

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Pertumbuhan Kelistrikan Nasional

Pada perkembangan populasi penduduk serta industri yang terus meningkat membuat kebutuhan akan energi listrik akan terus mengalami peningkatan, sebagian besar energi yang digunakan oleh pembangkit-pembangkit listrik adalah energi fosil seperti, minyak gas dan batubara. Energi listrik nasional disuplai langsung oleh PT.PLN Persero.

Kondisi kelistrikan nasional dalam 6 tahun terakhir yaitu dari tahun 2009 s.d. 2014, usaha PLN terus mengalami pertumbuhan. Penjualan listrik meningkat dari 133,1 TWh pada tahun 2009 menjadi 196,4 TWh pada tahun 2014, jumlah pelanggan meningkat dari 39,8 juta pada tahun 2009 menjadi 57,1 juta pada tahun 2014, dan rasio elektrifikasi meningkat dari 63,5% pada tahun 2009 menjadi 84,0% pada tahun 2014. Kondisi kelistrikan hingga September tahun 2014 dapat digambarkan sebagai berikut: kapasitas terpasang pembangkit PLN di Indonesia adalah 43.457 MW, terdiri dari 33.499 MW di Jawa- Bali dan 6.116 MW di Sumatera serta 3.842 MW di Indonesia Timur (RUP PT PLN 2015-2024).

Total pembangkit sebanyak 3.640 MW. Kapasitas pembangkit di Sumatera dan Indonesia Timur pada umumnya tidak cukup untuk melayani pelanggan yang ada, kecuali di sistem kelistrikan Sulawesi Selatan tersedia cadangan yang memadai. Dengan kondisi seperti tersebut, sewaktu-waktu sistem kelistrikan dapat mengalami defisit manakala ada sebuah pembangkit yang terganggu atau menjalani pemeliharaan rutin. Sebagai ilustrasi, sistem kelistrikan Sumatera Bagian Utara hampir sepanjang tahun tidak mempunyai cadangan operasi, sering mengalami defisit dan mengoperasikan banyak pembangkit berbahan bakar minyak.

Sistem Sumatera Bagian Selatan juga mengalami hal yang sama, yaitu hampir sepanjang tahun tidak mempunyai cadangan operasi yang cukup. Hal serupa terjadi di beberapa daerah lain, seperti Kalimantan Barat, Kalimantan Timur, Kalimantan Selatan, Sulawesi Tenggara, Minahasa Gorontalo, Palu, Lombok,

Ambon, Ternate dan Jayapura. Kondisi sistem kelistrikan yang lebih kecil juga banyak yang mengalami defisit. Sedangkan di wilayah Jawa Bali, kapasitas pembangkit pada dasarnya cukup untuk memenuhi kebutuhan beban yang ada. Hal yang menjadi masalah operasi selama tahun 2014 adalah belum optimalnya operasi pembangkit batubara FTP-1 PLN dan banyak trafo yang pembebanannya sudah sangat tinggi, serta semakin besarnya transfer listrik dari Jawa bagian Tengah/Timur ke Jawa bagian Barat yang berdampak pada penurunan tegangan di sistem transmisi pada periode beban puncak (RUP PT PLN 2015-2024).

Masalah penyediaan tenaga listrik saat ini adalah upaya memenuhi listrik pada daerah-daerah yang kekurangan pasokan listrik atau bahkan sama sekali belum teraliri listrik dengan cara mengganti pembangkit listrik berbahan bakar minyak dengan bahan bakar non minyak atau dengan memanfaatkan potensi energi terbarukan. Oleh karena itu pada saat ini pemanfaatan energi terbarukan terus menerus dikembangkan misalnya energi air, angin dan matahari yang bertujuan untuk menghindari habisnya cadangan energi fosil yang telah digunakan secara besar-besaran (Susatyo, 2003).

2.2 Pemanfaatan Energi Air Sebagai Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang tersedia dari alam dimana sumber nya tidak akan pernah habis meski meningkatnya perkembangan zaman. Contoh dari energi terbarukan yang biasa dijadikan energi alternatif untuk membangkitkan listrik adalah energi panas bumi, energi angin, energi surya dan energi air.

Air merupakan salah satu sumber daya yang dapat menghasilkan energi, terutama energi listrik yaitu dengan mengkonversikan energi tersebut kedalam bentuk energi yang berbeda. Sumber tenaga air di Indonesia khususnya di provinsi Sumatera Selatan cukup berpotensi untuk dibangun pembangkit listrik tenaga mikrohidro karena banyaknya sumber-sumber aliran sungai dan air terjun (Susatyo, 2003).

Pada air tersimpan energi potensial (pada air jatuh) dan energi kinetik (pada air mengalir). Tenaga air adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir. Energi yang dimiliki air dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi

mekanis maupun energi listrik. Besarnya tenaga air yang tersedia dari suatu sumber air bergantung pada besarnya head dan debit air. Dalam hubungan dengan reservoir air maka head adalah beda ketinggian antara muka air pada reservoir dengan muka air keluar turbin/kincir. Total energi yang tersedia dari suatu reservoir air adalah merupakan energi potensial air yaitu (Edi Susanto, 2009):

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Dengan :

m adalah massa air (kg)

h adalah head (m)

g adalah gravitasi (m/s^2)

Daya merupakan energi per satuan waktu ($\frac{E}{t}$), sehingga persamaan diatas menjadi :

$$\frac{E}{t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{t} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusikan P terhadap ($\frac{E}{t}$) dan mensubstitusikan $\rho \cdot Q$ terhadap ($\frac{m}{t}$) maka :

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \quad (3)$$

Dengan :

P adalah daya potensial air (Watt)

Q adalah debit aliran (m^3/s)

ρ adalah densitas air (kg/m^3)

Selain memanfaatkan air jatuh hydropower dapat diperoleh dari aliran air datar. Dalam hal ini energi yang tersedia merupakan energi kinetik (Edi Susanto, 2009) :

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (4)$$

Dimana :

v adalah kecepatan aliran air (m/s)

Daya air yang tersedia dinyatakan sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot v^2 \quad (5)$$

Atau dengan menggunakan persamaan kontinuitas $Q = Av$ maka :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

Dimana :

A adalah luas penampang aliran air (m^2)

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Macam-macam pembangkit listrik tenaga air ditinjau dari sumber aliran air diantaranya adalah pembangkit listrik dengan waduk (reservoir), pembangkit listrik tenaga air aliran danau dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (<http://mufidtaufan.wordpress>).

1. Pembangkit Listrik Tenaga Air Dengan Waduk (Reservoir)

Air sungai dialirkan ke kolam melalui saluran terbuka atau tertutup dengan disaring dengan terlebih dahulu dan ditampung disuatu kolam (reservoir) yang berfungsi untuk mengendapkan pasir dan lumpur. Air dari satu sungai atau lebih ditampung disuatu tempat untuk mendapatkan ketinggian tertentu dengan jalan dibendung, air dari waduk tersebut dialirkan melalui saluran terbuka melalui pintu air kesaluran tertutup yang selanjutnya melalui pipa pesat menggerakkan turbin untuk membangkitkan listrik. Contohnya adalah PLTA Cirata dengan kapasitas terbangkit 108 MW

2. Pembangkit Listrik Tenaga Air Aliran Danau

Sumber air dari pembangkit listrik ini adalah sebuah danau yang potensinya cukup besar dengan cara membuat bendungan dan mengatur ketinggian jatuh air melalui intake dan pipa pesat. Contohnya adalah pembangkit listrik tenaga air maninjau dengan kapasitas terbangkit 56 MW.

3. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan suatu pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air sebagai media penggerakannya, misalnya saluran irigasi, sungai atau air terjun alam, dengan cara memanfaatkan tinggi terjunnya (*head*, dalam meter) dan jumlah debit

airnya (m^3/detik). Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya maka semakin besar energi yang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik (Yusreza Caesar, 2016).

Di samping faktor geografis (tata letak sungai), tinggi jatuhnya air dapat pula diperoleh dengan membendung aliran air sehingga permukaan air menjadi tinggi. Air dari *intake* dialirkan ke turbin menggunakan saluran pembawa melalui sebuah pipa pesat (*penstock*) kedalam rumah pembangkit yang pada umumnya dibangun di bagian tepi sungai untuk menggerakkan turbin atau kincir air mikrohidro. Energi mekanik yang berasal dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator (Effendy, 2009).

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro telah digunakan secara luas sebagai salah satu sumber energi alternatif, khususnya di daerah terpencil dimana sumber energi lain tidak tersedia. PLTMH ini memanfaatkan ketinggian air yang tidak terlalu besar, misalnya dengan ketinggian air 2.5 meter yang menghasilkan listrik 400 Watt. Tenaga air dalam skala kecil dapat dipasang dalam sungai atau aliran air yang kecil dan tidak memerlukan dam atau sistem penampung air musiman, tetapi menggunakan sistem penghentian aliran sungai “*run off the river*”.

Relatif kecilnya energi yang dihasilkan mikrohidro dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya, berimplikasi pada relatif sederhananya peralatan serta kecilnya areal yang diperlukan guna instalasi dan pengoperasian mikrohidro. Hal tersebut merupakan salah satu keunggulan mikrohidro, yakni tidak menimbulkan kerusakan lingkungan. Dengan demikian, sistem pembangkit mikrohidro cocok untuk menjangkau ketersediaan jaringan energi listrik di daerah terpencil dan pedesaan. Beberapa keuntungan yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga listrik mikrohidro adalah sebagai berikut:

- a. PLTMH lebih mudah dalam pengoperasian dan pemanfaatan sumber daya alam yang ramah lingkungan dan tidak pernah habis.
- b. Merupakan sumber energi terbarukan.

- c. Konstruksi bangunan PLTMH sangat sederhana dan dapat digunakan pada daerah terpencil dan memanfaatkan potensi yang ada pada daerah tersebut.
- d. Dapat digunakan pada daerah irigasi atau tempat penampungan air (kolam). (Indriani, Hendra, M, & Herawati, 2013)
- e. Ketersediaan air tergantung kepada kondisi hutan disekitar daerah tersebut dimana kelestarian hutan akan menjamin ketersediaan air

Kebutuhan akan energi listrik pun dapat diselesaikan dengan membangun PLTMH dan salah satu jenis PLTMH yang digunakan adalah *crossflow turbine*. Dari segi teknologi, PLTMH jenis ini memiliki konstruksi yang masih sederhana, mudah dioperasikan dan kuat, serta mudah dalam perawatan dan penyediaan suku cadang, dan menghasilkan tenaga yang sangat murah. Secara sosial, PLTMH lebih mudah diterima masyarakat luas dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya seperti PLTN. (Damastuti, 1997).

Prinsip kerja dari PLTMH ini sangatlah sederhana dimana pada prosesnya hanya memanfaatkan energi dari debit aliran dan beda ketinggian jatuh air menjadi daya mekanik yang berhasil dikonversikan oleh mesin-mesin fluida tenaga. Selain debit dan beda ketinggian air, hal yang harus diperhatikan dalam PLTMH ini adalah mesin fluida nya, dalam proses pengkonversian energi potensial dan energi kinetik dari air digunakan alat mesin fluida tenaga berjenis turbin air.

2.4 Mesin-Mesin Fluida

Mesin-mesin fluida adalah mesin -mesin yang berfungsi untuk mengubah energi mekanis menjadi energi fluida kerja (energi potensial dan energi kinetik) atau sebaliknya. Secara umum mesin luida dapat dibagi atas 2 golongan utama yaitu (Dietsel, 1980) :

1. Mesin Kerja

Merupakan mesin luida yang berfungsi mengubah energi mekanis menjadi energi fluida, misalnya : Pompa, Kompresor, Blower dan lain-lain

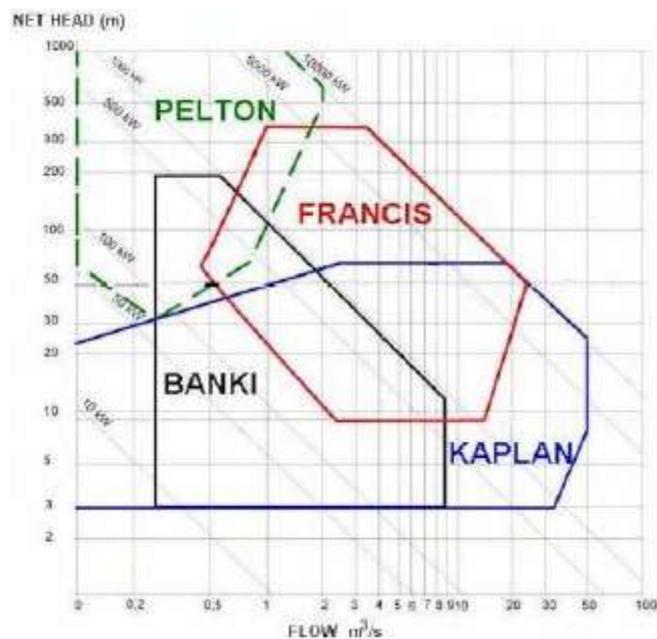
2. Mesin Tenaga

Merupakan mesin fuida yang berfungsi mengubah energi fluida menjadi energi mekanis, misalnya : Turbin Air, Turbin Uap dan Turbin Gas.

2.5 Klasifikasi Turbin Air

Turbin air merupakan alat untuk mengubah energi air menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros. Dengan kemajuan ilmu Mekanika fluida dan Hidrolika serta memperhatikan sumber energi air yang cukup banyak tersedia di pedesaan akhirnya timbullah perencanaan-perencanaan turbin yang divariasikan terhadap tinggi jatuh (*head*) dan debit air yang tersedia. Dari itu maka masalah turbin air menjadi masalah yang menarik dan menjadi objek penelitian untuk mencari sistim, bentuk dan ukuran yang tepat dalam usaha mendapatkan efisiensi turbin yang maksimum(Yusreza Caesar, 2016).

Pemilihan jenis turbin berdasarkan head dan debit aliran dilakukan untuk mengidentifikasi jenit turbin yang sesuai dengan data survei yang didapatkan. Gambar pemilihan jenis turbin berdasarkan head dan debit dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Pemilihan Jenis Turbin Berdasarkan Head Dan Debit

(Sumber : Husin Ibrahim, 2015)

Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis, turbin air dibedakan menjadi 2 kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi (Edi Susanto, 2009).

1. Turbin Impuls.

Semua energi potensial air pada turbin ini dirubah menjadi menjadi energi kinetis sebelum air masuk/ menyentuh sudu-sudu *runner* oleh alat pengubah yang disebut nozel. Setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga menjadi perubahan momentum (impuls). Yang termasuk jenis turbin ini antara lain : *Turbin Pelton* dan *Turbin Cross-Flow*.

a. Turbin Pelton

Turbin pelton merupakan turbin impuls yang terdiri satu set sudu jalam yang diputar ole pancaran air yang disemprotkan dari satu arah atau lebi alat yang disebut nozel. Turbin pelton adala turbin yang cocok digunakan untuk head yang tinggi. Gambar turbin pelton dapat dilihat pada gambar 2.



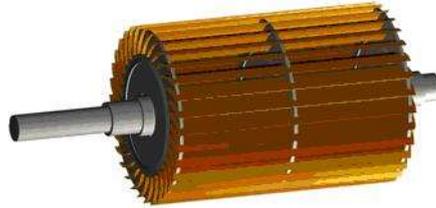
Gambar 2. Turbin Pelton

Sumber. http://en.wikipedia.org/wiki/pelton_wheel

b. Turbin Crosslow

Salah satu jenis turbin impuls yang juga dikenal dengan nama turbin Michell banki yang merupakan penemunya. Selain itu juga disebut juga turbin Obsberger yang merupakan perusahaan yang memproduksi turbin

crossflow turbin crossflow dapat dioperasikan pada head 1-200 meter..
Gambar turbin crossflow dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Turbin Crosslow

Sumber. http://en.wikipedia.org/wiki/pelton_wheel

Berdasarkan posisi penyemburan atau sudut nosel terhadap sumbu roda jalan (*runner*) turbin *cross-flow* dapat dibedakan atas tiga jenis yaitu :

1. Posisi vertikal

Jenis turbin air *cross-flow* dengan posisi penyemburan vertikal yaitu sisi masuk air secara vertikal membentuk sudut 90^0 dengan lantai atau garis horizontal. Gambar turbin crossflow dengan posisi vertikal dapat dilihat pada gambar 4.

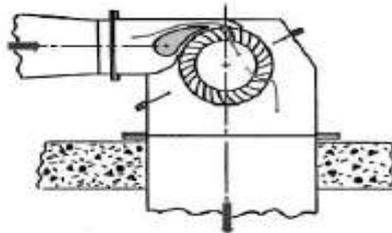


Gambar 4. Turbin Crosslow Vertikal

Sumber : dietzel, 1993

2. Posisi Horizontal

Posisi penyemburan sisi masuk air membentuk garis horizontal. Gambar turbin crossflow dengan posisi horizontal dapat dilihat pada gambar 5.

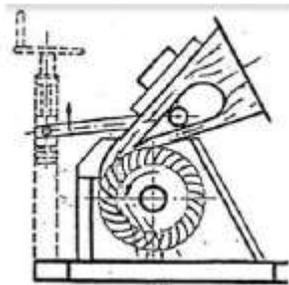


Gambar 5. Turbin Crosslow Horizontal

Sumber : dietzel, 1993

3. Posisi Miring

Posisi penyemburan miring yaitu dengan sudut miring antara 0° – 90° . Air masuk atau posisi penyemburan membentuk sudut miring 0° – 90° dengan lantai. Gambar turbin crossflow dengan posisi miring dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Turbin Crosslow miring

Sumber : dietzel, 1993

2. Turbin Reaksi.

Pada turbin reaksi, seluruh energi potensial dari air dirubah menjadi energi kinetis pada saat air melewati lengkungan sudu-sudu pengarah, dengan demikian putaran *runner* disebabkan oleh perubahan momentum oleh air. Yang termasuk jenis turbin reaksi diantaranya : *Turbin Francis* dan *Turbin Propeller*(Edi Susanto, 2009).

a. Turbin Francis

Turbin Francis adalah turbin yang terdiri dari sudu pengarah dan sudu jalan dan kedua sudu tersebut terendam didalam air, air pertama masuk pada terusan berbentuk rumah keong perubahan energi seluruhnya terjadi pada sudu pengarah dan sudu gerak. Turbin Francis dapat dilihat pada gambar 7.

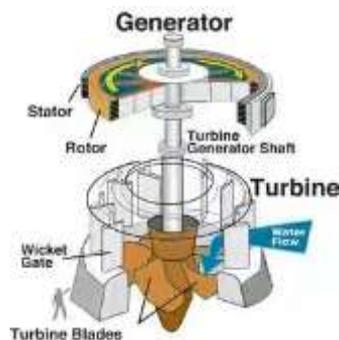


Gambar 7. Turbin Francis

Sumber. http://en.wikipedia.org/wiki/francis_wheel

b. Turbin Propeller

Turbin propeller merupakan turbin aliran aksial, propeller biasanya memiliki 6 sudu gambar turbin propeller dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Turbin Propeller

Sumber. http://en.wikipedia.org/wiki/propeller_wheel

2.6 Dasar Teori Turbin Crossflow

Transfer energi berlangsung dari air ke *runner* sebagai akibat dari perubahan momentum yang terjadi ketika air mengalir melalui sudu dari *runner* turbin, sehingga turbin merupakan komponen atau peralatan paling penting pada pembangkit listrik tenaga air (PLTMH).

Energi yang dimiliki air yang mengalir dikonversi menjadi energi mekanik dalam turbin menggunakan salah satu dari dua mekanisme dasar. Mekanisme yang pertama adalah prinsip impuls, yang mengekstraksi energi kinetik air dalam bentuk jet yang menyerang sudu *runner* dan mengubahnya menjadi kerja mekanik.

Energi potensial dan energi kinetik air dalam bentuk penurunan tekanan di dalam turbin dan mengkonversinya menjadi kerja mekanik. Semua mesin turbo atau turbin hubungan desain dasar berasal menggunakan hukum momentum. Hukum kedua Newton menyatakan bahwa jumlah gaya eksternal yang bekerja pada sistem bergerak adalah sama dengan tingkat waktu perubahan momentum dari sistem (Mafrudin, 2016).

$$F = m \times v \quad (7)$$

Dimana :

F = momentum (kg.m/s²)

m = laju aliran massa fluida (kg/s)

v = kecepatan fluida (m/s)

2.7 Perencanaan Runner Turbin Crossflow

Runner merupakan komponen utama pada turbin air Cross-flow, yang proses kerjanya adalah berputaran. Putaran pada runner ini dihasilkan akibat adanya gaya dorong air yang menumbuk kuat pada sudu-sudu runner. Perencanaan atau perhitungan parameter runner turbin cross-flow menggunakan persamaan-persamaan berikut (Mafrudin, 2016).

a. Diameter luar (D_1) dan lebar sudu turbin (L)

Untuk mengetahui luar runner turbin dapat diperoleh dari prinsip kontinuitas dimana debit dihitung dari luas dan kecepatan fluida, sehingga untuk mengetahui luas runner turbin yaitu :

$$LD = \frac{2.63 \times Q}{\sqrt{H}} \quad (8)$$

Dimana :

H = tinggi jatuh air (m)

Q = debit aliran (m³/detik)

b. Diameter dalam turbin (D_2)

Untuk menghitung diameter dalam turbin digunakan persamaan berikut

$$D_2 = \frac{2}{3} \times D_1 \quad (9)$$

c. Jarak antar sudu (K)

Untuk menghitung jarak antar sudu turbin digunakan persamaan berikut :

$$K = 0,175 D_1 \quad (10)$$

d. Jumlah sudu (n)

Jumlah sudu adalah salah satu pertimbangan penting dari desain runner. Terlalu besar jumlah sudu runner akan meningkatkan kerugian dan biaya pembuatan turbin karena memerlukan material yang lebih banyak. Di sisi lain, sejumlah kecil jumlah sudu runner akan meningkatkan kerugian dengan pemisahan aliran pada sisi belakang jumlah sudu.

$$N = \frac{\pi \times D_1}{K} \quad (11)$$

e. Jumlah putaran turbin

Untuk menghitung jumlah putaran turbin digunakan persamaan berikut :

$$n = \frac{39,87 \times \sqrt{H}}{D_1} \quad (12)$$

2.8 Daya yang dihasilkan Turbin

Daya poros turbin adalah hasil dari terkonversinya energi jatuh air oleh turbin menjadi putaran turbin yang dapat menggerakkan generator. Daya poros turbin dapat dihitung dengan rumus (Mafrudin, 2016) :

$$P \text{ turbin} = \tau \times \omega \quad (13)$$

Dimana :

τ = Momen gaya (Nm)

ω = kecepatan sudut (radian/detik)

$P \text{ turbin}$ = Daya poros turbin (watt)

Untuk menghitung daya turbin, perlu dihitung terlebih dahulu besarnya momen gaya (torsi). Momen gaya atau biasa disebut dengan torsi merupakan gaya yang dihasilkan dari putaran benda terhadap porosnya untuk menggerakkan benda lain (puli generator).

Dalam sebuah pembangkit listrik khususnya pada turbin crossflow torsi ini sangat dipengaruhi oleh laju aliran massa fluida dan jari-jari turbin. Semakin besar 2 variabel diatas maka torsi yang dihasilkan oleh turbin akan semakin besar. besarnya torsi ini dapat dihiutng dengan menggunakan rumus (Arismunandar, 2004) :

$$\tau = F \times r \quad (14)$$

Dimana :

$$F = \text{momentum} = m \times v \text{ (kg.m/s}^2\text{)}$$

r = jari-jari turbin (m)

Sedangkan kecepatan sudut dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Mafrudin, 2016) :

$$\omega = 2 \times \pi \times \frac{n}{60} \quad (15)$$

Dimana :

n = kecepatan putaran turbin (rpm)

2.9 Efisiensi Mekanik Turbin

Efisiensi turbin secara eksperimen diperoleh dari membandingkan output dan input yang terpakai. Dimana output merupakan daya yang dihasilkan turbin sedangkan input yaitu daya air yang digunakan. Dengan perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin dan daya yang air yang digunakan maka dapat diketahui efisiensi mekanik dari turbin. Efisiensi mekanik turbin juga menandakan keberhasilan dalam suatu pembuatan turbin. Semakin tinggi efisiensi suatu turbin maka semakin baik kualitas dari turbin dalam memanfaatkan energi air. Untuk mengetahui efisiensi mekanik turbin air dapat digunakan persamaan berikut [Acharya, et al. 2015].

$$\text{Efisiensi turbin} = \frac{\text{daya mekanik turbin}}{\text{Energi potensial air}} \times 100 \% \quad (16)$$

2.10 Daya Yang Dihasilkan Generator

Untuk mengetahui besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh generator dapat digunakan persamaan berikut [*Poernomo sari, dan Fasha 2012*].

$$P_g = V \cdot I \quad (17)$$

Dimana:

P_g = Daya listrik yang dihasilkan generator (Watt)

V = Beda potensial/tegangan (Volt)

I = Kuat arus (Ampere)