

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

PLTA merupakan salah satu sumber yang pertama dari energi mekanik dan sumber daya energi terbarukan tertua di dunia. Referensi yang dikenal paling awal adalah ditemukan dalam sebuah tulisan Yunani dari 85 SM dan ada referensi dalam teks Romawi terdahulu. Roda sederhana yang digunakan untuk menggerakkan pabrik dan menggiling gandum dikenal di Cina selama abad ke-1, dan pada awal milenium kedua teknologi secara luas dikenal di seluruh Asia dan Eropa (*Breeze, 2014*).

Pembangkit listrik tenaga air adalah bentuk sumber daya energi terbarukan, yang berasal dari air yang mengalir. Untuk menghasilkan listrik, maka sumber air yang digunakan sebagai sumber energi harus bergerak (air terjun atau air mengalir). Ketika air yang jatuh dari ketinggian tertentu akibat gaya gravitasi, maka di dalam air tersebut memiliki energi potensial yang dapat digunakan sebagai sumber energi listrik. Sebelum dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin, energi potensial yang digunakan dikonversi terlebih dahulu menjadi energi kinetik. Energi kinetik dari air kemudian memberikan daya dorong (tekanan) terhadap sudu atau baling-baling turbin, sehingga bentuk energi kinetik dari air dikonversi menjadi energi mekanik. Turbin tersebut digunakan untuk menggerakkan rotor generator yang kemudian mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dan sistem ini disebut pembangkit listrik tenaga air. Sistem listrik tenaga air pertama dikembangkan pada tahun 1880. Menurut lembaga energi internasional (IEA), pasokan pembangkit listrik tenaga air skala besar saat ini mencapai 16% dari kebutuhan listrik dunia (*Abdul Nasir, 2014*).

2.1.1 Potensi PLTA di Indonesia

Indonesia adalah negara yang kaya akan sumber daya alam, salah satunya potensi energi terbarukan (air). Energi air merupakan sumber energi terbarukan yang sangat potensial di Indonesia. Apabila pemanfaatan energi tersebut dilakukan secara meluas di seluruh wilayah Indonesia maka peluang untuk keluar dari krisis energi akan semakin besar. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)

Pembangkit Listrik Tenaga Mini/makro Hidro (PLTM/PLTMH) sebesar 770 MW dan Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Indonesia diperkirakan sebesar 75.000 Megawatt (MW). Dari potensi tersebut baru sekitar 6 persen yang telah dikembangkan. Tabel 2.1 menunjukkan potensi energi terbarukan (tenaga air) di Indonesia.

Tabel 2.1 Potensi Energi Terbarukan (Tenaga Air) Di Indonesia

No	Pulau	Potensi (MW)
1	Sumatera	15.600
2	Jawa	4.200
3	Kalimantan	21.600
4	Sulawesi	10.200
5	Bali-NTT-NTB	620
6	Maluku	430
7	Papua	22.350
Jumlah		75.000

Sumber: (Kementrian Energi Dan Sumber Daya Mineral: 2014)

2.1.2 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) adalah salah satu alternatif sumber pembangkit energi. Umumnya PLTMH adalah pembangkit listrik tenaga air jenis " *run-of-river*" dimana *head* diperoleh tidak dengan cara membangun bendungan besar, tetapi dengan mengalihkan sebagian aliran air sungai melalui pipa atau saluran untuk turbin ke salah satu sisi sungai dan menjatuhkannya lagi ke sungai yang sama. Jumlah aliran air yang dialihkan disesuaikan dengan kebutuhan yang diperlukan. PLTMH merupakan tipe terkecil dari pembangkit listrik tenaga air dan merupakan suatu instalasi pembangkit listrik tenaga air dengan kapasitas rendah. Dimana daya listrik yang dihasilkan antara 5 sampai 100 kW. Dalam memanfaatkan pembangkit listrik tenaga mikro hirdo (PLTMH) sebagai sumber energi listrik maka perlu dilakukan identifikasi dengan tepat mengenai potensi dari suatu wilayah atau tempat dan merancang sistem pembangkit listrik yang sesuai dengan kondisi lingkungan tersebut. Dengan identifikasi dan rancangan yang baik maka pembangkit listrik tenaga mikro hirdo (PLTMH) tidak akan menyebabkan gangguan pada aliran sungai ataupun dampak yang diakibatkan oleh pembangkit listrik tenaga mikro hirdo dapat diminimalkan

sehingga dapat hidup berdampingan dengan ekologi pada lokasi PLTMH (*Abdul Nasir, 2014*).

Keuntungan penggunaan turbin air (PLTMH) sebagai pembangkit listrik, (*Abdul Nasir, 2014*) antara lain:

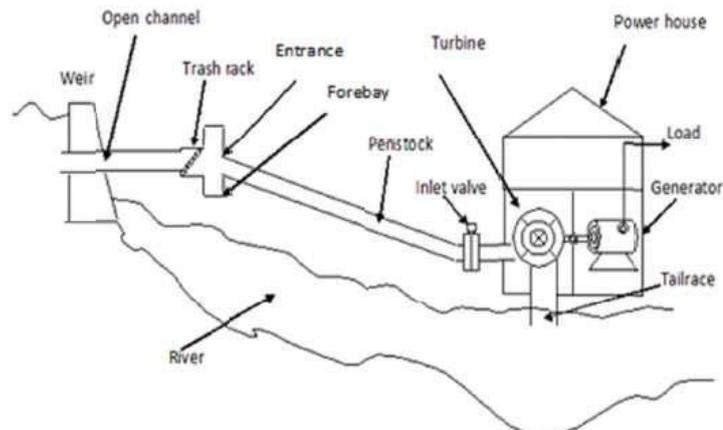
- a. Biaya operasional relatif murah karena berasal dari energi terbarukan sehingga penggunaan turbin sangat menguntungkan untuk penggunaan dalam waktu yang lama
- b. Turbin–turbin pada PLTMH dapat dioperasikan atau dihentikan pengoperasiannya setiap saat
- c. Dengan perawatan yang baik, turbin dapat beroperasi dalam waktu yang cukup lama
- d. Sumber energi yang digunakan adalah energi air sehingga tidak mengakibatkan pencemaran udara dan air

Kekurangan dari penggunaan turbin air (PLTMH) adalah, antara lain:

- a. Masa persiapan suatu proyek PLTMH pada umumnya memakan waktu yang cukup lama sehingga untuk pembuatan memerlukan biaya yang cukup besar
- b. Sumber energi yang digunakan (air) sangat dipengaruhi oleh iklim atau curah hujan.
- c. Pada umumnya dalam sebuah PLTMH terdapat beberapa komponen-komponen besar di antaranya yaitu:
 1. Dam/bendungan pengalihan dan *intake*. Dam pengalih berfungsi untuk mengalihkan air melalui sebuah pembuka di bagian sisi sungai ke dalam sebuah bak pengendap
 2. Bak pengendapan. Bak pengendap digunakan untuk memindahkan partikel-partikel pasir dari air. Fungsi dari bak pengendap adalah sangat penting untuk melindungi komponen-komponen berikutnya dari dampak pasir
 3. Saluran pembawa. Saluran pembawa mengikuti kontur dari sisi bukit untuk menjaga elevasi dari air yang disalurkan
 4. Pipa pesat (*penstock*). *Penstock* dihubungkan pada sebuah elevasi yang lebih rendah ke sebuah roda air, dikenal sebagai sebuah turbin

5. Turbin. Turbin berfungsi mengkonversi energi potensial dan energi kinetik dari air menjadi energi mekanik
6. Generator. Generator berfungsi mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Dimana pemilihan generator disesuaikan dengan daya yang dihasilkan turbin atau sumber daya air yang digunakan.

Secara umum skema PLTMH yang umum digunakan yaitu ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema Diagram PLTMH

Sumber: (Abdul Nasir, 2014)

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) yang cukup tinggi namun dalam penamfaatannya belum maksimal, sehingga kebutuhan energi masih didominasi oleh energi dengan bahan bakar minyak. Tabel 2.2 menjelaskan perbandingan kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) dengan kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik nasional.

Tabel 2.2 Kapasitas Terpasang Pembangkit Tenaga Listrik Nasional

NO.	Tahun	PLTMH Terpasang (MW)	Jumlah Total Pembangkit Yang Terpasang (MW)
1	2008	0,69	31.462,54
2	2009	0,69	31.958,93
3	2010	0,69	33.983,30
4	2011	5,93	39.898,97
5	2012	6,71	45.253,47
6	2013	29,69	50.898,51

Sumber: (Kementrian Energi Dan Sumber Daya Mineral: 2014)

2.2 Turbin Air

2.2.1 Pengertian Turbin Air

Turbin air dapat diartikan sebagai suatu mesin penggerak mula dimana fluida kerjanya adalah air. Turbin secara umum dapat diartikan sebagai mesin penggerak mula dimana energi fluida kerja yang digunakan langsung memutar roda turbin, fluida kerjanya yaitu berupa air, uap air dan gas (Arismunandar, 2004). Berbeda yang terjadi pada mesin torak (motor bakar), pada turbin tidak terdapat bagian mesin yang bergerak translasi. Bagian turbin yang berputar dinamai rotor (*runner* pada turbin *cross-flow*) atau roda turbin, sedangkan bagian yang tidak berputar dinamai stator atau rumah turbin. Roda turbin terletak di dalam rumah turbin dan roda turbin memutar poros daya yang menggerakkan atau memutar bebannya (generator).

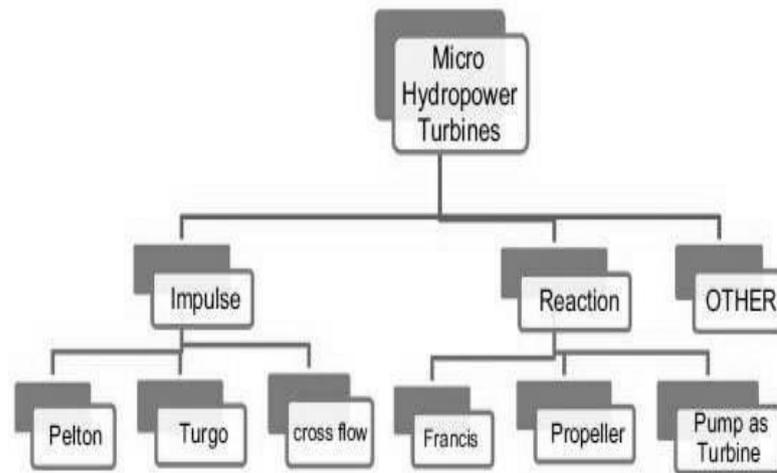
2.2.2 Prinsip Kerja Turbin Air

Pada roda turbin (*runner* pada turbin *Cross-flow*) terdapat sudu yaitu suatu konstruksi lempengan dengan bentuk dan penampang tertentu, air sebagai fluida kerja mengalir melalui ruang di antara sudu turbin tersebut, dengan demikian roda turbin akan dapat berputar dan pada sudu akan ada suatu gaya yang bekerja. Gaya tersebut akan terjadi karena ada perubahan momentum dari fluida kerja air yang mengalir di antara sudu. Sudu hendaknya dibentuk sedemikian rupa sehingga dapat terjadi perubahan momentum pada fluida kerja air tersebut (Arismunandar, 2004).

2.3 Klasifikasi Turbin Air

Turbin air mengubah atau mengkonversi energi kinetik air menjadi energi mekanis. Energi mekanis dikonversi dengan generator listrik menjadi tenaga listrik. Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanis (momentum fluida kerjanya), turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin implus dan turbin reaksi masing-masing dapat diaplikasikan untuk air yang mengalir pada *head* tertentu (Elbatran, et al. 2015).

Gambar 2.2 merupakan klasifikasi berbagai jenis turbin air yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga air (PLTMH).



Gambar 2.2 Klasifikasi Turbin Mikro hidro

Sumber: (Elbatran, et al. 2015)

Sedangkan untuk aplikasi atau pemilihan dari berbagai jenis turbin air sebagai pembangkit listrik dapat menggunakan klasifikasi *head* seperti pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Aplikasi Turbin Mikro hidro Dengan Klasifikasi Head

Tipe Turbin	Klasifikasi <i>Head</i>		
	<i>Higt</i> > 50 m	<i>Medium</i> 10-15 m	<i>Low</i> < 10 m
Implus	<i>Pelton</i>	<i>Cross-flow</i>	
	<i>Turgo</i>	<i>Turgo</i>	<i>Cross-flow</i>
	<i>Multi-jet Pelton</i>	<i>Multi-jet Pelton</i>	
Reaksi			<i>Francis</i>
		<i>Francis (Spiral Case)</i>	<i>Propeler</i>
			<i>Kaplan</i>

Sumber: (Elbatran, et al. 2015)

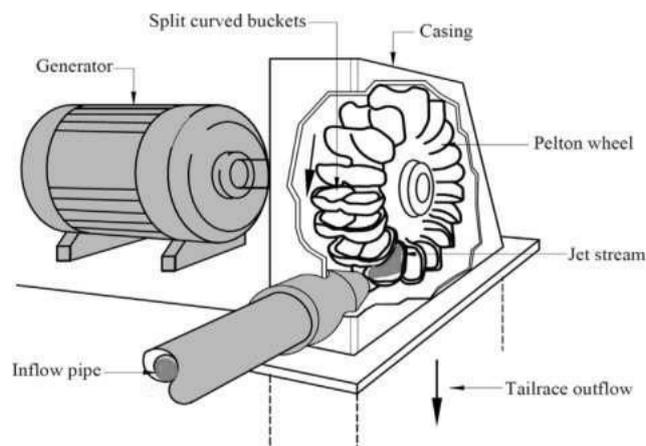
2.3.1 Turbin Implus

Turbin impuls adalah turbin tekanan sama karena aliran air yang keluar dari nosel tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Energi potensial yang dimiliki air dikonversi menjadi energi kinetik dan masuk melalui nosel. Air yang keluar dari nosel yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin. Setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (*impulse*). Sehingga roda turbin akan berputar. Adapun jenis – jenis turbin impuls adalah sebagai berikut:

a. Turbin *Pelton*

Turbin *Pelton* terdiri dari satu set sudu jalan yang diputar oleh semburan air yang disemprotkan dari satu atau beberapa nosel. Turbin *Pelton* adalah salah satu dari jenis turbin air yang paling efisien dibandingkan dengan turbin implus lainnya.

Bentuk sudu turbin terdiri dari dua bagian yang simetris. Sudu dibentuk sedemikian sehingga semburan air akan mengenai titik tengah sudu dan pancaran air tersebut akan berbelok ke kedua arah sehingga bisa membalikkan semburan air dengan baik dan membebaskan sudu dari gaya-gaya samping. Untuk turbin dengan daya yang besar, sistem penyemprotan airnya dibagi melalui beberapa nosel. Dengan demikian diameter semburan air bisa diperkecil dan sudu lebih kecil. Turbin *Pelton* untuk pembangkit skala besar membutuhkan *head* lebih kurang 150 meter tetapi untuk skala mikro *head* 20 meter sudah mencukupi. (Loots, et al. 2015). Gambar 2.3 menunjukkan visualisasi dari turbin *Pelton*.



Gambar 2.3 Turbin *Pelton*

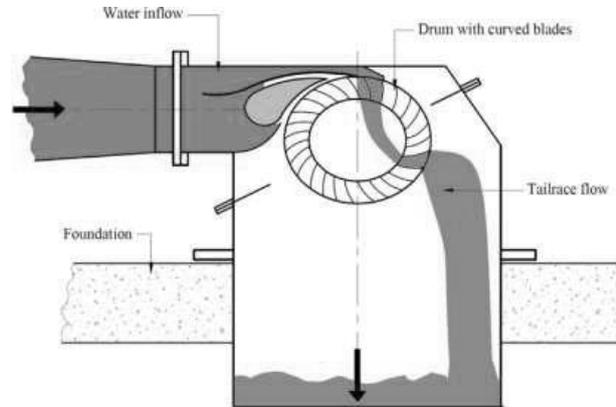
Sumber: (Loots, et al. 2015)

b. Turbin *Cross-flow*

Turbin *Cross-flow* mempunyai alat pengarah air sehingga dengan demikian celah bebas dengan sudu-sudu di sekeliling roda hanya sedikit. Turbin ini baik sekali digunakan untuk pembangkit listrik tenaga air yang kecil dengan daya kurang lebih 750 kW. *Head* yang dapat digunakan ialah di atas 1 m sampai dengan 200 m dan kapasitasnya antara 0,02 m³/dt sampai dengan 7 m³/dt. Dan kecepatan putarannya antara 60 rpm sampai 200 rpm tergantung kepada diameter roda.

Prinsip kerja dari turbin *Cross-flow* adalah air yang keluar dari nosel masuk ke *runner* menumbuk sudu-sudu tahap pertama dan kemudian air tersebut keluar dari celah

sudu-sudu tahap pertama lalu melewati ruang kosong dalam *runner* yang selanjutnya menumbuk sudu-sudu tahap kedua dan akhirnya air itu keluar dari celah sudu-sudu tingkat kedua menuju kolam bawah. (Loots, et al. 2015). Turbin *Cross-flow* ditunjukkan pada gambar 2.4.

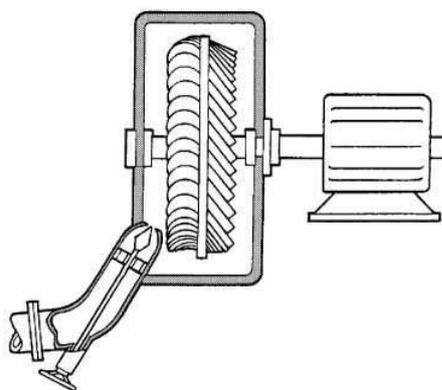


Gambar 2.4 Turbin *Cross-flow*

Sumber: (Loots, et al. 2015)

c. Turbin *Turgo*

Seperti turbin *Pelton*, turbin *Turgo* termasuk jenis turbin impuls, tetapi sudunya berbeda. Turbin *Turgo* dapat beroperasi pada *head* 3 s/d 150 m. Pancaran air dari nosel membentur sudu pada sudut 20° . Kecepatan putar turbin *Turgo* lebih besar dari turbin *Pelton*. Akibatnya dimungkinkan transmisi langsung dari turbin ke generator sehingga menaikkan efisiensi total sekaligus menurunkan biaya perawatan. (Paish, 2002). Gambar 2.5 menunjukkan visualisasi dari turbin *Turgo*.



Gambar 2.5 Turbin *Turgo*

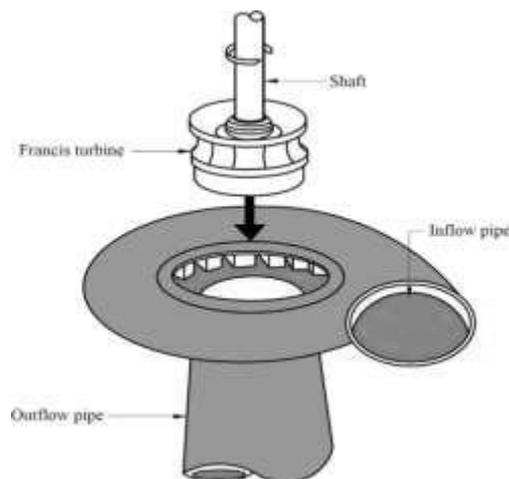
Sumber: (Paish, 2002)

2.3.2 Turbin Reaksi

Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga *runner* (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. Proses ekspansi fluida kerja pada turbin reaksi terjadi pada sudu tetap dan sudu geraknya. Air mengalir memasuki roda turbin melalui sudu - sudu pengarah dengan tekanan yang tinggi. Pada saat air yang bertekanan tersebut mengalir ke sekeliling sudu-sudu, roda turbin akan berputar penuh. Energi yang ada pada air akan berkurang ketika meninggalkan sudu. Energi yang hilang tersebut telah diubah menjadi energi mekanis oleh roda turbin. Dilihat dari konstruksinya, turbin reaksi ada dua jenis yaitu:

a. Turbin *Francis*

Turbin *Francis* merupakan salah satu jenis turbin reaksi. Turbin *Francis* menggunakan sudu pengarah. Sudu pengarah berfungsi untuk mengarahkan air masuk secara tangensial. Sudu pengarah pada turbin *Francis* dapat merupakan suatu sudu pengarah yang tetap ataupun sudu pengarah yang dapat diatur sudut atau kemiringannya. Turbin *Francis* diaplikasikan diantara sumber air tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluar. Untuk penggunaan pada berbagai kondisi aliran air penggunaan sudu pengarah yang dapat diatur merupakan pilihan yang tepat. (Loots, et al. 2015). Turbin *Francis* ditunjukkan pada gambar 2.6.



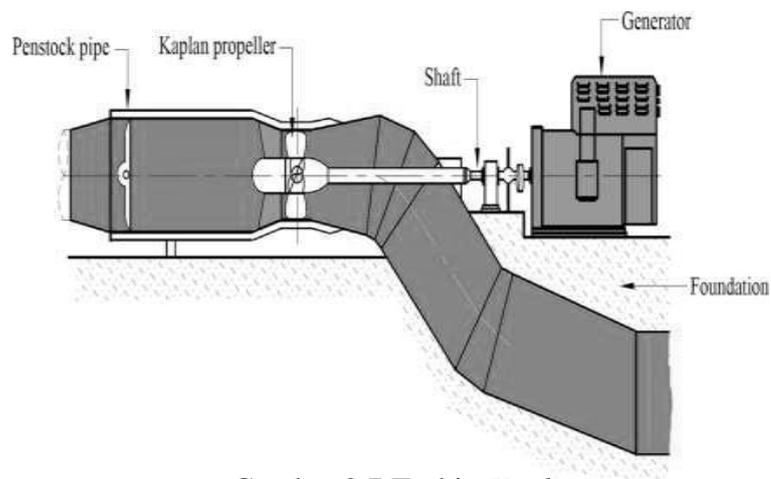
Gambar 2.6 Turbin *Francis*

Sumber: (Loots, et al. 2015)

b. Turbin *Kaplan*

Turbin *Kaplan* prinsip kerjanya menggunakan prinsip reaksi. Turbin *Kaplan* dapat beroperasi pada kecepatan tinggi sehingga ukuran roda turbin lebih kecil dan dapat dihubungkan langsung dengan generator. Dalam kondisi pada beban tidak penuh turbin kaplan mempunyai efisiensi paling tinggi, hal ini dikarenakan sudu-sudu turbin

Kaplan dapat diatur menyesuaikan dengan beban yang ada. Turbin *Kaplan* banyak dipakai pada instalasi pembangkit listrik tenaga air sungai, karena turbin ini mempunyai kelebihan dapat menyesuaikan *head* yang berubah-ubah sepanjang tahun. Turbin ini mempunyai roda jalan yang mirip dengan baling-baling pesawat terbang. Bila baling-baling pesawat terbang berfungsi untuk menghasilkan gaya dorong, roda jalan pada turbin *Kaplan* berfungsi untuk mendapatkan gaya yaitu gaya putar yang dapat menghasilkan torsi pada poros turbin. Berbeda dengan roda jalan pada *Francis*, sudu-sudu pada roda jalan turbin *Kaplan* dapat diputar posisinya untuk menyesuaikan kondisi beban turbin. (Loots, et al. 2015). Visualisasi turbin *Kaplan* dapat dilihat pada gambar 2.7.

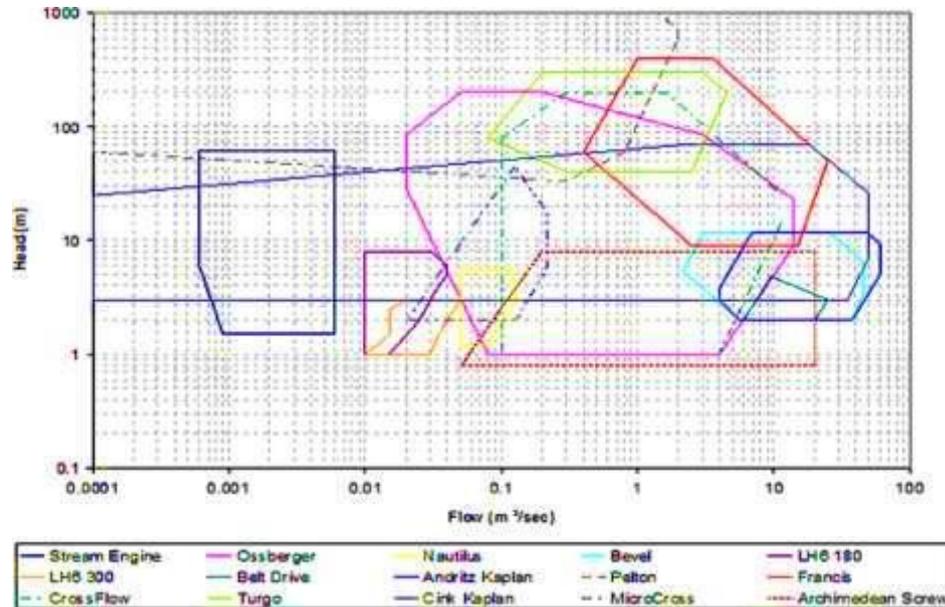


Gambar 2.7 Turbin *Kaplan*

Sumber: (Loots, et al. 2015)

2.3.3 Perbandingan Karakteristik Turbin

Perbandingan karakteristik turbin dapat kita lihat pada grafik head (m) dan flow (m^3/s) gambar 2.8.



Gambar 2.8 Grafik Perbandingan Karakteristik Turbin

Sumber: (Zidonis, and George, 2015)

Dapat dilihat pada Gambar 2.8 turbin Francis mempunyai karakteristik yang berbeda dengan yang lainnya yaitu turbin Francis dapat beroperasi pada head yang rendah atau beroperasi pada head yang tinggi. Turbin Pelton adalah turbin yang beroperasi pada head tinggi dengan debit yang rendah. Sedangkan untuk turbin Cross-flow dapat beroperasi pada head rendah dengan kapasitas aliran yang rendah pula.

Secara umum pemilihan turbin didasarkan pada head air yang didapatkan dan kurang lebih pada rata-rata debitnya. Umumnya, turbin impuls digunakan untuk tempat dengan head tinggi, dan turbin reaksi digunakan untuk tempat dengan head rendah.

2.4 Turbin *Cross-flow*

Turbin tipe ini dibuat pertama kali di Eropa. Nama *Cross-flow* diambil dari kenyataan bahwa air melintasi kedua sudu gerak atau *runner* dalam menghasilkan putaran (rotasi). Seorang insinyur Australia yang bernama A.G.M. Michell pada tahun 1903 menemukan prinsip kerja turbin *Cross-flow* namun belum dipatenkan. Kemudian turbin ini dikembangkan dan dipatenkan di Jerman Barat oleh Prof. Donat Banki

sehingga turbin ini diberi nama Turbin *Banki*. Prof. Donat Banki adalah nama ahli teknik yang mengembangkan prinsip – prinsip turbin tersebut yaitu turbin ini dilengkapi dengan pipa hisap, dan sebagai akibatnya daya yang dihasilkan turbin, proses kerja dan randemen turbin menjadi lebih baik. Turbin *Cross-flow* ini mempunyai arah aliran tegak lurus dengan sumbu turbin (radial). Turbin ini mempunyai alat pengarah yang disebut nosel sehingga dengan demikian celah bebas dengan sudu-sudu di sekeliling roda hanya sedikit. Karena itu pada keadaan beban penuh perputaran roda terjadi sedikit kemacetan-kemacetan, yang menimbulkan sedikit tekanan lebih. Turbin *cross-flow* terdiri dari tiga bagian utama yaitu roda jalan (*runner*), alat pengarah (nosel) dan rumah turbin. Dalam aplikasinya turbin *Cross-flow* baik sekali digunakan untuk pusat tenaga air yang kecil dengan daya kurang lebih 750 kW. Tinggi air jatuh yang bisa digunakan di atas 1 m sampai 200 m dan kapasitas antara 0,02 m³/s sampai 7 m³/s [Dietzel, 1993].

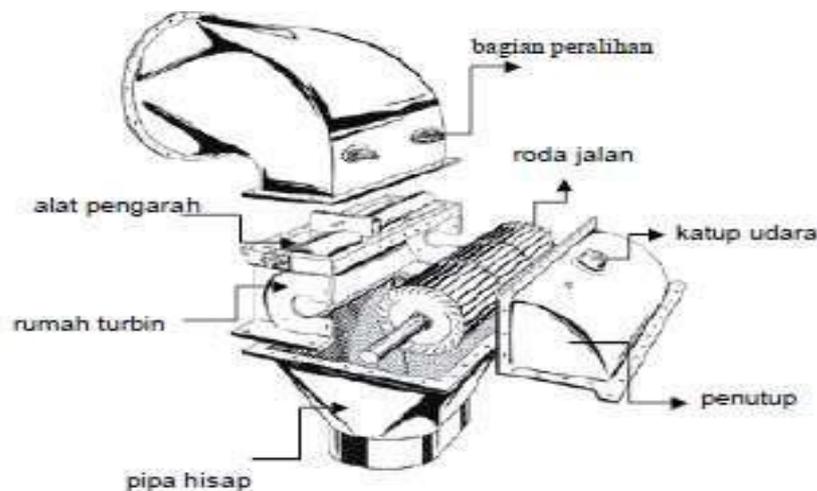
Penemuan turbin ini sangat didasarkan pada usaha untuk mencari jenis turbin baru yang lebih kecil, sederhana dan lebih murah dibandingkan dengan jenis turbin yang lainnya. Sebagai hasilnya, turbin air *Cross-flow* yang hanya memerlukan proses pembuatan yang sederhana, sepertinya dapat memenuhi kita, meskipun belum ada pembangkit daya yang besar yang pernah dibangun dengan menggunakan turbin jenis ini. Turbin air *Cross-flow* sangat terkenal untuk pembangkit daya ukuran kecil hingga sedang. Untuk jangkauan daya yang dapat dihasilkan, turbin air *Cross-flow* telah dapat menggantikan tempat mesin konversi daya air yang lain, seperti kincir air yang sederhana sampai turbin impuls dan reaksi yang rumit pembuatannya.

Turbin air *Cross-flow* yang selama ini dibuat termasuk jenis turbin air impuls radial. Aliran air masuk ke turbin melalui sebuah pipa pancar (nosel) dengan penampang segi empat. Aliran melewati sudu gerak turbin sebanyak dua kali dengan arah relatif tegak lurus poros turbin. Dalam hal ini tidak ada aliran arah aksial, sehingga tidak terdapat gaya – gaya yang bekerja dalam arah poros turbin. Air masuk roda gerak turbin ke sudu gerak tingkat pertama dari arah luar roda menuju ke arah tegak lurus poros, kemudian aliran air melalui bagian tengah roda gerak yang kosong dan airnya akan mengenai sudu gerak untuk kedua kalinya dan kemudian keluar turbin. Di antara tingkat pertama dan tingkat kedua aliran membentuk jet pada daerah terbuka dengan tekanan yang sama dengan tekanan atmosfer. Aliran yang terjadi secara fisik harus memenuhi prinsip kekekalan massa. Pada turbin impuls *Pelton* beroperasi pada *head*

relatif tinggi, sehingga pada *head* yang rendah operasinya kurang efektif atau efisiensinya rendah. Karena alasan tersebut, turbin *Pelton* jarang dipakai secara luas untuk pembangkit listrik skala kecil. Sebagai alternatif turbin jenis impuls yang dapat beroperasi pada *head* rendah adalah turbin *Cross-flow*.

Air yang masuk sudu diarahkan oleh alat pengarah yang sekaligus berfungsi sebagai nosel seperti pada turbin *Pelton*. Prinsip perubahan energi adalah sama dengan turbin impuls *Pelton* yaitu energi kinetik dari pengarah dikenakan pada sudu-sudu pada tekanan yang sama. Turbin *Cross-flow* menggunakan nosel persegi panjang yang lebarnya sesuai dengan lebar *runner*. *Runner* turbin dibuat dari beberapa sudu yang dipasang pada sepasang piringan paralel. Pancaran air masuk turbin dan mengenai sudu sehingga terjadi konversi energi kinetik menjadi energi mekanis (putaran). Air mengalir keluar membentur sudu dan memberikan energinya (lebih rendah dibanding saat masuk) kemudian meninggalkan turbin

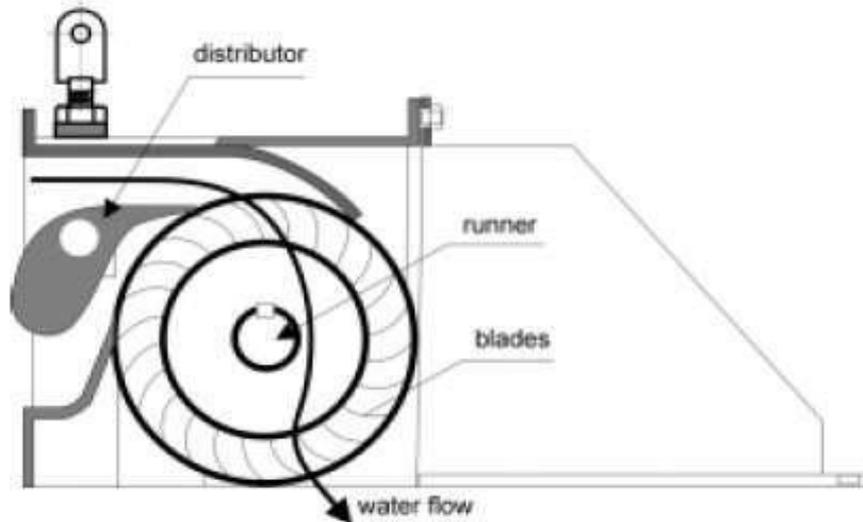
Komponen – komponen pada konstruksi turbin *Cross-flow* ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Konstruksi Turbin *Cross-flow*

Sumber: (Dietzel, 1993)

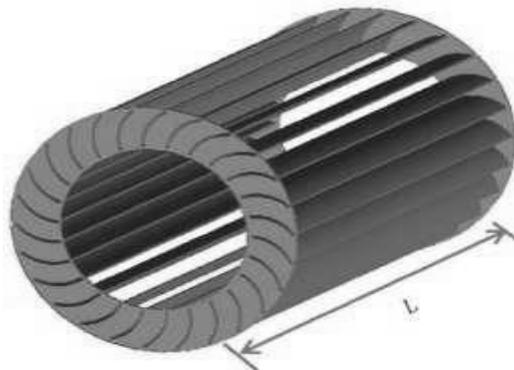
Turbin *Cross-flow* yang direncanakan dengan menggunakan rumah turbin yang sedemikian rupa dalam bentuk yang sederhana sehingga mudah diangkut dan dipasang. Pada turbin ini digunakan sebuah katup (*valve*) yang berbentuk khusus yang berfungsi untuk mengatur kapasitas dan arah aliran air. Gambar 2.10 menunjukkan aliran masuk turbin *Cross-flow*.



Gambar 2.10 Aliran Masuk Turbin *Cross-flow*

Sumber: (Poernomo sari, dan Fasha, 2012).

Turbin *Cross-flow* merupakan turbin pancaran ke dalam. Dan karena pada dasarnya alirannya adalah radial, diameter *runner* tidak tergantung pada besarnya tumbukan air tetapi dipengaruhi oleh *head* dan debit air yang digunakan, sedangkan panjang atau lebar *runner* dapat ditentukan berdasarkan lebar nosel dan tanpa tergantung sejumlah air. Visualisasi runner turbin *Cross-Flow* ditunjukkan pada gambar 2.11.



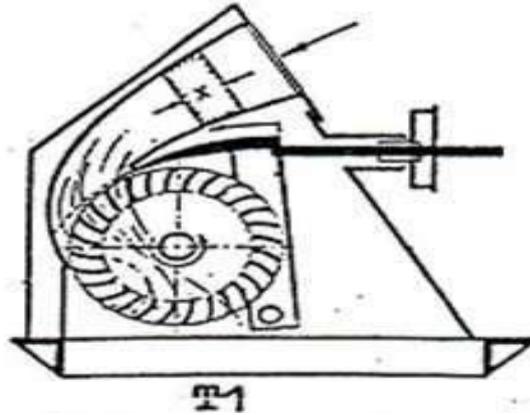
Gambar 2.11 *Runner* Turbin *Cross-Flow*

Sumber: (Elbatran, et al. 2015)

2.5 Jenis-Jenis Turbin Air *Cross-flow*

Turbin *Cross-flow* secara umum dapat dibagi dalam dua tipe. Kedua tipe turbintersebut dapat dilihat seperti pada gambar berikut ini :

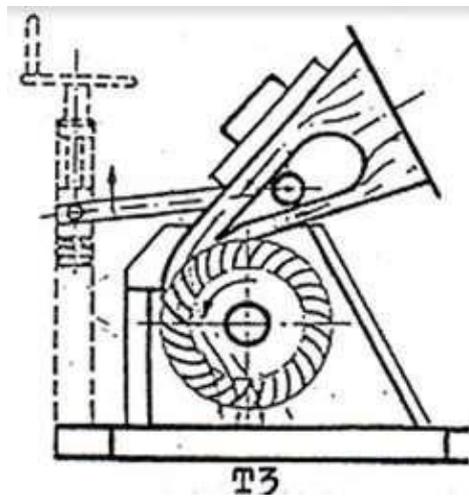
- a. Tipe T1, yaitu Turbin *Cross-Flow* kecepatan rendah, dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Turbin *Cross-flow* Kecepatan Rendah

Sumber: (Hatib, dan Ade Larasakti, 2013)

- b. Tipe T3, yaitu Turbin *Cross-flow* kecepatan tinggi, dapat dilihat pada gambar 2.13.

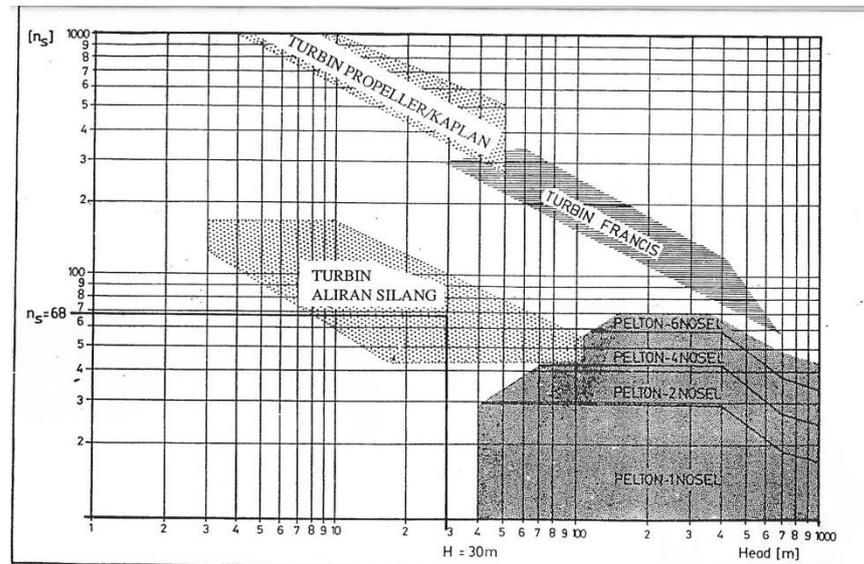


Gambar 2.13 Turbin *Cross-flow* Kecepatan Tinggi

Sumber: (Hatib, dan Ade Larasakti, 2013)

2.6 Teori Turbin *Cross-flow*

Sebagai suatu turbin aliran radial atmosferik, yang berarti bekerja pada tekanan atmosfer, turbin *Cross-flow* menghasilkan daya dengan mengkonversikan energi kecepatan pancaran air. Meninjau dari kecepatan spesifiknya, ia berada diantara turbin *Pelton* dan turbin *Francis* aliran campur yang dapat dilihat pada gambar 2.13 .



Gambar 2.14 Pemilihan Jenis Turbin Berdasarkan Aliran Silang Menggunakan N_s dan *Head*

(Sumber : Pedoman Rekayasa Tenaga Air Teknik Mesin UNSRI,1995)

Turbin *Cross-flow* terdiri atas dua bagian utama, yaitu *nozzle* dan *runner*. Dua buah piringan sejajar disatukan pada lingkaran luarnya oleh sejumlah sudu membentuk konstruksi yang disebut *runner*. *Nozzle* mengeluarkan pancaran air ke *runner* dan masuknya dengan sudut tertentu terhadap garis singgung lingkaran luar *runner*. Air masuk ke sudu-sudu pada rim *runner*, mengalir di atasnya, ke luar, memintas ruang kosong diantara bagian dalam rim, masuk ke sudu-sudu bagian dalam rim, dan akhirnya keluar dari *runner*. Dengan demikian, ia merupakan turbin pancaran ke dalam.

2.6.1 Alur Pancaran Memintas *Runner*

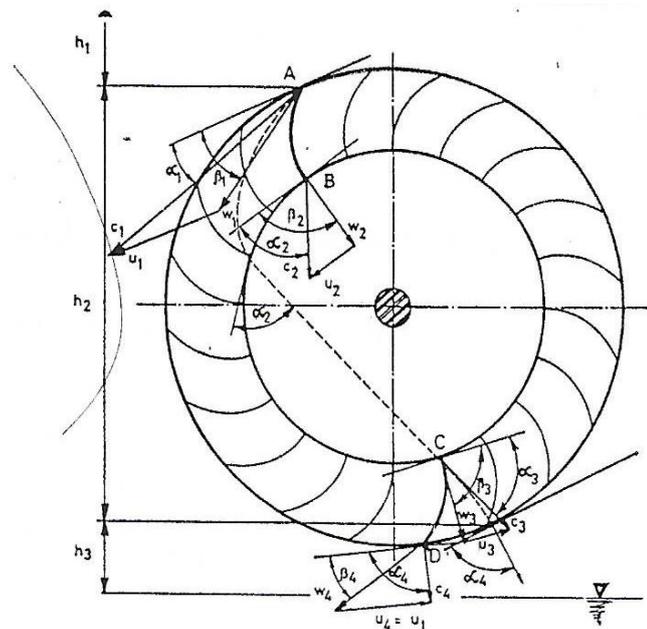
Dengan menganggap pusat pancaran *runner* di titik A pada gambar 2.15, dengan sudut α_1 terhadap garis singgung lingkaran luar *runner*, kecepatan aliran masuk *runner* adalah

$$c_1 = \phi(2gH)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(1)$$

(Mockmore and Merryfield, 1949 dalam Pedoman Rekayasa Tenaga Air Teknik Mesin UNSRI,1995)

Dimana :

- c_1 = Kecepatan absolut aliran masuk runner (m/s)
 ϕ = Koefisien nozzle, hilangnya energi kinetik yang melalui nozzle (0,98)
 g = percepatan gravitasi (m/s²)
 H = Ketinggian/Head (m)



Gambar 2. 15 Alur Air Memintas Turbin

(Sumber : Pedoman Rekayasa Tenaga Air Teknik Mesin UNSRI,1995)

Setelah kecepatan keliling diketahui, kecepatan reatif aliran disisi masuk w_1 dapat ditentukan. Sudut yang diapit dua kecepatan terakhir ini dinamai sudut β_1 . Agar diperoleh efisiensi maksimum, sudut sudu di titik A harus sama dengan β_1 . Lengkung AB menunjukkan suatu sudu. Kecepatan relatif, w_2 dan kecepatan keliling u_2 disisi keluar, mengapit sudut β_1 beta dua dititik itu. Kecepatan mutlak aliran c_2 dapat ditentukan dari w_2 , β_1 dan u_2 . S = Sudut yang dibentuk oleh dua kecepatan c_2 dan u_2 adalah α_2 .

Alur mutlak lintasan air diatas lengkung sudu AB bisa ditentukan seperti halnya titik senyatanya tempat air meninggikan sudu. Dengan menganggap kecepatan mutlak c_2 tidak mengalami perubahan, titik C tempat air kembali masuk rim dapat ditemukan.

Di titik ini c_2 menjadi c_3 , dan alur lintasan air, di atas lengkung sudu CD bisa dipastikan pula. Maka, $\alpha_3 = \alpha_2$, $\beta_3 = \beta_2$, dan $\beta_1 = \beta_4$. Karena semua sudut itu saling berkaitan pada sudu yang sama.

Pancaran dapat mengikuti alur mutlak ini, beberapa alur partikel air cenderung saling bersilangan di dalam runner seperti tampak pada gambar. Gambar ini memperlihatkan pendekatan keadaan sebenarnya. Sudut-sudut perpotongan, mencapai maksimum di masing-masing sisi keluar pancaran.

2.6.2 Daya Mekanis Turbin Secara Teoritis

Rumus daya mekanis turbin :

$$P = \left(\frac{W \cdot Q}{g} \right) \cdot (c_1 \cos \alpha_1 + c_4 \cos \alpha_4) \cdot u_1 \dots\dots\dots(2)$$

(Mockmore and Merryfield, 1949 dalam Pedoman Rekayasa Tenaga Air Teknik Mesin UNSRI, 1995)

Dimana :

P = Daya yang dihasilkan turbin (watt)

W = Berat jenis air (N/m^3)

Q = Laju alir (m^3/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

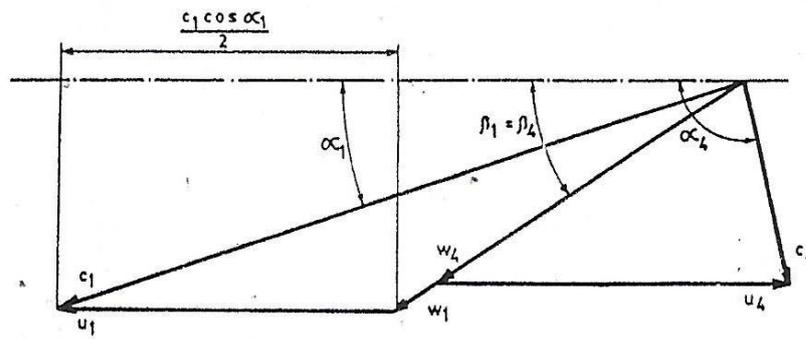
c_1 = Kecepatan air masuk tahap pertama (m/s)

c_4 = Kecepatan air masuk tahap kedua (m/s)

α_1 = Sudut kecepatan absolut masuk (rad)

α_4 = Sudut kecepatan absolut keluar (rad)

Dari gambar 2.15, diperoleh diagram segitiga kecepatan untuk turbin *cross-flow* yaitu dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16. Segitiga Kecepatan

(Sumber : Pedoman Rekayasa Tenaga Air Teknik Mesin UNSRI,1995)

Maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$c_4 \cos \alpha_4 = (w_4 \cdot c_4 \cos \beta_4) - u_1 \dots \dots \dots (3)$$

Dengan mengabaikan keaikian kecepatan air akibat selisih elevasi h_2 , maka :

$$w_4 = \Psi w_1 \dots \dots \dots (4)$$

Dimana :

Ψ = koefisien empiris lebih kecil dari satu (sekitar 0,98)

W_4 = Kecepatan relatif keluar (m/s)

W_1 = Kecepatan relatif masuk (m/s)

β_4 = Sudut kecepatan relatif masuk (m/s)

Dari segitiga kecepatan pada gambar 2.16 diperoleh hubungan :

$$w_i = \frac{c_1 \cos \alpha_1 - u_1}{\cos \beta_1} \dots \dots \dots (5)$$

Memasukkan persamaan (3), (4), dan (5) ke persamaan (2) dihasilkan :

$$P = \left(\frac{W \cdot Q \cdot u_1}{g}\right) (c_1 \cos \alpha_1 - u_1) \left(1 + \Psi \frac{\cos \beta_4}{\cos \beta_1}\right) \dots \dots \dots (7)$$

Besarnya daya masukan teoritis akibat air tinggi terjun H adalah :

$$P_{in} = W \cdot Q \cdot H = \frac{W \cdot Q \cdot c_1^2}{\phi^2 \cdot 2g} \dots \dots \dots (8)$$

2.6.3 Efisiensi Turbin Secara Teoritis

Efisiensi turbin merupakan perbandingan dari daya output dan input, (Rajab Yassen, 2014)

$$\eta = \frac{P_{turbin}}{P_{air}} \dots\dots\dots(9)$$

$$\eta = \frac{P = (\frac{W \cdot Q \cdot u_1}{g})(c_1 \cos \alpha_1 - u_1)(1 + \Psi \frac{\cos \beta_4}{\cos \beta_1})}{\frac{W \cdot Q \cdot c_1^2}{\phi^2 \cdot 2g}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\eta = 2 \phi^2 \frac{u_1}{c_1} (1 + \Psi \frac{\cos \beta_4}{\cos \beta_1})(\cos \alpha_1 - \frac{u_1}{c_1}) \dots\dots\dots(11)$$

Dimana $\beta_1 = \beta_2$ (β_1 dan β_2 sesuai untuk sudut sudu runner turbin yang sama

$$\eta = 2 \phi^2 \frac{u_1}{c_1} (1 + \Psi)(\cos \alpha_1 - \frac{u_1}{c_1}) \dots\dots\dots(12)$$

Kecepatan tangensial pada daya turbin secara teori yaitu :

$$u_1 = \frac{c_1 \cos \alpha_1}{2} \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{u_1}{c_1} = \frac{1}{2} \cos \alpha_1 \dots\dots\dots(14)$$

Sehingga efisiensi turbin secara teoritis menjadi :

$$\eta = 2 \phi^2 (1 + \Psi) (\frac{1}{2} \cos \alpha_1 - \frac{1}{2} \cos \alpha_1) \dots\dots\dots(15)$$

$$\eta = 2 \phi^2 (1 + \Psi) \frac{1}{2} \cos \alpha_1 (\frac{1}{2} \cos \alpha_1) \dots\dots\dots(16)$$

$$\eta = 2 \phi^2 (1 + \Psi) \frac{1}{4} \cos^2 \alpha_1 \dots\dots\dots(17)$$

Maka secara teoritis efisiensi turbin *cross-flow* dapat diketahui berdasarkan sudut nozzle .

$$\eta = \frac{1}{2} \phi^2 (1 + \Psi) \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_1 \dots\dots\dots(18)$$

Oleh karea itu, daya Turbin dapat dicari dengan rumus :

$$P_{turbin} = \eta P_{air} \dots\dots\dots(19)$$

$$P_{turbin} = \frac{W \cdot Q}{g} \cdot \phi \left(\frac{u_1}{c_1} \right)^2 \cdot (1 + \Psi) \dots\dots\dots(20)$$

2.7 Perencanaan Turbin Cross-flow

Untuk menghitung perancangan desain turbin *Cross-flow* dapat digunakan persamaan Mockmore (*dalam pratilastiarso J., and Hesti S., 2012 :316*) yaitu berikut :

a. Diameter luar dan lebar sudu turbin

Untuk menghitung diameter luar dan lebar turbin digunakan persamaan berikut

$$LD_1 = \frac{2.62 \times Q}{\sqrt{H}} \dots\dots\dots(21)$$

Dimana :

D_1 = Diameter luar (m)

L = lebar sudu turbin (m)

H = tinggi jatuh air (m)

Q = debit aliran (m³/detik)

b. Diameter dalam turbin

Untuk menghitung diameter dalam turbin digunakan persamaan berikut :

$$D_2 = \frac{2}{3} \times D_1 \dots\dots\dots(22)$$

Dimana :

D_1 = Diameter luar (m)

D_2 = Diameter dalam (m)

c. Jarak antar sudu

Untuk menghitung jarak antar sudu turbin digunakan persamaan berikut :

$$K = 0,174 D_1 \dots\dots\dots(23)$$

Dimana :

D_1 = Diameter luar (m)

K = Jarak antar sudu

d. Ketebalan semburan *nozzle*

Untuk menghitung ketebalan semburan *nozzle* digunakan persamaan berikut :

$$M = 0,22 \times \frac{Q}{L \times \sqrt{H}} \dots\dots\dots(24)$$

Dimana :

M = Ketebalan semburan nozzle (m)

L = lebar sudu turbin (m)

H = tinggi jatuh air (m)

Q = debit aliran (m³/detik)

e. Jari-jari kelengkungan sudu

Untuk menghitung jari-jari kelengkungan turbin digunakan persamaan berikut :

$$r_1 = 0,163 \times K \dots\dots\dots(25)$$

Dimana :

r_1 = Jari-jari kelengkungan sudu (m)

K = Jarak antar sudu

f. Jumlah sudu

Untuk menghitung jumlah sudu turbin digunakan persamaan berikut :

$$N = \frac{\pi \times D_1}{K} \dots\dots\dots(26)$$

Dimana :

D_1 = Diameter luar (m)

K = Jarak antar sudu

N = Jumlah sudu

g. Daya air yang digunakan

Untuk menghitung daya air digunakan persamaan berikut :

$$P_{\text{air}} = W \cdot Q \cdot H \dots\dots\dots(27)$$

Dimana :

W = Berat air (N/m^3)

H = Ketinggian jatuh air (m)

P_{air} = Daya air (Watt)

h. Daya yang dihasilkan turbin

Untuk menghitung daya turbin digunakan persamaan berikut (*Mafruddin, 2016*)

$$P_t = \frac{2\pi n T}{60} \dots\dots\dots(28)$$

Dimana :

T = torsi turbin (N.m)

n = jumlah putaran turbin (rpm)

P_t = daya turbin (Watt)

i. Efisiensi mekanik turbin

Untuk menghitung efisiensi mekanik turbin digunakan persamaan berikut

(Mafruddin, 2016) :

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_{air}} \times 100 \% \dots\dots\dots(29)$$

Dimana :

η_t = Efisiensi turbin

P_t = Daya mekanik turbin (Watt)

P_{air} = Daya air (Watt)

j. Daya yang Dihasilkan Generator

Untuk mengetahui besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh generator dapat digunakan persamaan 30. (Poernomo Sari dan Fasha, 2012)

$$P_g = I \times V \dots\dots\dots(30)$$

Dimana:

P_g = Daya listrik yang dihasilkan generator (W)

V = Beda potensial/tegangan (Volt)

I = Kuat arus (Ampere)

k. Efisiensi Sistem Pembangkit

Dalam pengujian efisiensi pembangkit penggerak mula turbin *Cross-flow* digunakan untuk menggerakkan motor induksi sebagai generator. Pengukuran menggunakan power meter karakteristik yang dihasilkan generator atau besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Dimana daya listrik dari generator diketahui berdasarkan hasil pengujian. Efisiensi sistem pembangkit turbin *Cross-flow* dapat diketahui dengan persamaan 31. (Mafruddin, 2016)

$$\eta_{SP} = \frac{P_g}{P_{air}} \dots\dots\dots(31)$$

Dimana :

η_{sp} = Efisiensi sistem pembangkit

P_g = Daya generator (Watt)

P_{air} = Daya air (Watt)

2.8 Nozzle

Nozzle adalah alat atau perangkat yang dirancang untuk mengontrol arah atau karakteristik dari aliran fluida (terutama untuk meningkatkan kecepatan) saat keluar (atau memasuki) sebuah ruang tertutup atau pipa. Sebuah *nozzle* sering berbentuk pipa atau tabung dari berbagai variasi luas penampang, dan dapat digunakan untuk mengarahkan atau memodifikasi aliran fluida (cairan atau gas). *Nozzle* sering digunakan untuk mengontrol laju aliran, kecepatan, arah, massa, bentuk, dan / atau tekanan dari aliran yang muncul. Salah satu contoh dari jenis *nozzle* adalah *nozzle jet* yang dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 *Nozzle jet*

(Sumber : Maria dkk, 2014)

Kecepatan *nozzle* dari fluida meningkat sesuai energi tekanannya. Prinsip utama penggunaan *nozzle* untuk fluida air atau tak mampat menggunakan prinsip hukum kontinuitas yaitu kekekalan massa atau menggunakan prinsip Bernouli dengan pengaruh ketinggian (*Head*). (Maria dkk, 2014).

Apabila zat cair tak mampu mampat (*uncompressible*) mengalir secara kontinyu melalui pipa atau saluran, dengan penampang aliran tetap ataupun tidak tetap, maka volume zatcair yang lewat tiap satuan waktu adalah sama di semua penampang. Keadaan ini disebut dengan persamaan kontinuitas aliran zat cair. (Nastain dkk, 2008)

Prinsip utama penggunaan *nozzle* untuk fluida air atau tak mampat menggunakan prinsip hukum kontinuitas yaitu kekekalan massa. Laju aliran massa yang mengalir dapat diketahui dengan persamaan dibawah ini:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

$$\dot{m} = \frac{v \cdot A}{V}$$

Dimana : \dot{m} = laju aliran massa (kg/s)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

V = volume jenis (m^3/kg)

$A =$ luas penampang pipa (m^2)

Laju aliran adalah volume fluida yang dikeluarkan tiap detiknya. Laju aliran dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q = v \cdot A$$

Dimana: $Q =$ debit aliran (m^3/s)

$v =$ kecepatan aliran (m/s)

$A =$ Luas Penampang (m^2)

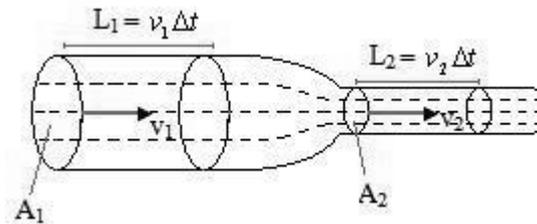
$D =$ diameter pipa (m)

laju aliran melalui A_1 dan A_2 harus sama, dengan demikian:

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

disebut persamaan kontinuitas. Jika $\rho_1 = \rho_2$, maka persamaan kontinuitas menjadi:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \dots\dots\dots(32)$$

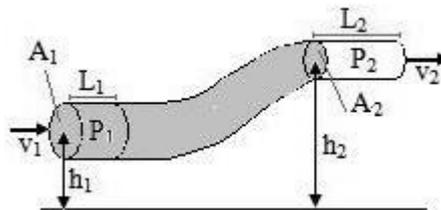


Gambar 2.18 Persamaan Kontinuitas

(Sumber : Nastain dkk, 2008)

Persamaan Bernouli ideal adalah alirannya konstan sepanjang lintasan dan mengabaikan segala kerugian yang terjadi dalam lintasan fluida.

$$gz + \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} = konstan$$



Gambar 2.19 Persamaan Bernoulli

(Sumber : Nastain dkk, 2008)

Persamaan untuk dua titik pada suatu garis aliran adalah:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + h_L \quad \dots\dots\dots(33)$$

Namun kenyataannya pada siring atau lintasan fluida terjadi kerugian gesekan. h_L adalah kerugian gesek didalam saluran. (*Nastain dkk, 2008*)

2.7.1 Jenis Nozzle

Klasifikasi jenis-jenis *nozzle* air (*Maria dkk, 2014*) sebagai berikut:

a. *Nozzle jet*

Nozzle jet memiliki diameter yang lebih besar dan tekanan yang lebih rendah pada bagian input dari pada bagian output yang memiliki diameter lebih kecil dan tekanan yang lebih besar akibat pengecilan diameter.

b. *Nozzle Magnetik*

Magnetic nozzle juga telah diusulkan untuk beberapa jenis penggerak, di mana aliran plasma diarahkan oleh medan magnet, bukan dinding yang terbuat dari materi padat.

c. *Nozzle Spray*

Nozzle spray memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan *nozzle jet* namun memiliki diameter yang lebih kecil dan terjadi perluasan aliran output fluida atau memecah aliran fluida (aerosol).