang, 2016):

$$D_s = 2 \times R_s \quad (2.35)$$

Dimana :

D_s = Diameter Ujung *Splitter* (m)

R_s = Radius Ujung *Splitter* (m)

2.6. Generator

Generator merupakan komponen kritis yang mengonversi energi mekanik dari Turbin Pelton menjadi energi listrik. Desain dan operasi generator harus disinkronkan dengan karakteristik turbin untuk memastikan efisiensi dan stabilitas sistem. Berikut penjabaran spesifik terkait integrasi generator dengan Turbin Pelton:

2.6.1. Prinsip Kerja Generator pada Turbin Pelton

Generator sinkron atau induksi dipasang pada poros Turbin Pelton. Energi mekanik dari putaran turbin (akibat tumbukan jet air ke *bucket*) menghasilkan medan magnet pada rotor generator, yang menginduksi tegangan listrik di stator. Frekuensi listrik output bergantung pada kecepatan putaran turbin dan jumlah kutub generator sehingga dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Avinash, 2022):

$$f = \frac{P \cdot ns}{120} \quad (2.36)$$

Dimana :

f = Frekuensi Listrik (Hz)

p = Jumlah total kutub pada generator

ns = Kecepatan Putaran Turbin (*synchronous speed*)

2.6.2. Efisiensi Generator

Efisiensi generator merupakan ukuran kemampuan generator dalam mengubah daya mekanis dari turbin menjadi daya listrik tanpa mengalami kerugian energi yang signifikan. Efisiensi ini dipengaruhi oleh faktor seperti rugi-rugi listrik (resistansi kawat), rugi-rugi magnetik (histeresis dan arus eddy), serta rugi gesek mekanis pada bearing. Pada sistem pembangkit listrik, efisiensi generator (η generator) dinyatakan sebagai rasio antara daya listrik keluaran ($P_{\text{electrical}}$) terhadap daya mekanis masukan ($P_{\text{mechanical}}$) dari turbin sehingga dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Chapman, 2001) :

$$\eta_{\text{generator}} = \frac{P_{\text{electrical}}}{P_{\text{mechanical}}} \cdot 100\% \quad (2.37)$$

$$P_{\text{electrical}} = V \cdot I \quad (2.38)$$

$$P_{\text{mechanical}} = \eta_{\text{turbin}} \times \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.39)$$

$$\eta_{\text{generator}} = \frac{V \cdot I}{\eta_{\text{turbin}} \times \rho \cdot g \cdot Q \cdot H} \cdot 100\% \quad (2.40)$$

Dimana :

$\eta_{\text{generator}}$ = Efisiensi Generator

$P_{electrical}$ = Daya Listrik Keluaran

$P_{mechanical}$ = Daya Mekanis Masukan

η_{turbin} = Efisiensi Turbin

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

ρ = Massa jenis fluida/air (kg/m^3)

g = Gravitasi (m/s^2)

Q = Debit air (m^3/s)

H = *Head* Efektif (m)

2.6.3. Sinkronisasi Kecepatan Turbin dan Generator

Kecepatan putaran Turbin Pelton (N) harus disesuaikan dengan jumlah kutub generator (p) untuk menghasilkan frekuensi listrik stabil (Avinash, 2022) :

$$N = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.41)$$

Dimana :

f = Frekuensi Listrik (Hz)

p = Jumlah total kutub pada generator

N = Kecepatan Putaran generator (*synchronous speed*)