

BAB II

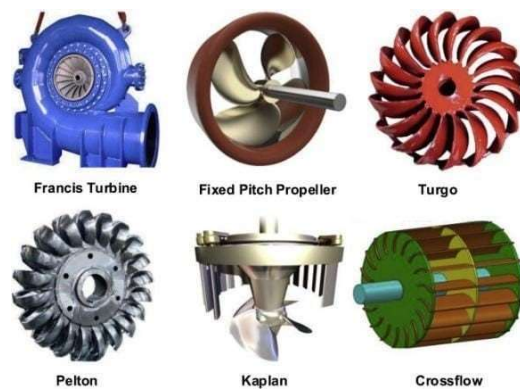
TINJAUAN PUSTAKA

Pemanfaatan sumber daya air sebagai pembangkit listrik menunjukkan tren peningkatan yang signifikan di berbagai skala kapasitas pembangkitan. Analisis tren global pembangkit listrik tenaga air menunjukkan perkembangan yang menarik. Menurut studi komprehensif yang dilakukan (Ptak et al., 2022), pembangunan pembangkit listrik tenaga air skala kecil (*Small Hydropower/SHP*) mengalami pertumbuhan signifikan di berbagai wilayah, yang tercermin dalam aspek sosial, politik, ekonomi, dan lingkungan. Fenomena ini semakin diperkuat dengan data yang mengesankan, dimana International Center on Small Hydropower (ICSHP) mencatat kapasitas terpasang global SHP mencapai 78 Gigawatt (GW) pada tahun 2019, meningkat dari 75 GW di tahun 2016 dan 71 GW di tahun 2013 (Ptak et al., 2022). Lebih lanjut, penelitian ini mengungkapkan distribusi geografis yang tidak merata, dengan Asia mendominasi 65% dari total kapasitas terpasang, diikuti Amerika 25%, sementara Eropa dan Afrika masing-masing hanya 1%, dan Oceania menyumbang 8%. Optimasi kinerja turbin air merupakan fungsi kompleks dari berbagai parameter desain dan operasional yang saling berkaitan. Studi parametrik yang dilakukan (Rai dan Kumar, 2019) mengungkapkan bahwa optimasi jumlah sudu dan geometrinya dapat meningkatkan efisiensi total hingga 12%, sementara dalam operasi turbin Pelton yang mengekstrak energi dari impuls air berkecepatan tinggi (*water jet*), aspek jarak antara nosel dan sudu menjadi parameter kritis. Studi yang dilakukan (Miyani, 2024) mengungkapkan bahwa jarak

minimum antara *water jet* dan sudu, yang dikenal sebagai "*nozzle-to-clearance*", memainkan peran vital dalam mencegah interferensi antara *water jet* dan sudu yang berputar, sekaligus memastikan transfer energi yang efektif tanpa menyebabkan kerusakan sistem. Penelitian Setyawan et al. menunjukkan bahwa *outlet* nosel harus sedekat mungkin dengan *runner* Pelton untuk mencegah jet menyimpang dari diameter yang dirancang, dengan jarak optimal antara nosel dan *runner* sebaiknya 5% dari diameter *orifice runner*. Lebih lanjut (Miyani, 2024) menekankan bahwa parameter ini sangat krusial dalam mempertahankan efisiensi dan fungsi optimal dari turbin Pelton.

2.1 Turbin Air

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 et al., 2020). Pada turbin impuls/aksi, *runner* turbin berputar dengan memanfaatkan gaya aksi air ketika mengenai roda turbin. Energi tekanan air akan diubah menjadi energi kinetik dengan cara mengalirkan air pada nosel sehingga kecepatannya meningkat. Air dengan kecepatan tinggi akan menumbuk sudu sehingga dapat berputar, contoh nya yaitu turbin Pelton, Banki, *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 Kaplan (Handayani, 2014).



Gambar 2.1 Jenis-jenis Turbin Air

Sumber: <https://images.app.goo.gl/MqJrsiQf7ZfzVLZa8>

Turbin air menghasilkan energi mekanik berupa putaran yang dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi alternatif bagi pembangkit listrik (pembangkit listrik tenaga air). Dalam konteks pengembangan pembangkit listrik tenaga air, (Yah et al., 2017) mengklasifikasikan pembangkit berdasarkan kapasitas dayanya, mulai dari skala besar yang mampu menghasilkan daya di atas 100 MW hingga pikohidro dengan kapasitas maksimum 5 kW. 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 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.

2.2 Turbin Pelton

Salah satu turbin yang memanfaatkan energi kinetik aliran air yaitu turbin Pelton atau turbin impuls dimana turbin ini menggunakan *head* melalui pancaran air dari nosel dan meneruskan tenaga menjadi energi mekanik berupa putaran roda turbin yang tersambung dengan poros dan diteruskan alternator untuk menghasilkan tenaga listrik (Simbolon et al., 2020). Menurut (Rosmiati dan Yani, 2017), turbin Pelton juga dapat dikatakan sebagai turbin yang berfungsi mengubah energi potensial berupa energi kecepatan oleh nosel menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros turbin yang kemudian dikopel dengan generator untuk mendapatkan energi listrik.

Turbin Pelton dikenal memiliki efisiensi kinerja yang cukup tinggi. Studi eksperimental yang dilakukan (Cobb dan Sharp, 2013) 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. Dimana besar kecepatan putaran dipengaruhi oleh besar tekanan aliran. Semakin besar tekanan aliran maka semakin besar gaya yang ada untuk mendorong sudu turbin. Selain itu, terdapat juga parameter lain yang memengaruhi putaran turbin yaitu, jarak nosel, posisi nosel, diameter nosel, jumlah nosel, dan bentuk geometri sudu turbin.

Instalasi pemanfaatan turbin Pelton sebagai penggerak dapat disesuaikan dengan kebutuhan atau batasan kondisi yang ada seperti keterbatasan ruang atau sistem instalasi. Pada umumnya instalasi Turbin Pelton memiliki dua konfigurasi

yang didasarkan pada posisi poros turbin yaitu, turbin Pelton poros horizontal dan turbin Pelton 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 jet. Susunan dua jet umum digunakan untuk poros horizontal. Terkadang dua *runner* terpisah dipasang pada satu poros yang menggerakkan satu generator listrik.



Gambar 2.2 Turbin Pelton Poros Horizontal

Sumber: <https://images.app.goo.gl/pYmaDNqNZtFR6BNR6>

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 et al., 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 nosel berjumlah 4 sampai dengan 6 buah. Sedangkan untuk penggunaan pipa saluran air dapat disesuaikan dengan kebutuhan atau tergantung kepada keadaan tempat dan biaya pengadaannya.



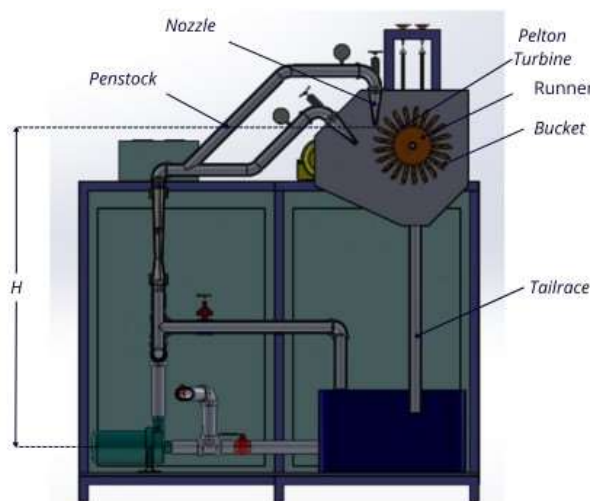
Gambar 2.3 Turbin Pelton Poros Vertikal

Sumber: <https://images.app.goo.gl/S4GJjXxHvYiWWCn57>

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. Perancangan *test bed* turbin Pelton dilakukan berdasarkan parameter-parameter tetap yang telah ditentukan, seperti kapasitas dan konfigurasi pompa yang digunakan. 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* merupakan alat atau media yang prinsip kerjanya merupakan gambaran dari sistem PLTMH dengan turbin Pelton. Dalam hal ini, beberapa parameter pada putaran sudu di *test bed* turbin Pelton yang mempengaruhi diantaranya seperti debit air, beban, jenis *runner*, jumlah sudu, dan konfigurasi pompa terhadap performa turbin.

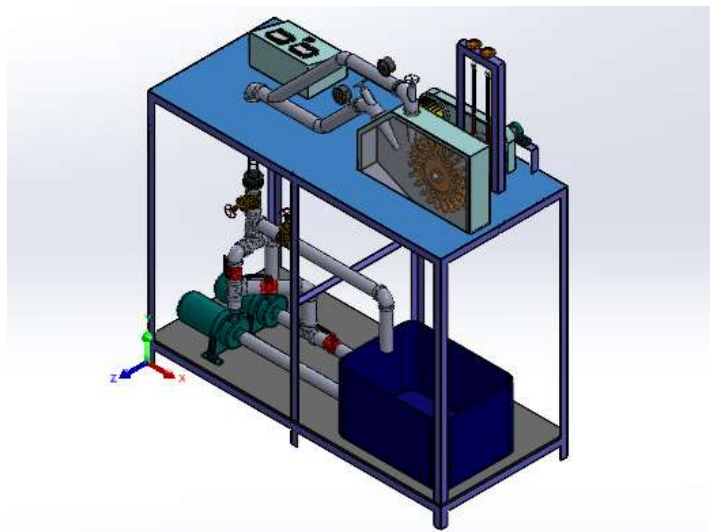


Gambar 2.4 Skema *Test bed* Turbin Pelton

Desain *test bed* turbin Pelton yang akan dibangun mengacu dari berbagai referensi yang ada di artikel/jurnal dan buku. Studi eksperimen yang dilakukan (Irawan et al., 2020) menunjukkan daya yang dihasilkan turbin pada variasi 1 nosel yaitu 367,47 watt, dan variasi 3 nosel daya turbin yang dihasilkan yaitu 419,53

Watt. Jumlah nosel tergantung pada kapasitas aliran air, tiap turbin biasanya dilengkapi dengan 1-6 nosel. Penggunaan jumlah nosel pada turbin Pelton berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan, dimana semakin banyak nosel yang digunakan maka kecepatan aliran dan daya yang dihasilkan semakin besar (Samosir, 2018; Yasir et al., 2022). Maka dari itu, desain *test bed* turbin Pelton poros horizontal yang kami pilih menggunakan dua nosel. Sebelum direalisasikan, *test bed* tersebut melalui proses desain dengan menggunakan *software* desain 3D seperti Solidworks dan Autodesk Inventor. Tujuan utama dari pembuatan desain ini adalah menyajikan gambaran bilamana *test bed* telah terealisasi sehingga dapat menjadi acuan dan meningkatkan efisiensi dalam proses produksi.

Dalam proses membuat desain *test bed* turbin Pelton, dapat dibagi menjadi beberapa bagian proses desain yaitu, desain rangka *test bed*, desain sistem perpipaan, desain turbin Pelton, dan *assembly* keseluruhan komponen *test bed* turbin Pelton.



Gambar 2.5 *Test bed* Turbin Pelton

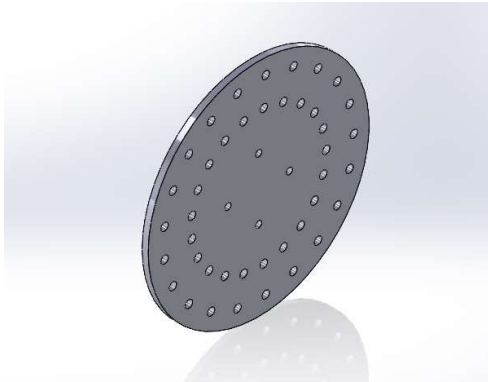
2.4 Rancang Bangun Turbin Pelton

Turbin Pelton yang akan digunakan terdiri dari dua bagian utama yaitu, bagian *runner* dan sudu/sudu turbin. Kedua bagian tersebut dibuat terpisah dan nantinya akan disatukan menggunakan sistem penghubung baut.

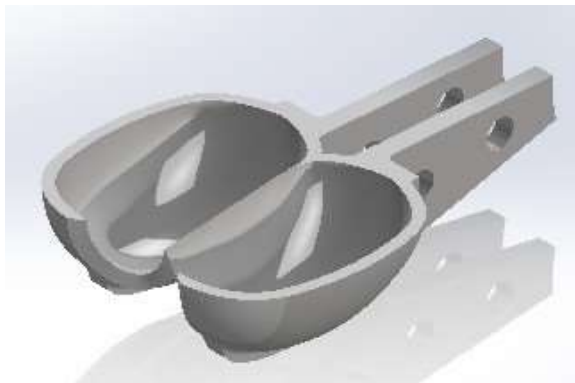


Gambar 2.6 Turbin Pelton

Runner yang dirancang memiliki bentuk silindris dengan ketebalan tertentu dan memiliki banyak lubang di bagian tepinya untuk mengakomodir pemasangan sudu turbin. Bagian tengah runner memiliki empat buah lubang baut untuk memasang *flange* untuk mengkoneksikan dengan poros turbin. Pada *test bed* turbin Pelton ini terdapat *runner* yang akan digunakan yaitu, *runner* dengan bahan aluminium 5052. Sedangkan bentuk sudu turbin yang akan digunakan adalah sudu mangkuk (*eliptic*) yang terdiri dari dua bentuk mangkuk yang berdampingan, dengan *splitter* di bagian tengah dan celah di bagian ujung sudu. Pada *test bed* turbin Pelton ini, sudu yang digunakan dibentuk dengan bahan resin fotopolimer menggunakan *printer 3 dimensi*.



Gambar 2.7 *Runner*



Gambar 2.8 Sudu Turbin Pelton

2.4.1 Perhitungan Dimensi Turbin Pelton

1. Kecepatan Putar Turbin Pelton

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

$$n = \frac{n_q \cdot H^{3/4}}{\sqrt{\frac{Q}{Z_{jet}}}} \quad (2.1)$$

Dimana :

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

H = Head sistem (m)

Q = Debit (m³/s)

Z_{jet} = Jumlah nosel

2. Pasangan Kutub Generator

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

$$p = \frac{f}{n} \quad (2.2)$$

Dimana :

p = Jumlah pasangan kutub magnet

f = Frekuensi (50 Hz)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

3. Kecepatan Sinkron Putar Turbin

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

$$n = \frac{f}{p} \quad (2.3)$$

Dimana :

n = Kecepatan putaran turbin (1/min)

p = Jumlah pasangan kutub magnet

f = Frekuensi (50 Hz)

4. Rekalkulasi Kecepatan Spesifik

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

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{Z_{jet}} \cdot H^{3/4}} \quad (2.4)$$

Dimana :

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

H = Head sistem (m)

Q = Debit (m³/s)

Z_{jet} = Jumlah nosel

5. Diameter Lingkaran *Pitch*

Dalam menentukan diameter tangensial pada roda yang dilewati oleh titik tengah semburan air, dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$D_m = \frac{K_m \sqrt{2gH}}{\pi.n} \quad (2.5)$$

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 sistem (m)

n = Kecepatan putaran turbin (1/s)

6. Lebar Sudu

Dalam menentukan ukuran maksimum sudu pada arah transversal terhadap aliran jet air, lebarnya harus cukup besar untuk menangkap aliran jet air dengan menggunakan persamaan berikut ini (Zhang, 2016) :

$$B = 2,5 \times n_q \times D_m \quad (2.6)$$

Dimana :

B = Lebar Sudu (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

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

7. Panjang Sudu

Ukuran panjang sudu dipengaruhi oleh dimensi lebar sudu. Untuk memperoleh ukuran panjang sudu, pengaruh tersebut diterjemahkan dalam persamaan berikut ini (Zhang, 2016) :

$$b = 0,85 \times B \quad (2.8)$$

Dimana :

b = Panjang Sudu (m)

B = Lebar Sudu (m)

8. Jumlah Sudu

Secara praktikal jumlah sudu yang diperlukan dalam suatu turbin Pelton, dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$N = 15 + \frac{0,62}{n_q} \quad (2.9)$$

Dimana :

N = Jumlah Sudu (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

9. Diameter jet

Diameter jet dan dimensi sudu harus memiliki kesesuaian antara satu dengan yang lain, sehingga kinerja turbin nantinya dapat optimal. Ukuran diameter jet dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut (Zhang, 2016) :

$$d_0 = 0,81 \times n_q \times D_m \quad (2.10)$$

Dimana :

d_0 = Diameter jet (m)

n_q = Kecepatan spesifik (1/s)

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

10. Radius Lingkaran *Pitch*

Radius lingkaran *pitch* atau jari-jari lingkaran *pitch* dapat diperoleh dengan membagi dua nilai diameter lingkaran *pitch*. Berikut adalah persamaannya (Zhang, 2016) :

$$R_m = \frac{1}{2} \times D_m \quad (2.11)$$

Dimana :

R_m = Radius lingkaran pitch (m)

D_m = Diameter lingkaran pitch roda Pelton (m)

11. Radius Lingkaran Tepi Potongan Sudu

Ukuran radius tepi potongan lingkaran atau diameter pada *cutout* dapat diperoleh dengan perhitungan menggunakan persamaan sebagai berikut (Zhang, 2016) :

$$R_c = \frac{R_m}{\cos \alpha_0} \quad (2.12)$$

Dimana :

R_c = Radius Lingkaran Tepi Potongan Sudu (m)

R_m = Radius Lingkaran Pitch (m)

$\cos \alpha_0$ = Sudut Posisi Sudu (α°)

12. Kedalaman Sudu

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

$$h_2 = 0,28 \times B \quad (2.13)$$

Dimana :

h_2 = Kedalaman Sudu (m)

B = Lebar Sudu (m)

13. Radius Roda

Radius roda adalah jarak dari titik pusat turbin sampai ujung sudu terluar. Ukuran radius roda dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Eisenring, 1991) :

$$R_a = R_m + \frac{3}{5} b \quad (2.14)$$

Dimana :

R_a = Radius Roda (m)

R_m = Radius Lingkaran Pitch (m)

b = Panjang Sudu (m)

14. Diameter Roda

Diameter roda yang dimaksud adalah diameter keseluruhan turbin Pelton. Diameter roda dapat diperoleh dengan persamaan berikut (Zhang, 2016) :

$$D_a = 2 \times R_a \quad (2.15)$$

Dimana :

D_a = Diameter Roda (m)

R_a = Radius Roda (m)

15. Radius Ujung *Splitter*

Radius ujung *splitter* merupakan jarak antara titik pusat turbin sampai ke bagian ujung *splitter* yang ada di tengah sudu. Radius ujung *splitter* dapat ditentukan dengan persamaan (Eisenring, 1991) :

$$R_s = R_m + (1,2 \times d_0) \quad (2.16)$$

Dimana :

R_s = Radius Ujung *Splitter* (m)

R_m = Radius Lingkaran *Pitch* (m)

d_0 = Jet Diameter (m)

16. Diameter Ujung *Splitter*

Diameter ujung *splitter* merupakan jarak terjauh antar ujung *splitter* di kedua sisi turbin. Diameter ujung *splitter* dapat ditentukan dengan persamaan (Zhang, 2016) :

$$D_s = 2 \times R_s \quad (2.17)$$

Dimana :

D_s = Diameter Ujung *Splitter* (m)

R_s = Radius Ujung *Splitter* (m)

2.4.2 Simulasi FEA Desain Sudu Turbin Pelton

Finite Element Analysis (FEA) dapat dikenal juga dengan metode analisis elemen hingga. Metode elemen hingga merupakan prosedural berbasis komputer yang dapat digunakan untuk menganalisis struktur. FEA menyimulasikan fenomena fisik menggunakan teknik matematika numerik dengan diskritisasi menjadi elemen-elemen kecil (Andleeb et al., 2022). Diskritisasi sendiri merupakan proses permodelan dari struktur/objek dengan membaginya menjadi elemen-elemen kecil yang terhubung oleh titik-titik yang digunakan oleh elemen-elemen tersebut dan sebagai batas dari struktur/objek. Berdasarkan uraian tersebut, dapat dikatakan bahwa simulasi FEA merupakan simulasi berbasis komputer yang menyimulasikan gaya dan dampak yang terjadi pada struktur/objek sesuai dengan keadaan sebenarnya.

Simulasi FEA yang dilakukan akan menunjukkan dampak fisik (deformasi) akibat gaya-gaya dan kondisi batas yang bekerja pada struktur/objek. Selain deformasi, hasil simulasi juga memberikan data tegangan, regangan, titik kritis, bahkan *fatigue* yang terjadi pada objek. Hasil simulasi yang diperoleh bergantung pada jenis simulasi FEA yang diterapkan. Pada umumnya, simulasi FEA dapat dibedakan menjadi simulasi statik dan dinamik. Simulasi statik merupakan jenis analisis yang digunakan untuk menentukan perilaku struktur model di bawah beban statis, yaitu beban yang tidak berubah terhadap waktu. Melalui simulasi statik diperoleh tegangan, regangan, dan perpindahan yang bekerja pada model simulasi. Sedangkan, simulasi dinamik merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui respon struktur model terhadap pembebanan yang berubah-ubah

seiring berjalannya waktu. Hasil simulasi dinamik salah satunya adalah *fatigue*/kelelahan model akibat pembebanan berulang. Penerapan simulasi FEA pada suatu objek dilakukan melalui tiga tahap utama yaitu, tahap *pre-processing*, *solution*, dan *post-processing*. Tahap *pre-processing* merupakan tahap pertama dimana pada tahap ini dilakukan *modeling*, *input* data material dan gaya, menentukan kondisi batas, dan *meshing*. Tahap *solution* atau solusi merupakan tahap dilakukannya komputasi melalui sistem komputer dengan iterasi tertentu sehingga diperoleh hasil dengan akurasi tinggi. Tahap *post-processing* merupakan tahap terakhir dari simulasi FEA dimana dilakukan pembacaan dan interpretasi data hasil simulasi.

Gaya yang Bekerja pada Sudu Turbin

Turbin Pelton merupakan turbin impuls dimana turbin akan berputar ketika pancaran jet air mengenai sudu turbin tersebut. Pancaran jet air tersebut membawa energi yang kemudian dikonversikan oleh sudu turbin menjadi energi mekanik, sehingga sudu turbin akan menerima gaya eksternal berupa gaya jet air. Sudu turbin yang menerima pancaran jet mengakibatkan turbin berputar pada porosnya. Turbin yang berputar mengakibatkan sudu turbin mengalami gaya sentrifugal yang arahnya menjauhi poros turbin. Sehingga ketika turbin berputar, sudu turbin seakan-akan terdorong menjauhi poros turbin. Selain kedua gaya tersebut, gaya lain yang bekerja pada sudu turbin adalah gaya berat sudu turbin sendiri yang arahnya searah dengan gaya gravitasi.

1. Kecepatan Jet

Kecepatan jet diperlukan untuk menentukan gaya jet air yang menumbuk sudu turbin. Kecepatan jet dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Eisenring, 1991):

$$c_1 = k_c \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (2.18)$$

Dimana:

c_1 = Kecepatan jet (m/s)

k_c = Koefisien nosel (0,96 ... 0,98)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

H = Head net (m)

2. Gaya Jet Air

Gaya jet air yang menumbuk sudu turbin secara langsung dapat dikalkulasikan menggunakan persamaan berikut (Eisenring, 1991).

$$F_{jet} = 2 \cdot \rho \cdot Q \cdot c_1 \quad (2.19)$$

Dimana:

F_{jet} = Gaya jet air (N)

ρ = Massa jenis (kg/m³)

Q = Debit (m³/s)

c_1 = Kecepatan jet (m/s)

3. Kecepatan Angular

Kecepatan angular diperlukan untuk menentukan gaya sentrifugal yang bekerja pada sudu turbin. Kecepatan angular dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Khurmi and Gupta, 2005).

$$\omega = 2\pi \times \frac{n}{60} \quad (2.20)$$

Dimana:

ω = Kecepatan angular (rad/s)

n = Kecepatan putaran turbin (rpm)

4. Gaya Sentrifugal

Gaya sentrifugal sebagai dampak dari gerak putar turbin dapat dikalkulasikan menggunakan persamaan berikut (Alerci et al., 2023).

$$F_{cent} = m \cdot \omega^2 \cdot \frac{D_m}{2} \quad (2.21)$$

Dimana:

F_{cent} = Gaya sentrifugal (N)

m = Massa sudu turbin (m)

ω = Kecepatan angular (rad/s)

D_m = Diameter pitch (m)

5. Kecepatan Angular Generator

Kecepatan angular generator diperlukan untuk mengetahui momen putar generator. Kecepatan angular generator dapat dikalkulasikan dengan persamaan berikut (Khurmi and Gupta, 2005).

$$\omega_G = 2\pi \times \frac{n_G}{60} \quad (2.22)$$

Dimana:

ω_G = Kecepatan angular generator (rad/s)

n_G = Kecepatan putaran generator berdasarkan spesifikasi (rpm)

6. Torsi Generator

Torsi generator yang dimaksud adalah momen gaya yang diperlukan untuk memutar generator. Torsi generator dapat dikalkulasi dengan persamaan berikut (Carrelhas et al., 2023).

$$T_G = \frac{P}{\omega_G \cdot \eta} \quad (2.23)$$

Dimana:

T_G = Torsi generator (Nm)

P = Daya generator (Watt)

η = Efisiensi generator

ω_G = Kecepatan angular generator (rad/s)

7. Perbandingan Tegangan Tali

Perbandingan tegangan tali digunakan untuk mengidentifikasi gaya gesek akibat tali yang tersematkan pada neraca Newton di belakang turbin sebagai variasi beban. Perbandingan tegangan tali dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Khurmi and Gupta, 2005).

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu \cdot \theta} \quad (2.24)$$

Dimana:

T_1 = Tegangan kencang tali (N)

T_2 = Tegangan kendur tali (N)

e = Bilangan Euler (2,71828)

μ = Koefisien gesek

θ = Sudut kontak tali (rad)

8. Tegangan Kencang Tali

Setelah perbandingan tegangan tali diketahui, selanjutnya adalah menghitung tegangan kencang tali dengan persamaan berikut (Khurmi and Gupta, 2005).

$$T_1 = \frac{P \cdot l}{s} \quad (2.25)$$

Dimana:

T_1 = Tegangan kencang tali (N)

P = Gaya tarik tali (N)

l = Panjang lengan gaya (m)

s = Jarak T_1 dengan T_2 (m)

9. Tegangan Kendur Tali

Tegangan kendur tali dapat diketahui dengan menggunakan perbandingan tegangan tali dan tegangan kencang tali yang dimasukkan ke dalam persamaan berikut.

$$T_2 = \frac{T_1}{\frac{T_1}{T_2}} \quad (2.26)$$

Dimana:

T_2 = Tegangan kendur tali (N)

T_1 = Tegangan kencang tali (N)

$\frac{T_1}{T_2}$ = Perbandingan tegangan tali

10. Gaya Gesek Tali

Gaya gesek tali merupakan salah satu gaya pembebanan turbin dan mereduksi gaya turbin sebagai akibat dari adanya variasi pembebanan pada sistem *test bed*. Gaya gesek tali dapat dikalkulasikan sebagai berikut (Khurmi and Gupta, 2005).

$$F_g = T_1 - T_2 \quad (2.27)$$

Dimana:

F_g = Gaya gesek tali (N)

T_1 = Tegangan kencang tali (N)

T_2 = Tegangan kendur tali (N)

Hasil Simulasi FEA

Simulasi FEA menghasilkan berbagai macam data yang dapat menjadi acuan dalam optimalisasi desain sudu turbin yang akan digunakan. Hasil-hasil simulasi FEA disajikan dalam bentuk angka, grafik, kontur warna, maupun animasi. Berbagai macam hasil simulasi FEA yaitu;

a. Tegangan

Tegangan merupakan ukuran intensitas gaya internal yang bekerja di area tertentu pada suatu benda yang mengalami pembebanan atau deformasi. Tegangan menggambarkan bagaimana suatu gaya eksternal didistribusikan di dalam material sebagai respon terhadap pembebanan. Dalam simulasi FEA tegangan yang sering digunakan sebagai indikator kegagalan adalah tegangan von Mises. Tegangan von Mises merupakan tegangan tunggal yang mewakili semua komponen tegangan yang terjadi pada suatu titik. Pada simulasi FEA, tegangan disajikan dalam bentuk kontur warna pada model benda yang disimulasikan. Warna-warna tersebut menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi (umumnya merah-jingga menunjukkan tegangan tinggi, hijau-biru menunjukkan tegangan rendah).

b. Regangan

Regangan merupakan perubahan dimensi relatif terhadap dimensi awal benda. Regangan menggambarkan seberapa banyak benda meregang atau tertekan akibat gaya yang terjadi. Pada simulasi FEA, regangan disajikan dalam bentuk kontur warna pada model benda yang disimulasikan. Warna-warna tersebut

menunjukkan besarnya regangan yang terjadi (umumnya merah-jingga menunjukkan regangan tinggi, hijau-biru menunjukkan regangan rendah).

c. Deformasi

Deformasi dalam simulasi FEA cukup erat kaitannya dengan perpindahan (*displacement*). Deformasi merupakan perubahan bentuk/geometri suatu benda, sedangkan perpindahan dalam simulasi FEA merujuk pada perubahan posisi atau menggambarkan jarak dan arah pergerakan suatu titik pada benda dari posisi awal ke posisi akhir akibat gaya maupun kondisi batas yang bekerja. Pada simulasi FEA, deformasi divisualisasikan dengan animasi atau gambar perubahan bentuk model benda. Sedangkan perpindahan disajikan dalam bentuk grafik dan kontur warna pada model benda yang disimulasikan. Warna-warna tersebut menunjukkan besarnya perpindahan yang terjadi (umumnya merah-jingga menunjukkan nilai perpindahan tinggi, hijau-biru menunjukkan nilai perpindahan rendah).

d. *Life*

Life yang dimaksud dalam hal ini merupakan banyaknya siklus pembebanan yang mampu diterima suatu geometri desain benda. *Life* erat kaitannya dengan kelelahan material yang dapat diartikan sebagai kerusakan material akibat pembebanan berulang dalam periode tertentu. Fenomena kelelahan ini diawali dari inisiasi retakan yang kemudian menyebar dalam material dan patahan terjadi diakibatkan pertumbuhan retakan yang tidak konstan (Li Ji-Qing, 2017).

Pada analisis *life* menggunakan ANSYS *transient structure*, terdapat beberapa parameter yang dapat disesuaikan sesuai dengan kondisi kerja aktual struktur yang akan dianalisis, seperti tipe pembebanan, skala pembebanan, tipe

analisis, *mean stress theory*, dan satuan *life* yang digunakan. Hasil analisis *life* divisualisasikan dalam bentuk kontur warna dan animasi deformasi model sudu turbin yang disimulasikan.

e. Faktor Keamanan (*Factor of Safety*/FOS)

Faktor keamanan (FOS) merupakan perbandingan antara kekuatan material benda dengan beban kerja aktual atau yang diharapkan. FOS memberikan margin keamanan untuk memperhitungkan ketidakpastian dalam desain, material, manufaktur, dan kondisi operasional. Pada simulasi FEA, FOS dapat didefinisikan dengan rumus:

$$FOS = \frac{yield\ stress}{working\ stress} \quad (2.28)$$

FOS diinterpretasikan dengan beberapa ketentuan, jika $FOS > 1$, maka desain aman dan mampu menerima pembebanan yang diantisipasi dengan margin tertentu. Jika $FOS = 1$, maka desain dalam batas kegagalan dan tidak ada margin keamanan. Jika $FOS < 1$, maka desain tidak aman dan kemungkinan terjadi kegagalan di bawah beban aktual atau yang diharapkan. Faktor keamanan untuk sudu turbin Pelton sendiri disarankan memiliki nilai sekitar tiga (Eisenring, 1991).

2.5 Alat dan Bahan Rancang Bangun Turbin Pelton

Sebelum melakukan rancang bangun turbin Pelton, alat dan bahan yang akan digunakan selama proses perancangan terlebih dahulu dipersiapkan agar dapat mempermudah proses jalannya rancang bangun sehingga dapat berjalan dengan lancar dan sesuai dengan rencana. Adapun alat dan bahan yang digunakan yaitu:

2.5.1 Alat

a. 3D Printer

Mesin 3D *printer* digunakan sebagai pembuat profil komponen sudu turbin Pelton yang menggunakan bahan resin fotopolimer. Prinsip kerjanya yaitu memancarkan cahaya ultraviolet (UV) melewati LCD yang mengatur keluaran cahaya untuk memicu resin yang ada pada wadah mengalami polimerisasi, mengeras, dan menempel pada *build plate*, sehingga terbentuk lapisan sesuai bentuk benda. Hal tersebut terjadi berulang sampai lapisan membentuk benda yang utuh.



Gambar 2.9 Mesin 3D *Printer*

Sumber : <https://www.3djake.uk/phrozen/sonic-mega-8k-v2>

b. Mesin *Computer Numerical Control* (CNC)

Mesin CNC digunakan untuk melakukan proses pemesinan pada bahan alumunium 5052 yang akan dibentuk menjadi *runner* turbin Pelton. Mesin CNC yang digunakan adalah mesin yang diproduksi oleh DTECH-ENGINEERING seri SUPERMILL.



Gambar 2.10 Mesin CNC

Sumber: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTWWIGPpVYfV7mATd5Zd1D945LELTZRMXPORw&_s

c. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk melakukan pengukuran pada material maupun hasil dari pemesinan yang telah dilakukan, sehingga dapat dipastikan ukuran dari hasil proses manufaktur akurat dan sesuai dengan referensi desain yang dibuat.



Gambar 2.11 Jangka Sorong

Sumber: <https://alatproyek.com/pub/media/catalog/product/cache/c687aa7517cf01e65c009f6943c2b1e9/f/6/f633d417-7362-47a1-a033-310b4f938b2c.jpeg>

d. Kikir Besi

Kikir besi digunakan untuk merapikan dan menghaluskan bagian tepi benda hasil pemesinan yang telah dilakukan, sehingga terlihat rapi dan tidak melukai tangan ketika dipegang.



Gambar 2.12 Kikir Besi

Sumber: https://erp.indoteknik.com/api/image/product.template/image_512/586656

e. Tap

Tap merupakan alat yang digunakan untuk membuat ulir pada lubang yang ada pada *runner* maupun pada *flange*, sehingga *runner* dan *flange* dapat terkoneksi dengan bantuan baut. Tap yang digunakan adalah tap dengan ukuran M6.



Gambar 2.13 Tap M6

Sumber: https://res.cloudinary.com/rsc/image/upload/w_1024/C0215530-01

2.5.2 Bahan

a. Resin Fotopolimer

Resin fotopolimer merupakan bahan cetak 3D yang bereaksi terhadap cahaya (UV) untuk mengalami proses polimerisasi dan mengeras. Resin fotopolimer yang digunakan merupakan *hard-tough* resin fotopolimer yang memiliki kekuatan fisik tinggi, kekerasan, dan ketangguhan yang mirip dengan plastik ABS. Hasil cetak resin ini memiliki kekerasan permukaan tinggi dan ketahanan aus, cocok untuk aplikasi yang memerlukan daya tahan dan stabilitas struktural. *Hard-tough* resin fotopolimer memiliki sifat dan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2.1 *Hard-tough Photopolymer Resin Physical Properties*

Physical Performance	Values	Units
Density	1,08-1,12	g/cm ³
Viscosity	200-300	mPa·s
Hardness	75-81	Shore D

Sumber: e-sun Hard Tough Resin *Technical Data Sheet*

Tabel 2.2 *Hard-tough Photopolymer Resin Mechanical Properties*

Mechanical Performance	Values	Units
Tensile Strength	30-60	MPa
Tensile Yield Strength	26-31	MPa
Young's Modulus	1000	MPa
Poisson's Modulus	0,41	-
Elongation at Break	35-52	%
Flexural Strength	30-75	MPa
Izod Impact Strength	40-110	J/m

Sumber: e-sun Hard Tough Resin *Technical Data Sheet*

b. Alumunium 5052

Alumunium 5052 merupakan paduan alumunium yang mengandung 2,5% magnesium dan 0,25% kromium. Bahan ini menjadi bahan dasar pembuatan *runner* dan *flange* turbin Pelton yang akan digunakan. Alumunium 5052 digunakan karena memiliki berat yang cukup ringan, tahan korosi, dan mudah dilakukan pemesinan.



Gambar 2.14 Alumunium 5052

Sumber: <https://hardajaya.com/wp-content/uploads/2022/03/Plat-Alumunium-5052.jpg>

2.6 Penelitian Terdahulu

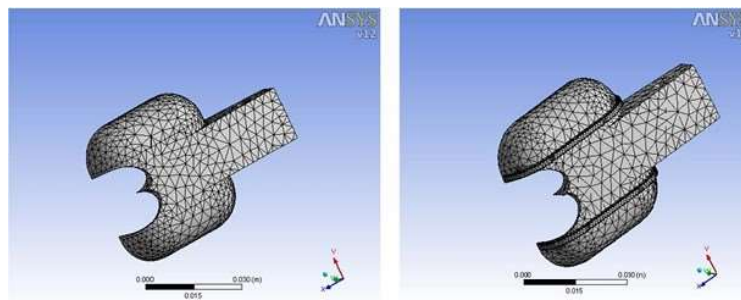
Pembahasan terkait analisis kekuatan struktur pada sudu turbin Pelton dapat ditemukan di beberapa jurnal penelitian terdahulu. Meskipun demikian, tidak banyak pembahasan mengenai analisis kekuatan struktur sudu turbin Pelton dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Pada penelitian sebelumnya, proses FEA yang dilakukan memiliki alur dan tahapan yang relatif sama. Meskipun memiliki tahapan yang sama, tentu parameter-parameter yang digunakan memiliki pengaturan berbeda, menyesuaikan kebutuhan/tujuan, geometri, dan kondisi batas yang diperlukan dalam analisis. Kebutuhan dan tujuan penelitian menjadi aspek utama dalam perbedaan parameter-parameter dalam FEA. Kebutuhan atau tujuan

penelitian menggunakan metode FEA diantaranya yaitu, rancang bangun sudu turbin atau turbin secara keseluruhan, melakukan perbandingan analisis tegangan hasil FEA dengan metode lain, menganalisis kerusakan pada turbin, maupun optimalisasi desain/bentuk sudu yang telah ada.

Penelitian yang dilakukan oleh (Mane and Choure, 2020) memiliki tujuan rancang bangun turbin dengan bahan logam paduan CA6NM. Sudu dimodelkan dan dianalisis menggunakan *software* Solidworks. Kondisi batas yang diterapkan, yaitu *fix support* pada lubang baut sudu dan gaya yang mendorong sudu diambil dari gaya yang pertama kali menumbuk sudu, dengan gaya sebesar 153,864 kN. Dari FEA tersebut diperoleh hasil von Mises *stress* maksimum sebesar 45,793 N/mm², FOS minimum di angka 3,851, dan *displacement* sebesar 0,034. Hasil dari FEA tersebut dinyatakan aman karena tegangan yang terjadi tidak melebihi kekuatan luluh dari material tersebut yang memiliki nilai sebesar 689,43 MPa dan FOS yang diperoleh lebih dari batas minimum yaitu 1 dan berada di nilai yang direkomendasikan untuk suatu sudu turbin Pelton yaitu ~ 3 atau ≥ 3 .

FEA dengan tujuan untuk melakukan perbandingan antar geometri, material sudu, maupun metode analisis juga dapat ditemui. Penelitian oleh (Mbiu, 2021) membandingkan dua geometri sudu yang berbeda dengan material sudu berupa aluminium A356. Salah satu sudu telah dimodifikasi dengan menambahkan geometri tertentu pada bagian bawahnya dengan harapan performa sudu tersebut dapat meningkat. Model sudu dilakukan *meshing* dengan bentuk tetrahedron dengan ukuran bervariasi menyesuaikan dengan geometri sudu. Kondisi batas yang diterapkan berupa *fix support* pada tangkai sudu dan gaya yang diterapkan sebesar

1236,8 N yang diletakkan di bagian tertentu pada kedua mangkuk sudu yang bersebelahan. Hasil yang diperoleh pada FEA tersebut adalah tegangan pada sudu yang dimodifikasi lebih kecil, dengan nilai sebesar $7,952 \times 10^7$ Pa dibanding sudu lainnya yang memiliki nilai tegangan sebesar $8,285 \times 10^7$ Pa. Sedangkan untuk total deformasi yang terjadi, sudu yang dimodifikasi memiliki nilai yang lebih besar dengan nilai 0,00015 m dibanding sudu lainnya yang memiliki nilai 0,00006 m.



Gambar 2.15 Analisis pada Geometri Berbeda

Sumber: Mbiu, 2021

Hampir sama dengan membandingkan geometri antara dua sudu, membandingkan material sudu juga diperlukan dua model sudu yang berbeda. Hanya saja perbedaan tersebut terdapat pada bagian input data material, sedangkan geometri kedua sudu identik. Penelitian oleh (Jamali et al., 2021) membandingkan dua sudu dengan material berbeda yaitu baja AISI 1020 dan baja struktural. *Meshing* yang dilakukan pada penelitian ini terbilang cukup baik dengan *mesh* yang halus dan ukuran elemen yang kecil yaitu sebesar 0,4, sehingga meningkatkan akurasi hasil dari FEA. Hal ini dapat menjadi pedoman atau referensi dalam melakukan *meshing* untuk penelitian yang penyusun lakukan. Dari FEA tersebut dapat disimpulkan bahwa baja struktural memiliki performa yang lebih baik

dibanding baja AISI 1020. Tegangan, regangan, dan deformasi yang terjadi pada baja struktural memiliki nilai yang lebih rendah dibanding baja AISI 1020.

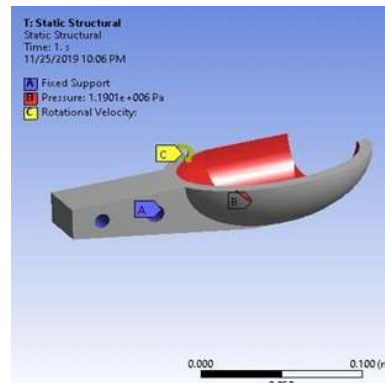
Tabel 2.3 Hasil FEA Perbandingan Material

Result	AISI 1020	Structural Steel
Von-Mises Stres (MPa)	145,43	124,7
Total Deformation	$4,86311 \times 10^{-5}$	$4,1874 \times 10^{-5}$
Von-Mises Strain	$7,5239 \times 10^{-7}$	$6,43 \times 10^{-7}$

Sumber: Jamali, et al., 2021

Selain melakukan perbandingan, FEA juga dapat digunakan untuk menganalisis kerusakan pada sudu turbin, seperti yang dilakukan oleh (Libay, 2020). Penelitian tersebut menganalisis penyebaran retakan pada bagian tangkai sudu turbin yang telah retak dan menyimulasikan *fatigue life* dari sudu tersebut. Geometri yang digunakan untuk analisis tersebut hanya setengah dari model sudu turbin. Kondisi batas yang diterapkan pada FEA tersebut diantaranya yaitu *fix support* pada lubang baut sudu, gaya yang berupa tekanan pada bagian mangkuk sudu sebesar $1,1901 \times 10^6$ Pa, dan *rotational velocity* sebagaimana kondisi sudu sebenarnya ketika berputar dengan kecepatan 195 rad/s. Kondisi batas tersebut dapat menjadi referensi bagi penyusun dalam melakukan FEA sehingga gaya-gaya yang terjadi pada sudu turbin untuk analisis lebih lengkap dan semakin sesuai dengan kondisi riil sudu turbin tersebut. Dengan begitu, hasil dari FEA yang dilakukan menjadi semakin akurat. Hasil dari penelitian oleh (Libay, 2020) antara lain yaitu tegangan yang terjadi semakin bertambah seiring bertambahnya kedalaman retakan dan akan mengalami kegagalan karena tegangan yang terjadi melebihi kekuatan luluh yaitu ketika kedalaman retakan sebesar 9,4 mm.

Pertambahan ukuran retakan memiliki propagasi sebesar $5,7147 \times 10^{-6}$ sampai $1,4936 \times 10^{-3}$ mm/*cycle* mulai dari kedalaman 0,1 mm sampai 8,1 mm dan *fatigue life* pada kedalaman 8,1 mm adalah 2.758.440 siklus.



Gambar 2.16 Kondisi Batas Analisis Retakan dan *Fatigue Life*

Sumber: Libay, 2020

Setiap penelitian tersebut memiliki fokus tertentu sesuai dengan tujuannya. Tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan deformasi yang terjadi (*displacement*), umumnya menjadi parameter yang diperhatikan dalam analisis kekuatan struktur sudu turbin Pelton dengan metode FEA. Untuk menambah kelengkapan informasi dan mengakomodir kebutuhan penelitian, maka ditambahkan beberapa *solution* lain seperti FOS dan *fatigue life*. Penelitian-penelitian yang dilakukan sebelumnya telah memberi referensi dan acuan dalam melaksanakan penelitian saat ini. Selain itu, dengan adanya penelitian-penelitian sebelumnya, dapat dicari celah atau bagian-bagian yang masih bisa untuk dikembangkan lebih lanjut.