

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja (*energy is the capacity for doing work*). Energi merupakan salah satu kebutuhan pokok bagi manusia dalam melangsungkan aktivitasnya sehari-hari. Hingga saat ini, energi yang paling banyak digunakan adalah energi fosil yang berupa bahan bakar minyak, gas bumi, dan batu bara, sedangkan sumber energi air, panas bumi, panas matahari, dan nuklir masih terus dikembangkan. Sebagaimana yang telah kita ketahui bahwa persediaan sumber energi minyak bumi, gas alam dan batubara sangat terbatas. Energi fosil merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui dan ketersediaannya telah mengalami penurunan yang sangat drastis, sehingga harganya cenderung naik. Dengan demikian, apabila secara terus menerus kita gunakan sumber energi tersebut, maka suatu saat sumber energi tersebut akan habis, disamping kecenderungan melonjaknya harga sumber energi yang dimaksud.

Berdasarkan sumbernya, energi dapat dibedakan menjadi energi yang berasal dari bumi (*terrestrial*) dan yang berasal dari luar bumi (*extra terrestrial*). Sumber energi dari bumi dikategorikan menjadi jenis *renewable* atau dapat di daur ulang, misalnya energi kayu, biomassa, biogas. Sumber energi dari luar bumi, misalnya energi surya dan energi sinar kosmis yang sifatnya tidak habis (*non-depleted energy resources*). Sedang sumber energi seperti minyak bumi, batu bara dan gas alam adalah sumber energi yang bersifat tidak dapat diperbaharui atau dapat habis.

Energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi kehidupan manusia baik untuk kegiatan industri, kegiatan komersial maupun kegiatan dalam kehidupan sehari – hari. Energi listrik dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan penerangan dan untuk proses produksi yang melibatkan barang – barang elektronik serta alat – alat atau mesin – mesin di sebuah industri. Sehingga sangat diperlukan pengembangan pembangkit tenaga listrik *renewable*, agar kebutuhan

konsumen dapat terpenuhi dengan baik dan tidak terlalu mengganggu lingkungan alam sekitar.

Dampak dari terbatasnya energi listrik yang dipasok oleh PLN adalah sering terjadinya pemutusan sementara dan pembagian energi listrik secara bergilir serta kenaikan pembayaran listrik, akibat dari peningkatan konsumsi energi listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan energi listrik yang dihasilkan atau diproduksi oleh pembangkit tenaga listrik. Untuk mengurangi dampak dari terbatasnya energi listrik yang dipasok oleh PLN, diperlukan peningkatan pengembangan pembangkit energi listrik yang *renewable*.

Kenaikan harga energi fosil mempengaruhi harga energi listrik, karena sebagian besar pembangkit listrik yang ada di Indonesia menggunakan energi fosil. Agar energi listrik tidak semakin mahal, maka perlu dilakukan upaya lain untuk mengatasinya. Salah satu upaya yang sudah dilakukan adalah pemakaian energi air sebagai penggerak turbin. Di dalam turbin energi kinetik air dirubah menjadi energi mekanik, dimana air memutar sudu turbin (Arismunandar, 1982). Energi puntir yang dihasilkan selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator (Luknanto, 2008). Namun, selama ini energi air yang digunakan adalah air dengan ketinggian dan debit yang besar. Sementara energi air dengan ketinggian dan debit yang kecil, belum banyak dimanfaatkan. Padahal di beberapa wilayah Indonesia memiliki potensi yang cukup besar untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik tenaga air dengan tinggi jatuh air (*head*) dan debit yang kecil (*microhydro*).

Secara umum Listrik Tenaga Air dapat dikategorikan sesuai dengan besar daya yang dihasilkannya.

Tabel 1.1. Kategori listrik tenaga air berdasarkan besar daya yang dihasilkan

No.	Jenis	Daya yang Dihasilkan
1.	PLTA	> 5 MW (5.000 kW)
2.	PLTM	100 kW < PLTM < 5.000 kW
3.	PLTMH	< 100 kW

(Sumber : Severn Wye Energy Agency, www.swea.co.uk)

Namun sebenarnya, pembagian antara PLTA, PLTM, dan PLTMH bervariasi dan dinamis. Pembagian pada tabel di atas merupakan salah satu

contohnya. Namun, secara umum dapatlah ditentukan bahwa yang dimaksud sebagai PLTMH adalah jika mempunyai kapasitas daya dibawah 100 kW.

Mikro hidro adalah istilah yang digunakan untuk instalasi pembangkit listrik yang menggunakan energi air dengan debit kecil. Konsep mikro hidro yang dikembangkan kebanyakan memanfaatkan air terjun sebagai sumber tenaga pembangkit listrik, sehingga konsep ini sulit diterapkan di daerah dataran. Faktanya, Indonesia memiliki saluran irigasi di daerah dataran rendah yang sampai saat ini hanya digunakan untuk mengairi areal persawahan. Saluran irigasi dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai sumber energi, dengan aliran airnya yang memutar atau menggerakkan sudu turbin yang dapat menghasilkan tenaga listrik mikro hidro tanpa mengganggu sistem pengairan atau suplai air ke area persawahan.

Potensi air sebagai sumber energi terutama yang digunakan sebagai penyedia energi listrik melalui pembangkit listrik tenaga air maupun mikro hidro. Potensi tenaga air di seluruh Indonesia diperkirakan sebesar 75.684 MW. Potensi ini dapat dimanfaatkan untuk pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas 100 MW ke atas dengan jumlah sekitar 800 (Anonim 3, 2009).

Pemanfaatan energi air pada dasarnya adalah pemanfaatan energi potensial dari ketinggian jatuh air atau ketinggian aliran air yang mengalir hingga menubruk permukaan sudu pada turbin dan dengan adanya gaya gravitasi bumi. Energi mekanik aliran air yang merupakan transformasi dari energi potensial gravitasi dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin atau kincir. Umumnya turbin digunakan untuk membangkitkan energi listrik sedangkan kincir untuk pemanfaatan energi mekanik secara langsung. Pada umumnya untuk mendapatkan energi mekanik aliran air ini, perlu beda tinggi air yang diciptakan dengan menggunakan bendungan.

Banyaknya sungai, saluran irigasi dan danau air tawar yang ada di Indonesia merupakan modal awal untuk pengembangan energi air ini. Namun, pengembangan terhadap sumber energi yang satu ini, harus memperhatikan ekosistem lingkungan yang ada di sekitarnya. Seperti saluran irigasi yang memiliki fungsi untuk mengairi areal persawahan, pada aliran air tersebut terdapat

energi kinetik. Energi kinetik di aliran air tersebut dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dengan memutar *runner* turbin yang terhubung dengan generator listrik.

Meski aliran air mengalir mendatar seperti aliran air pada irigasi, tetap dapat dimanfaatkan alirannya tersebut dengan memasang turbin di dalam rendaman aliran air irigasi tersebut. Dengan memasang plat atau landasan pada permukaan dasar sungai atau irigasi tersebut agar lumpur atau batu di permukaan dasarnya tidak mengganggu aliran air atau menabrak sudu sehingga menyebabkan kerusakan sudu dan memberikan ukuran sudut yang tepat untuk pemasangan saluran pemasukan aliran air yang mendorong sudu turbin agar aliran air terpusat ke permukaan sudu turbin.

Bentuk turbin yang tepat guna digunakan pada pembangkit mikro hidro adalah turbin *cross flow*. Daya guna kincir air dari jenis yang paling unggul mencapai 70%, sedangkan efisiensi turbin *cross flow* mencapai 82% (Haimerl, L.A., 1960). Selain itu diperlukan kajian khususnya untuk turbin dengan komponen penggerak (*runner*), yang terdiri dari sudu – sudu yang mengelilinginya. Sudu putar (*rotary blade*) mengubah arah dan kecepatan aliran fluida (air) sehingga menimbulkan gaya yang memutar poros (Paryatmo, 2007).

Sudu pada turbin diperlukan untuk menangkap energi kinetik dari aliran air, sehingga membuat *runner* berputar karena terjadinya perubahan energi kinetik dari aliran air yang mendorong sudu menjadi energi mekanis pada *runner* turbin. Jumlah sudu yang banyak akan membuat penangkapan dorongan aliran air meski dalam keadaan turbin yang terendam dalam air. Tetapi, bila sudu dalam keadaan diam atau tidak berengsel maka akan menyebabkan timbulnya gaya seret (*drag force*) pada bagian belakang sudu turbin. Yang mengakibatkan berkurangnya gaya kerja atau gaya dorong dari aliran air yang terjadi pada permukaan sudu turbin. Oleh karena itu, perlu dilakukan penyesuaian jumlah sudu dan gerakan sudu yang terpasang pada rotor turbin agar dapat menghasilkan jumlah putaran generator, daya listrik yang dihasilkan atau daya *output* generator dan efisiensi total yang optimal.

Berdasarkan uraian teori dan masalah di atas, penulis tertarik untuk melakukan penelitian yang berjudul “*Analisa Variasi Jumlah Sudu Berengsel Terhadap Unjuk Kerja Turbin Cross Flow Zero Head*”.

1.2. Rumusan Masalah

Salah satu faktor yang mempengaruhi unjuk kerja turbin *cross flow* adalah jumlah sudu. Pada saat pengujian dan pengambilan data, dilakukan perbandingan hasil uji atau data yang diperoleh dari jumlah sudu yang terpasang pada *runner* turbin antara sudu berengsel dan sudu tetap. Berdasarkan latar belakang di atas, penulis dapat merumuskan permasalahan dalam penelitian ini yaitu untuk mengetahui berapa jumlah putaran generator, debit air, daya listrik yang dihasilkan turbin dan efisiensi sistem pada instalasi turbin yang optimal.

Setelah memperoleh data – data tersebut, dilakukan perbandingan data yang diperoleh saat gerakan sudu tetap dengan gerakan sudu berengsel. Sehingga, dapat diketahui jumlah sudu dan pergerakan sudu yang tepat untuk instalasi turbin *cross flow* yang tertutup. Dengan posisi turbin yang terendam dalam air dan aliran air yang keluar nosel adalah aliran *undershot*.

1.3. Batasan Masalah

Untuk menghindari terjadinya permasalahan yang meluas maka perlu diberikan batasan – batasan masalah, sebagai berikut :

1. Sudu turbin berbahan dari fiber dan resin sebagai pengikatnya.
2. Variasi jumlah sudu yang diteliti adalah 12 buah, 6 buah, dan 4 buah.
3. Generator yang digunakan adalah generator arus AC berfungsi sebagai pengubah energi mekanik menjadi tenaga listrik arus bolak – balik.
4. Beban berupa lampu *Light Emitting Diode* (LED) dengan besar daya listrik masing – masing lampu adalah 3 Watt.
5. Pompa yang dipakai untuk mensirkulasikan air memiliki kapasitas sebesar 340 liter/menit.
6. Posisi turbin, terendam dalam air.

7. Yang diperhitungkan dalam penelitian ini adalah debit air, energi kinetik *input*, energi listrik yang dihasilkan generator sebagai energi *output* generator, sehingga diperoleh besar efisiensi sistem pada instalasi turbin tersebut.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa variasi jumlah sudu berengsel terhadap unjuk kerja turbin *cross flow zero head*, yang nantinya dibandingkan dengan sudu tetap atau diam. Analisa dilakukan untuk mengetahui jumlah putaran generator, energi listrik yang dihasilkan generator sebagai energi *output* generator dan efisiensi sistem yang optimal. Dengan memvariasikan gerakan sudu, antara sudu tetap dan sudu berengsel.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang ingin dicapai oleh penulis adalah :

1. Agar mahasiswa dapat mengaplikasikan ilmu yang diperoleh saat di bangku perkuliahan.
2. Dapat memberikan pengetahuan di bidang Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) dalam pengembangan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH).
3. Dapat menambah pengetahuan tentang PLTMH yang dapat dikembangkan dengan memanfaatkan potensi energi air yang tersedia di alam sekitar. Seperti daerah pedalaman atau pedesaan yang hampir keseluruhan penduduknya bermata pencaharian sebagai petani dan sangat jauh dari jaringan listrik (PLN). Dengan luas dan dekatnya pemukiman penduduk dengan area persawahan, maka lokasi pemukiman akan dekat pula dengan saluran irigasi di area sawahnya. Sehingga, penduduk dapat memanfaatkan saluran irigasi tersebut sebagai potensi energi air yang dapat merubah energi kinetik menjadi energi listrik sehingga penduduk dapat menggunakan alat – alat elektronik sesuai dengan fungsi dari alat elektronik tersebut.

1.6. Sistematika

Pada penelitian ini menggambarkan tentang salah satu PLTMH yang memanfaatkan energi kinetik air sebagai fluida penggerak turbin dengan posisi turbin yang terendam dalam air. Putaran rotor dipengaruhi oleh beberapa hal yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain; jumlah sudu yang terpasang dan gerakkan sudu.

Dari variasi jumlah sudu dan gerakan sudu tersebut, dianalisa pengaruhnya terhadap energi listrik yang dihasilkan oleh instalasi turbin pada PLTMH. Dengan posisi turbin rotor yang terendam dalam air, sehingga energi *input*-nya berupa total energi kinetik aliran fluidanya.

1.7. Hipotesis

Adanya pengaruh jumlah sudu berengsel terhadap unjuk kerja dari turbin *cross flow zero head*. Semakin banyak jumlah sudu pada *runner* turbin maka penangkapan energi kinetik akan semakin meningkat. Kegunaan sudu adalah untuk menangkap energi kinetik dari aliran air yang menubruk permukaannya sehingga runner dapat berputar dan menghasilkan daya listrik akibat terhubung dengan generator listrik. Tetapi, jika sudu tetap atau tidak berengsel yang digunakan dan dalam jumlah yang banyak akan menyebabkan terjadinya peningkatan gaya seret (*drag force*) pada bagian belakang sudu akibat dorongan aliran air pembuangan yang keluar turbin setelah menyentuh permukaan bagian depan sudu pada turbin.

Sehingga diperlukan penelitian terhadap jumlah sudu berengsel yang mengelilingi komponen penggerak (*runner*), agar turbin mendapatkan *transfer* energi kinetik dan penangkapan aliran air yang optimum saat aliran fluida (air) menuju turbin yang membuat *runner* berputar serta pengurangan gaya seret dari aliran air pembuangan yang keluar dari turbin.

1.8. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mataram.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Arsyad (2009), telah melakukan aplikasi turbin *cross-flow* untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro di Kalimantan Barat. Penelitian dilakukan pada beberapa sungai, antara lain; sungai Kamat, sungai Temiang, sungai Malam, sungai Mengiring, dan sungai Sintot. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah perhitungan dari data – data yang diperoleh saat penelitian di masing – masing sungai. Daya desain dihitung dengan efisiensi turbin *cross-flow* sebesar 0,76, efisiensi generator 0,89 dan efisiensi transmisi mekanik 0,98. Efisiensi turbin dihitung dari data yang sesuai dengan *head* dan *flow* desain masing – masing sungai. Dalam penelitian ini referensi turbin *cross-flow* yang mengacu pada turbin Osberger-Jerman dan turbin *cross-flow* buatan Indonesia tipe T-14 D150 dan D300. Hasil penelitian menyatakan bahwa pemanfaatan turbin *cross flow* untuk potensi energi air yang tersedia di alam sekitar sangat cocok mengingat turbin impuls jenis *cross flow* memiliki karakteristik yang cocok untuk *range head* rendah hingga medium.

Larasakti, Himran dan Arifin (2012), telah melakukan penelitian tentang pembuatan dan pengujian pembangkit listrik tenaga mikrohidro turbin Banki daya 200 Watt. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui cara yang digunakan untuk mendapatkan start dalam fabrikasi turbin Banki dari 200 Watt dengan kapasitas daya *electrical*, menentukan pengaruh pembukaan sudu tetap dan variasi dinamometer loading. Penelitian ini dilakukan dan diperiksa secara langsung di laboratorium Universitas Hasanudin, Makassar. Pengukuran kecepatan putar turbin, kapasitas air, dengan menggunakan tachometer tangan, dan manometer. Pembukaan sudu pengarah tetap dilakukan saat penelitian. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pada pembukaan sudu pengarah dengan variasi beban dan putaran yang konstan pada turbin menghasilkan daya listrik sebesar 72 Watt dengan efisiensi turbin mencapai 30,7% saat pembukaan sudu pangarah 12° dengan beban 2 kg di putaran 550 rpm dan daya maksimum sebesar 186 Watt

dengan efisiensi turbin mencapai 78,9% saat pembukaan sudu pangarah 20° dengan beban 5,2 kg di putaran 550 rpm.

Sahid (2012), telah mengkaji kinerja turbin *cross flow* berbasis konstruksi silinder (drum) poros vertikal untuk potensi arus sungai. Tahap awal penelitian adalah menyiapkan konstruksi silinder berdiameter 1 m yang dibuat dari lembaran *stainless steel* ukuran 2 mm. Selubung silinder dibelah menjadi empat bagian. Bagian-bagian selubung tersebut diputar dengan pusat sumbu adalah bagian tengah busur selubung sehingga silinder – silinder tersebut membentuk turbin *cross flow*. Pada bagian luar dipasang rumah turbin yang dilengkapi pengarah aliran menuju sudu – sudu turbin. Turbin *cross flow* dihubungkan dengan pompa sentrifugal (sebagai beban) melalui sistem transmisi poros dan roda gigi. Tahap selanjutnya adalah uji karakteristik turbin. Dalam uji ini dilakukan optimasi sudut sudu jalan turbin. Uji dilakukan di aliran sungai dengan parameter yang diukur adalah debit dan *head* aliran sungai untuk menghitung daya *input* turbin serta *head* dan debit aliran yang dihasilkan oleh pompa irigasi untuk menghitung daya *output* pompa. Berdasarkan pada hasil pengujian, turbin aliran silang poros vertikal sebagai penggerak pompa air yang dibuat berdasarkan konstruksi silinder yang dibelah menjadi empat mempunyai sudut sudu jalan optimum 60° dengan debit aliran masukan sebesar $0,23 \text{ m}^3/\text{det}$, debit aliran keluaran pompa sebesar $0,000253 \text{ m}^3/\text{det}$, daya hidrolis yang dihasilkan pompa sebesar 3,05 watt dan mempunyai efisiensi sistem sebesar 4,98%.

Tirono (2012), telah melakukan penelitian tentang pemodelan turbin *cross flow* untuk diaplikasikan pada sumber air dengan tinggi jatuh dan debit kecil. Variabel terikatnya adalah memvariasikan jumlah sudu yang berhubungan dengan jumlah putaran, daya turbin, dan efisiensi turbin. Selain itu, variasi juga dilakukan pada bentuk saluran yang digunakan yaitu saluran terbuka berbentuk persegi, setengah lingkaran dan trapesium. Penelitian dilakukan dengan mengambil beberapa *input* yang disesuaikan dengan kebanyakan yang ada di lapangan. Input yang digunakan adalah kecepatan alir, tinggi jatuh, kemiringan saluran, lebar penampang saluran, jari – jari saluran, diameter luar turbin dan lebar turbin. Sementara itu, besaran yang dibuat sebagai variabel adalah jumlah sudu

pada turbin *cross flow*. Penampang sebagai saluran air yang dipakai berbentuk persegi, setengah lingkaran dan trapesium. Ketiganya dibuat terbuka. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan asumsi lebar penampang 4 m, tinggi jatuh 2 m, jari – jari 2 m, kemiringan $1/\sqrt{3}$ kecepatan aliran 2 m/s, diameter luar turbin 0,75 m dan lebar turbin 4,3 m, maka turbin dengan jumlah sudu 12 memiliki jumlah putaran, daya turbin dan efisiensi turbin yang paling besar. Bilamana jumlah sudu diperbanyak, maka jumlah putaran, daya turbin dan efisiensi turbin semakin kecil. Sementara itu, penelitian untuk menentukan jenis penampang saluran didapatkan bahwa jenis saluran dengan penampang trapesium dihasilkan jumlah putaran, daya turbin dan efisiensi turbin yang paling besar kemudian disusul dengan jenis penampang persegi dan terakhir adalah jenis penampang lingkaran.

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) adalah suatu pembangkit listrik skala kecil (mikro) yang memanfaatkan energi potensial air melalui debit aliran dari ketinggian jatuh air (*head*) sampai tertangkap oleh sudu dan memutar turbin sehingga mampu menghasilkan daya listrik yang dibutuhkan. PLTMH dibangun dalam rangka program LISDES (Listrik Masuk Desa) dan diarahkan untuk daerah – daerah terpencil yang tidak terjangkau PLN.

Berdasarkan daya listrik yang dapat dibangkitkan, PLTMH merupakan pembangkit listrik dengan daya listrik yang dihasilkan sampai 100 kW (Canren, 2004). Sedangkan pembangkit listrik yang mampu menghasilkan energi listrik antara 100 kW sampai 5 MW didefinisikan sebagai Pembangkit Listrik Minihidro (Bapangsamirana, 2001).

Pembangkit listrik mini-hidro pada dasarnya dibangun dengan memanfaatkan sumber tenaga air. Pembangunan diutamakan untuk daerah – daerah terpencil yang tidak terjangkau jaringan PLN. Pembangkitan dilakukan dengan memanfaatkan aliran air dari anak – anak sungai yang kecil atau saluran irigasi. Potensi mini-mikrohidro *power* di Indonesia sekitar 7.500 MW dengan kapasitas terpasang sebesar 200 MW (Mumpuni, 2001). Pada tahun 2011 sesuai

data potensi desa BPS 2011, rasio desa berlistrik untuk mendukung peningkatan rasio elektrifikasi dalam rangka meningkatkan kehidupan masyarakat sudah mencapai 96,02% dari seluruh jumlah desa yang ada di Indonesia yang berjumlah 78.609 desa (Anonim 4, 2013).

Beberapa kelebihan mini-hidro dari energi – energi lain (Das, 2002) adalah:

1. Bersih lingkungan.
2. Renewable energi.
3. Tidak konsumtif terhadap pemakaian air.
4. Mudah dioperasikan sebagai *base load* maupun *peak load* (dapat dengan cepat *On/Off*).
5. Biaya operasi rendah.
6. Tahan lama (*long life*).
7. Sesuai untuk daerah terpencil.

Berdasarkan instalasinya, secara garis besar PLTMH dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu jenis PLTMH instalasi daerah pegunungan dan instalasi daerah datar. Jenis instalasi untuk daerah pegunungan pada umumnya terdiri dari komponen sebagai berikut (Anonim 1, 1999) :

- a. Pintu pengambilan (*intake/diversion*),
- b. Bak pengendapan (*destiling tank*),
- c. Saluran penghantar (*headrace*),
- d. Bak penenang (*forebay*),
- e. Pipa pesat (*penstock*),
- f. Gedung pembangkit (*power house*),
- g. Turbin air (*water turbine*),
- h. Generator listrik (*electrical generator*),
- i. Saluran buang (*tailrace*) dan
- j. Jaringan transmisi (*grid line*).

Sedangkan jenis instalasi untuk daerah datar pada umumnya terdiri dari komponen pokok (Chandrasekhar, 2002) sebagai berikut :

- a. Pintu pengambilan (*intage/diversion*),

- b. Saluran tenaga (*power canal*),
- c. Saluran penghantar (*headrace*),
- d. Gedung pembangkit (*power house*),
- e. Turbin air (*water turbine*),
- f. Generator listrik (*electrical generator*),
- g. Saluran buang (*tailrace*),
- h. Jaringan transmisi (*grid line*).

Pada dasarnya suatu pembangkit listrik tenaga air berfungsi untuk mengubah potensi tenaga air yang berupa aliran air yang mempunyai debit dan tinggi jatuh (*head*) untuk menghasilkan energi listrik. Bangunan tersebut mencakup bangunan sipil dan peralatan elektromekanik.

2.3. Sejarah Turbin Air

Dari sejak dulu kincir air telah digunakan sebagai tenaga di sebuah industri. Yang menjadi pertimbangan mula – mula adalah ukuran kincirnya, yang membatasi debit dan *head* saat memutar turbin. Perkembangan kincir air menjadi turbin modern membutuhkan jangka waktu yang cukup lama. Perkembangan yang dilakukan dalam waktu revolusi industri menggunakan metode dan prinsip ilmiah. Mereka juga mengembangkan teknologi material dan metode produksi baru pada saat itu.

Kata "*turbine*" ditemukan oleh seorang insinyur Perancis yang bernama Claude Bourdin pada awal abad 19, yang diambil dari terjemahan bahasa Latin dari kata "*whirling*" (putaran) atau "*vortex*" (pusaran air). Perbedaan dasar antara turbin air awal dengan kincir air adalah komponen putaran air yang memberikan energi pada poros yang berputar. Komponen tambahan ini memungkinkan turbin dapat memberikan daya yang lebih besar dengan komponen yang lebih kecil. Turbin dapat memanfaatkan air dengan putaran lebih cepat dan dapat memanfaatkan *head* yang lebih tinggi.

Ján Andrej Segner mengembangkan turbin air reaksi pada pertengahan tahun 1700. Turbin ini mempunyai sumbu horizontal dan merupakan awal mula dari turbin air modern. Turbin ini merupakan mesin yang simpel yang masih

diproduksi saat ini untuk pembangkit tenaga listrik skala kecil. Segner bekerja dengan Euler dalam membuat teori matematis awal untuk desain turbin.

Pada tahun 1820, Jean-Victor Poncelet mengembangkan turbin aliran kedalam. Pada tahun 1826, Benoit Fourneyon mengembangkan turbin aliran keluar. Turbin ini sangat efisien (~80%) yang mengalirkan air melalui saluran dengan sudu lengkung satu dimensi. Saluran keluaran juga mempunyai lengkungan pengarah.

Pada tahun 1844, Uriah A. Boyden mengembangkan turbin aliran keluar yang meningkatkan performa dari turbin Fourneyon. Bentuk sudunya mirip dengan turbin Francis. Pada tahun 1849, James B. Francis meningkatkan efisiensi turbin reaksi aliran kedalam hingga lebih dari 90%. Dia memberikan test yang memuaskan dan mengembangkan metode *engineering* untuk desain turbin air. Turbin Francis dinamakan sesuai dengan namanya, yang merupakan turbin air modern pertama. Turbin ini masih digunakan secara luas di dunia saat ini.

Pada tahun 1866, tukang pembuat gilingan di California, Samuel Knight menemukan sebuah mesin yang mengerjakan tuntas sebuah konsep yang berbeda jauh. Terinspirasi dari sistem jet tekanan tinggi yang digunakan dalam lapangan pengeboran emas hidrolik, Knight mengembangkan ceruk kincir yang dapat menangkap energi dari semburan jet. Yang ditimbulkan dari energi kinetik air pada sumber yang cukup tinggi (ratusan kaki) dan dialirkan melalui sebuah pipa saluran. Turbin ini disebut turbin impulse atau turbin tangensial. Aliran air mendorong ceruk disekeliling kincir turbin pada kecepatan maksimum dan jatuh keluar sudu dengan tanpa kecepatan.

Pada tahun 1879, Lester Pelton melakukan percobaan dengan kincir Knight, dikembangkanlah desain ceruk ganda yang membuang air kesamping, menghilangkan beberapa energi yang hilang pada kincir Knight yang membuang sebagian air kembali melawan kincir. Sekitar tahun 1895, William Doble mengembangkan ceruk setengah silinder milik Pelton menjadi ceruk berbentuk bulat memanjang, termasuk sebuah potongan didalamnya yang memungkinkan semburan untuk membersihkan masukan ceruk. Turbin ini merupakan bentuk modern dari turbin Pelton yang saat ini dapat memberikan efisiensi hingga 92%.

Pelton telah memprakarsai desain yang efektif, kemudian Doble mengambil alih perusahaan Pelton dan tidak mengganti namanya menjadi Doble karena nama Pelton sudah dikenal. Turgo dan turbin aliran silang (*cross flow*) merupakan desain turbin impulse selanjutnya.

2.4. Pengenalan dan Perkembangan Turbin Air

Turbin air adalah turbin dengan media kerja air. Secara umum, turbin adalah alat mekanik yang terdiri dari poros dan sudu – sudu. Sudu tetap (*stationary blade*), tidak ikut berputar bersama poros, berfungsi mengarahkan aliran fluida. Sedangkan sudu putar (*rotary blade*), untuk mengubah arah dan kecepatan aliran fluida sehingga timbul gaya yang memutar poros. Air biasanya dianggap sebagai fluida yang tak kompresibel, yaitu fluida yang secara virtual massa jenisnya tidak berubah dengan tekanan.

Ada beberapa kesamaan teori antara turbin air dan pompa air, dengan perbedaan utama energi *transfer* yang berkebalikan. Turbin air mengubah energi potensial dari aliran fluida (air) menjadi energi mekanis pada putaran poros turbin. Sedangkan pompa air mengubah energi mekanis dari putaran poros pada pompa menjadi gerak aliran air.

Turbin konvensional terbagi menjadi 3 macam mesin penggerak mula (*prime movers*), antara lain yaitu :

1. Turbin air dengan fluida kerja air,
2. Turbin gas dengan fluida kerja gas panas yang bertekanan,
3. Turbin uap dengan fluida kerja uap.

Ketiga macam turbin tersebut mempunyai kemiripan dalam konstruksi, namun berbeda dalam segi termodinamika. Karena fluida kerjanya tidak sama.

Tujuan utama turbin air dalam teorinya adalah untuk mendapatkan unjuk kerja yang optimum dalam pemanfaatan energi air pada suatu kondisi operasi tertentu. Rumus yang digunakan secara empiris kebanyakan diperoleh berdasarkan pengalaman, eksperimen atau analisis dimensi.

Kerja dasar turbin air yang paling sederhana telah ditemukan sebelum dimulainya tahun masehi. Teknologi turbin air merupakan perkembangan dari kincir air (*water wheel*). Perbedaan utama antara kincir air dengan turbin air adalah perubahan yang dilakukan pada arah dan kecepatan aliran fluida (air). Kincir air hanya mengubah kecepatan aliran fluida kerjanya (air), sedangkan turbin air dapat mengubah kecepatan dan arah aliran fluida kerjanya (air).

Penggunaan turbin air lebih banyak dibandingkan dengan kincir air, karena turbin air mempunyai beberapa keuntungan lebih dibandingkan kincir air, antara lain :

1. Dapat ditempatkan dalam ruangan yang tidak terlalu besar seperti penempatan dari kincir air.
2. Dapat beroperasi dengan kecepatan yang lebih tinggi.
3. Mampu membangkitkan daya yang lebih besar, dengan ukuran turbin yang relative kecil.
4. Daerah putaran yang lebih luas, sehingga memungkinkan terjadi hubungan langsung dengan generator.
5. Mampu memanfaatkan ketinggian air jatuh dari ketinggian yang sangat tinggi sampai ketinggian yang sama dengan nol (*zero head*).
6. Tetap dapat beroperasi, meski terendam di dalam air.
7. Mempunyai efisiensi yang relatif lebih baik.
8. Dapat dikonstruksikan dengan poros yang horizontal maupun vertikal.

Penggunaan turbin air kebanyakan untuk pembangkit tenaga sebagai penggerak generator seperti pada PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), karena turbin air memiliki karakteristik yang memenuhi persyaratan sebagai pembangkit tenaga yang modern. Beberapa persyaratan dari pembangkit tenaga yang modern, antara lain :

1. Memiliki efisiensi yang baik dan tidak banyak berubah, meski diberikan beban yang bervariasi.
2. Memiliki putaran yang cukup tinggi, sehingga dapat dikopel langsung dengan generator.

3. Dapat dikonstruksikan dengan poros yang horizontal dan vertikal.
4. Dapat dimanfaatkan dengan variasi ketinggian jatuhnya air dan kapasitas aliran fluida kerjanya (air).

2.5. Turbin Air

Berdasarkan perubahan energi fluidanya, turbin air dibagi menjadi dua bagian, yaitu : Turbin Impuls dan Turbin Reaksi (Lensley, 1998).

2.5.1. Turbin Impuls

Turbin impuls adalah turbin dengan proses ekspansi energi dari fluida kerjanya hanya terjadi di dalam sudu tetap saja. Turbin impuls juga disebut turbin aksi. Semburan air mendorong bagian turbin yang berputar (rotor). Air dari sebuah bendungan atau penampung dialirkan melalui pipa, dan kemudian melewati mekanisme pengarah dan akhirnya melewati nosel. Pada proses tersebut energi yang tersedia dikonversikan ke energi kinetik, dengan melewatkannya pada nosel, dimana posisinya sangat dekat dengan *runner*.

Turbin impuls diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu (Lensley, 1998) :

1. Turbin Pelton

Turbin Pelton dikenal sebagai roda air tangensial atau roda pelton. Turbin ini memiliki ember terbelah (*split bucket*) yang terpasang di sekeliling bagian luar roda. *Split bucket* dapat dicetak sendiri, kemudian dikencangkan dengan baut pada sentral *slide*-nya atau dapat juga seluruh runner dicetak sebagai satu kesatuan.

Pada saat pancaran air menerpa sisi pemisah dari ember, maka ember – ember tersebut akan terpisah menjadi dua bagian dan keluar lagi dari sisi ember. Untuk turbin yang kecil hanya menggunakan satu titik pancaran air (nosel), sedangkan untuk turbin yang besar menggunakan beberapa nosel. Pancaran ini dihasilkan oleh penyemprot berbentuk jarum yang mirip dengan katup jarum. Putaran turbin ini dipertahankan konstan pada berbagai beban dengan merubah debit dari pancaran air.

2. Turbin Turgo

Seperti halnya turbin Pelton, turbin Turgo merupakan turbin impuls. 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.

3. Turbin *Cross Flow*

Turbin *Cross Flow* merupakan salah satu jenis turbin impuls. Ditemukan pertama kali oleh Michell-Banki. Turbin *Cross Flow* menggunakan nosel persegi panjang yang sesuai dengan lebar *runner*. Pancaran masuk turbin mengenai sudu, sehingga terjadi konversi energi kinetik menjadi energi mekanis. Air mengalir keluar membentur sudu dan memberikan energinya kemudian meninggalkan turbin. *Runner* turbin dibuat dari beberapa sudu yang terpasang pada sepasang piringan paralel.

2.5.2. Turbin Reaksi

Turbin Reaksi adalah turbin yang dimana proses ekspansi dari fluida kerjanya terjadi pada sudu – sudu tetap maupun sudu – sudu gerak dan perubahan ketinggian serta penurunan tekanan akan berpengaruh pada *impeller*-nya. Aliran fluida dapat berupa aliran aksial, radial, dan campuran atau sebagian radial atau sebagian aksial.

Turbin Reaksi digunakan untuk ketinggian (*head*) yang rendah tetapi debit air yang besar. Aliran fluida pada turbin merupakan kebalikan dengan pompa, yaitu masuk melalui seksi dengan diameter yang besar dan keluar melalui sebuah lubang kecil setelah memberikan energinya pada *impeller*.

Turbin Reaksi diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu (Lensley, 1998) :

1. Turbin Francis

Pada turbin Francis, air masuk ke rumah siput dan bergerak ke dalam *runner* melalui sudu pengatur dengan celah – celah sempit yang mengubah *head* tekanan menjadi *head* kecepatan. Sudu – sudu tersebut dapat diatur sedemikian rupa sehingga jumlah air yang masuk dan arah alirannya dapat

dikendalikan. Jika beban turbin berkurang dengan cepat, maka alat pengatur akan bekerja menggerakkan mekanisme yang akan menutup sudu pengatur. Aliran yang melalui *runner* turbin Francis yang mula – mula merupakan aliran radial, perlahan – lahan menjadi aliran aksial.

2. Turbin Kaplan

Turbin Kaplan adalah sebuah turbin dengan daun baling – baling yang digerakkan agar sesuai dengan kondisi operasi yang terbaik. Pengaturan ini dilakukan oleh suatu mekanisme di dalam sumber *runner* yang dijalankan secara hidrolik oleh suatu pengatur.

3. Turbin Propeller

Turbin Propeller adalah turbin yang digerakkan oleh aliran aksial dengan *runner*-nya diletakkan pada saluran tertutup. *Runner* pada umumnya memiliki empat hingga delapan buah baling – baling yang diletakkan pada sebuah sumbu, dengan celah yang sangat kecil antara baling – baling dan dinding salurannya.

Terdapat dua jenis turbin dari turbin Propeller, yaitu :

a. Turbin Deriaz

Turbin Deriaz adalah sebuah turbin dengan baling – baling yang dapat diatur dengan air ke baling – baling yang dapat diatur dengan air ke baling – baling secara diagonal.

b. Turbin Tabing

Turbin Tabing adalah sebuah turbin dengan sumbu miring yang sesuai untuk tekanan rendah, karena aliran dapat dibentuk secara langsung.

Berdasarkan arah aliran fluida (air) yang masuk ke *runner*, turbin air juga dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Turbin aliran tangensial (roda Pelton).
2. Turbin aliran radial (tubin Pelton).
3. Turbin aliran campuran (turbin Pelton modern).
4. Turbin aliran aksial tipe *fixed blade* (Propeller) atau *moveable blade* (Kaplan).

2.6. Turbin *Cross Flow*

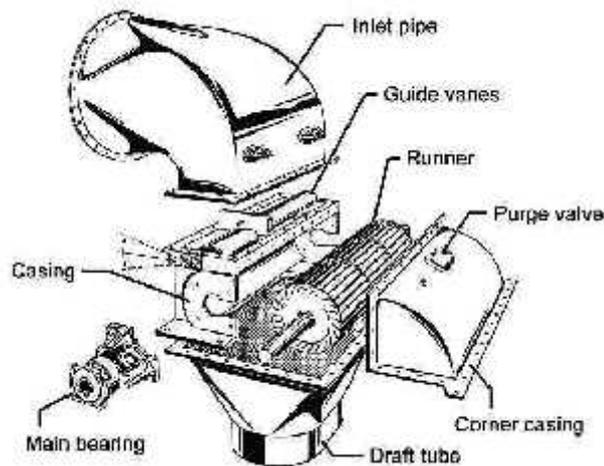


Gambar 2.1 Turbin *cross flow*

(Sumber : <http://rimoo.files.wordpress.com/2009/02/crossflow.jpg&imgrefurl>)

Salah satu turbin jenis turbin *impuls* yang banyak dipakai pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) adalah turbin *cross flow* (aliran silang). Turbin *cross flow* merupakan jenis turbin impuls yang dikembangkan oleh Anthony Michell (Austria), Donat Banki (Hongaria) dan Fritz Ossberger (Jerman). Michell memperoleh hak paten atas desainnya pada 1903. Turbin jenis ini pertama – tama diproduksi oleh perusahaan Weymouth. Turbin ini juga sering disebut sebagai turbin Ossberger, yang memperoleh hak paten pertama pada 1922. Perusahaan Ossberger tersebut, sampai sekarang masih bertahan dan merupakan produsen turbin *cross flow* yang terkemuka di dunia.

Turbin ini mempunyai *runner* yang berbentuk seperti drum yang mempunyai dua atau lebih piringan parallel yang masing – masingnya dihubungkan oleh susunan sudu yang berbentuk lengkung. Dalam pengoperasian turbin *cross flow*, sebuah nosel persegi empat mengarahkan pancaran air ke sepanjang *runner*. Pancaran air tersebut mendorong sudu dan memindahkan sebagian besar energi kinetiknya ke turbin. Pancaran air tersebut lalu melewati runner dan kembali mendorong bagian sudu yang lain sebelum keluar dari *runner*, memindahkan sebagian kecil energi kinetiknya yang masih tersisa.



Gambar 2.2 Konstruksi dari turbin *cross flow*
 (Sumber : http://www.freeflowhydro.co.uk/assets/schema_aj.jpg)

Turbin *cross flow* terdiri dari rotor, rumah turbin, *guide vane*, puli, adapter dan *base frame*.

1. Rotor atau *runner* turbin adalah bagian yang berputar dari turbin. *Runner* ini terdiri dari poros, sudu (*blade*) dan pirirngan (*disk*).
2. Rumah turbin adalah bagian turbin yang merupakan tempat memasang bagian – bagian turbin lain, seperti poros (*runner*), *guide vane* dan adapter.
3. *Guide vane* atau sering juga disebut sebagai distributor berfungsi untuk mengarahkan aliran air sehingga secara efektif meneruskan energinya ke sudu atau rotor turbin. Dengan demikian, energi kinetik yang ada pada pancaran air akan menggerakkan rotor dan menghasilkan energi mekanik yang seterusnya memutar generator melalui puli.
4. Puli merupakan salah satu transmisi mekanik yang sering dipakai pada PLTMH. Sistem transmisi tersebut juga berfungsi untuk mengubah kecepatan putar dari satu poros ke poros lain, jika kecepatan putar turbin berbeda dengan kecepatan generator atau peralatan lain yang harus diputarnya. Sebenarnya terdapat beberapa jenis sistem penggerak atau transmisi mekanik pada mikrohidro, yaitu penggerak langsung, *Flat belt* dan puli, V atau *wedge belt* dan puli, *Chain* dan *Sprocket* beserta *gearbox*. Namun, puli dan belt merupakan transmisi mekanik yang paling banyak dipakai.

5. Adapter merupakan pipa penghubung antara rumah turbin dengan pipa pesat. Bentuk adapter pada satu sisi yang terhubung dengan rumah turbin adalah persegi sesuai dengan rumah turbin, sedangkan bagian yang disambung dengan *inlet valve* atau pipa pesat berbentuk lingkaran.
6. *Base frame* merupakan tempat atau rangka untuk meletakkan turbin. Biasanya pada PLTMH berkapasitas kecil, base frame turbin menyatu dengan base frame generator sehingga kedudukan turbin dan generator telah tertentu susunannya dan tidak berubah – ubah.

Keunggulan – keunggulan dari turbin *cross flow* adalah :

1. Turbin *cross flow* merupakan jenis turbin *impuls* yang harganya lebih murah dibandingkan dengan turbin reaksi karena tidak memerlukan *casing* yang mampu menahan tekanan tinggi dan juga tidak *clearance* yang sangat teliti.
2. Kisaran operasi turbin *cross flow* cukup fleksibel pada berbagai *head* dan debit, khususnya untuk daya sampai 1 MW. Dengan kisaran operasi yang luas tersebut, turbin *cross flow* dapat menjadikan alternatif pengganti turbin Francis yang dulu sering dipakai sebagai penggerak mula PLTM, yang termasuk berkapasitas kecil (PLTMH).
3. Desain turbin *cross flow* lebih fleksibel, dimana untuk kisaran debit dan *head* yang berbeda ukuran diameter turbin air tetap sama, *manufacturer* (pemimpin pabrik) tinggal mengatur lebar turbin dan transmisi mekanik yang sesuai. Dengan demikian, ini memungkinkan untuk produksi massal tanpa harus memesan desain khusus.
4. Turbin tipe *cross flow* saat ini telah banyak diproduksi di dalam negeri sehingga terbuka untuk memperoleh dengan harga lebih murah dan mutu yang baik.
5. Pengaturan efisiensi yang tetap tinggi pada debit rendah.
Turbin *cross flow* mempunyai keunggulan, dimana efisiensinya tetap tinggi meski aliran air yang mengalir sangat kecil sekali. Adanya karakteristik yang memungkinkan turbin ini dapat tetap mempertahankan efisiensinya meski beroperasi pada debit air sungai pada PLTMH. Mengingat debit sungai tersebut

sangat tergantung pada musim, dimana pada saat kemarau aliran air akan jauh lebih rendah daripada saat musim hujan. Disamping itu, biasanya PLTMH tidak dilengkapi kolam tendon harian apalagi waduk.

Dengan kemampuannya yang mampu beroperasi pada kisaran debit dan aliaran air yang luas, turbin *cross flow* cocok untuk dikembangkan sebagai penggerak mula PLTMH. Sementara teknologi yang sederhana dari turbin ini memungkinkannya dapat diproduksi pada bengkel – bengkel setempat akan mampu efek sebar (*spread-effect*) yang luas bagi perkembangan ekonomi di daerah – daerah terpencil atau jauh dari jangkauan listrik (PLN). Sementara keterbatasan turbin jenis ini pada rendahnya tingkat efisiensi sebenarnya merupakan konsekuensi tingkat teknologi yang dipergunakan. Pengembangan turbin ini pada tingkat teknologi yang lebih canggih seperti yang dilakukan oleh Ossberger terbukti dapat mencapai efisiensi yang baik dan sebanding dengan turbin Francis.

Untuk itu diusulkan agar teknologi pembuatan turbin cross flow ini dapat disebarluaskan ke seluruh daerah di Indonesia, antara lain dengan memberikan percontohan dan pelatihan pada industry permesinan atau bengkel – bengkel di daerah. Dengan melakukan diseminasi bagi tersedianya energi listrik pada daerah – daerah terpencil yang memiliki sumber daya air.

2.7. Persamaan Aliran Dasar Turbin Air

Analisa permulaan aliran fluida di dalam turbin didasarkan pada persamaan persamaan kontinuitas, energi dan momentum. Persamaan – persamaan ini merupakan hasil hubungan antara berbagai parameter dari turbin.

1. Persamaan Kontinuitas

Persamaan dasar berpangkat satu dari persamaan kontinuitas (Streeter, 1988) :

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (2.1)$$

Karena penampang pipa berbentuk lingkaran, maka $A_1 = \frac{1}{4}fD_1^2$ dan

$$A_2 = \frac{1}{4}fD_2^2 \text{ sehingga;}$$

$$Q = \left(\frac{1}{4}fD_1^2\right) \cdot v_1 = \left(\frac{1}{4}fD_2^2\right) \cdot v_2 \quad (2.2)$$

Dimana;

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

$$D_1 = \text{Diameter pipa pada saluran masuk (m)}$$

$$D_2 = \text{Diameter pipa pada saluran keluar (m)}$$

$$A_1 = \text{Luas penampang pipa pada saluran masuk (m}^2\text{)}$$

$$A_2 = \text{Luas penampang pipa pada saluran keluar (m}^2\text{)}$$

$$v_1 = \text{Kecepatan aliran pipa pada saluran masuk pipa (m/s)}$$

$$v_2 = \text{Kecepatan aliran pipa pada saluran keluar pipa (m/s)}$$

2. Persamaan Energi

Pada ketinggian air pada suatu keadaan, diambil suatu selisih ketinggian Z antara tinggi permukaan air bagian atas dan bawah. Persamaan menurut Bernoulli tersebut adalah (Fritz, 1998) :

$$E = m \cdot g \cdot Z + m \cdot \frac{P}{\dots} + \frac{m \cdot v^2}{2} = \text{konstan} \quad (2.3)$$

Bila pada aliran tersebut diambil jumlah aliran air tiap satu kilogram, maka;

$$E = g \cdot Z + \frac{P}{\dots} + \frac{v^2}{2} \quad (2.4)$$

Dengan persamaan Bernoulli, diperoleh persamaan ditulis (Fritz, 1998) :

$$Z + \frac{P_1}{\dots \cdot g} + \frac{v_1^2 \cdot g}{2} = Z + \frac{P_2}{\dots \cdot g} + \frac{v_2^2 \cdot g}{2} \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) dapat ditulis kembali dalam bentuk :

$$\frac{p_1}{\dots \cdot g} + \frac{v_{r_1}^2 \cdot g}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\dots \cdot g} + \frac{v_{r_2}^2 \cdot g}{2g} + Z_2 \quad (2.6)$$

Dalam hal ini, berlaku hubungan $Z_1 = Z_2$. Terdapat dua perubahan dalam persamaan ini, yaitu kecepatan relatif digunakan pada saat kecepatan mutlak dan terdapatnya suatu batas energi perubahan dengan tinggi tekan

sentrifugal $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$

$$\frac{p_1 - p_2}{\dots \cdot g} = \frac{v_{r_1}^2 - v_{r_2}^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} \quad (2.7)$$

Adapun ditambahkan *head losses* (H_L) akibat adanya gesekan fluida dengan saluran yang berupa material.

Maka, persamaan (2.7) ditulis ulang menjadi :

$$\frac{P_1 - P_2}{\dots \cdot g} = \frac{v_{r_1}^2 - v_{r_2}^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + H_L \quad (2.8)$$

Dimana;

E = Energi (J)

p = Tekanan (Pa)

\dots = Massa jenis (kg/m^3)

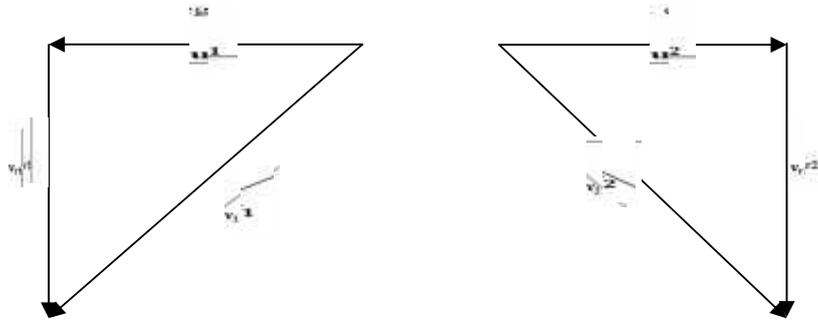
g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

v = Kecepatan aliran (m/s)

H_L = *Head losses* (m)

p_1 dan p_2 = Tekanan pada saluran masuk dan keluar (Pa)

Dengan adanya gerak relatif, diketahui bahwa v_{r1} , v_{r2} , v_1 , v_2 , u_1 dan u_2 membentuk sebuah segitiga kecepatan pada aliran masuk dan keluar turbin, maka;



Gambar 2.3 Vektor segitiga kecepatan pada aliran masuk dan keluar turbin
(Sumber : Fritz, 1998)

Diperoleh vektor dari segitiga kecepatan :

$$u_1 \mapsto v_{r1} = v_1 \quad (2.9)$$

$$u_2 \mapsto v_{r2} = v_2 \quad (2.10)$$

Dimana;

u_1 dan u_2 = Kecepatan penggerak air pada aliran masuk dan keluar turbin (m/s)

v_{r1} dan v_{r2} = Kecepatan relatif air pada aliran masuk dan keluar turbin (m/s)

v_1 dan v_2 = Kecepatan absolut/mutlak air pada aliran masuk dan keluar turbin (m/s)

Untuk mengoperasikan turbin dalam putaran tetap, nilai koefisien tinggi tekan tidak boleh bernilai tetap apabila terjadi perubahan tinggi tekan, karena efisiensi akan turun apabila *head* lebih besar dari yang direncanakan. Kenaikan beban akan meningkatkan torsi yang melawan gerakan turbin. Hal ini akan menyebabkan berkurangnya putaran turbin, tetapi pembukaan katup jarum atau sudu pengatur untuk meningkatkan debit (Q) akan dapat menjaga konstannya putaran tersebut.

Sebaliknya, penurunan beban harus diikuti oleh penutupan pintu air atau katup yang seimbang untuk menjaga kestabilan putaran. Pada kondisi operasi yang normal, sudu pengatur pada turbin reaksi terbuka sekitar tiga perempatnya untuk memungkinkan pembukaan tambahan bila ada peningkatan kebutuhan daya.

Suatu bukaan sudu pengatur akan mengubah vektor kecepatan pada sisi masuk dan sisi keluar *runner*. Air tidak akan lagi masuk ke dalam sudu secara tangensial dan turbulensi yang dihasilkan akan meningkatkan kehilangan *head* di dalam *runner*. Faktor – faktor inilah yang menyebabkan turunnya efisiensi semua jenis turbin bila dioperasikan dalam beban yang kecil.

Tabel 2.1 Jenis turbin dan *head* (Sihombing, 2009)

Tipe Turbin	Klasifikasi <i>Head</i>		
	Tinggi (>50 m)	Sedang (10 s/d 50 m)	Rendah (<10 m)
Impuls	Pelton	<i>Cross Flow</i>	<i>Cross Flow</i>
	Turgo	Turgo	
	<i>Multi Jet Pelton</i>	<i>Multi Jet Pelton</i>	
Reaksi	-	Francis (<i>spiral case</i>)	Francis (<i>open flume</i>)
			Propeller
			Kaplan

Seperti halnya pompa, hubungan antara kapasitas, tinggi tekan dan putaran yang digunakan untuk menurunkan kecepatan spesifik suatu *impeller* yang beroperasi pada putaran turbin (n_t) dan debit (Q), serta pada total ketinggian (H_{tot}) yang menghasilkan persamaan (Douglas, 1998) :

$$n_s = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q}}{(g \cdot H_{tot})^{3/4}} \quad (2.11)$$

Dimana;

$$n_s = \text{Putaran spesifik (rpm)}$$

2.8. Rumusan Dasar untuk Perhitungan pada Turbin Air

2.8.1. Tinggi Jatuh Air (*Head*)

Menurut persamaan Bernoulli maka persamaan tinggi jatuh air sebagai berikut :

- a. Komponen energi tempat

$$E_z = W \cdot z \quad (2.12)$$

Dimana;

W = Gaya berat fluida (N)

z = Jarak tegak diatas suatu elevasi acuan (m)

- b. Komponen energi tekanan

$$E_p = \frac{W \cdot P}{\chi} \quad (2.13)$$

Dimana;

χ = Berat jenis fluida (N/m³)

- c. Komponen energi kecepatan

$$E_k = \frac{W \cdot c^2}{2 \cdot g} \quad (2.14)$$

Dimana;

c = Kecepatan fluida = $\sqrt{2 \cdot g \cdot H}$

Dari persamaan diatas maka, Energi totalnya adalah :

$$E_{total} = E_z + E_p + E_k \quad (2.15)$$

Apabila ruas kanan dan kiri dibagi dengan gaya berat (mg), maka persamaan diatas menjadi tinggi jatuh;

$$H = z + \frac{P}{\dots \cdot g} + \frac{c^2}{2 \cdot g} = \text{konstan} \quad (2.16)$$

Dimana;

H = Total ketinggian air jatuh (m)

z = Energi potensial dibagi gaya berat (m)

$\frac{P}{\dots g}$ = Energi tekanan air dibagi gaya berat (m)

$\frac{c^2}{2 \cdot g}$ = Energi kecepatan aliran air dibagi gaya berat (m)

2.8.2. Daya yang Dihasilkan Turbin

Dari kapasitas atau debit air (Q) dan tinggi air jatuh (H) dapat diperoleh persamaan;

$$P_a = Q \cdot \dots \cdot g \cdot h \quad (2.17)$$

Dimana;

P_a = Daya air (W)

h = Tinggi air jatuh (m)

Untuk mengetahui daya output turbin, hasil perhitungan daya potensial dikalikan dengan efisiensi turbin yang didesain :

$$P_{out} = P \cdot y_{tot} \quad (2.18)$$

Dimana;

P_{out} = Daya *output* turbin (W)

y_{tot} = Efisiensi total turbin (%)

Dalam *Soft Technology Magazine* # 35 yang dikutip dalam *Compendium Of Small Hydro Power*, Ian Scale menuliskan : y_{tot} merupakan efisiensi turbin yang dituliskan dalam bentuk decimal (contoh : 65% menjadi 0,65). y_{tot} termasuk *hydraulic losses* di nosel dan *blade*, serta *mechanical losses* pada bantalan poros. Kamu dengan mudah dapat menebaknya, karena tidak ada cara akurat untuk memprediksikan y_{tot} . Memilih 0,65 akan aman jika

pengerjaannya (pembuatan turbin) dilakukan dengan kualitas yang baik dengan pengerjaan yang biasa – biasa saja. Memilih 0,7 jika anda berfikir dapat melakukannya dengan sangat baik (lengkukan *blade* yang akurat, keseimbangan rotor, permukaan hidrolis yang mulus). Setelah selesai membuatnya maka kamu akan mengetahui seberapa baik tebakanmu, hal ini berdasarkan pengalaman. Tidak satu pun hasil uji di laboratorium universitas – universitas yang menghasilkan efisiensi lebih dari 70% (Anonim 1, 1999).

Dan efisiensi turbin;

$$y_t = \frac{P_t}{P_a} \quad (2.19)$$

Maka;

$$P_t = P_a y_t \quad (2.20)$$

$$P_t = Q \dots g \cdot h y_t \quad (2.21)$$

Dimana;

P_t = Daya turbin (kW)

y_t = Efisiensi turbin

Secara sederhana, dapat dinyatakan bahwa semakin tinggi air jatuh, dengan kapasitas aliran sama akan mempunyai energi potensial yang lebih besar dibandingkan dengan tinggi jatuh air yang lebih rendah. Logika tersebut juga berlaku sebaliknya, yaitu untuk tinggi jatuh air yang sama, energi potensial yang dimiliki akan lebih besar apabila kapasitas aliran air juga besar.

2.8.3. Penentuan Luas Penampang Saluran

Diameter pipa dan luas penampang lintang saluran dalam turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kontinuitas. Yang dimaksud dengan luas penampang lintang saluran adalah suatu luasan permukaan irisan saluran yang dibuat tegak lurus dengan arah aliran cairan.

$$Q = A \cdot c_n \quad (2.22)$$

Dimana;

A = Luas penampang pipa yang dipakai (m^2)

c_n = Kecepatan aliran air (m/s)

Kecepatan aliran air akan besar pada penampang yang semakin kecil, pada kapasitas aliran air yang sama. Adapun kecepatan pancaran air yang keluar dari nosel (turbin Pelton) adalah $c_n = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$

2.8.4. Diameter Runner

Diameter luar *runner* dihitung dengan memakai rumus sebagai berikut;

$$u_1 = \frac{f \cdot D_{OR} \cdot n}{60} \quad (2.23)$$

Maka;

$$D_{OR} = \frac{60 \cdot u_1}{f \cdot n} \quad (2.24)$$

Dimana;

D_{OR} = Diameter luar *runner* (m)

n = Putaran turbin (rpm)

u_1 = Kecepatan *runner* (m/s)

2.8.5. Pengukuran Debit Aliran Fluida Kerja (Air)

Debit aliran adalah jumlah air yang mengalir dalam satuan volume per waktu. Debit adalah satuan besaran air yang keluar dari Daerah Aliran Sungai (DAS). Satuan debit yang digunakan adalah meter kubik per detik (m^3/s). Debit aliran adalah laju aliran air (dalam bentuk volume air) yang melewati suatu penampang melintang sungai per satuan waktu.

Kemampuan pengukuran debit aliran sangat diperlukan untuk mengetahui potensi sumber daya air di suatu wilayah DAS. Debit aliran dapat dijadikan sebuah alat untuk memonitor dan mengevaluasi neraca air suatu kawasan melalui pendekatan potensi sumber daya air permukaan yang ada.

Menurut Mayong ada tiga metode pengukuran debit aliran sungai, antara lain sebagai berikut :

1. *Velocity Methode*

Pada prinsipnya adalah pengukuran luas penampang basah dan kecepatan aliran. Penampang basah diperoleh dengan pengukuran lebar permukaan air dan pengukuran kedalaman dengan tongkat pengukur atau kabel pengukur. Kecepatan aliran dapat diukur dengan metode : metode *current-meter* dan metode apung.

Current meter adalah alat untuk mengukur kecepatan aliran (kecepatan arus). Ada dua tipe *current meter* yaitu tipe baling-baling (*proppeler type*) dan tipe canting (*cup type*). Oleh karena distribusi kecepatan aliran di sungai tidak sama baik arah vertikal maupun horisontal, maka pengukuran kecepatan aliran dengan alat ini tidak cukup pada satu titik. Debit aliran sungai dapat diukur dengan beberapa metode. Tidak semua metode pengukuran debit cocok digunakan. Pemilihan metode tergantung pada kondisi (jenis sungai, tingkat turbulensi aliran) dan tingkat ketelitian yang akan dicapai.

2. Pengukuran Debit dengan Cara Apung (*Float Area Methode*)

Metode ini cukup akurat. Untuk metode ini dilakukan dengan menandai bagian sungai sepanjang minimal 30 kaki (10 meter), dimana alirannya mulus dan lurus. Lalu, menghanyutkan benda ringan mengapung seperti spon atau botol plastic, hitung waktunya. Lakukan beberapa kali atau cari waktu rata – rata yang ditempuh benda terapung tersebut. Lalu kalikan dengan faktor koreksi (0,8 untuk aliran yang mulus dan 0,6 untuk aliran yang penuh bebatuan). Selanjutnya, ukur kedalaman rata – rata sepanjang aliran dan lebar sungainya.

Jika ditulis dalam persamaan akan menjadi :

$$v_{\text{sungai}} = \frac{l \times 0,8}{t} \quad (2.25)$$

Dimana;

$$v_{\text{sungai}} = \text{Kecepatan aliran sungai (m/s)}$$

l = Panjang aliran (m)

t = Waktu (s)

Dan untuk menentukan debitnya digunakan kecepatan sungai tinggal dikalikan dengan lebar sungai dan kedalaman rata – ratanya.

Prinsip pengukuran debit dengan cara apung (*float area methode*), antara lain :

- kecepatan aliran (v) ditetapkan berdasarkan kecepatan pelampung (U)
- luas penampang (A) ditetapkan berdasarkan pengukuran lebar saluran (L) dan kedalaman saluran (D)
- debit sungai (Q) = $A \times v$ atau $v = U \times k$ dimana k adalah konstanta

$$Q = A.U.k \quad (2.26)$$

Dimana;

A = luas penampang basah sungai (m^2)

U = kecepatan pelampung (m/s)

k = koefisien pelampung

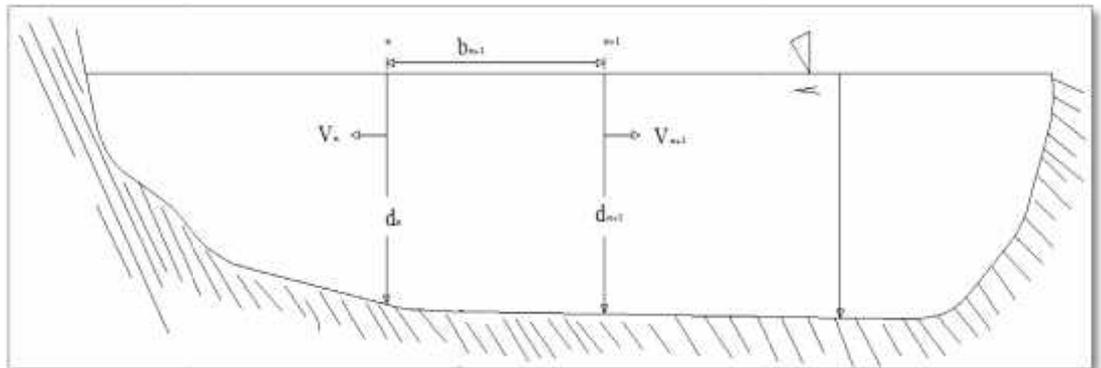
Prinsip pengukuran debit dengan *current meter*, antara lain:

- kecepatan diukur dengan *current meter*
- luas penampang basah ditetapkan berdasarkan pengukuran kedalaman air dan lebar permukaan air. Kedalaman dapat diukur dengan mistar pengukur, kabel atau tali

3. Pengukuran Debit dengan Metode Kontinyu

Current meter diturunkan kedalam aliran air dengan kecepatan penurunan yang konstant dari permukaan dan setelah mencapai dasar sungai diangkat lagi ke atas dengan kecepatan yang sama. Cara menghitung luas seksi (penampang) ada 2 yaitu;

1. Luas rata – rata penampang sungai (*Mean Section*)



Gambar 2.4 Menghitung luas penampang dengan *Mean Section*

$$a_n = \frac{d_n + d_{n+1}}{2} \times b_{n+1}$$

Dimana;

a_n = Luas penampang A

d_n = Kedalaman sungai (1)

d_{n+1} = Kedalaman sungai (2)

b_{n+1} = Lebar penampang sungai

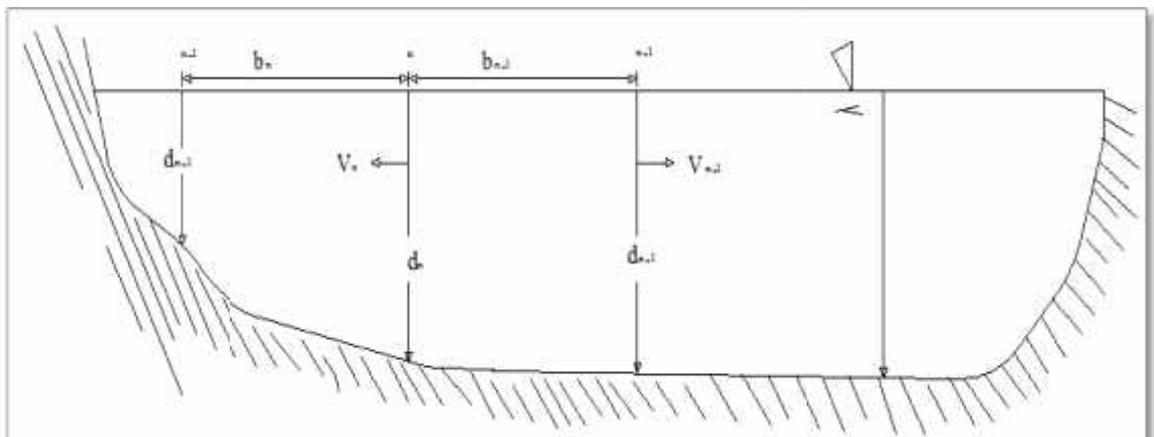
$$\bar{V}_n = \frac{V_n + V_{n+1}}{2}$$

Dimana;

\bar{V}_n = Kecepatan rata – rata pada penampang ke-n

\bar{V} = Kecepatan rata – rata penampang sungai

2. Luas antar penampang sungai (*Mid Section*)



Gambar 2.5 Menghitung luas penampang dengan *Mid Section*

$$a_n = \frac{b_n + b_{n+1}}{2} \times d_n$$

Cara menghitung debit air (Q) dan debit penampang sungai (q);

$$q_n = a_n \times \bar{V}_{n+1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

Dimana;

q_n = Debit penampang sungai ke-n

q_i = Debit penampang sungai ke-I

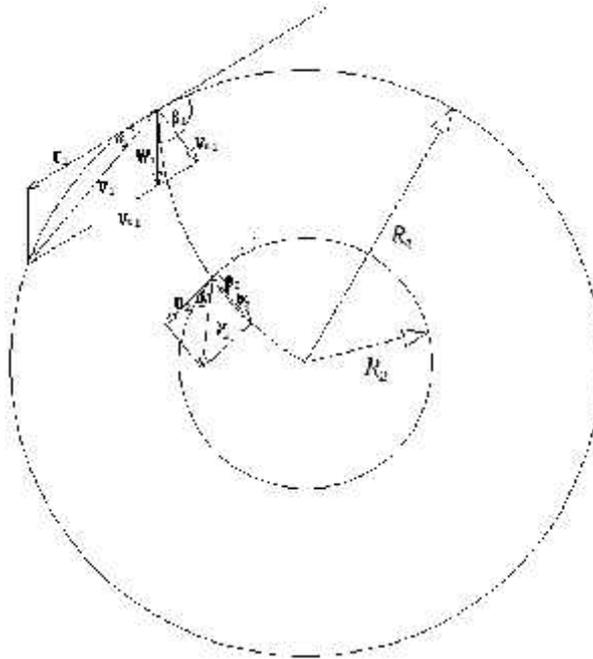
a_n = Luas peampang ke-n

\bar{V}_n = Kecepatan aliran air rata – rata pada penampang sungai yang bersangkutan (ke-n)

\bar{V}_{n+1} = Kecepatan rata – rata pada kedalaman sungai d_{n+1}

Q = Debit air sungai

2.9. Geometri Aliran pada Rotor



Gambar 2.6 Geometri aliran pada rotor
(Sumber : Furze, 2002)

Besarnya komponen tangensial dari kecepatan absolut aliran air yang rotor (*inlet*), yaitu;

$$V_{u_1} = V_1 \cos \gamma_1 \quad (2.27)$$

Dimana;

V_{u_1} = Komponen tangensial dari kecepatan absolut aliran air saat memasuki rotor (m/s)

V_1 = Kecepatan air *inlet* ke turbin (m/s)

γ_1 = Sudut masuk air ke dalam sudu (*blade*)

Besarnya sudut masuk air, sesuai dengan yang dianjurkan Ian Scale dan Mockmore. Dan komponen radial dari kecepatan absolut air ketika memasuki rotor;

$$V_{R_1} = V_1 \sin \gamma_1 \quad (2.28)$$

Dimana;

V_{R_1} = Komponen radial dari kecepatan absolut air ketika memasuki rotor (m/s)

Setelah mengetahui besarnya V_1 maka kecepatan tangensial aliran saat memasuki rotor dapat dicari dengan rumus;

$$U_1 = \frac{V_{u_1}}{\lambda} \quad (2.29)$$

Dimana;

U_1 = Kecepatan tangensial aliran saat memasuki rotor (m/s)

λ = Koefisien kerja dari turbin yang sama dengan 2

Besar nilai ini diambil berdasarkan asumsi dari turbin *impuls* pada kondisi ini memiliki derajat reaksi sama dengan nol. Dalam kenyataannya, turbin tidak akan dapat beroperasi pada kondisi ini. (Furze, 2002)

Menentukan sudut aliran relatif pada inlet rotor (S_1);

$$S_1 = 90^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{V_{u_1} - U_1}{V_{R_1}} \right) \quad (2.30)$$

Dimana;

S_1 = Sudut aliran relatif pada *inlet* rotor ($^\circ$)

Dengan diketahuinya sudut aliran relatif maka kecepatan relatif aliran pada *inlet* rotor adalah;

$$W_1 = \frac{V_{u_1} - U_1}{\sin(S_1 - 90^\circ)} \quad (2.31)$$

Dimana;

W_1 = Kecepatan relatif aliran pada *inlet* rotor (m/s)

2.9.1. Geometri Rotor

Berdasarkan anjuran Ian Scale, rasio antara diameter dalam dan diameter luar rotor adalah;

$$M = \frac{D_{IR}}{D_{OR}} \quad (2.32)$$

Dimana;

M = Rasio antara diameter dalam dan diameter luar

D_{OR} = Diameter luar rotor (m)

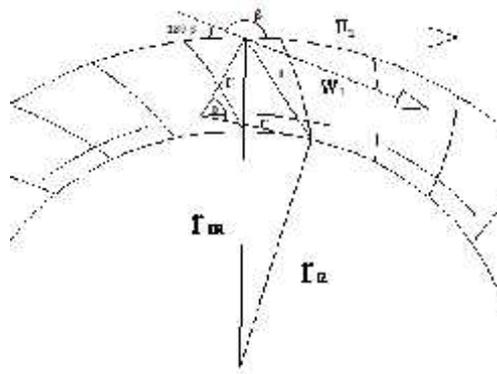
D_{IR} = Diameter dalam rotor (m)

Dengan didapatkannya nilai – nilai dari persamaan – persamaan di atas, maka tebal disk adalah;

$$a = \frac{D_{OR} - D_{IR}}{2} \quad (2.33)$$

Dimana;

a = Tebal disk *runner* (m)



Gambar 2.7 *Layout blades*
(Sumber : Furze, 2002)

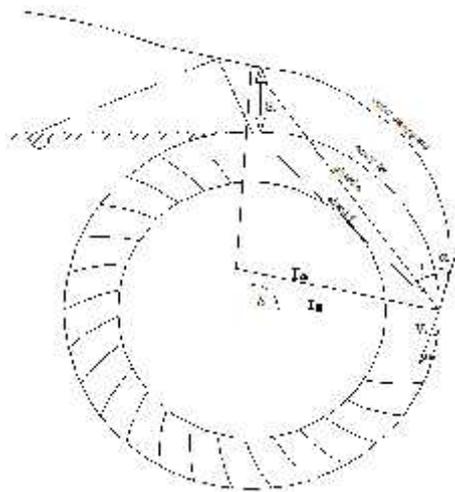
Untuk menentukan Jarak antar sudu (*blade*) di seputar disk digunakan persamaan sebagai berikut;

$$t = \frac{fD_{OR}}{Z} \quad (2.34)$$

Dimana;

Z = Jumlah sudu (*blade*)

t = Jarak antar sudu (*blade*) (m)



Gambar 2.8 *Nosel dan rotor*
(Sumber : Furze, 2002)

Jumlah sudu (*blade*) inlet;

$$X = \frac{Z}{360} \quad (2.35)$$

Dimana;

$$\begin{aligned} X &= \text{Jumlah sudu inlet} \\ &= \text{Besarnya sudut rotor yang dikelilingi nosel } (^{\circ}) \end{aligned}$$

Persamaan untuk menghitung panjang rotor;

$$B = Q \frac{Z}{I} \frac{1}{fV_1 D_{OR} \sin r_1} \quad (2.36)$$

Dimana;

$$B = \text{Panjang rotor (m)}$$

Rasio normal antara panjang rotor dengan diameter luar rotor;

$$0,5 \leq \frac{B}{D_{OR}} \leq 3 \quad (2.37)$$

2.9.2. Geometri Aliran Fluida Kerja (Air) di Pertengahan Rotor

Fase ini merupakan fase yang dimana, fluida kerja keluar dari sudu (*blade*) setelah terjadi tumbukan pertama antara fluida kerja dan sudu. Bagian ini perlu diperhitungkan karena nantinya kondisi fluida saat keluar dari tahap pertama akan sama dengan kondisi fluida saat memasuki tahap kedua (misalnya sudut keluar sudu pertama sama dengan sudut masuk pada sudu tahap kedua).

$$r_2 = \tan^{-1} \left(\frac{1}{M} \cos(180^{\circ} - s_1) \right) \quad (2.38)$$

Dimana;

$$r_2 = \text{Sudut keluar aliran fluida kerja dari sudu pada tahap pertama } (^{\circ})$$

Kecepatan tangensial aliran di pertengahan rotor U_2 ;

$$U_2 = U_1 \cdot M \quad (2.39)$$

Dimana;

U_2 = Kecepatan tangensial saat keluar dari sudu pada tahap pertama (m/s)

Sudut aliran relatif;

$S_2 = 90^\circ$ (anjuran Ian Scale)

Dimana;

S_2 = Sudut aliran relatif fluida kerja keluar dari sudu pada tahap pertama ($^\circ$)

Kecepatan relatif aliran di pertengahan rotor;

$$W_2 = U_2 \tan r_2 \quad (2.40)$$

Dimana;

W_2 = Kecepatan relatif aliran fluida kerja keluar dari sudu pada tahap pertama (m/s)

Kecepatan absolut aliran fluida kerja di pertengahan turbin;

$$V_2 = \sqrt{U_2^2 + W_2^2} \quad (2.41)$$

Dimana;

V_2 = Kecepatan absolut aliran fluida kerja keluar dari sudu pada tahap pertama (m/s)

2.9.3. Geometri Sudu (*Blade*)

Setelah menentukan kondisi aliran pada turbin, maka dimensi rotor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut;

Besarnya sudut busur sudu (*blade*);

$$w = \frac{360^\circ}{Z} \quad (2.42)$$

Dimana;

w = Besarnya sudut busur sudu (*blade*) ($^\circ$)

Untuk radius sudu (*blade*) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini;

$$r = \frac{R_1^2 - R_2^2}{2R_1 \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1)} \quad (2.43)$$

Dimana;

r = Radius sudu (*blade*) (m)

R_1 = Jari –jari luar rotor (m)

R_2 = Jari –jari dalam rotor (m)

Besar sudut busur sudu (*blade*);

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\cos(180^\circ - \alpha_1)}{\sin(180^\circ - \alpha_1) + M} \right) \quad (2.44)$$

Dimana;

α = Besar sudut sudu (*blade*) (°)

Panjang garis lurus (*chord*) L ;

$$L = 2 \cdot r \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.45)$$

Dimana;

L = Panjang garis lurus (*chord*) antar ujung sudu (*blade*) (m)

BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian didefinisikan sebagai penyelidikan yang sistematis terorganisir berdasarkan pada fakta atau data, kritis atau ilmiah terhadap permasalahan yang dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian yang objektif. Sedangkan metode penelitian didefinisikan sebagai cara – cara yang digunakan dalam merancang penelitian, penemuan data dan analisis data serta cara – cara pengambilan kesimpulan.

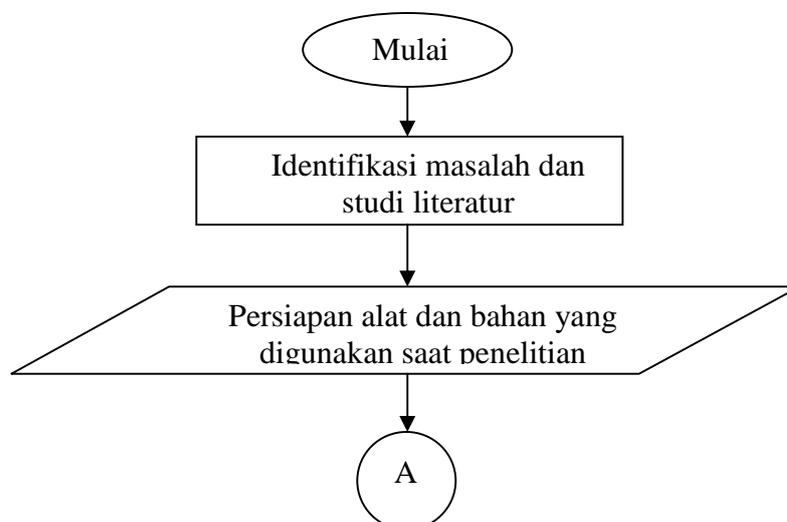
Dalam penelitian ini dilakukan dengan dua metode, yaitu :

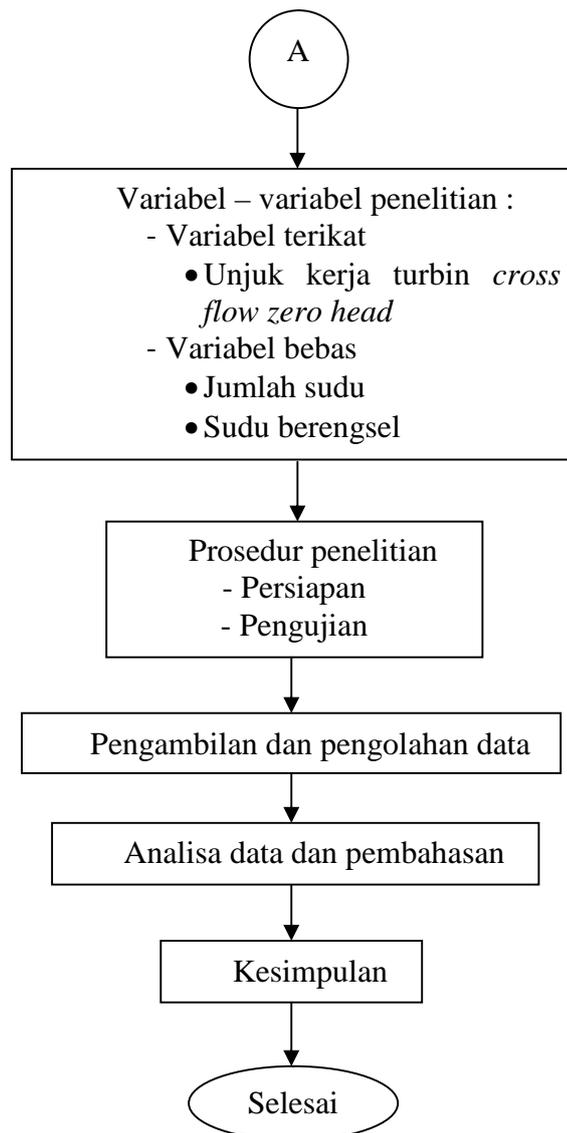
1. Studi literatur (*library research*), yaitu dengan mempelajari literatur – literatur dan tulisan – tulisan yang menjelaskan tentang teori yang berkaitan dengan masalah yang dibahas dalam penelitian ini.
2. Studi eksperimental, yaitu dengan melakukan pengujian langsung ke lapangan atau tempat pengujian agar diperoleh data – data yang diinginkan.

3.1. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mataram.

3.2. Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3. Identifikasi Masalah dan Studi Literatur

Untuk mengembangkan perkembangan dari PLTMH yang dapat menambah pasokan energi listrik ke konsumen. Dengan memanfaatkan saluran irigasi yang awalnya hanya berguna untuk pengairan di persawahan, karena aliran air di saluran irigasi kebanyakan merupakan saluran yang mendatar (*zero head*). Sehingga diperlukan penelitian seperti ini agar terjadi pengembangan PLTMH yang dapat memanfaatkan sesuatu yang mulanya memiliki manfaat dan kegunaan yang sangat kecil dan sempit.

3.4. Persiapan Alat dan Bahan

3.4.1. Alat Penelitian

Beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. *Stopwacth*



Gambar 3.2 *Stopwacth*

Digunakan untuk mengukur waktu debit air yang mengalir pada variasi jumlah sudu.

2. Gelas Ukur



Gambar 3.3 Gelas ukur yang digunakan untuk pengukuran debit air

Untuk mengukur volume air pada saat mengukur debit air yang dikombinasikan dengan *stopwatch*.

3. *Tachometer*



Gambar 3.4 *Tachometer*

Digunakan untuk mengetahui putaran generator.

4. AVOMeter



Gambar 3.5 AVometer

Digunakan untuk mengukur besar tegangan (V) dan arus (I) listrik yang dihasilkan oleh turbin tersebut.

5. Meteran

Digunakan untuk mengukur panjang atau jarak beberapa bagian atau komponen yang ada pada rangka instalasi turbin yang digunakan untuk pengujian saat penelitian.

6. Ember atau bak penampung

Digunakan untuk menampung air sebagai fluida kerja pada turbin yang dibuang setelah memutar atau menggerakkan rotor turbin. Ada di bagian bawah rangka instalasi turbin.

7. Instalasi turbin *cross flow*



Gambar 3.6 Instalasi turbin yang digunakan untuk pengujian saat penelitian

- Turbin hasil desain dan rancangan beberapa dosen yang melakukan penelitian terhadap turbin tersebut. Air yang mengalir mempunyai energi hidrolis yang dialirkan ke suatu turbin. Turbin terdiri dari runner yang dihubungkan dengan poros adalah untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis atau daya poros. Turbin bisa dihubungkan langsung dengan generator atau melalui roda-gigi atau belt dan pulley, tergantung pada putaran turbin yang dihasilkan dan putaran generator yang harus diputar.
- Pompa air, berguna untuk memompa air dari wadah tampungan air menuju wadah penampung air yang menuju saluran keluar air menuju permukaan sudu turbin sehingga menyebabkan *runner* turbin berputar dan menggerakkan generator.
- Generator, mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin air (putaran poros) untuk menggerakkan generator menjadi energi listrik. Tipe generator yang sering dipakai adalah generator yang menghasilkan arus bolak balik yang dikenal sebagai alternator. Ada dua tipe generator, yaitu generator sinkron dan asinkron (umumnya disebut generator induksi). Generator sinkron adalah standar generator yang digunakan dalam pembangkit daya listrik dan digunakan pada kebanyakan power plant. Kelebihan dari generator sinkron adalah mempunyai rotor eksitasi yang terpisah, dipakai baik pada system terisolasi maupun interkoneksi dengan sistem tenaga listrik. Generator asinkron (induksi) mempunyai rotor *exiter*, biasanya dipakai pada *networks* dengan sumber listrik yang lain. Pada sistem yang terisolasi (*independent*), generator ini harus dihubungkan dengan kapasitor untuk menghasilkan listrik. Kelebihan generator induksi adalah sering digunakan untuk penyediaan tenaga listrik di daerah terpencil karena generator induksi cukup kuat, kompak dan handal. Generator induksi dan generator sinkron menghasilkan arus bolak-balik (AC). Keunggulan dari arus bolak-balik (AC) adalah dapat menyalurkan daya listrik pada jarak yang cukup jauh. Berlainan jika kita menggunakan arus searah (DC) yang hanya dapat menghasilkan listrik untuk penggunaan

pada jarak yang sangat dekat atau pada *power house* sehingga jarang dipakai pada instalasi tenaga listrik modern kecuali untuk system yang dayanya hanya beberapa ratus watt atau kurang. Dengan demikian maka, arus bolak-balik cocok untuk proyek kelistrikan karena beban listrik biasanya tersebar dan keseringan jaraknya jauh dari generator.

- Lampu LED (*light Emitting Diode*), sebagai beban terhadap daya listrik yang dihasilkan turbin tersebut.
- *Spool*, dengan jumlah 6 buah dan 2500 lilitan kawat tembaga berdiameter 0,1 mm pada masing – masing *spool*.

8. Tabung Pitot

Untuk mengukur ketinggian relatif terhadap aliran fluida inlet menuju permukaan sudu pada rotor dan fluida outlet menuju saluran pembuangan.

3.4.2. Bahan Penelitian

Beberapa bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Air
2. *Acrylic*
3. Kabel
4. Epoksi dan *hardener*
5. Dop
6. Lem silikon

3.5. Variabel – Variabel Penelitian

Adapun beberapa hal yang menjadi variabel dalam penelitian ini adalah :

1. Variabel terikat (*dependent variables*) adalah faktor – faktor yang diobservasi dan diukur untuk menentukan adanya pengaruh variabel bebas. Tujuan utama dari penelitian adalah menjelaskan variabel terikat. Dengan menganalisis variabel terikat, diharapkan dapat ditemukan jawaban atau penyelesaian masalah. Yang menjadi variabel terikat pada penelitian ini adalah analisa variasi jumlah sudu berengsel terhadap unjuk kerja turbin *cross flow zero head*. Unjuk kerja turbin yang dianalisa antara lain; efisiensi sistem, energi *output*

dan putaran generator. Sehingga dapat mengembangkan PLTMH yang menggunakan saluran irigasi untuk pengairan di area persawahan yang aliran airnya mengalir secara mendatar tanpa adanya ketinggian jatuh air (*zero head*).

2. Variabel bebas (*independent variables*) adalah variabel yang menyebabkan atau mempengaruhi variabel terikat. Adapun yang menjadi variabel bebas pada penelitian ini adalah jumlah sudu berengsel akan mempengaruhi unjuk kerja turbin. Semakin banyak jumlah sudu maka unjuk kerja turbin menjadi semakin baik. Perbandingan unjuk kerja turbin dengan sudu tetap atau tidak berengsel dengan sudu berengsel. Anggapan sementara, dengan menggunakan sudu berengsel akan mengurangi gaya seret (*drag force*) yang terjadi di bagian belakang sudu turbin sehingga unjuk kerja turbin menjadi lebih baik dengan menggunakan sudu berengsel.

3.6. Prosedur Penelitian

3.6.1. Persiapan

Tahap persiapan yang dilakukan saat penelitian adalah :

1. Persiapan alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian.
2. Pemasangan alat dan bahan sesuai dengan kegunaan dan fungsinya pada saat penelitian.

3.6.2. Pengujian

Tahap pengujian yang dilakukan saat penelitian adalah :

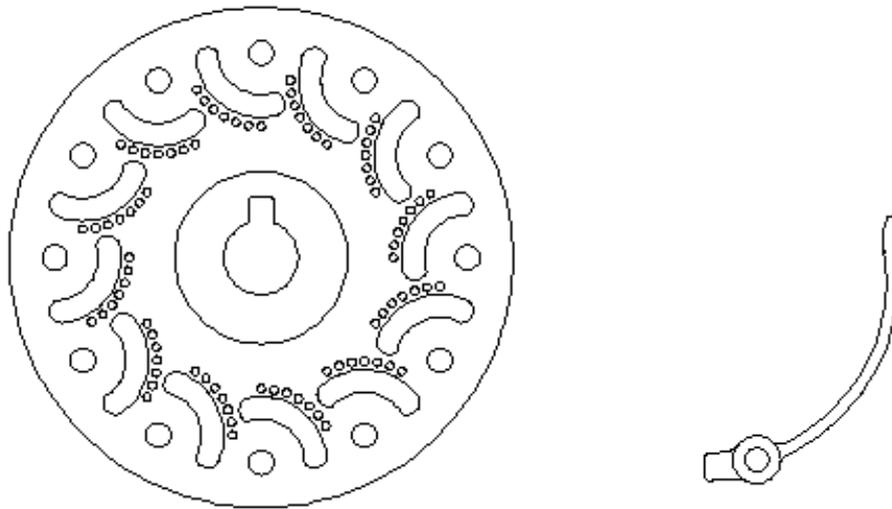
1. Bak penampung air yang ada di bagian bawah rangka turbin, diisi penuh.
2. Keran saluran pembuangan fluida kerja yang terhubung langsung dengan saluran yang mengalirkan air dari bak penampung bagian bawah instalasi turbin ditutup, agar tidak mengganggu proses pendorongan air ke kotak penampung air bagian atas instalasi turbin sehingga aliran air yang masuk ke turbin menjadi lambat dan rotor tidak berputar.
3. Kemudian pompa listrik dihidupkan

4. Setelah pompa dihidupkan, pentil di ujung kotak penampung air bagian atas ditekan yang bertujuan untuk mengurangi gelembung udara di dalam bak penampung air bagian atas.
5. Air buangan yang keluar dari saluran pembuangan turbin, ditampung dengan gelas ukur (ember). Dikombinasikan dengan pengukuran lama waktu yang digunakan agar gelas ukur terpenuhi volumenya hingga 5 Watt, dengan menggunakan *stopwatch*.
6. Pencatatan data – data antara lain; putaran generator, tinggi air raksa pada tabung pitot, tegangan listrik dan arus listrik dengan parameter yang divariasikan saat penelitian adalah jumlah sudu (4, 6 dan 12 sudu) dan pergerakan sudu (sudu berengsel dan sudu tetap).
7. Pompa listrik dimatikan. Kemudian, pentil di ujung kotak penampung air bagian atas ditekan yang bertujuan untuk mengurangi gelembung udara di dalam bak penampung air bagian atas. Dan, keran saluran pembuangan air dari kotak penampung air bagian atas instalasi turbin dibuka. Agar air buangan di saluran pembuangan dapat keluar dengan baik dan tersalur langsung menuju bak penampung air bagian bawah instalasi turbin.

3.7. Rangkaian Sudu Turbin *Cross Flow* yang Digunakan



Gambar 3.7 Sudu yang digunakan saat pengujian



Gambar 3.8 *Disk* dan sudu turbin tampak depan

Langkah – langkah yang dilakukan saat pengujian:

1. Pembukaan *disk* turbin dilakukan pada *disk* yang kemunculan poros turbinnya pendek. Sebelum lempengan *disk* tersebut ditarik dari porosnya, dilakukan pelepasan baut pengunci engsel sudu.
2. Dilakukan pengambilan sudu satu per satu untuk memvariasikan jumlah sudu yang dipasang pada *disk* dengan posisi yang mengelilingi poros turbin (rotor).
3. Untuk memvariasikan gerakan engsel sudu tetap dan sudu berengsel, dilakukan pengencangan baut pengunci engsel sudu agar diperoleh gerakan sudu yang tetap.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Di dalam bab ini akan menjelaskan tentang hasil pengujian yang diperoleh setelah melakukan penelitian, dengan beberapa variabel yang ingin diteliti saat penelitian. Beberapa data yang diambil saat penelitian adalah data – data yang berhubungan dengan daya listrik *ouput* yang dapat dihasilkan oleh generator pada instalasi turbin yang berfungsi sebagai salah satu bagian dari PLTMH. Dengan memvariasikan jumlah sudu dan membandingkan gerakan sudu berengsel dengan sudu tetap, saat turbin berputar sehingga menghasilkan energi listrik akibat poros turbin yang terhubung langsung dengan generator.

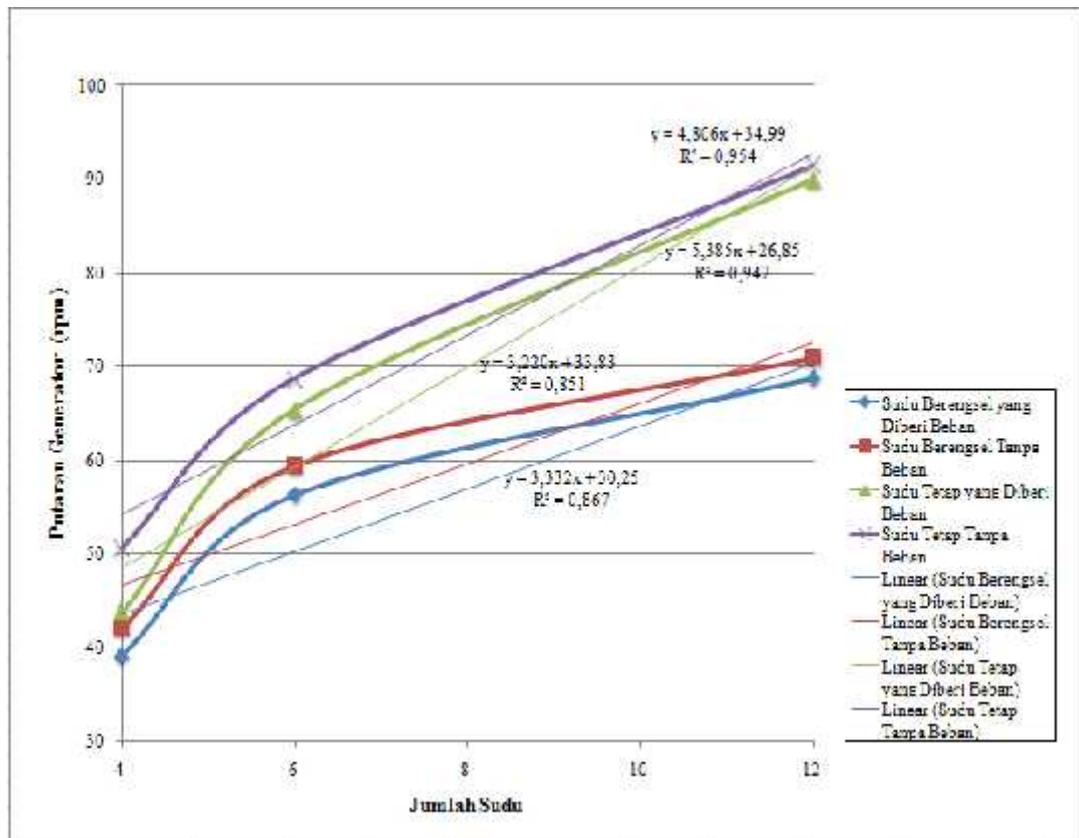
Data yang diperoleh setelah pengujian pada instalasi turbin adalah putaran generator, tegangan listrik, arus listrik, debit air, kecepatan aliran fluida masuk menabrak permukaan sudu turbin (*inlet*) pada rotor dan kecepatan aliran fluida keluar turbin (*outlet*) dari rotor. Daya listrik *output* yang dihasilkan generator dihitung dengan menggunakan persamaan yang mengalikan tegangan listrik (V) dengan arus listrik (I).

Dari data – data yang telah diperoleh tersebut, dapat terlihat perbandingan saat divariasikan jumlah sudu dengan gerakan sudu berengsel dan gerakan sudu tetap. Untuk efisiensi sistem instalasi turbin tersebut, dilakukan perbandingan antara energi listrik yang dihasilkan generator sebagai energi *output* generator dan energi kinetik *input* pada instalasi turbin kemudian dikali 100%. Berikut ini adalah daftar hasil pengukuran putaran generator yang diperoleh dan ditampilkan pada sub bab 4.1, dalam bentuk tabel 4.1.

4.1. Hasil Pengukuran Putaran Generator

Tabel 4.1 Putaran generator (rpm)

Variasi		12			Rata-rata	6			Rata-rata	4			Rata-rata
Sudu Berengsel	Diberi beban	68,5	68,7	69,0	68,7	56,6	56,2	56,0	56,3	39,3	38,8	39,1	39,1
	Tanpa beban	70,9	71,1	70,8	70,9	59,3	59,5	59,3	59,4	42,2	42,0	42,0	42,1
Sudu Tetap	Diberi beban	89,9	90,0	89,9	89,9	65,9	65,2	64,9	65,3	43,7	43,6	44,0	43,8
	Tanpa beban	91,5	91,6	91,3	91,5	68,8	68,4	68,8	68,7	50,8	51,2	49,8	50,6



Gambar 4.1 Grafik perbandingan putaran generator saat divariasikan jumlah sudu dan pergerakan sudu serta pemberian beban pada generator turbin

Pada variasi jumlah sudu saat gerakan sudu berengsel yang diberi beban, putaran generator yang paling banyak dihasilkan saat jumlah sudu 12 buah dengan putaran generator rata – ratanya sebesar 68,7 rpm. Sedangkan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 6 buah menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 56,3 rpm dan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 4 buah akan menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 39,1 rpm.

Pada variasi jumlah sudu saat gerakan sudu berengsel tanpa beban, putaran generator yang paling banyak dihasilkan saat jumlah sudu 12 buah dengan putaran generator rata – ratanya sebesar 70,9 rpm. Sedangkan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 6 buah menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 59,4 rpm dan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 4 buah akan menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 42,1 rpm.

Pada variasi jumlah sudu saat gerakan sudu tetap yang diberi beban, putaran generator paling banyak dihasilkan saat jumlah sudu 12 buah dengan putaran generator rata – ratanya sebesar 89,9 rpm. Sedangkan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 6 buah menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 65,3 rpm dan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 4 buah akan menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 43,8 rpm.

Pada variasi jumlah sudu saat gerakan sudu tetap tanpa beban, putaran generator paling banyak dihasilkan saat jumlah sudu 12 buah dengan putaran generator rata – ratanya sebesar 91,5 rpm. Sedangkan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 6 buah menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 68,7 rpm dan saat jumlah sudu yang digunakan sebanyak 4 buah akan menghasilkan putaran generator rata – rata sebesar 50,6 rpm.

Data – data hasil penelitian menunjukkan bahwa saat gerakan sudu tetap tanpa beban dan saat jumlah sudu 12 buah yang menghasilkan putaran generator rata – rata yang paling besar, sebesar 91,5 rpm. Hal ini disebabkan karena gerakan sudu tetap terbuka saat turbin berputar, sehingga aliran fluida dapat menumbuk permukaan sudu dengan tepat sasaran. Sehingga, poros turbin yang terhubung langsung dengan generator dapat berputar dengan cepat. Penjelasan yang lebih tepat ada pada lampiran 1.

Putaran generator akan semakin besar bila aliran listrik yang dihasilkan genertor tidak dihubungkan ke beban yang berupa rangkaian listrik dengan hambatan berupa lampu LED. Variasi gerakkan sudu berengsel dengan sudu tetap mengakibatkan perbedaan putaran generator pada instalasi turbin. Karena gerakkan sudu berengsel akan mengakibatkan pembebanan pada poros turbin saat mentransmisi energi kinetik air menjadi energi mekanik, sehingga generator menghasilkan energi listrik.

Hubungan antara putaran generator turbin dengan energi listrik yang dihasilkan pada instalasi turbin sangat berpengaruh, semakin banyak putaran generator maka energi listrik yang dihasilkan akan semakin besar. Gerakan sudu juga berpengaruh terhadap proses transmisi energi kinetik aliran air yang

menabrak permukaan sudu menjadi energi mekanik pada poros turbin yang memutar genertor turbin sehingga menghasilkan energi listrik.

4.2. Perhitungan Efisiensi Sistem pada Instalasi Turbin

Untuk menghitung besar efisiensi sistem pada instalasi turbin dapat dihitung dengan perumusan; energi *output* generator dibagi dengan energi kinetik *input* kemudian dikali 100%. Energi *output* generator adalah energi listrik yang dihasilkan generator karena putaran generator turbin, sedangkan energi kinetik *input* adalah energi kinetik yang keluar dari nosel pada saat fluida mengalir masuk menuju permukaan sudu (*inlet*) pada rotor.

$$y_{sistem} = \frac{E_{og}}{\dot{E}k_i} = \frac{E_{og}}{\frac{1}{2} \times \dot{m} \times v_i^2} \times 100\%$$

Dimana;

y_{sistem} = Efisiensi sistem (%)

E_{og} = Energi *output* generator (energi listrik yang dihasilkan generator (Watt))

$\dot{E}k_i$ = Energi kinetik *input* (laju aliran energi kinetik air yang keluar nosel (Watt))

\dot{m} = Laju aliran massa air (kg/s)

v_i = Kecepatan aliran air yang menabrak permukaan sudu (m/s)

4.2.1. Hubungan antara Tegangan Listrik dengan Arus Listrik

Berikut ini adalah hasil pembacaan menggunakan alat ukur AVOMeter analog untuk membaca seberapa besar tegangan dan arus listrik yang dihasilkan turbin akibat putaran poros turbin yang terhubung langsung dengan generator turbin. Sehingga menghasilkan tegangan listrik dan arus listrik setelah dihubungkan dengan rangkaian listrik yang diberi hambatan berupa lampu LED.

Tabel 4.2 Tegangan listrik (V) dan arus listrik (I) sebagai energi *output* generator

Variasi	12		6		4	
	V (Volt)	I (Ampere)	V (Volt)	I (Ampere)	V (Volt)	I (Ampere)
Sudu Berengsel	60	0,36	50	0,30	40	0,22
Sudu Tetap	65	0,45	60	0,22	50	0,25

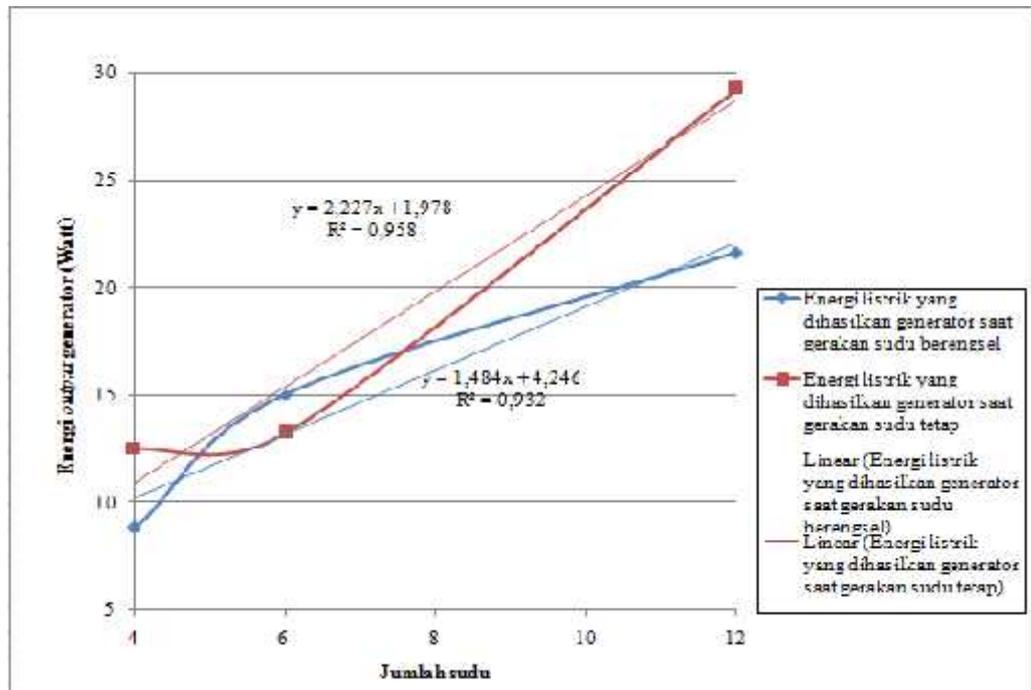
Dengan menggunakan rumus perhitungan tegangan listrik (V) dikalikan dengan arus listrik (I) akan diperoleh ukuran energi listrik yang dihasilkan generator (energi *output* generator). Berikut ini adalah perhitungan yang digunakan untuk memperoleh besar energi listrik yang dihasilkan generator saat jumlah sudu 12 buah dengan gerakkan sudu berengsel;

$$\begin{aligned}
 E_{og} &= V \times I \\
 &= 60 \text{ Volt} \times 0,36 \text{ Ampere} \\
 &= 21,60 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Dengan perhitungan yang sama seperti yang di atas, akan diperoleh hasil energi listrik yang dihasilkan generator dengan variasi jumlah sudu dan pergerakan sudu yang lain dalam tabel 4.3, berikut ini.

Tabel 4.3 Energi listrik yang dihasilkan generator (energi *output* generator)

Variasi	Energi listrik yang dihasilkan generator (E_{og}) (Watt)		
	Variasi Jumlah Sudu		
	12	6	4
Sudu Berengsel	21,60	15,00	8,80
Sudu Tetap	29,25	13,20	12,50



Gambar 4.2 Grafik energi listrik yang dihasilkan generator (energi *output* generator)

Dari gambar 4.2, dapat disimpulkan bahwa daya listrik yang paling besar dihasilkan saat variasi jumlah sudu sebanyak 12 buah dengan gerakan sudu tetap. Dari persamaan; $E_{og} = V \times I$, dapat disimpulkan bahwa energi listrik yang dihasilkan akan semakin besar bila tegangan listrik atau arus listrik yang digunakan semakin besar pula.

Bila dihubungkan dengan perputaran turbin, kesimpulan yang dapat disimpulkan yaitu menjadi semakin tinggi putaran generatornya maka daya listrik yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Tetapi, tegangan listrik dan arus listrik dapat terukur setelah dihubungkan dengan rangkaian listrik sebagai bebannya.

4.2.2. Perhitungan Laju Aliran Energi Kinetik *Inlet* pada Instalasi Turbin

Berikut ini adalah perhitungan laju aliran energi kinetik *inlet* pada instalasi turbin. Kecepatan aliran air yang keluar nosel dan menuju permukaan sudu (v_i) memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan kecepatan aliran air yang keluar dari celah – celah sudu pada rotor turbin (v_o). Karena kecepatan

laju aliran energi kinetik *inlet* ke rotor akan ditransmisikan ke poros turbin menjadi energi mekanik, maka kecepatan laju aliran energi kinetik *outlet* rotor akan mengecil. Dari energi mekanik pada poros akan ditransmisikan menjadi energi listrik yang dihasilkan generator akibat putaran generator turbin. Energi kinetik yang diserap turbin adalah energi kinetik *inlet* dikurangi energi kinetik *output*.

Kecepatan dapat diukur dengan menggunakan tabung pitot sebagai alat ukur, dan diperhitungkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut;

$$v = \sqrt{\frac{2 \times g \times \dots' \times h}{\dots_u}}$$

- Dimana; g = Gaya gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)
 h = Ketinggian relatif terhadap suatu referensi (m)
 \dots' = Massa jenis air raksa (13.600 kg/m^3)
 \dots_u = Massa jenis udara ($1,2 \text{ kg/m}^3$)

Tabel 4.4 Ketinggian relatif terhadap aliran fluida masuk (*Inlet*) menuju permukaan sudu turbin pada rotor

Variasi	12			Rata-rata (m)	6			Rata-rata (m)	4			Rata-rata (m)
	$h \times 10^{-2}$ (m)				$h \times 10^{-2}$ (m)				$h \times 10^{-2}$ (m)			
Sudu Berengsel	1,9	2	2	$1,97 \times 10^{-2}$	1,8	1,9	2	$1,90 \times 10^{-2}$	1,8	1,9	1,8	$1,83 \times 10^{-2}$
Sudu Tetap	2,1	2,1	2	$2,07 \times 10^{-2}$	1,8	1,9	1,9	$1,87 \times 10^{-2}$	2	2	2	$2,00 \times 10^{-2}$

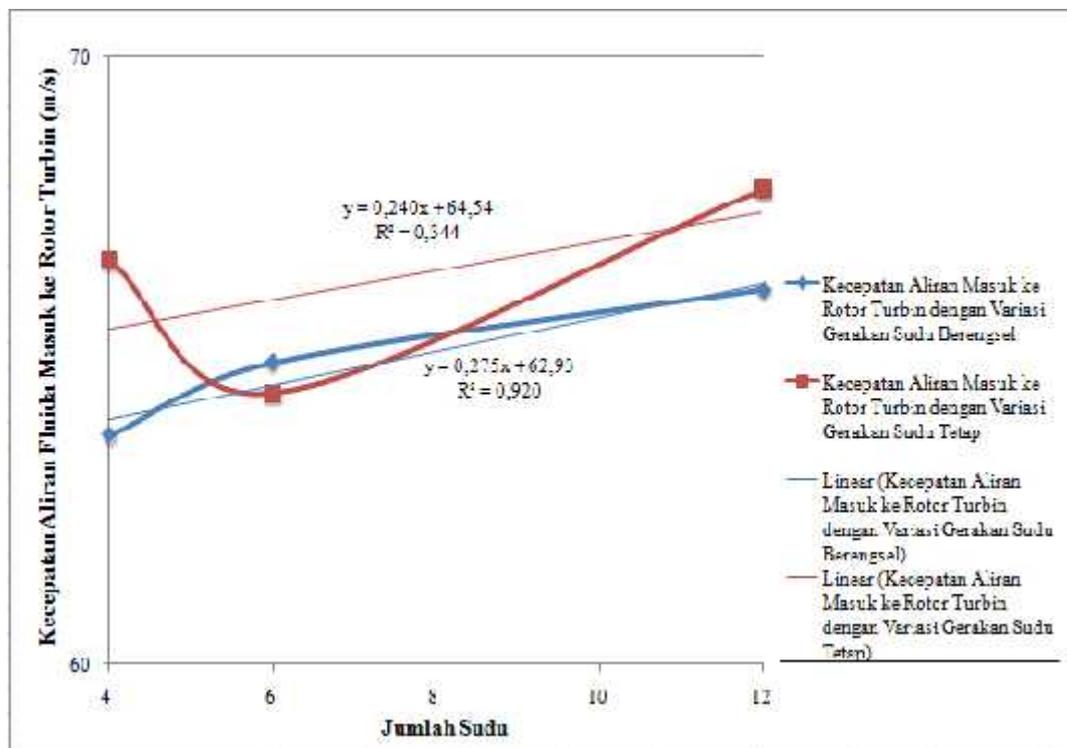
Berikut ini adalah perhitungan kecepatan aliran fluida masuk (*Inlet*) menuju permukaan sudu turbin pada rotor dengan variasi jumlah sudu sebanyak 12 buah dan pergerakan sudu berengsel.

$$\begin{aligned}
 v_i &= \sqrt{\frac{2 \times g \times \dots' \times h_i}{\dots_u}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \text{ m/s}^2 \times 13.600 \text{ kg/m}^3 \times 1,97 \times 10^{-2} \text{ m}}{1,2 \text{ kg/m}^3}} \\
 &= 66,15 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Besar kecepatan aliran fluida masuk (*Inlet*) menuju permukaan sudu turbin pada rotor dengan variasi jumlah sudu dan pergerakan sudu lainnya akan ditampilkan pada tabel 4.5, berikut ini.

Tabel 4.5 Kecepatan aliran fluida masuk (*Inlet*) menuju permukaan sudu turbin pada rotor

Variasi	Kecepatan aliran (m/s)		
	12	6	4
Sudu Berengsel	66,15	64,97	63,76
Sudu Tetap	67,81	64,45	66,65



Gambar 4.3 Grafik perbandingan kecepatan aliran fluida masuk ke rotor turbin dengan variasi jumlah sudu dan pergerakan sudu

Jika dilihat dari gambar 4.3, dapat disimpulkan bahwa kecepatan aliran fluida masuk yang paling tinggi terjadi saat gerakan sudu tetap dengan jumlah sudu 12 buah yang memiliki kecepatan aliran fluida sebesar 18,37 m/s. Kecepatan aliran fluida masuk ke turbin semakin bertambah tinggi saat gerakan sudu berengsel sesuai dengan urutan variasi jumlah sudu yang mengelilingi rotor turbin. Untuk kecepatan aliran fluida keluar melalui sela – sela sudu menuju saluran pembuangan (*Outlet*) dapat dilihat pada lampiran 4.

Untuk mengetahui besar energi kinetik *input*, dilakukan perhitungan laju aliran energi kinetik *input*. Yang menggunakan laju aliran massa air (\dot{m}) dalam rumus laju aliran energi kinetik *input*. Laju aliran massa air diperoleh melalui debit air (Q) dikali dengan massa jenis air (...) sebesar 1000 kg/m^3 .

Berikut ini adalah perhitungan laju aliran massa air saat variasi jumlah sudu sebanyak 12 buah dan pergerakan sudu berengsel.

$$\begin{aligned}\dot{m} &= Q \times \dots \\ &= 2,81 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \\ &= 2,81 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Untuk variasi jumlah sudu dan pergerakan sudu lainnya hasil perhitungan laju aliran massanya akan ditampilkan pada tabel 4.6 berikut ini. Sedangkan data pengukuran debit air, ditampilkan pada lampiran 3.

Tabel 4.6 Laju aliran massa air (\dot{m})

Variasi	Laju aliran massa air (kg/s)		
	12	6	4
Sudu Berengsel	2,81	3,60	3,81
Sudu Tetap	2,71	3,09	3,56

Setelah memperoleh besar laju aliran massa air, diperoleh total laju aliran energi kinetik air yang diserap turbin dan energi kinetik *input*. Dengan perhitungan yang akan ditampilkan sebagai berikut.

Perhitungan total laju aliran energi kinetik air yang diserap turbin saat variasi jumlah sudu sebanyak 12 dengan pergerakan sudu berengsel;

$$\begin{aligned}Ek_{i-o} &= \frac{\dot{m} \times (v_i^2 - v_o^2)}{2} \\ &= \frac{2,8121 \text{ kg/s} \times ((66,15 \text{ m/s})^2 - (40,82 \text{ m/s})^2)}{2} \\ &= 3.809,76 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^3} = 3.800 \text{ J/s} = 3.809,76 \text{ Watt}\end{aligned}$$

Hasil perhitungan total laju aliran energi kinetik air yang diserap turbin saat divariasikan jumlah sudu dan pergerakan sudu yang lainnya akan diampilkkan pada tabel 4.7 di bawah ini.

Tabel 4.7 Total laju aliran energi kinetik air yang diserap turbin

Variasi	Eneri kinetik air (J/s)		
	12	6	4
Sudu Berengsel	3.809,76	3.997,03	4.230,72
Sudu Tetap	4.223,86	3.566,58	4.077,19

Perhitungan energi kinetik *input* untuk variasi jumlah sudu sebanyak 12 buah dengan gerakan sudu berengsel, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{E}k_i &= \frac{\dot{m} \times v_i^2}{2} \\ &= \frac{2,8121 \text{ kg / s} \times (66,15 \text{ m / s})^2}{2} \\ &= 6.152,63 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^3} = 6.152,63 \text{ J/s} = 6.152,63 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan energi kinetik input dengan variasi jumlah sudu dan pergerakan sudu yang lain, hasil perhitungannya akan ditampilkan pada tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4.8 Energi kinetik *input*

Variasi	Eneri kinetik <i>input</i> (Watt)		
	12	6	4
Sudu Berengsel	6.152,63	7.592,71	7.742,23
Sudu Tetap	6.245,50	6.413,47	7.918,04

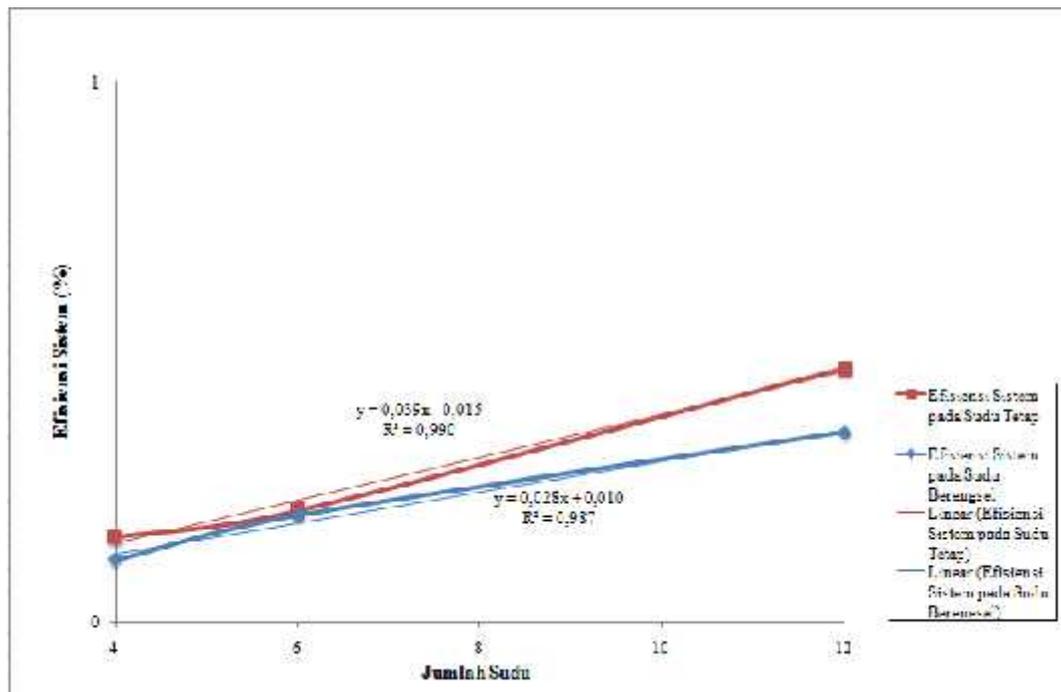
Sehingga, dapat diketahui besar efisiensi sistem pada instalasi turbin hasil penelitian. Berikut ini adalah salah satu bentuk perhitungan efisiensi sistem pada instalasi turbin saat variasi jumlah sudu sebanyak 12 buah dengan gerakan sudu berengsel.

$$\begin{aligned}
 y_{sistem} &= \frac{E_{og}}{\frac{1}{2} \times m \times v_i^2} \times 100\% \\
 &= \frac{21,60}{\frac{1}{2} \times 2,8121 \text{ kg / s} \times (66,15 \text{ m / s})^2} \times 100\% \\
 &= 0,35\%
 \end{aligned}$$

Efisiensi sistem untuk variasi jumlah sudu dan pergerakan sudu yang lainnya akan dimunculkan hasil perhitungannya pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Efisiensi sistem dengan variasi jumlah sudu dan pergerakan sudu

Variasi	Efisiensi Sistem (%)		
	12	6	4
Sudu Berengsel	0,35	0,20	0,11
Sudu Tetap	0,47	0,21	0,16



Gambar 4.5 Grafik perbandingan efisiensi sistem saat divariasikan jumlah sudu dan pergerakan sudu

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa efisiensi sistem dipengaruhi oleh jumlah sudu. Semakin banyak jumlah sudu, maka efisiensi akan semakin meningkat. Efisiensi sistem diperoleh dari perhitungan energi listrik yang dihasilkan generator dibagi dengan energi kinetik *input* kemudian dikali 100%.

Perbandingan efisiensi sistem saat gerakan sudu berengsel dengan sudu tetap dapat terlihat jelas di grafik. Pada saat gerakan sudu berengsel dan sudu tetap, efisiensi sistemnya selalu meningkat sesuai dengan meningkatnya jumlah sudu yang mengelilingi rotor. Saat gerakan sudu tetap, peningkatan efisiensi terlihat lebih baik dibandingkan saat gerakan sudu berengsel. Karena, energi listrik yang dihasilkan generator saat gerakan sudu tetap lebih besar dibandingkan energi listrik yang dihasilkan generator saat sudu berengsel.

Peningkatan energi kinetik *input* terjadi akibat penurunan jumlah sudu yang mengelilingi rotor. Meski energi kinetik *input* meningkat, jika energi listrik yang dihasilkan generator (energi *output* generator) menurun maka efisiensi sistem akan menurun pula. Karena efisiensi sistem diperoleh dari perbandingan energi *output* generator dengan energi kinetik *input*.

Pada grafik perbandingan efisiensi sistem antara variasi jumlah sudu dengan gerakan sudu, garis warna merah menunjukkan efisiensi sistem maksimumnya adalah sebesar 0,47%. Dikarenakan, saat variasi gerakan sudu tetap dengan jumlah sudu sebanyak 12 buah menghasilkan daya listrik sebagai energi *output* generator yang paling besar yaitu sebesar 29,25 Watt. Dan energi kinetik air yang keluar dari nosel sebagai energi kinetik *input* sebesar 6.152,63 Watt. Sehingga, menunjukkan perbandingan yang paling baik antara daya listrik yang dihasilkan dengan total laju aliran energi kinetik air pada instalasi turbin. Dan perbandingan tersebut yang digunakan sebagai penunjuk besar efisiensi sistem pada instalasi turbin saat pengujian.

Efisiensi sistem merupakan gabungan dari keseluruhan efisiensi – efisiensi yang ada pada instalasi turbin. Antara lain; efisiensi turbin dikali efisiensi mekanik dan dikali efisiensi generator. Efisiensi – efisiensi tersebut tidak diketahui besarnya karena tidak dilakukan pengukurannya saat pengujian.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari pembahasan dan analisa data dapat ditarik beberapa kesimpulan, antara lain sebagai berikut :

1. Efisiensi sistem yang paling baik diperoleh saat variasi jumlah sudu 12 dengan gerakan sudu tetap. Perbandingan energi *output* generator dengan energi kinetik *input* menunjukkan besar efisiensi sistem pada instalasi turbin. Efisiensi sistem saat variasi jumlah sudu 12 buah dan gerakan sudu tetap adalah 0,47%.
2. Putaran generator yang paling banyak terjadi saat variasi jumlah sudu 12 buah dengan pergerakan sudu tetap. Putaran generatornya sebesar 89,9 rpm saat diberi beban dan sebesar 91,5 rpm saat tidak diberi beban.
3. Energi *output* generator pada instalasi turbin adalah daya listrik yang dihasilkan generator. Pada instalasi turbin yang digunakan saat pengujian, energi *output* generator yang paling besar diperoleh saat variasi jumlah sudu sebanyak 12 buah dengan gerakan sudu tetap. Dan energi *output* yang dihasilkan sebesar 29,25 Watt.
4. Jumlah sudu yang mengelilingi poros rotor turbin *cross flow zero head* mempengaruhi unjuk kerja turbin *cross flow zero head*. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah sudu maka efisiensi sistem pada instalasi turbin yang digunakan untuk pengujian ini akan bertambah pula.
5. Pada instalasi turbin yang digunakan, pergerakan sudu tetap adalah pergerakan sudu yang menghasilkan efisiensi sistem lebih tinggi dibandingkan pergerakan sudu berengsel.

5.2. Saran

Beberapa saran masukan dari penulis jika melakukan sebuah penelitian anatara lain :

1. Menggunakan alat ukur yang lebih tepat saat penelitian atau pengambilan data, agar diperoleh data yang lebih baik dan sesuai dengan yang diharapkan.
2. Pengujian dan pengambilan data pada penelitian tentang instalasi turbin air sebaiknya memilih lokasi penelitian yang terdekat dengan saluran pengairan. Agar pompa tidak macet karena kekurangan fluida kerjanya saat dioperasikan.
3. Melakukan pengecekan terhadap alat dan bahan yang digunakan saat pengujian atau penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim 1, 1999, *Small Hydro Power, Alternate Hydro Energy Center*, India : University of Roorkee. (7 Maret 2013)
- Anonim 2, 2004, *Pembangkit Listrik Tenaga Air*, Institut Pertanian Bogor, Bogor. (21 Maret 2013)
- Anonim 3, 2009, *Energi Air*, <http://web.ipb.ac.id/~tepfteta/elearning/media/Energi%20dan%20Listrik%20Pertanian/MATERI%20WEB%20ELP/Bab%20V%20ENERGI%20AIR/indexAir.htm> (4 mei 2013).
- Anonim 4, 2011, *Turbin Air*, Universitas Sumatera Utara, <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/24300/4/Chapter%20II.pdf> (7 Maret 2013)
- Anonim 5, 2013, *Pengembangan Listrik Pedesaan*, <http://ebtke.esdm.go.id/id/berita/758-pengembangan-listrik-perdesaan.html> (15 mei 2013).
- Arismunandar, W., 1982, *Penggerak Mula Turbin*, Bandung : Penerbit ITB.
- Arsyad, I.M., 2009, *Applikasi Turbin Cross Flow untuk Pembangkit Listrik Mikrohidro di Kalimantan Barat*, *Jurnal ELKHA*, Vol. 1, No. 3., Maret 2009, Universitas Tanjungpura, Pontianak.
- Bapangsamarana, Y.B., 2001, *Aspek Administratif Proyek PLTMH, Workshop Pengelolaan dan Perencanaan Teknis Pembangunan PLTMH*, Saguling : Udiklat PLN Saguling.
- Canren, 2004, *Microhydro Power Basic Introduction*, India : University of Roorkee.
- Chandrsekhar, S., 2002, *Experience of Private Sector in SHP, Lecture Notes on Overview of SHP Development*, India : Bhoruka Power Corporation-Bangalane.
- Das, B., 2002, *An Overview on Small Hydro Power Development, Lecture Notes on Overview of SHP Development*, India.
- Douglas, J.F., 1998, *Fluid Mechanics, Second Edition*, USA : Longman Publisher.
- Fritz, D., 1998, *Turbin, Pompa, dan Kompresor*, Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Furze, J., 2002, *Compedium in Small Hydro*, University of Aarhus.
- Hadi, S., 2012, *Perancangan Turbin Cross Flow pada Aliran Irigasi Kokoq Daye Dusun Merca Kecamatan Narmada Kabupaten Lombok Barat*, Universitas Mataram, Mataram.

- Haimerl, L.A., 1960, *The Cross Flow Turbine*, Jerman Barat.
- Larasakti, A.A., Himran, S. dan Arifin, S.A., 2012, *Pembuatan dan Pengujian Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Turbin Banki Daya 200 Watt*, *Jurnal Mekanikal*, Vol. 3, No. 1., Januari 2012, p. 245-253.
- Lensley, R. K., 1998, *Teknik Sumber Daya Air*, Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Luknanto, D., 2008, *Diktat Kuliah Bangunan Tenaga Air*, Surabaya : ITS.
- Mawengkang, R.S., 2011, *Pengaruh Variasi Diameter Penstock dan Penggunaan Nosel pada Turbin Cross Flow terhadap Daya Output Generator*, Universitas Mataram, Mataram.
- Mumpuni, S., 2001, *Pengembangan Mini-Mikro Hidro di Indonesia (Makalah Diskusi Ilmiah METI)*.
- Muarif, S., 2008, *Perancangan dan Pembuatan Model Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Menggunakan Penggerak Pompa Sentrifugal sebagai Turbin (PST)*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Paryatmo, W., 2007, *Turbin Air*, Jilid I, Yogyakarta : Graha Ilmu.
- Sahid, 2012, *Kaji Eksperimental Kinerja Turbin Cross Flow Berbasis Konstruksi Silinder (Drum) Poros Vertikal untuk Potensi Arus Sungai*, B. 10., Universitas Wahid Hasyim Semarang, Semarang.
- Sihombing, E.S., 2009, *Pengujian Sudu Lengkung Prototype Turbin Air Terapung pada Aliran Sungai*. Medan : Universitas Sumatera Utara.
- Streeter, V.L., 1988, *Mekanika Fluida*, Edisi II, Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Suarda, M., 2009, *Kajian Teknis dan Ekonomis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro-Hidro di Bali*, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CakraM*, Vol. 3, No. 2., Oktober 2009, p. 184 – 193.
- Tirono, M., 2012, *Pemodelan Turbin Cross Flow untuk Diaplikasikan pada Sumber Air dengan Tinggi Jatuh dan Debit Kecil*, *Jurnal Neutrino*, Vol. 4, No. 2., April 2012, UIN Maliki Malang, Malang.