

POTENSI DAN KARAKTERISTIK BEBAN PLTA

Potensi dan Karakteristik Beban PLTA

Desember 2021 oleh Penerbit Unpak Press

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak dokumen ini dalam bentuk apa pun, baik sebagian maupun keseluruhan tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Penulis : Prof. Dr. rer. pol. Ir. H. Didik Notosudjono, M.Sc.
No.Reg.Kom 1446.01233 2019
Editor : Prof. Dr. Hj. Eri Sarimanah, M.Pd.
No.Reg.Kom1446.01477 2020
Desainer Isi : Bagus Dwi Ramadhon, S.T.
Desainer Kover : Bagus Dwi Ramadhon, S.T.

Cetakan Pertama, Desember 2021 ISBN:

Diterbitkan oleh

Unpak Press, Universitas Pakuan (Anggota APPTI No. 001.010.1.06.2017)

Jl. Pakuan No. 1 PO Box 452 Ciheuleut Bogor Ngentan, Baki, Sukoharjo, 57556

Telp. +62 2518362701

unpakpress.2014@gmail.com



Daftar Isi

POTENSI DAN KARAKTERISTIK BEBAN PLTA	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
PRAKATA	ix
BAB 1 Daya Listrik dari PLTA	1
A. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	1
B. Sekilas tentang PLTA Ubrug	2
BAB 2 Air, Teknologi, dan PLTA	3
A. Distribusi Tegangan Listrik dari PLTA.....	3
1. Turbin angin kecil	5
2. Bagian turbin angin kecil.....	6
3. Melakukan Studi Meja	7
4. Melakukan Survei di Lokasi Potensial	8
B. Prinsip Kerja dan Potensi Tenaga Air pada PLTA	9
C. Model Bangunan Sipil PLTA.....	11
1. Bendungan	12
2. Pintu Kontrol (<i>Intake</i>).....	13
3. Saringan Sampah.....	13
4. Saluran Pengambil Air	14
5. Saluran Berbentuk Persegi.....	14
6. Saluran Berbentuk Trapesium.....	15
7. Saluran Pelimpah	15
8. Kolam Tandon	16
9. Tangki Surja	16
10. Pipa Pesat.....	17
11. Bangunan Sentral	17
12. Saluran Pembuang	18
D. Turbin Air	18
E. Jenis-Jenis Turbin Air	21
1. Turbin Francis.....	22
2. Turbin Kaplan	24
3. Turbin Pelton.....	25
F. Pertimbangan Memilih Jenis Turbin.....	25
G. Generator	27
1. Sistem Kerja Generator Sinkron.....	27
2. Model Generator Sinkron	28
3. Kemampuan Putar pada Generator Sinkron ..	30
4. Generator Sinkron Tanpa Beban	31

5.	Generator Sinkron dengan Beban	32
6.	Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron	33
H.	Governor.....	35
I.	Automatic Voltage Regulator (AVR).....	36
J.	Jumlah Aliran Air	37
K.	Menghitung Tinggi Jatuh Air (<i>Head</i>).....	40
L.	Karakteristik Beban.....	41
	BAB 3 Sejarah dan Konstruksi Bangunan PLTA Ubrug	43
A.	Napak Tilas PLTA Ubrug.....	43
B.	Mengenal Daerah Aliran Sungai (DAS) Cicatih	45
C.	Lokasi Ideal Membangun Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).....	46
D.	Bangunan Penunjang PLTA.....	46
1.	Bendungan	47
2.	Bangunan Pengendali Banjir.....	48
3.	Saluran Penghantar	49
4.	Kolam Tandon (Bak Penenang)	49
5.	Surge Tank	50
6.	Pipa Pesat	51
7.	Saluran Pembuangan.....	52
8.	Bangunan Pembangkit.....	53
E.	Struktur Utama PLTA.....	53
F.	Peralatan Elektrik.....	54
G.	Automatic Voltage Regulator (AVR).....	55
	BAB 4 Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Ubrug	57
A.	Kecepatan Aliran Air di Saluran Penghantar	58
B.	Luas Penampang Aliran Air dan Debit Air Saluran Penghantar.....	59
C.	Perhitungan Terkait Kolam Tandon.....	60
D.	Perhitungan Terkait Pipa Pesat	60
E.	Perhitungan Terkait Luaran Daya Turbin Air dan Luaran Daya Generator.....	61
F.	Perhitungan Terkait Karakteristik Beban	61
	BAB 5 Impian (PLTA) Ubrug pada Masa Depan	63
	Daftar Pustaka	119
	Profil Penulis	122

Daftar Gambar

Gambar 1. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	3
Gambar 1. 2 adalah tipikal bendungan di PLTA Ubrug	7
Gambar 2. 1 Prinsip kerja Generator Sinkron.....	11
Gambar 2. 2 Generator (Hasil Survei PLTA Ubrug, Sukabumi).....	12
Gambar 2. 3 Generator Sinkron.....	13
Gambar 2. 4 Generator Arus Bolak-Balik Dengan Penguatan Searah	15
Gambar 2. 5 Sistem Jaringan Tenaga Listrik.....	17
Gambar 2. 6 Daur Hidrologi atau Siklus Air	18
Gambar 2. 7 Ilustrasi Daerah Aliran Sungai (DAS)	21
Gambar 2. 8 Intake PLTA Ubrug, Sukabumi	26
Gambar 2. 9 Kisi-Kisi Saringan Sampah.....	27
Gambar 2. 10 Automatic Trash Rake di PLTA Ubrug, Sukabumi	28
Gambar 2. 11 Katup Pintu	30
Gambar 2. 12 Katup Kupu-Kupu.....	31
Gambar 2. 13 Katup Bola.....	32
Gambar 2. 14 Katup Howell-Bunger.....	33
Gambar 2. 15 Saluran Pengambil Air pada PLTA Ubrug	33
Gambar 2. 16 Saluran Air Berpenampang Persegi.....	34
Gambar 2. 17 Saluran Air Berpenampang Trapesium.....	34
Gambar 2. 18 Saluran Pelimpah	35
Gambar 2. 19 Bak Penenang (Kolam Tandon).....	36
Gambar 2. 20 Surge Tank.....	37
Gambar 2. 21 Pipa pesat	37
Gambar 2. 22 Saluran Bawah	40
Gambar 2. 23 Akibat Kavitasi pada Turbin.....	43
Gambar 2. 24 Turbin Francis.....	44
Gambar 2. 25 (a).....	45
Gambar 2. 26 (b).....	46

Gambar 2. 27 (c).....	46
Gambar 2. 28 (d).....	46
Gambar 2. 29 (e).....	46
Gambar 2. 30 Turbin Kaplan.....	47
Gambar 2. 31 Turbin Pelton	48
Gambar 2. 32 Diagram Aplikasi Berbagai Jenis Turbin.....	50
Gambar 2. 33 Governor pada Sistem PLTA Ubrug Sukabumi	59
Gambar 2. 34 AVR pada Sistem PLTA Ubrug	61
Gambar 3. 1 Bendungan PLTA Ubrug Sukabumi.....	70
Gambar 3. 2 Saluran Pengendali Pasir PLTA Ubrug Sukabumi.	73
Gambar 3. 3 Saluran Penghantar Terbuka PLTA Ubrug.....	74
Gambar 3. 4 Saringan Sampah	76
Gambar 3. 5 Saluran Pelimpah PLTA Ubrug.....	76
Gambar 3. 6 Tangki Surja pada PLTA Ubrug Sukabumi.....	77
Gambar 3. 7 Penstok yang digunakan di PLTA Ubrug Sukabumi.....	77
Gambar 3. 8 Saluran Pembung PLTA Ubrug Sukabumi.....	78
Gambar 3. 9 Bangunan Pembangkit (Power House) PLTA Ubrug.....	78
Gambar 4. 1 Karakteristik beban harian PLTA Ubrug.....	94
Gambar 4. 2 Grafik Karakteristik Beban Mingguan.....	95
Gambar 4. 3 Grafik Karakteristik Beban Bulanan.....	95
Gambar 4. 4 Perbandingan Beban Harian Unit	96
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Beban Bulanan Unit 1	97
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Beban Harian Generator Unit 2.....	98
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Beban Bulanan Generator Unit 2	100
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Beban harian Unit 3.....	101
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Beban Bulanan Unit 4	102

Daftar Tabel

Tabel 2. 1 Jenis Roda Turbin Air dan Kecepatan Spesifiknya	41
Tabel 2. 2 Kecepatan Spesifik Turbin	50
Tabel 3. 1 Delapan Unit PLTA yang Dikelola PT Indonesia Power up	68
Tabel 3. 2 Luas Wilayah Sub-Sub DAS yang berada di Sub DAS Cicatih	69
Tabel 3. 3 Spesifikasi Bendungan.....	72
Tabel 3. 4 Data Teknis Generator PLTA Ubrug.....	81
Tabel 4. 1 Kecepatan Aliran Air pada Saluran Terbuka.....	85

Prakata

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, karunia, dan rida-Nya sehingga buku *Potensi dan Karakteristik Beban PLTA* ini dapat diselesaikan dengan baik. Tujuan dari penulisan buku ini adalah untuk mengevaluasi Pembangkit Listrik tenaga Air (PLTA) yang telah berusia hampir seratus tahun, namun masih berfungsi dengan baik, ditinjau dari Potensi PLTA, Karakterik Generatornya dan penyebab dari penurunan daya Output PLTA.

Sasaran dari Pembaca ini adalah Dosen, para mahasiswa di Perguruan Tinggi, para Praktisi di bidang PLTA

Sedangkan sistematika pembahasan yang difokuskan pada tipe bendungan, pengukuran debit air, tinggi jatuh, panampang aliran sungai, tipikal turbin air, karakteristik turbin, prinsip *surge tank* yang banyak di pelajari di pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dan juga mempelajari terjadi *kavitasi* karena tekanan air dalam pipa pesat dan permasalahan yang terkait pelimpah pada bendungan. Buku ini pun memberikan gambaran terkait dengan beberapa karakteristik pemilihan turbin untuk berbagai tipe turbin sehingga memudahkan pembaca untuk menentukan tipe turbin yang tepat. Selain itu, buku ini juga membahas cara pengukuran debit air secara tradisional. Untuk mengevaluasi kinerja PLTA, lebih lanjut dibahas tentang penyebab penurunan daya generator yang banyak dipengaruhi faktor luar, salah satunya penurunan debit karena perubahan penggunaan lahan hutan yang beralih fungsi menjadi pertanian atau tempat tinggal dan juga terjadi pendangkalan bendungan.

Keunggulan dari buku ini dibandingkan buku lain adalah ditemukan penyebab dari penurunan Daya output PLTA dengan cara evaluasi menyeluruh. Pada kesempatan ini juga penyusun menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyusunan dalam menyelesaikan buku ini. Mudah-mudahan buku ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan para mahasiswa, khususnya untuk dijadikan referensi perkuliahan

Prof. Dr. rer. pol. Ir. H. Didik Notosudjono, M.Sc.

Daftar Istilah, Singkatan, dan Makna

Singkatan	Istilah	Makna
-----------	---------	-------

A	Ampere	merupakan satuan untuk arus listrik.
AC	<i>Alternating Current</i>	merupakan arus bolak-balik yang besarnya dan arahnya berubah secara bolak balik.
ATR	<i>Automatic Trash Rake</i>	mesin pembersih sampah otomatis
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>	peralatan yang dapat mengendalikan kestabilan tegangan generator
DC	<i>Direct Current</i>	arus listrik searah
DAS	Daerah Aliran Sungai	
GI	Gardu Induk	adalah ebuah bagian dari sistem pembangkit, transmisi dan distribusi listrik
Hz	Hertz Frekuensi	satuan jumlah gelombang dalam frekuensi
JTM	Jaringan Tegangan Menengah	jaringan distribusi yang berada pada sisi primer transformator yang digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik ke beban-beban yang ada pada konsumen
JTR	Jaringan Tegangan Rendah	jaringan tenaga listrik dengan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan tersebut beserta perlengkapannya
KV	Kilo Volt	suatu satuan dari besaran beda potensial (voltase)
MVA	Mega Volt Ampere	suatu satuan dari besaran beda potensial (voltase)
MW	Mega Watt	suatu satuan dari besaran watt
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air	sumber pembangkit listrik yang dihasilkan oleh tenaga air
PLTB	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu	sumber pembangkit listrik yang dihasilkan oleh tenaga angin
PDE	Proyek Disertifikasi Energi	
PLTMH	Pembangkit Listrik Tenaga MikroHydro	teknologi untuk memanfaatkan debit air yang ada di sekitar kita untuk diubah menjadi energi listrik

PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya	sumber pembangkit listrik yang dihasilkan oleh tenaga matahari
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap	sumber pembangkit listrik yang dihasilkan oleh tenaga uap
RPM	Revolution Per Minutes	satuan yang digunakan untuk menyatakan kecepatan perputaran mesin
SUTET	Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi	saluran tenaga listrik yang menggunakan kawat telanjang (konduktor) di udara bertegangan di atas 230 kv sesuai dengan standar di bidang ketenagalistrikan
V	Volt	merupakan satuan tegangan listrik
W	Watt	merupakan satuan daya listrik

Bab 1

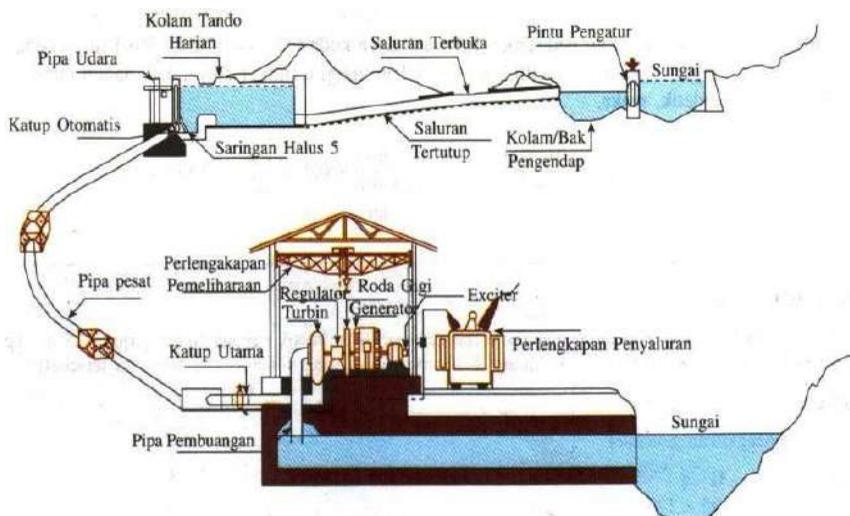
Sumber daya Listrik dari PLTA

Energi listrik merupakan salah satu sumber energi yang sangat potensial dan penting dalam kehidupan manusia. Energi listrik dapat dimanfaatkan baik dalam sektor rumah tangga, sektor komersial, perkantoran, maupun di sektor industri. Penyediaan energi listrik merupakan salah satu infrastruktur sektor energi yang mempunyai kegunaan yang sangat vital agar kegiatan di semua sektor dan masyarakat di suatu daerah dapat berjalan dengan baik sehingga proses pemanfaatannya lebih produktif. Pada saat ini sumber air merupakan salah satu potensi yang sangat dibutuhkan beberapa daerah. Namun, bila melihat di lapangan belum semua dimanfaatkan secara maksimal dan optimal. Sementara sampai saat ini kita mengetahui bahwa air merupakan salah satu energi yang dapat diperbaharui. Dipastikan untuk daerah Indonesia tersedia sepanjang waktu, meskipun pada saat musim tertentu ada penurunan kapasitas debit air sehingga sudah saatnya energi air bisa menggantikan ketergantungan dari energi fosil sampai dengan saat ini masih mendominasi suplai energi di Indonesia. Perlu diperhatikan bahwa lambat laun energi fosil akan habis.

Pada periode tahun terakhir ini memang sudah ada pembatasan pembangunan energi fosil yang berasal dari batu bara. Apalagi jika dilihat dari perencanaan energi yang dibuat oleh Dirjen Energi Baru lebih mengutamakan pemanfaatan energi terbarukan. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan sumber energi berpotensi

besar sebagai pembangkit listrik di masa yang akan datang. Posisi PLTA semakin strategis sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang cukup besar potensinya mengingat potensi sumber energi dari fosil dan batu bara akan semakin berkurang.

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) merupakan energi yang sangat potensial untuk dikembangkan di Indonesia. Pada umumnya, pembangkit listrik tenaga air dikembangkan di daerah terpencil dan di daerah pegunungan. PLTA ini juga merupakan sumber energi listrik bagi masyarakat dan memberikan banyak keuntungan terutama bagi masyarakat pedalaman di seluruh Indonesia. Pengembangan energi PLTA menjadi alternatif penting untuk diimplementasikan. Pada jangka Panjang, PLTA merupakan energi terbarukan sumber yang sangat penting karena dapat dijadikan sumber energi pembangkit listrik yang murah dan tidak menimbulkan polusi. Selain itu, potensi PLTA Indonesia cukup besar sehingga sangat berpotensi untuk memproduksi energi listrik yang bersumber dari PLTA. Silakan cermati gambar 1 yang memperlihatkan pembangkit listrik tenaga air.



Berdasarkan sejarah, PLTA merupakan pembangkit listrik tertua di Indonesia. PLTA di Indonesia dibangun pertama kali pada tahun 1923. PLTA pada awal pembangunan dan mulai beroperasi dijadikan sebagai beban dasar dan beban puncak, terutama PLTA yang dibangun di Pulau Jawa. Selain itu, ada beberapa PLTA tua yang sekarang masih ada dan masih beroperasi dengan baik termasuk PLTA Ubrug, Sukabumi, PLTA Kracak, dan beberapa PLTA di Jawa Timur, seperti PLTA Mendalan dan PLTA Siman yang dibangun hampir bersamaan pada tahun 1923-1926 oleh Pemerintah Hindia Belanda.

Suplai energi di Indonesia pada saat ini masih bergantung pada energi fosil terutama didominasi energi yang berasal dari minyak dan batubara. Padahal Indonesia mempunyai potensi ketersediaan energi luar biasa melimpah, yaitu sumber energi terbarukan, yang meliputi energi air (hidro, mini/mikro hidro), panas bumi, biomasa (limbah organik), sinar matahari (surya) dan angin. Sumber energi air yang telah dimanfaatkan untuk listrik hingga 14,2% (dari potensi 458,75 MW) dalam bentuk mini/mikro hidro, bentuk hidro 5,1% dari potensi setara 75,67 GW listrik, panas bumi 4,1% dari potensi 19,66 GW, biomasa 0,6% dari potensi 49,81 GW, dan matahari, serta angin masih di bawah permil dari potensinya. Pasokan energi listrik pada saat ini masih bergantung pada pembangkit listrik tenaga disel (PLTD) yang berasal dari bahan bakar minyak dan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang disuplai dari batu bara dan gas.

Sekitar 190 negara dan organisasi yang menghadiri KTT COP-

26 Glasgow dilaporkan menandatangani perjanjian untuk memensiunkan PLTU batu bara. Hal ini untuk mencegah ancaman perubahan iklim yang diakibatkan oleh pembakaran bahan bakar fosil yang tidak ramah lingkungan. Ini adalah sinyal terakhir penggunaan batu bara untuk suplai PLTU. Pada tahun 2030-an secara bertahap untuk negara-negara maju dan ekonomi besar berkomitmen untuk menghentikan pembangkit listrik tenaga batu bara. Masa mendatang, tepatnya tahun 2040-an menghentikan pembangkit listrik tenaga batu bara untuk negara dengan ekonomi yang lebih kecil.

Sehubungan dengan hal di atas, Indonesia dikabarkan siap dan berkomitmen untuk 'memensiunkan' secara dini pembangkit listrik dengan sumber energi batu bara pada 2040 sebagai bentuk komitmen Indonesia dalam mengantisipasi perubahan iklim yang mengancam dunia. Keputusan Indonesia ini jauh lebih cepat dari prakiraan semula penghentian batu bara baru yang bisa dilakukan pada 2056 sehingga pada 2060 Indonesia bisa mencapai emisi nol karbon. Dengan Komitmen Indonesia untuk pengoperasian PLTU dari batu bara, merupakan sinyal menarik untuk pengembangan energi terbarukan, khususnya PLTA karena potensi PLTS di Indonesia masih cukup besar.

A. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik adalah suatu rangkaian alat atau mesin yang mengubah energi mekanikal untuk menghasilkan energi listrik. Biasanya rangkaian alat itu terdiri dari turbin dan generator listrik. Fungsi dari turbin adalah untuk memutar rotor dari generator listrik sehingga dari putaran rotor itu menghasilkan energi listrik. Listrik yang dihasilkan dinaikkan terlebih dahulu tegangannya menjadi 150

KV sampai dengan 500 KV melalui trafo *step up*. Peningkatan tegangan ini berfungsi untuk mengurangi kerugian akibat hambatan pada kawat penghantar dalam proses transmisi. Dengan tegangan yang ekstra tinggi maka arus yang mengalir pada kawat penghantar menjadi kecil. Tegangan yang sudah dinaikkan kemudian ditransmisikan melalui jaringan saluran udara tegangan ekstra tinggi (sutet) ke gardu induk (GI) untuk diturunkan tegangannya menjadi tegangan menengah 20 KV. Kemudian tegangan menengah disalurkan melalui jaringan tegangan menengah (JTM), ke trafo-trafo distribusi. Di trafo-trafo distribusi tegangannya diturunkan dari 20 KV menjadi 220 Volt dari trafo-trafo distribusi disalurkan melalui jaringan tegangan rendah (JTR) ke pelanggan listrik.

Salah satu solusi menghadapi masalah kelistrikan, yaitu sumber daya air yang mempunyai potensi cukup besar untuk menunjang kebutuhan sektor listrik. Peran penting dari PLTA/PLTM sebagai penunjang pembangkit yang ada masih berpotensi untuk dimanfaatkan dan dikembangkan, dan memang harus disadari bahwa biaya investasi PLTA/PLTM sangat besar, waktu pembangunan cukup lama sehingga harus dilakukan perencanaan yang baik dan detail.

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) adalah suatu bentuk perubahan tenaga dari tenaga air menjadi tenaga mekanik dengan memanfaatkan ketinggian (h) dan debit air (Q) yang mengalir dan diubah menjadi energi tenaga listrik dengan menggunakan bantuan turbin air dan generator listrik. Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) bervariasi, tetapi prinsip kerjanya sama, yaitu perubahan tenaga potensial air menjadi tenaga mekanik dan diubah lagi menjadi tenaga listrik. Proses perubahan memang tidak langsung, tetapi berturut-turut melalui perubahan dimulai dari tenaga potensial yang ada pada air (debit air) dialirkan sehingga menjadi tenaga kinetik; (2) tenaga kinetik diubah melalui turbin menjadi energi tenaga mekanik, energi yang timbul pada tenaga mekanik putaran poros turbin digunakan untuk menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik tenaga listrik.

Tenaga potensial adalah tenaga air karena berada pada ketinggian terjun. Tenaga kinetik adalah tenaga air karena mempunyai kecepatan air yang mengalir. Tenaga mekanik adalah tenaga kecepatan air yang terus memutar turbin air. Tenaga listrik adalah energi yang dihasilkan oleh generator yang berputar akibat berputarnya turbin air. Prinsip kerja PLTA yang paling utama adalah memanfaatkan semaksimal mungkin potensi energi air yang dapat diubah oleh peralatan turbin air. Pada PLTA besar banyak memanfaatkan bendungan dan bak penenang untuk kapasitas di atas 10 MW. Sedangkan untuk kapasitas menengah pembangkit listrik mini hidro bendungan tidak begitu besar kapasitasnya biasanya 1-10MW. Cara kerja pembangkit listrik mikrohidro (PLTMH) banyak memanfaatkan aliran sungai dengan bendungan yang tidak cukup besar. Di bawah ini dijelaskan klasifikasi PLTA berdasarkan kapasitas listrik yang dibangkitkan/dihasilkan.

- a. PLTA mikro < 100 kW
- b. PLTA mini 100-999 kW
- c. PLTA kecil 1000-10.000 kW
- d. PLTA besar > 10.000 kW

Secara umum, pembangkit listrik tenaga air bisa memanfaatkan air waduk, air terjun, dan tenaga ombak. Aliran air inilah yang kemudian diproses sedemikian rupa hingga menghasilkan aliran listrik. Listrik yang dihasilkan disimpan terlebih dahulu dalam sebuah sistem sebelum dialirkan ke masyarakat dan industri. Aliran listrik bisa digunakan untuk menyalakan televisi, kipas, bahkan mesin produksi dalam sebuah pabrik. Energi listrik tersebut dialirkan melalui jaringan-jaringan yang telah dibuat sehingga akhirnya energi listrik tersebut sampai ke konsumen. PLTA mempunyai lima komponen utama, yaitu bendungan, turbin, generator, penstock, dan jalur transmisi.

B. Sekilas tentang PLTA Ubrug, Sukabumi

PLTA Ubrug tak lepas dari Bendungan Kebon Randu Waterkracht De Tjitjatih Tjibadak. Sudah sejak lama tenaga air dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi di Indonesia. Bahkan sudah dimulai sejak Belanda masih berkuasa di Indonesia. Potensi air yang dimiliki Indonesia sangat

besar. Hal tersebut ditengarai jadi salah satu alasan mengapa Belanda ikut membangun PLTA untuk memenuhi energi listrik pada masa pemerintahannya.

Dalam Bahasa Belanda, bendungan disebut dengan *dam*. Untuk memenuhi kebutuhan listrik, Belanda banyak membangun bendungan sebagai sumber tenaga. Bendungan dan PLTA yang dibangun Belanda juga tidak sedikit. Di Indonesia, salah satu bendungan yang dibangun Pemerintah Hindia Belanda adalah Bendungan Kebon Randu Waterkracht Van De Tjitjatih Tjibadak. Bendungan Kebon Randu berada di Kampung Babakan, Desa Tenjojaya, Kecamatan Cibadak, Sukabumi, Jawa Barat. Bendungan ini dibangun sejak tahun 1918 oleh Ir. Ch. F. van Haeften. Bendungan tersebut selesai dalam dua tahun, yaitu 1920.

Fungsi utama dari bendungan Kebon Randu Waterkracht Van De Tjitjatih Tjibadak untuk mengalirkan air ke bak penampungan Ubrug. Air tersebut yang jadi sumber energi PLTA Ubrug. Aliran air di Bendungan Kebon Randu dialirkan ke generator PLTA Ubrug melalui pipa. PLTA Ubrug dibangun oleh Belanda sekitar tahun 1923 setelah bertepatan dengan Bendungan Randu selesai. Setahun kemudian bendungan pun beroperasi, tepatnya tahun 1924. Pembangkit Listrik Tenaga Air Ubrug memiliki 3 buah pembangkit dengan kapasitas sebesar 18 megawatt.

Gambar 1.2 adalah tipikal bendungan di PLTA Ubrug



Gambar 1. 2 Tipikal Bendungan di PLTA Ubrug
(PLTA Ubrug sering dijadikan destinasi wisata.
Salah satunya adalah wisata edukasi bagi para mahasiswa)

Lisrik yang dihasilkan PLTA Ubrug disalurkan ke wilayah Sukabumi

dan sekitarnya. Bahkan listrik PLTA Ubrug dialirkan ke Jakarta, termasuk digunakan untuk mengoperasikan Pelabuhan Tanjung Priok, trem, dan operasional kereta api. Tegangan pembangkit listrik Ubrug dimulai dari 20 kilovolt, 50 kilovolt, 100 kilovolt hingga 150 kilovolt.

Sampai saat ini, Bendungan Kebon Randu fungsinya masih sama, yaitu sebagai bendungan penting yang dimanfaatkan untuk PLTA Ubrug. Namun, Bendungan Kebon Randu sering jadi rujukan para wisatawan untuk memanjakan mata. Hawa sejuk yang ada di sekitar bendungan menjadi salah satu alasan mengapa banyak warga sekitar sering berkunjung.

Indonesia mempunyai beberapa lokasi pembangkit listrik tenaga air. Tiap-tiap lokasi mempunyai kapasitas penyimpanan dan pasokan listrik yang berbeda. Perbedaan ini dipengaruhi oleh debit air, jumlah mesin, dan kapasitas penyimpanan arus listrik. Salah satu lokasi pemasok listrik energi air yang ada di Indonesia adalah PLTA Ubrug. Pembangkit listrik ini berada di Desa Ubrug, Warungkiara, Sukabumi.

PLTA Ubrug mempunyai tiga unit generator dengan daya 18 MW. Tiga unit generator ini digerakkan dengan tiga turbin air. Akan tetapi, dalam implementasinya pengoperasian turbin disesuaikan dengan kebutuhan. Ketika debit air sedikit, maka turbin air yang digunakan akan dikurangi. Sebaliknya, jika debit air tinggi ketiga turbin air bisa dioperasikan semua.

Bab 2

Air, Teknologi, dan PLTA

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) terdiri dari beberapa komponen yang meliputi bendungan besar, saluran pengambilan air, bak penenang yang berfungsi menenangkan air, pipa pesat, dan *power house*. Pada *Power house* biasanya berisikan komponen turbin air, generator listrik, dan peralatan pendukung lainnya. Untuk membawa air dari bak penenang ke turbin diperlukan pipa pesat yang mampu menahan tekanan air yang cukup tinggi dan fungsi dari pipa pesat sangat penting untuk menyalurkan air ke Turbin air.

Perancangan pipa pesat ini adalah sama dengan perencanaan tangki dan *vessel* (bejana tekan) dan pada pipa pesat ini biasanya dilengkapi dengan *governor* kontrol dan katup operasi turbin yang berfungsi untuk mengendalikan tekanan air yang tiba tiba terjadi, seperti *water hammer*. Oleh karena itu, maka perencanaannya perlu diperhatikan dengan saksama. Apabila jarak antara bak penenang dan turbin pendek, pipa pesat yang digunakan satu batang pipa untuk satu turbin. Sedangkan untuk pembangkit yang mempunyai *head* yang tinggi atau jarak antara turbin air dan bak penenang yang lokasinya cukup jauh, maka digunakan satu batang pipa atau lebih khusus untuk melayani beberapa turbin. Ada beberapa jenis dan bahan pipa pesat (Sharma K. N. Dandekar, M.M.: 1991), yaitu

- a. pipa *carbon* (pipa baja)
- b. pipa spiral *welded steel* (pipa baja spiral)
- c. pipa PVC
- d. Pipa *rolled welded steel* (pipa baja gulung)

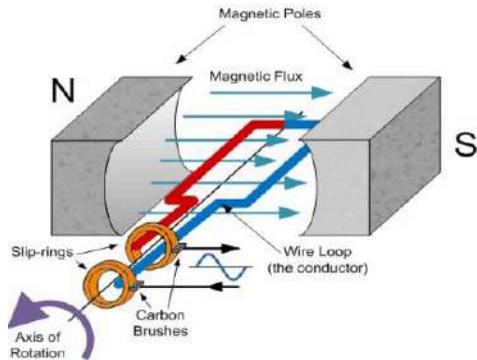
Turbin air adalah alat untuk mengubah energi air menjadi energi puntir. Energi puntir ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Untuk pemilihan turbin sendiri digunakan **diagram di bawah ini**

pembangkit listrik tenaga air adalah turbin dan generator listrik. Turbin inilah yang digunakan untuk memutar rotor yang ada di dalam generator listrik. Turbin dan generator listrik mempunyai sistem kerja yang saling mempengaruhi.

1. Generator

Generator adalah suatu alat yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, sedangkan jenis generator yaitu: generator sinkron dan asinkron. Generator yang digunakan pada stasiun tenaga air biasanya terdiri dari mesin sinkron tiga fase dengan putaran antara 70 sampai 1000 rpm. Berdasarkan arah porosnya, generator dibagi menjadi jenis poros datar (horizontal) dan poros tegak (vertikal). Jenis poros datar biasanya digunakan pada PLTA skala kecil dengan putaran tinggi. Untuk jenis poros tegak biasanya digunakan untuk PLTA skala besar dengan putaran rendah. Kelebihan dari generator poros tegak, yaitu ruang yang dibutuhkan relatif kecil. (Arismunandar, Kuwahara, 1982).

Generator yang paling banyak digunakan pada PLTA adalah generator sinkron dengan tipe arus bolak balik atau generator. Generator sinkron adalah mesin yang menggunakan magnet untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Prinsip kerja dari generator sinkron ini dengan sederhana dikatakan bahwa tegangan diinduksikan pada konduktor. Apabila konduktor diputar atau digerakkan di dalam medan magnet dapat memotong garis gaya. Oleh karena itu, konduktor tersebut akan terbangkitkan tegangan induksi dengan memenuhi kaedah Hukum Induksi Faraday. Generator digerakkan oleh beberapa mesin mekanis (uap, turbin air, mesin bensin, atau motor listrik). Generator AC sinkron memerlukan energi mekanis untuk menggerakkan rotor pada generator. Pada gambar 2.1 diperlihatkan prinsip kerja dari generator sinkron.



Gambar 2. 1 Prinsip kerja Generator Sinkron

Menurut Frank D. Petruzella, jumlah tegangan yang diinduksikan pada penghantar saat bergerak pada medan magnet bergantung pada beberapa faktor di bawah ini.

- a. Kekuatan medan magnet. Makin kuat medan magnet, maka makin besar tegangan yang diinduksikan.
- b. Kecepatan pada penghantar yang memotong *fluks*. Bertambahnya kecepatan penghantar menambah besarnya tegangan yang diinduksikan.
- c. Sudut pada tempat penghantar memotong *fluks*. Tegangan maksimum diinduksikan apabila konduktor memotong pada 90° , dan tegangan yang lebih rendah diinduksikan apabila sudut ini kurang dari 90° .
- d. Panjang penghantar pada medan magnet. Jika penghantar digulung menjadi kumparan yang terdiri dari beberapa lilitan, panjang efektif bertambah dan tegangan yang diinduksikan akan bertambah.

Generator pembangkit listrik tenaga air biasanya terdiri dari mesin sinkronis tiga fase. Generator dari stasiun tenaga air memiliki kecepatan rata-rata berkisar antara 70-1000 rpm. Berikut adalah gambar generator PLTA sebagaimana terlihat pada gambar 2.4 di bawah ini.



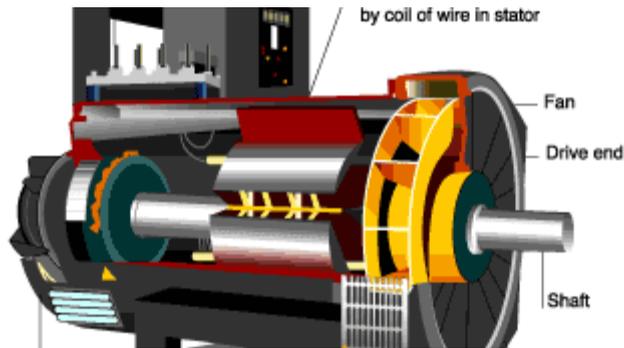
Gambar 2. 2 Generator (Hasil Survei PLTA Ubrug, Sukabumi)

Keadaan khusus dari generator untuk stasiun tenaga air ialah pada bentuk angker medan magnet dari unit stator yang merupakan bentuk kepala dari rotor. Bentuk ini memudahkan untuk menangani persoalan yang timbul pada pencabangan listrik untuk tegangan tinggi. Dengan kata lain, untuk menstabilkan voltase yang relatif rendah dapat dilakukan dengan mempergunakan cincin gelincir dan penyekatan dari rotor. (M. M. Dandekar, 1991: 455)

2. Klasifikasi Generator

Berdasarkan bentuk porosnya generator sinkron dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.

- a. *Salient pole* generator.
- b. *Cylindrical-rotor* generator (generator turbo).



Gambar 2. 3 Generator Sinkron

Sumber : <https://www.edukasikini.com/2019/05/prinsip-kerja-generator-sinkron.html>

Generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga air yang besar biasanya merupakan jenis generator turbo yang beroperasi pada kecepatan tinggi dan dikopel dengan turbin air. Sedangkan generator *salient-pole* biasanya digunakan untuk pembangkit listrik kecil dan menengah. Pada generator sinkron, arus searah dialirkan pada kumparan rotor yang kemudian menghasilkan medan magnet rotor. Rotor dari generator akan diputar oleh turbin untuk menghasilkan medan magnet putar di dalam mesin. Pada stator generator juga terdapat kumparan. Medan magnet putar menyebabkan medan magnet yang berinteraksi dengan kumparan stator berubah secara kontinu. Perubahan medan magnet secara kontinu ini menginduksikan tegangan induksi pada kumparan stator. Tegangan induksi ini akan berbentuk sinusoidal dan besarnya bergantung pada kekuatan medan magnet serta kecepatan putaran dari rotor. Untuk membuat generator tiga fase, pada stator ditempatkan tiga buah kumparan yang terpisah sejauh 120° satu sama lain sehingga tegangan yang diinduksikan akan terpisah sejauh 120° satu sama lain pula. Sehingga antara fasenya membentuk gelombang sinusoidal yang berbeda 120° .

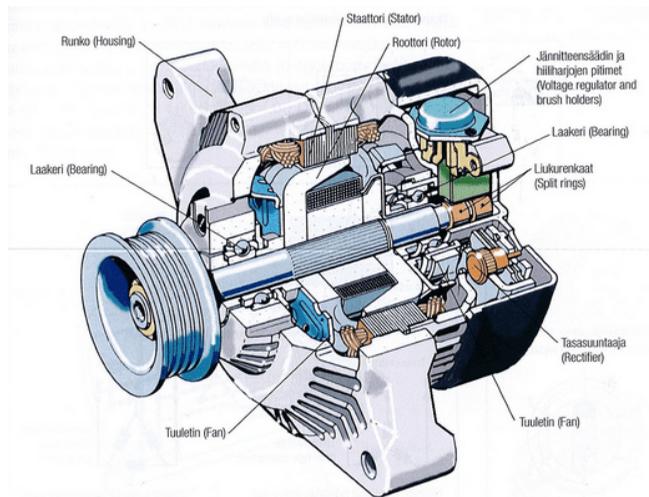
Berdasarkan arah porosnya, generator turbin air dibagi dalam dua golongan (Arismunandar, 1982: 77), yaitu poros datar (horizontal) dan poros tegak (vertikal). Golongan poros datar sesuai untuk mesin-mesin berdaya kecil atau mesin-mesin berputaran tinggi. Sedangkan golongan

poros tegak pada generator sesuai untuk mesin-mesin berdaya besar atau mesin-mesin berputaran rendah. Sedangkan Menurut sistem pendinginannya dibagi menjadi dua bentuk, yaitu saluran terbuka (open) dan saluran tertutup (closed).

Menurut Arismunandar, sistem pendinginan udara saluran terbuka, aliran udara dihisap langsung dari suatu bangunan ke dalam tudung generator. Kemudian dibuang ke luar bangunan itu melalui saluran udara. Untuk sistem pendinginan udara saluran tertutup, aliran udara dihisap ke dalam dan dikeluarkan lagi dari suatu bangunan melalui saluran khusus atau tersendiri. Pada Generator AC berdaya besar biasanya dilengkapi dengan tudung dengan sistem peredaran udara tertutup, maka udara di dalam mesin diedarkan melalui suatu pendingin udara. Walaupun menggunakan sistem pendinginan dengan zat air (hydrogen) juga dikenal sistem model pendingin demikian ini tidak diterapkan pada generator yang diputar oleh turbin air karena dianggap tidak ekonomis.

3. Sistem Penguatan (Eksitasi)

Generator arus bolak-balik dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan arus searah (direct current). Sistem penguatan digolongkan menurut cara penyediaan tenaga listrik, yang biasanya menggunakan arus searah. Dalam sistem penguatan mesin arus searah, dipergunakan sebuah generator searah untuk membangkitkan sumber tenaganya. Untuk itu dipakai penguat (exciter) *shunt* tunggal atau kombinasi dari penguat utamanya. Pada gambar adalah gambar generator arus bolak-balik dengan penguatan searah seperti terlihat pada gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2. 4 Generator Arus Bolak-Balik Dengan Penguatan Searah
 (sumber:<https://www.tukang-listrik.com/2018/01/pengertian-alternator-generator-sinkron.html>)

Generator arus searah tadi dihubungkan langsung pada poros generator utama atau diputar oleh mesin lain yang terpisah bergantung pada besarnya putaran generator utama. Kemampuan penguatan dan bekerjanya sistem kontrol. Pada sistem eksitasi dengan arus bolak-balik, arusnya disearahkan untuk penguatan. Sistem ini dimungkinkan penerapannya karena adanya perkembangan teknologi penyearah (rectifier) semi-konduktor akhir-akhir ini. Penguatan dengan mesin arus searah, secara konvensional mempunyai kelemahan dalam hal pemeliharaan sikatnya (brush) dan reaksi cepat dari penguat (Arismunandar, 1982: 82). Ada dua jenis penguatan dengan arus bolak-balik, sebagai berikut.

- a. Generator arus bolak-balik dengan eksitasi sendiri ditemukan sebagian dari daya arus bolak-balik yang dibangkitkan dipergunakan untuk eksitasi.
- b. Generator arus bolak-balik tanpa sikat akan berdampak pada arus bolak-balik dari generator yang dipergunakan sebagai eksitasi disearahkan dengan penyearahan (rectifier) pada rotor generator utama. Kemudian langsung dialirkan pada lilitan penguat magnet tanpa menggunakan cincin selip,

4. Pengatur Tegangan Otomatis (Automatic Voltage Regulator)

Pengatur tegangan otomatis (Automatic Voltage Regulator, AVR) dibagi menurut cara bekerjanya, yaitu jenis kontinu (continuous duty) dan jenis terputus (intermittent duty). Jenis pertama digunakan untuk mengatur tegangan dalam batas variasi yang kecil tetapi tidak untuk harga tertentu. Sedangkan jenis kedua untuk mengatur tegangan pada harga tertentu dalam batas toleransi tertentu pula. AVR yang bekerja secara kontinu diterapkan pada generator buatan tahun-tahun terakhir.

Selain jenis-jenis di atas, ada juga jenis tanpa kontak. Jenis yang menggunakan tahanan secara langsung atau tidak langsung, dan jenis vibrasi. Jenis tanpa kontak dapat bekerja kontinu tanpa menggunakan kontak (mekanis), atau operasi mekanisnya dilakukan dengan menggunakan penguat magnetis (magnetic amplifier), penguat berputar (rotating amplifier), tabung elektronis atau semikonduktor. Jenis yang menggunakan tahanan secara langsung disebut juga jenis berkontak banyak (multicontact type). Pada tahap ini tahanan yang dipasang dalam rangkaian medan dari penguat (medan) diatur langsung oleh isyarat kontrol. Pada jenis yang tidak menggunakan tahanan langsung, tahanan yang dipasang pada rangkaian medan diatur dengan perantara motor pengatur atau suatu mekanisma hidrolis. Jenis vibrasi menggunakan kontaktor untuk mengatur tegangan pada harga rata-rata yang konstan dengan menghubungkan atau memutuskan (on-off operation) sebagian atau seluruh tahanan yang terhubung pada rangkaian medan (Arismunandar, 1982: 83).

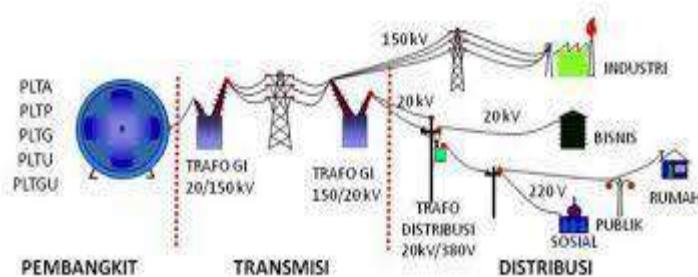
A. Distribusi Tegangan Listrik dari PLTA

Tegangan listrik yang dihasilkan dari generator PLTA awalnya dinaikkan menjadi 150–500 kilovolt (KV). Akan tetapi, tegangan sebesar ini tidak langsung dialirkan ke rumah-rumah atau industri pabrik. Tujuan dari penaikan tegangan ini supaya kerugian yang dihasilkan dari hambatan pada kawat penghantar dalam proses transmisi bisa berkurang.

Tegangan listrik dari generator kemudian dialirkan ke gardu induk

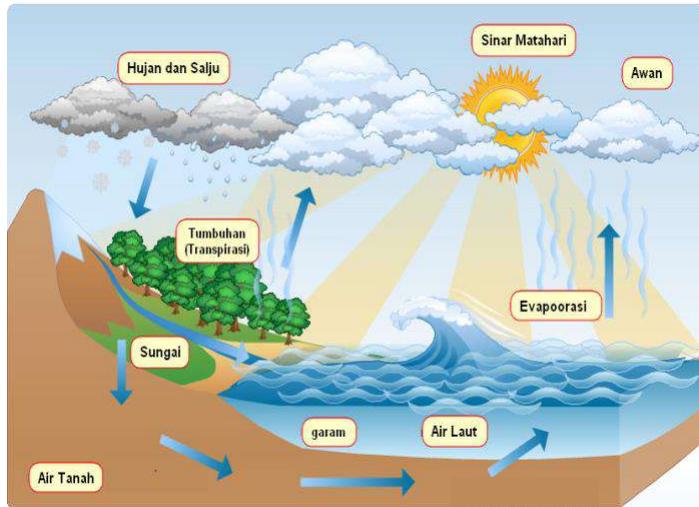
melalui jaringan sutet (saluran udara tegangan ekstra tinggi). Pada tahap ini, tegangan listrik diturunkan menjadi tegangan menengah, yakni 20 KV. Setelah itu, barulah dialirkan ke trafo-trafo distribusi melalui jaringan tegangan menengah (JTM).

Tegangan listrik yang tersimpan di trafo-trafo distribusi selanjutnya kembali diturunkan menjadi 220 volt. Barulah dari trafo-trafo distribusi akan disalurkan ke jaringan tegangan rendah (JTR). Pada akhirnya tegangan listrik dari PLTA baru bisa digunakan oleh masyarakat untuk menghidupkan berbagai peralatan elektronik. Pada gambar 2.5 adalah gambaran sistem jaringan kelistrikan dari pembangkit listrik ke konsumen, seperti ke rumah tangga, industri, sektor komersial, sektor industri, maupun fasilitas sosial, dan sebagainya.



Gambar 2. 5 Sistem Jaringan Tenaga Listrik

Potensi sumber daya listrik yang satu ini sayangnya kian terancam. Mengapa demikian? Hal ini mengingat ketersediaan air tawar yang bisa langsung dimanfaatkan oleh makhluk hidup kian menurun. Ketersediaan air di bumi sebageaian besar merupakan air laut yang mempunyai rasa asin sehingga tidak bisa dimanfaatkan langsung oleh makhluk hidup. Ketersediaan air tawar yang ada di bumi didapat secara alami melalui daur hidrologi atau siklus air (Suyitno, 2014: 82). Pada gambar 2.5 *Daur Hidrologi atau Siklus Air* yang merupakan informasi penting untuk ketersediaan air untuk pembangkit listrik tenaga air.



Gambar 2. 6 Daur Hidrologi atau Siklus Air

(sumber: rumushitung.com)

1. Tahapan Membangun PLTA

Indonesia dikenal sebagai negara yang kaya dan besar. Tidak terkecuali dengan sumber daya alam yang melimpah, baik sumber daya air, kayu, maupun tanah. Salah satu yang bisa dimanfaatkan dari potensi alam Indonesia berupa pembuatan PLTA dengan memanfaatkan sumber daya air. Perlu diketahui kalau sampai saat ini, kurang dari 5% saja tenaga air yang dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik. Supaya kita mempunyai bayangan, kapasitas PLTA skala menengah-besar setidaknya potensi air minimal 75.000 MW. Untuk skala mini-hidro kapasitas potensi tenaga airnya kurang dari 5 MW. Sementara untuk skala mikrohidro, kapasitas potensi airnya kurang dari 100 KW. Apabila ingin mengembangkan listrik tenaga air di suatu daerah/ lokasi tertentu, maka harus melalui beberapa tahapan. Berikut beberapa tahapan pengembangan listrik tenaga air di wilayah tertentu.

- a. Mencari dan memilih lokasi yang berpotensi menghasilkan listrik

- tenaga air.
- b. Melakukan survei potensi atau survei identifikasi lokasi berdasarkan data awal yang sudah dikumpulkan.
 - c. Melakukan survei penjajagan (*reconnaissance survei*).
 - c. Melakukan studi kelayakan (*feasibility study, F/S*).
 - d. Membuat desain secara rinci (*detail design*) mengenai rancangan bangunan PLTA.
 - e. Memulai melakukan kontruksi atau pembangunan sesuai dengan rancangan bangunan (*contruction*).
 - f. Memulai mengoperasi PLTA dan tidak lupa melakukan pemeliharaan secara berkala.

Tahapan di atas biasanya dilakukan pada skala PLTA hingga skala minihidro dengan tingkat kerumitan yang berbeda. Menurut Sedyo Sebayang (2002: 1) bahwa semakin singkat tahapan yang dilakukan dalam pengembangan listrik tenaga air di wilayah tertentu, biaya yang dikeluarkan justru semakin sedikit.

2. Potensi Sumber Energi Tenaga Air

Sumber daya air bisa menjadi sumber listrik jika digunakan dengan tepat. Energi listrik yang berasal dari tenaga air mempunyai dua faktor utama, yaitu debit air dan tinggi jatuh air. Kedua faktor ini mempunyai keterkaitan yang kuat dan menjadi dasar terjadinya proses pembangkit listrik tenaga air. Aliran air mempunyai debit air yang bisa berubah setiap waktu. Artinya, bisa meningkat atau berkurang secara tiba-tiba. Kondisi semacam ini dipengaruhi oleh curah hujan dan lokasi. Oleh karena itu, perlu perencanaan yang baik terkait dengan aliran air supaya bisa memaksimalkan kinerja dari PLTA.

Debit air adalah jumlah/volume air per satuan waktu yang akan memutar turbin mesin pembangkit. Sedangkan tinggi jatuh air (*head*) adalah perbedaan elevasi permukaan air di tempat masuknya air ke dalam pipa pesat (*penstok*) dan di tempat keluarnya air dari mesin pembangkit. Dijelaskan oleh Sedyo Sebayang (2002: 3) bahwa energi yang dihasilkan dari tenaga air termasuk energi potensial. Oleh karena itu, percepatan gravitasi memengaruhi besaran kapasitas atau potensi yang dihasilkan.

Dengan demikian potensi tenaga air atau kapasitas pembangkit dapat diperkirakan dari hubungan dengan persamaan sebagai berikut.

$$P = \eta \cdot g \cdot q \cdot h$$

Keterangan:

P = Kapasitas daya pembangkit (KW)

η = Efisiensi peralatan

g = Percepatan gravitasi (m/detik²)

q = Debit air (m³/detik)

h = Tinggi jatuh (meter)

3. Melakukan Studi Meja (*Desk Study*)

Data mempunyai peran yang penting dalam sebuah penelitian. Dalam hal ini, data yang dimaksud mengenai debit air dan tinggi jatuh air yang terjadi di PLTA Ubrug. Tidak menutup kemungkinan, data yang didapat bisa berbeda dengan data yang ada di lapangan.

Dalam melakukan studi meja adakalanya perlu menentukan titik daerah aliran sungai (DAS). Daerah aliran sungai adalah lokasi atau daerah yang berada di sekitar aliran sungai. Sedyia Sebayang (2002: 4) menjelaskan bahwa langkah berikutnya setelah menentukan daerah aliran sungai ialah mencatat data curah hujan yang turun ke DAS. Perlu diketahui kalau daerah aliran sungai dipengaruhi oleh curah hujan yang turun ke DAS. Anda bisa mencari sumber data terkait curah hujan ini melalui setidaknya tiga pos curah hujan. Gambar 2.7 Ilustrasi Daerah Aliran Sungai (DAS) (Sumber: rumushitung.com)



Gambar 2. 7 Ilustrasi Daerah Aliran Sungai (DAS)
(sumber: rumushitung.com)

Apabila tidak memungkinkan mencari tiga titik. Titik tempat pengukuran (POs) curah hujan, satu atau dua pos curah hujan juga sudah cukup. Anda bisa mengolah dan menyimpulkan berdasarkan data yang didapat. Jika tersedia lebih dari satu pos, Anda bisa menghitung dengan cara mencari perkiraan rata-rata debit sungai dengan rumus berikut.

$$Q = \alpha \cdot \frac{A \cdot R}{365 \times 24 \times 3600}$$

Keterangan:

Q = Debit air sungai (m³/detik)

α = Koefisien pengaliran (*Run-Off coefficient*) A = Luas DAS (m²)

R = Curah hujan rata-rata tahunan

*Angka $365 \times 24 \times 3600$ = waktu satu tahun dalam detik

4. Melakukan Survei di Lokasi Potensial

Survei langsung ke lokasi penting dilakukan untuk mengetahui kondisi yang sebenarnya di lapangan. Kegiatan survei potensi bertujuan untuk mengecek lokasi pengembangan listrik tenaga air di wilayah tertentu secara langsung ke lapangan setelah memperoleh data dari studi meja. Selain mengecek lokasi, survei potensi juga dilakukan evaluasi dan

modifikasi untuk menentukan langkah apa yang diambil selanjutnya.

Ada aspek-aspek atau hal-hal yang perlu diperhatikan ketika melakukan survei lokasi. Dalam hal ini, aspek-aspek yang perlu diperhatikan, yaitu (a) topografi; (b) geologi/geoteknik; (c) hidrologi; (d) sarana prasarana yang berkaitan dengan pelaksanaan konstruksi; dan (e) suplai bahan bangunan. Aspek-aspek ini sebagai pertimbangan supaya apa yang dikerjakan memberi hasil optimal. Oleh karena itu, beberapa aspek di atas perlu dipahami sebelum melakukan turun ke lapangan.

Tujuan dari kegiatan survei potensi tidak hanya melakukan pengamatan terkait potensi dari suatu lokasi yang dipilih. Akan tetapi, ada kegiatan pokok lain yang perlu dilakukan. Berikut kegiatan pokok dalam kegiatan survei lapangan.

- a. Kondisi nyata lokasi yang dipilih.
- b. Mencoba mengukur debit air sungai.
- c. Mengukur tinggi air jatuh.
- d. Merencanakan bentuk dan posisi bangunan PLTA.
- e. Meninjau terkait topografi, hidrologi, geologi, sistem kelistrikan, sosial ekonomi, dan hal terkait lainnya.

Sedyasebyang (2002:8) menjelaskan bahwa PLTA yang mempunyai kapasitas besar justru semakin banyak aspek yang dipertimbangkan. Perlu dilakukan penggabungan dan pemangkasan paket biaya mengingat tahapan pengembangan PLTA yang relatif lama. Selain itu, biaya yang dikeluarkan untuk survei juga relatif banyak.

B. Prinsip Kerjadan Potensi Tenaga Air pada PLTA

Proses fisika yang terjadi dalam sistem PLTA adalah perubahan energi potensial dan energi gerak menjadi energi listrik. Perubahan energi dipengaruhi oleh peralatan yang digunakan. Peralatan utama berupa motor yang dihubungkan ke turbin. Turbin inilah yang akan digerakkan oleh energi gerak dari air. Secara umum, pembangkit tenaga listrik menggunakan putaran generator sinkron sehingga pada akhirnya didapatkan tenaga listrik arus bolak-balik tiga fasa.

Mesin penggerak yang biasa digunakan untuk menggerakkan generator listrik adalah turbin air, diesel, turbin uap, dan turbin gas. Mesin penggerak generator inilah sebagai tempat terjadinya perubahan tenaga primer menjadi tenaga gerak. Efek dari perubahan ini akan menimbulkan suara yang cukup bising dan limbah. Kedua efek yang bisa dibilang 'merugikan' ini perlu solusi supaya tidak berdampak buruk terhadap lingkungan.

Suyitno (2014: 85) menjelaskan bahwa dalam pembangkit listrik tenaga air terjadi perubahan dari tenaga air menjadi tenaga listrik. Penghitungan daya dari suatu pembangkit bisa dilakukan setelah diketahui tinggi jatuh dan debit air. Kedua faktor ini mempunyai peran yang penting mengingat debit air bisa berubah secara tiba-tiba. Semakin kecil debit air, maka daya yang dihasilkan juga semakin kecil. Berikut rumus yang digunakan untuk menghitung daya dari suatu pembangkit.

$$P = g \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_g$$

Keterangan:

P = daya keluaran (KW)

Q = debit air per unit (m^3/detik) H = tinggi terjun air (m)

η_t = efisiensi turbin air

η_g = efisiensi generator

g = gaya gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

Komponen-komponen yang digunakan dalam sistem kerja PLTA mempunyai peran dan fungsi yang berbeda. Oleh karena itu, berbagai komponen dalam PLTA perlu dipersiapkan dan direncanakan dengan baik. Hal ini supaya pembangkit listrik tenaga air bisa bekerja secara optimal. Sebelum mengembangkan PLTA, berikut komponen-komponen yang perlu dipahami.

- a. Konstruksi sipil, terkait dengan bendungan, masukan, saluran pengantar air, kolam tandon, pipa pesat, dan bangunan sentral.

- b. Peralatan mekanik–elektrikal pada bangunan sentral, terkait dengan turbin, generator, dan panel kontrol.
- c. Penyaluran atau distribusi, terkait dengan pipi-pipa untuk menghubungkan atau penyalur aliran air.

C. Model Bangunan Sipil PLTA

Model bangunan sipil PLTA perlu dirancang dan dipersiapkan dengan matang. Tidak hanya sekadar bentuk bangunan, tetapi juga terkait posisi atau peletakan berbagai komponen PLTA. Hal ini perlu diperhitungkan supaya sistem kerja PLTA berjalan dengan baik dan maksimal.

Jenis pembangkit listrik tenaga air apabila dilihat dari cara membendung bisa dibedakan menjadi dua, yakni PLTA *run off river* dan PLTA dengan kolam tandon (*reservoir*). Jika menggunakan jenis PLTA *run off river* perlu diperhatikan pemindahan air sungai memanfaatkan dam yang difungsikan sebagai pemutus aliran sungai. Setelah itu, barulah air sungai dialirkan menuju PLTA.

Berbeda dengan jenis PLTA *run off river*, aliran air pada jenis PLTA dengan kolam tandon terlebih dahulu ditimbun dengan bendungan yang besar. Setelah itu, barulah air dialirkan ke PLTA. Saat musim hujan tiba, tandon air berfungsi sebagai tempat menampung debit air yang meningkat. Sementara saat musim kemarau, kebutuhan air bisa diambil dari tandon air.

Pembuatan PLTA jenis *reservoir* membutuhkan biaya yang lebih besar. Bangunan air PLTA yang mengalirkan air dari dam pada PLTA *run off river* dan dari kolam tandon pada PLTA yang menggunakan bendungan sampai ke turbin. Secara garis besar, bangunan air ini terdiri dari saluran air yang terbuka atau tertutup (terowongan) sampai pada tabung peredam.

Sebelum tabung peredam terdapat katup pengaman dan setelah tabung peredam terdapat saluran air berupa pipa pesat yang harus tahan terhadap guncangan tekanan air. Pada ujung bawah pipa pesat terdapat katup utama turbin. Dari katup utama turbin, air mengalir menuju katup utama turbin. Dari katup utama turbin, air terus mengalir menuju katup pengatur turbin, lalu air mengenai roda air turbin yang mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik roda air turbin (Suyitno, 2014: 97).

Supaya lebih jelas, berikut penjelasan mengenai konstruksi bangunan yang ada pada PLTA.

1. Bendungan

Sebelum membuat bendungan perlu perencanaan yang matang. Hal ini supaya umur bendungan bisa lama dan tidak mudah retak atau rusak. Bendungan mempunyai peran yang penting karena sebagai penahan air dalam jumlah yang banyak. Secara umum, bendungan yang ada saat ini masih berbentuk tembok.

Biaya pembuatan bendungan bisa dikatakan cukup tinggi. Biasanya memakan anggaran biaya 20–25% dari biaya pembuatan PLTA. Bahan membuat bendungan bisa menggunakan batu, beton, atau kayu. Akan tetapi, saat ini bendungan dibuat dengan bahan beton bertulang. Perlu dilakukan perawatan dan pengecekan secara berkala supaya bendungan mempunyai umur yang panjang. Kerusakan yang sering terjadi berupa keretakan tembok.

Bendungan sejatinya memiliki dua fungsi dasar, yakni sebagai tempat penampung air yang mempunyai kesanggupan untuk menyediakan air dan menaikkan ketinggian tekanan air yang merupakan potensi dari air sungai. Dilihat dari fungsinya, bendungan dapat digolongkan menjadi tiga, yakni bendungan pemasukan (*intak dam*), bendungan penyimpan (*stroge dam*), dan bendungan pengatur (*regulating dam*).

Bendungan bisa dibedakan menjadi dua jenis jika dilihat dari konstruksinya. Berikut penjelasan singkat mengenai dua jenis bendungan yang dimaksud.

- a. Bendungan beton, digunakan dengan mencampur semen, pasir, dan kerikil. Pembangunan bendungan jenis ini biasanya lebih cepat dan mengutamakan kualitas dibanding bendungan dari tembok.
- b. Bendungan kayu, digunakan saat lokasi pembuatan yang minim. Penggunaan kayu memang mempunyai harga yang lebih murah dibanding harga semen.

2. Pintu Kontrol (*Intake*)



Pemasangan pintu kontrol digunakan sebagai jalur air yang akan masuk ke turbin melalui penstok. Komponen ini juga berfungsi sebagai pembagi aliran air untuk berbagai keperluan, misalnya irigasi, navigasi, dan *power generation*. Pada gambar 2.7 adalah memperlihatkan Intake di ada di PLTA Ubrug, Sukabumi



Gambar 2. 8 Intake PLTA Ubrug, Sukabumi

Konstruksi bangunan *intake* untuk mengambil air langsung dari sungai dapat berupa bendungan (*intake dam*) yang melintang sepanjang lebar sungai atau langsung membagi aliran air sungai tanpa dilengkapi bangunan. Sering kali pintu kontrol dibuat pada permukaan rendah. Konsep seperti ini bisa dimanfaatkan untuk menggelontor endapan tanah atau lempung (Dandekar, 1991: 262).

3. Saringan Sampah

Melihat keadaan saat ini, seakan aliran air tidak bisa dipisahkan dari yang namanya sampah. Sampah yang dimaksud adalah sampah organik maupun sampah anorganik. Oleh karena itu, dalam pembuatan PLTA memerlukan saringan sampah untuk mencegah sampah-sampah masuk ke sistem pembangkit listrik. Saringan sampah sebaiknya dipasang secara horizontal antara 50–80 derajat. Komponen yang satu ini dipasang miring supaya bisa maksimal menahan sampah pada aliran air. Kisi-kisi dalam saringan sampah ada berbagai ukuran. Ada yang digunakan untuk menahan

sampah, menahan ikan, atau menahan pasir. Berikut adalah gambar kisi-kisi saringan sampah seperti terlihat pada gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2. 9 Kisi-Kisi Saringan Sampah
(Hasil Survei PLTA Ubrug, Sukabumi)

Dandekar (1991: 351) menjelaskan bahwa kisi-kisi dalam saringan sampah digunakan untuk roda-roda francis yang kecil atau turbin-turbin francis dengan kecepatan rendah untuk mengetahui apakah benda kecil atau binatang yang terapung seperti contoh ikan. Bagaimanapun tujuannya adalah menjaga air yang masuk ke turbin dalam keadaan bersih dengan difungsikan kisi-kisi pada saringan andal sehubungan dengan ongkos pertama yang tinggi dan perawatan, seperti juga hubungan dengan kualitas yang bersih dan menjaga kehilangan tinggi tekan.

Saringan sampah mendapat tekanan dari aliran air dan tekanan lebih besar jika ada tumpukan sampah yang terperangkap. Model rak-rak saringan sampah pada keadaan normal umumnya dibuat untuk menahan tinggi tekanan antara 1–2 meter. Sementara pada keadaan luar biasa, rak-rak saringan sampah dibuat untuk menahan tinggi tekanan antara 4–5 meter. Mesin pembersih rak bergerak pada rel-rel yang dipasang pada pintu masuk saluran atau pada jembatan pemeliharaan yang dibuat untuk hal tersebut. Batang-batang pada rak yang diperuntukan untuk pembersihan berkelanjutan dari menghindarkan hambatan yang lebih kecil pada aliran air .

Automatic trash rake (ATR) merupakan sebuah mesin yang berfungsi untuk membersihkan sampah pada (water way). Mesin ini terdiri dari *grab*, *tilting panel*, *conveyor*, *power hidroulic pack* dan penampung sampah. ATR dioperasikan secara manual maupun otomatis *by hand start cycle* dan *by timer start cycle* (Purnomo, 2015; 4-5) Berikut adalah gambar automatic trash rake seperti terlihat pada gambar 2.9 di bawah ini:



Gambar 2. 10 Automatic Trash Rake di PLTA Ubrug, Sukabumi

4. **Katup Air**

Dandekar (1991: 291) menjelaskan bahwa katup dapat ditempatkan pada posisi di tengah-tengah pipa atau pada ujung pipa. Penempatan pada posisi di tengah-tengah pipa disebut katup segaris sedangkan penempatan pada ujung pipa disebut katup terminal. Pada proyek pembangkit listrik tenaga air, katup digunakan pada batang pipa dan pada pintu air. Katup-katup di dalam batang pipa jarang yang terdiri dari jenis pengatur, tetapi biasanya berfungsi membuka atau menutup pintu air. Katup-katup pada pintu air terdiri dari jenis pengatur karena dapat membuka sebagian atau seluruhnya. Katup mempunyai peran yang sangat penting, sedangkan fungsi kerja dalam pipa saluran adalah mengatur aliran, menghentikan aliran samasekali, dan dapat mengurangi pemborosan energi dalam keadaan tertentu.

Di dalam saluran pipa air terdapat dua tempat yang dapat digunakan untuk memasang katup, agar aman, maka penempatannya perlu memperhatikan dua hal, yaitu

- a. pada mulut batang pipa yang panjang, pada ujung saluran tekanan. Katup jenis ini dikenal sebagai katup batang pipa;
- b. pada ujung batang pipa sebelum batang pipa bersambung dengan gulungan yang menggerakkan turbin Katup ini dikenal sebagai katup turbin.

Berdasarkan penjelasan M. Dandekar, mulut pipa air masuk yang mengontrol aliran air masuk ke dalam sistem pengangkutan merupakan jenis geser pintu daun. Katup batang pipa akan berguna jika batang pipa memerlukan pengurangan air dengan cepat. Katup turbin akan diperlukan jika gulungan penggerak memerlukan pengurangan air. Jika pintu pipa masuk merupakan keharusan, pintu pipa masuk itu sendiri dapat berfungsi sebagai katup batang pipa, yang selanjutnya dapat ditiadakan. Begitu pula, jika dibuatkan katup batang pipa, katup turbin dapat ditiadakan.

Dalam keadaan demikian, pintu-pintu kecil turbin sendiri dapat berfungsi sebagai pengganti katup-katup turbin. Dalam hal ini kekurangannya ialah terdapatnya kebocoran yang cekung besar pada pintu-pintu kecil yang dapat berarti kehilangan tenaga yang cukup besar. Selain itu, karena katup turbin biayanya paling sedikit 15 persen (biasanya malah lebih tinggi) dari biaya turbin, maka jika tidak menggunakan katup turbin akan berarti memerlukan perhitungan ekonomi yang lebih dalam, untuk mendapatkan *cost* yang efisien.

5. Katup Pintu

Pintu dapat digambarkan sebagai pintu geser tanpa tutup, pintu cincin penyangga, atau pintu gulung, pintu aliran pancar atau pintu radial dengan penutup di atas. Berikut adalah gambar katup pintu seperti terlihat pada gambar 2.10 di bawah ini:



Gambar 2. 11 Katup Pintu

Masalah utama sehubungan dengan katup-katup ini ialah masalah deposit endapan dan peronggaan dalam ceruk katup bila dalam keadaan terbuka. Katup pintu cincin penyangga merupakan penyempurnaan dalam hal tersebut di atas. Ada sebuah cincin yang sama diameternya dengan diameter pipa penyalur. Bila pintu tertutup, cincin disambut dalam ruangan tepat di bawahnya. Bila pintu dibuka, daun pintunya bergeser di dalam ruangan di atasnya, dan cincin menempati posisi dalam ceruk, dan membiarkan aliran air lalu di situ. Katup pintu biasanya digerakkan melalui mekanisme tekanan minyak atau melalui aliran listrik (Dandekar, 1991: 294).

a. Katup Kupu-Kupu (*Butterfly Valve*)

Katup kupu-kupu terdiri atas pelat *lenticular* dan bulat dapat berputar antara sumbu sentral yang tegak lurus dan sumbu pipa. Bila terbuka, dengan sendirinya membuka pada arah aliran. Bila tertutup, dengan sendirinya menutup aliran samasekali. Untuk saluran yang sangat lebar, katup kupu-kupu merupakan satu-satunya jenis katup yang cocok. Kesukaran pada katup kupu-kupu ialah sukarnya memperoleh kesesakan (kepenuhan) air, dan pada umumnya merupakan kebocoran terjadi pada katup pada waktu sedang tertutup. Begitu pula, garis pipa saturasi pada kedua sisi katup harus terisi air sepenuhnya untuk memberi beban yang seimbang selama membuka atau menutup. (Dandekar,1991: 294).

Berikut adalah gambar katup kupu-kupu seperti terlihat pada gambar

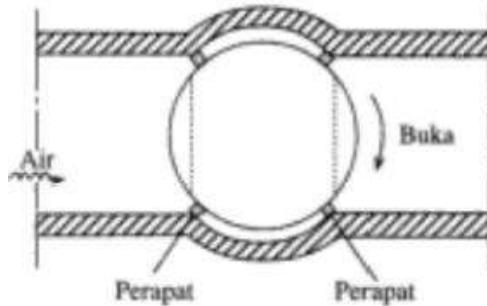
2.11 di bawah ini (Marsudi, 2005: 191).



Gambar 2. 12 Katup Kupu-Kupu

b. Katup Bola (*Ball Valve*)

Katup putar (juga dikenal sebagai katup sumbat) atau katup bola secara struktural lebih kokoh daripada katup kupu-kupu. Katup ini terdiri atas sebuah batang yang tegak lurus mengarah sumbu pipa saluran dan sebuah silinder dengan diameter yang sama dengan pipa saluran berputar dalam ruangan yang bulat seperti bola. Bila terbuka, silinder ini dengan sendirinya searah dengan pipa saluran dan air pun lewat mengalir. Jika tertutup, silinder itu berputar pada sumbunya, dan selanjutnya mulut saluran tertutup oleh pelat bundar yang secara struktural terpasang di atas silinder. Katup ini, seperti katup kupu-kupu, juga bekerja dalam kondisi beban yang seimbang dan memerlukan lini *by-pass*. Kekokohnya mampu digunakan untuk kepala yang tinggi. Pada kepala setinggi 250 m atau lebih. Boleh dikatakan katup putar sajalah yang digunakan (Dandekar, 1991: 296). Berikut adalah gambar katup bola seperti terlihat pada gambar 2.12 di bawah ini (Marsudi, 2005: 191).



^Gambar 2. 13 Katup Bola

c. **Katup Howell-Bunger**

Dandekar menjelaskan bahwa katup *howell-bunger* sama konsepnya, tetapi pada umumnya digunakan untuk mengurangi pemborosan energi pada saluran keluar bertekanan tinggi. Katup itu berupa kerucut yang terpasang di dalam silinder. Silinder itu dipasang pada penyalur di tempat saluran ke luar, dan dapat bergeser sepanjang pipa penyalur. Aliran air dapat memancar karena kerucut yang merintanginya berbentuk rongga pemancar dan energi dapat dilepas secara efektif. Katup ini digunakan untuk melepaskan jumlah air ke hilir secara terkontrol bagi keperluan energi, mengawasi luapan, dan untuk keperluan irigasi katup ini mempunyai koefisien pelepasan yang sangat tinggi.

Pancaran pelepasan air dari katup jarum dapat menimbulkan erosi karena energi kinetiknya yang besar. Dengan demikian, sebuah alat penyebar yang terdiri dari sejumlah baling-baling dipasang di saluran ke luar. Alat penyebar itu menyebabkan pancaran air terburai dan meluas arahnya sehingga tidak ada kerusakan walaupun aliran air cepat sekali. Berikut adalah gambar katup Howell-Bunger seperti terlihat pada gambar 2.13 di bawah ini.



Gambar 2. 14 Katup Howell-Bunger

Fixed cone valves, dikenal juga dengan nama *howell-bunger valves*, berasal dari nama pembuatnya C. H. Howell dan H. P. Bunger pada tahun 1935 pertama kali dipasang pada Bendungan El Vado, New Mexico, USA. Penggerak dapat dioperasikan secara manual baik menggunakan tenaga listrik maupun hidrolis. Berbentuk pipa bundar dengan selubung yang dapat diatur maju-mundur. Besar aliran tergantung jarak antara *cone* dan selubung. Mampu bekerja hingga beda tinggi 300 m.

6. Saluran Pengambil Air

Dandekar (1991: 342) menjelaskan bahwa ada berbagai jenis saluran pengambil air (*headrace*) dalam PLTA. Saluran pengambil dalam hal ini, seperti sarana pengambil air, aliran permukaan sungai, dan pengambil air dengan tinggi tekan rendah. Saluran pengambil air juga untuk mengeluarkan lumpur dan sebagai penangkap lumpur. Bagian depan saluran pengambil air dipasang dinding penyaring. Saluran pengambilan air (*headrace*) dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut :



Gambar 2. 15 Saluran Pengambil Air pada PLTA Ubrug

Saluran pengambil air bisa disalurkan sampai saluran-saluran pengalihan. Keberadaan saluran ini supaya aliran air yang digunakan untuk PLTA bisa maksimal. Pada akhirnya, PLTA bisa menghasilkan energi listrik yang optimal. Salah satu hal yang perlu dipahami terkait pengeluaran lumpur dan komponen penangkap lumpur.

7. Saluran Berbentuk Persegi

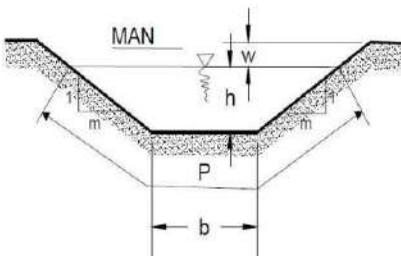
Penggunaan saluran berpenampang persegi dikarenakan atas pertimbangan proses pembuatan yang mudah dan tidak memakan tempat yang lebar. Ciri dari saluran bentuk persegi, misalnya berdinding tegak pada bagian samping. Saluran jenis ini lebih banyak dipakai dibandingkan dengan saluran berbentuk trapesium. Pada Gambar 2.14 saluran air berpenampang persegi.



Gambar 2. 16 Saluran Air Berpenampang Persegi.

Apabila ingin menggunakan saluran berbentuk persegi, perlu menghitung luas penampang aliran air. Hal ini supaya air yang mengalir bisa lancar dan tidak meluap. Saluran jenis ini sampai saat ini masih bisa ditemukan berbagai tempat, misalnya irigasi sawah dan aliran air untuk PLTA.

8. Saluran Berbentuk Trapesium



Gambar 2. 17 Saluran Air Berpenampang Trapesium.

Air yang mengalir di saluran berbentuk trapesium mempunyai fluktuasi kecil, tetapi mengalir secara terus-menerus. Saluran jenis ini digunakan untuk menampung dan menyalurkan limpasan air hujan dalam jumlah debit yang besar. Saluran berpenampang trapesium biasa digunakan di lokasi dengan lahan yang cukup lebar pada gambar di samping.

9. Saluran Pelimpah

Debit air akan mengalami peningkatan saat musim penghujan. Oleh karena itu, pembuatan bendungan perlu dilengkapi dengan saluran pelimpah. Saluran pelimpah akan bekerja saat debit air sudah mencapai titik tertentu. Jika keadaan tersebut sudah tercapai, kapasitas disalurkan dari pelimpah sehingga aliran keluar dari pelimpah sama dengan aliran masuk alhasil, permukaan reservoir tidak akan memotong permukaan air tertinggi (Suyitno, 201: 101). Berikut merupakan gambar 2.16 saluran pelimpah :



Gambar 2. 18 Saluran Pelimpah

Tinggi debit air antara permukaan daya tampung penuh dan permukaan air disebut dengan tinggi banjir. Sedangkan permukaan tertinggi debit air yang terjadi selama terjadinya banjir disebut dengan permukaan air tertinggi. Kedua istilah ini perlu dipahami supaya tidak salah dalam penyebutan.

10. Kolam Tandon

Sebelum Anda membuat kolam tandon, perlu memperhatikan terkait rembusan air. Hal ini supaya air yang melimpah tidak mengikis tanah bahkan bisa membuat bendungan longsor. Kolam tandon yang juga sering disebut dengan bak penenang ini berfungsi untuk mengendapkan material kecil, misalnya kerikil, batu, dan tanah yang terbawa arus air. Berikut merupakan gambar 2.17 Bak penenang (kolam tandon) :



Gambar 2. 19 Bak Penenang (Kolam Tandon)

Pembuatan kolam tandon juga berfungsi untuk menstabilkan debit air. Supaya tidak mudah rusak dan roboh, kolam tandon dibuat dengan fondasi yang kuat. Anda bisa menggunakan rumus berikut untuk mencari besarnya volume yang ada pada bak penenang.

$$V = P \times L \times T$$

Keterangan:

V = Volume air (m³)

P = Panjang bak penenang (m) L = Lebar bak penenang (m)

T = Kedalaman bak penenang (m)

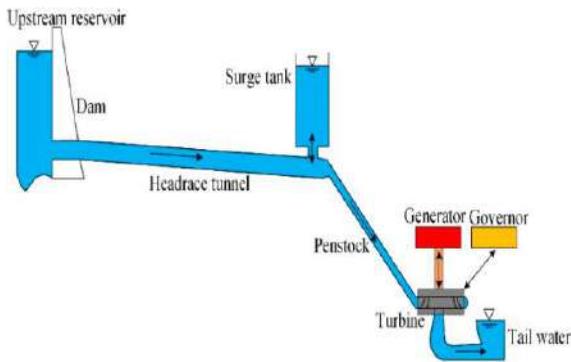
11. Surge-Tank (Tangki -Pengelak)

Penggunaan tangki-pengelak (*surge tank*) berfungsi sebagai pengendali debit air untuk menyerap pukulan air ketika terjadi perubahan debit air di turbin. Tangki jenis ini terpasang di terminal terowongan tekan pada listrik jenis bendungan bersaluran. Sementara tangki yang berada di terowongan tanpa tekan disebut tangki atas. Jenis tangki ini berfungsi untuk mengatur debit air dan membersihkan pasir.

Ketika terjadi *water hammer* (pukulan air) bisa berpotensi pipa akan pecah. Hal ini terjadi karena katub yang menutup secara tiba-tiba dan tekanan yang meningkat. Oleh karena itu, diperlukan *surge tank* untuk mengurangi tekanan akibat *water hammer* dan menyuplai air saat tiba-tiba ada pembebanan. Jika kecepatan aliran massa air di dalam pipa dikurangi atau dihentikan sama sekali akan menimbulkan kenaikan tekanan air yang secara mendadak. Tekanan air ini terjadi karena adanya kejutan aliran air akibat perubahan energi regangan yang dikenal dengan fenomena “effect water

hammer“. Hal ini sering terjadi pada instalasi turbin Air, karena adanya pengurangan beban secara mendadak. Fenomena ini sangat berbahaya bagi instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

Salah satu cara untuk menghindari atau mengurangi kerusakan pada saluran pipa, yakni dengan memasang *surge tank* (tangki pengelak). Hal ini dipilih karena kostrukasinya relatif murah, sederhana dan tidak memerlukan perawatan khusus. Salah satu keuntungan dengan dipasang *surge tank* adalah akan dicapai kondisi stabil dari permukaan air dari terjadinya osilasi permukaan air dalam tangki pengelak, pada gambar 2.18 dibawah adalah gambar *surge tank*.



Gambar 2. 20 *Surge Tank*

12. Pipa Pesat



Gambar 2. 21 Pipa pesat
(Sumber: PLTA Lamajan)

Penggunaan pipa pesat (penstock) untuk mengalirkan air dari bak penenang menuju turbin. Penggunaan pipa pesat disesuaikan dengan tekanan yang diterima. Pipa pesat dibuat menggunakan pipa baja jika tekanan yang diterima lebih dari 6 meter. Sementara itu, untuk tekanan di bawah 6 meter bisa menggunakan drum minyak atau papan kayu.

Jalaludin Almahalli (2009: 35) mengungkapkan bahwa perlu adanya perhitungan terhadap tekanan air yang besar ketika membuat pipa pesat. Penghitungan ini terkait dengan luas penampang pipa pesat, kecepatan aliran dalam pipa pesat, tebal pipa, dan kehilangan tinggi tekan pada saluran penstok. Hal ini untuk mengantisipasi terjadinya tekanan yang meningkat akibat gelombang dan pukulan air. Pada gambar 2.19 adalah gambaran pipa pesat. Luas penampang pipa pesat dapat dihitung dengan persamaan 2.7 berikut : (Sumber: Jalaludin Almahalli, 2009: 35)

$$A_n = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \dots\dots\dots 2.7$$

Dimana :

A_n = Luas penampang pipa pesat (m²)

D = Diameter pipa (m)

Kecepatan dalam aliran pipa pesat dapat dihitung dengan persamaan 2.8 berikut :

$$V = \left(\frac{Q}{\frac{1}{4}\pi D^2}\right) \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

V = Kecepatan dalam aliran (m/det)

Q = Debit aliran (m³/det)

D = Diameter pipa pesat (m)

(Sumber: http://eprints.undip.ac.id/34513/5/1501_chapter_II.pdf)

Tebal pipa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9 berikut: (Sumber: M. M. Dandekar, 1991: 278)

$$t = \frac{pR}{S\eta - (0,6p)} + \varepsilon \dots\dots\dots (2.9)$$

Di mana:

t = Ketebalan dinding (cm)

p = Tekanan (kg/cm²)

R = Jari-jari internal (cm)

S = Tekanan desain (1000kg/cm³)

η = Faktor efisiensi pengelasan (0,85)

ε = Faktor korosi (0,15 cm)

Losses (kehilangan tinggi tekan) pada saluran penstok akibat saringan

(trashrack) dapat dihitung dengan persamaan 2.10 berikut: (Sumber: Jurnal Ilmiah PLTMH Yogi Suryo Setyo Putro)

$$h_s = k_t \left(\frac{t_k}{b_k}\right)^{4/3} \sin \alpha \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

h_s = kehilangan energi (Losees)

k_t = koefisien kehilangan energi karena bentuk kisi (0,5 untuk bentuk persegi/ tegak, 0,05 untuk bentuk yang dibulatkan)

t_k = tebal kisi (m), b_k = jarak kisi (m)

α = sudut pemasangan

v = kecepatan aliran (m/detik)

g = gravitasi (9,8 m/s²)

Losses (kehilangan tinggi tekan) pada saluran penstok akibat pemasukan dapat dihitung dengan persamaan 2.11 berikut:

$$h_p = K \times \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

K = Koefisien kecepatan (0,95)

Losses (kehilangan tinggi tekan) pada saluran penstok akibat belokan dapat dihitung dengan persamaan 2.12 berikut:

$$h_b = K_b \times \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

K_b = Koefisien belokan (0,67 dengan belokan 50o)

13. Bangunan Sentral

Bangunan sentral atau *power house* merupakan bangunan yang digunakan untuk menaruh komponen utama PLTA. Penting untuk merencanakan lokasi, struktur bangunan, dan bentuk bangunan sentral. Pertimbangan yang dilakukan berkaitan dengan berbagai hal, misalnya letak geografi, jangkauan, dan akses untuk pembuatan dan pemeliharaan.

Pembuatan bangunan sentral disesuaikan dengan lokasi dan kondisi tanah. Hal ini penting dilakukan supaya bangunan sentral tidak mudah rusak, bahkan roboh. Bangunan sentral yang akan diisi dengan turbin air, generator, dan mesin-mesin pembantu lainnya.

14. Saluran Pembuang

Saluran pembuang akan mengalirkan air dari waduk awal melalui pipa

lepas, saluran bawah, dan pintu keluar. Pembuatan tangki pendatar pada pusat listrik bawah tanah dengan saluran bawah yang panjang dibuat di sekitar titik mula terowongan saluran bawah. Berikut merupakan gambar 2.20 saluran bawah:



Gambar 2. 22 Saluran Bawah

Pembuatan waduk awal sebaiknya mempunyai ukuran lebar yang cukup besar. Mengapa demikian? Hal ini supaya saat debit air mengalami perubahan permukaan air tetap stabil. Artinya, saat tiba-tiba debit air mengalami penambahan atau penurunan tidak mempunyai pengaruh yang cukup besar.

D. Turbin Air

Arismunandar Wiranto (1980: 48) menjelaskan bahwa saat turbin bekerja akan terjadi perubahan energi kinetik yang dihasilkan dari air diubah menjadi energi mekanis. Air inilah yang akan memutar roda turbin. Oleh karena itu, air berperan sebagai fluida kerja ketika turbin beroperasi.

Berbeda dengan mesin torak, tidak ada mesin yang bergerak translasi ketika turbin bekerja. Bagian turbin yang berputar dikenal dengan nama rotor atau roda turbin, sedangkan bagian turbin yang tidak berputar dikenal dengan nama stator atau rumah turbin.

Saat bekerja, roda turbin akan memutar berbagai komponen, misalnya generator listrik, pompa, baling-baling, dan kompresor. Selama proses beroperasi, turbin fluida mengalami proses ekspansi (proses adanya penurunan tekanan dan mengalir secara terus-menerus). Proses kerja fluida bisa berupa air, uap, atau gas.

Saat ini terdapat beragam jenis turbin air, salah satunya turbin francis. Proses kerja turbin jenis ini diawali dengan air masuk ke roda jalan, barulah akan diubah menjadi energi kinetik dari sudu dalam. Akibat dari kecepatan air cukup tinggi, alhasil sudut gerak akan berputar. Dari perputaran inilah pada

akhirnya bisa menghasilkan daya.

Tekanan pada sisi ke luar roda jalan biasanya rendah (kurang dari 1 atm) dan mempunyai kecepatan aliran yang tinggi. Akan tetapi, kecepatan tekanan pada sisi isap akan berkurang. Hal ini akan menaikkan tekanan sehingga air dapat dialirkan ke luar lewat saluran air bawah. Berdasarkan segi pengubahan momentum fluida kerjanya, turbin air dibedakan menjadi dua.

Pertama, turbin impuls—akan bekerja ketika bagian rotor terkena aliran air. Pada saat itu, beda tinggi diubah menjadi kecepatan karena perbedaan tinggi. Salah satu kekhasan dari turbin jenis ini terdapat pada turbin pelton yang dipadu dengan pasangan ember-ember (*buckets*) pada keliling luar rotor. Komponen ini akan bekerja saat terkena pancaran air dari *nozzle*.

Kedua, turbin reaksi—akan bekerja ketika air dengan ketinggian air yang jatuh karena tekanan mengalir ke bagian rotor. Berikut beberapa jenis turbin air yang termasuk turbin reaksi.

1. Turbin francis, air akan mengalir ke bagian rotor dengan arah radial dan keluar dengan arah aksial, perubahan arah terjadi sambil melewati rotor.
2. Turbin aliran diagonal (*diagonal flow*), air akan melewati rotor dengan arah diagonal menuju ke poros.
3. Turbin baling-baling (*propeller turbine*), air akan melewati rotor dengan arah aksial.

Turbin reaksi yang dapat dipakai sebagai pompa dengan membalik arah putaran rotor dinamakan turbin pompa balik (*reversible pump Turbine*). Penggunaan jenis turbin air disesuaikan dengan kondisi air. Hal ini mempertimbangkan kecepatan spesifikasi turbin supaya bisa bekerja dan memberi hasil yang optimal.

Tabel 2. 1 Jenis Roda Turbin Air dan Kecepatan Spesifiknya

Jenis Turbin	Kecepatan Spesifik n_s , (rpm)	Efisiensi η_T , %	Tinggi Jatuh Air H
Implus (Pelton)	2–4	85–90	2.000–6.000
	4	90	2.000
	4–7	82–90	400–2.000
Francis	10–30	90–94	500
	30–82	94	70–500
	82–90	93–94	45–70

Propeler	100–140	94	15–100
	140–250	85–95	10–15

Sumber: Wiranto Arismunandar(1980: 50)

Dalam turbin air ada yang namanya kavitasi. Kavitasi adalah peris- tiwa gelembung-gelembung uap yang terbentuk di dalam cairan dalam. Peristiwa ini terjadi di turbin yang diakibatkan turunnya tekanan cairan sampai di bawah tekanan uap jenuh cairan pada suhu operasi turbin.

Gelembung uap yang terbentuk dalam proses ini mempunyai siklus yang sangat singkat. Meskipun begitu, efek atau dampak yang dihasilkan dari adanya kavitasi cukup berpengaruh. Berikut beberapa pengaruh kavitas pada turbin.

1. Saat turbin bekerja akan terdengar suara yang cukup bising.
2. Pada area bertekanan rendah di dalam volute akan terbentuk gelembung-gelembung udara.
3. *Head (pressure)* akan mengalami pengurangan.
4. Kapasitas turbin yang berkurang.
5. Suara bising saat turbin bekerja.
6. Kerusakan pada *impeller* atau *volute*.

Berbagai pengaruh kavitasi pada turbin seperti yang disebutkan di depan sebenarnya bisa diatasi dan diminimalisasi. Penanganan yang dilakukan perlu ketelitian dan kecermatan. Berikut beberapa cara mengatasi kavitasi pada turbin.

1. Melakukan perbaikan konstruksi dan menghindari adanya belokan-belokan yang tapukul.
2. Memilih bahan yang mampu menahan erosi akibat pengikisan dari pecahnya gelembung-gelembung uap yang dibawa oleh air dan menggunakan bahan yang tahan terhadap korosi.
3. Menempatkan turbin pada tempat yang cocok, yaitu dengan memperkecil tinggi hisap agar tekanan air lebih rendah dari tekanan uap jenuhnya.

Ketika *runner* mengalami kerusakan yang diakibatkan kavitasi, sebaiknya segera diperbaiki. Jika tidak segera diperbaiki, erosi yang terjadi bisa menurunkan efisiensi sistem kerja. Bahkan, mesin bisa rusak dan terjadi noise dan vibrasi yang besar pada mesin. Oleh karena itu, perbaikan secara berkala dilakukan untuk memastikan setiap komponen PLTA bisa bekerja secara maksimal.pada gambar 2.21 adalah Runner Turbin yang rusak akibat Kavitasi



Gambar 2. 23 Akibat Kavitas pada Turbin

(sumber: <http://boedmade.blogspot.co.id/2013/09/fenomena-kavitas-pada-turbin-hidrolik.html>)

Kecepatan liar (*run away speed*), yaitu suatu kecepatan yang terjadi akibat pada waktu turbin bekerja dimana tiba-tiba bebannya dihentikan dengan tiba-tiba. Dalam hal tersebut timbul gejala bahwa roda turbin akan berputar dengan sangat cepat. Kekuatan turbin harus diperhitungkan terhadap kecepatan liarnya untuk mencegah terjadinya kerusakan turbin atau generatornya.

Kecepatan liar juga dipengaruhi oleh koefisien kavitas. Pengaruh karakteristik kavitas terhadap kecepatan liarnya sangat kuat dalam suatu daerah karakteristik kavitas tertentu dan juga tergantung dari jenis turbinnya. Kecepatan liar juga dipengaruhi oleh pembukaan pintu air atau katup, tetapi kecepatan liar yang maksimum tidak selalu terjadi pada permukaan pintu air yang maksimum.

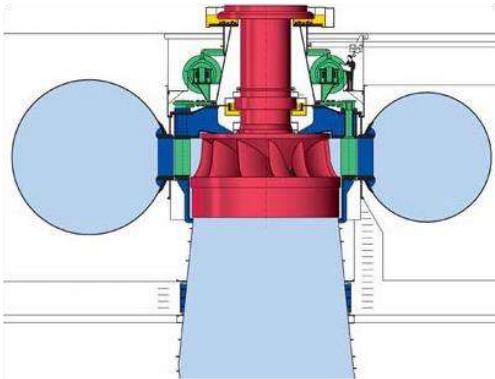
Arismunandar 1980, menjelaskan bahwa kecepatan liar dapat diantisipasi atau dikurangi dengan cara, yaitu pada bagian poros turbin dibuat suatu pengatur kecepatan (*governor*) yang dapat meredam putaran liar. Pukulan Air (*Water Hammer*) Turbin adalah Suatu peristiwa di mana timbulnya gelombang bertekanan akibat dari fluida yang mengalir tiba-tiba berhenti atau arah alirannya berubah (perubahan momentum). *Water hammer* juga terjadi akibat katup pada air keluar turbin di tutup secara tiba-tiba sehingga tekanan di dalam turbin meningkat.

Selain tekanan tinggi juga terjadi gelombang kejut sehingga menimbulkan suara keras seperti suara menempa/pukulan. Ini dapat menyebabkan kerusakan pada turbin. Untuk mengatasi *water hammer* dapat diantisipasi atau dikurangi dengan cara, yaitu dengan membuat *surge tank* pada bagian atas dekat sumber air. *Surge tank* ini akan menampung air yang membalik pada saat katup ditutup, sehingga *water hammer* dapat dihindari.

E. Jenis-Jenis Turbin Air

Turbin air termasuk komponen utama pada pembangkit listrik tenaga air. Oleh karena itu, penggunaan turbin air tidak boleh sembarangan. Saat ini sudah ada berbagai jenis turbin air yang bisa digunakan. Tiap-tiap jenis turbin air mempunyai spesifikasi, keunggulan, dan kelemahan yang berbeda. Pemilihan jenis turbin disesuaikan dengan tujuan pemakaian dan lokasi yang dipilih. Hal ini mengingat masing-masing jenis turbin air mempunyai spesifikasi, bentuk, dan karakteristik yang berbeda. Supaya lebih jelas mengenai jenis-jenis turbin air, perhatikan penjelasan berikut ini.

1. Turbin Francis



Gambar 2. 24 Turbin Francis

(Sumber: Markus Schweiss/https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M_vs_francis_schnitt_1_zoom.jpg)

Turbin francis merupakan jenis turbin air yang sampai saat ini sering mengalami perubahan. Cara kerja turbin jenis ini dipengaruhi oleh air yang bertekanan. Jenis turbin francis selalu mengalir penuh pada penggerak yang sama.

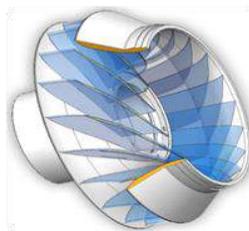
Penggerak dari turbin francis berupa pisau-pisau melengkung yang dilas pada dua shroud. Jumlah pisau-pisau mulai dari 12–22 tergantung dari kecepatan spesifik. Spesifik kecepatan lebih dari 300 menggunakan nomor rendah. Sebaliknya, spesifik kecepatan kurang dari 300 menggunakan nomor-nomor tinggi.

Sistem kerja turbin francis tentu saja berbeda dengan jenis turbin air yang lain. Mula-mula air mengalir menuju selubung spiral melalui pipa pesat. Dengan tekanan yang ada, akhirnya air masuk ke dalam penggerak. Air mengalir meninggalkan penggerak melalui tube sementara dan saluran buang.

Tube sementara merupakan aliran *hydraulically a closed conduit*. Tube sementara adalah *flaring* tube lurus atau tipe busur yang mempunyai peran penting ketika ada reaksi turbin. Penggunaan tube sementara bertujuan untuk mengetahui kecepatan dari tinggi aliran air yang keluar dari penggerak. Selain itu, juga bertujuan untuk mengusahakan penggerak mempunyai tingkat aliran hilir tanpa mengorbankan tinggi air yang bersangkutan.

Sepanjang pinggir penggerak ada pintu-pintu kecil yang berputar dan diatur secara kontrol. Perubahan ukuran pembukaan pintu pemukiman turbin melalui pintu di mana air dapat mengalir dan mengawasi kecepatan air yang berlebihan. Berikut komponen utama turbin francis.

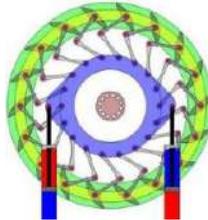
- a. *Runner*, berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik. (Gambar a)
- b. *Casing*, berfungsi untuk menampung fluida yang terletak keluar *guide vane* dan memaksimalkan energi yang dihasilkan dari tekanan. (Gambar b)
- c. *Guide vane*, berfungsi untuk meningkatkan kecepatan aliran air sebelum dialirkan menuju *runner* dan menyetarakan aliran air dari katup pengatur kapasitas dari *casing* ke *runner*. (Gambar c)
- d. Pipa inlet, berfungsi untuk menyalurkan aliran air yang akan masuk ke *casing*. (Gambar d)
- e. *Draft tube*, berfungsi untuk meneruskan aliran air dari turbin ke saluran pembuangan. (Gambar d)



Gambar 2. 25 (a)



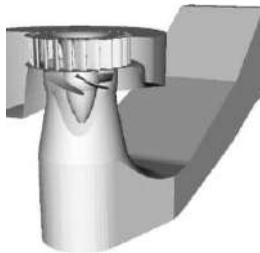
Gambar 2. 26 (b)



Gambar 2. 27 (c)



Gambar 2. 28 (d)

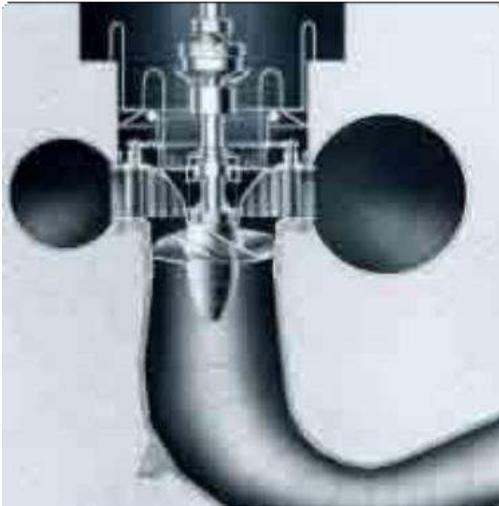


Gambar 2. 29 (e)

Seperti yang sudah dijelaskan di depan, penggunaan turbin air disesuaikan dengan tujuan dan lokasi. Hal ini supaya alat yang digunakan memberi manfaat yang optimal. Pada umumnya, turbin francis digunakan untuk produksi tegangan listrik pada ketinggian *head* air 40–600 m. Daya listrik yang dihasilkan dari generator yang menggunakan turbin francis maksimal 800 megawatt (MW).

Pipa input turbin francis berdiameter antara 0,91 m–10,06 m. Turbin saat beroperasi mempunyai kecepatan kisaran 83–1000 rpm. Pemasangan turbin francis kebanyakan memosisikan bagian poros dalam bentuk vertikal. Hal ini dimaksudkan untuk menjaga air dari generator yang melekat. Selain itu, juga untuk memudahkan instalasi dan akses pemeliharaan turbin.

2. Turbin Kaplan



Gambar 2. 30 Turbin Kaplan
(Sumber: www.daviddarling.info)

Dandekar dan K. N. Sharma (1991: 412) menjelaskan bahwa turbin kaplan dilengkapi alat penggerak seperti ulir atau baling-baling berbentuk lengkung dinaikkan. Pada bagian dalam baling-baling turbin terdapat dayung yang jumlahnya bervariasi. Badan baling-baling mempunyai rongga semikonikal permukaan luar yang menjadi batas air masuk.

Jumlah dayung pada baling-baling turbin disesuaikan pada jangkauan (*range*) kecepatan spesifik. Turbin kaplan biasanya digunakan pada tinggi terjun air di bawah 20 meter. Selain itu, turbin jenis ini memanfaatkan kecepatan air untuk mengonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin. Sudu turbin kaplan biasanya berjumlah 3–6 sudu.

3. Turbin Pelton



Gambar 2. 31 Turbin Pelton
(Sumber: <http://sajjacob.blogspot.co.id/2015/05/pembangkit-listrik-tenaga-air-dengan>)

Turbin pelton termasuk salah satu dari jenis turbin air yang bisa dibilang sangat efisien. Turbin ini mempunyai satu set sudu jalan yang berputar akibat adanya pancaran air yang disemprotkan dari nozel. Sudu turbin dari turbin pelton berbentuk simetri.

Disarankan pada *head* tinggi sebaiknya menggunakan turbin pelton. Pancaran air yang disemprotkan oleh nozel mengenai tengah-tengah sudu, lalu berbelok ke dua arah. Alhasil, pancaran air yang membalik akan maksimal.

Turbin pelton mempunyai piringan lingkaran yang berada pada pinggir-pinggirnya, sebuah nomor dari dua-lobe keranjang dimontase (*mounted*). Dahulu, desain turbin ini pada setiap keranjang dikukuhkan di tengah piringan. Namun, desain saat ini dibuat secara menyeluruh.

F. Pertimbangan Memilih Jenis Turbin

Berbagai jenis turbin air yang ada saat ini mempunyai spesifikasi, bentuk, dan komponen pembuat yang berbeda. Oleh karena itu, saat membeli turbin disesuaikan dengan kegunaan, melihat kelebihan, dan melihat kelemahan dari masing-masing jenis turbin. Berikut beberapa kriteria yang perlu dipertimbangkan saat memilih jenis turbin air.

1. Faktor tinggi jatuh air efektif (*net head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin.
2. Faktor daya (*power*) berhubungan dengan *head* dan debit.
3. Kecepatan (putaran) turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Sebagai contoh untuk sistem transmisi *direct couple* antara generator dengan turbin pada head rendah, sebuah turbin reaksi (*propeller*) dapat mencapai putaran yang diinginkan, sementara turbin pelton dan *crossflow* berputar sangat lambat (*low speed*) yang akan menyebabkan sistem tidak beroperasi.

Ketiga faktor di atas seringkali diekspresikan sebagai “kecepatan spesifik, *Ns*”, yang didefinisikan dengan formula:

$$N_s = \frac{5}{4} H \cdot P \cdot N \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana :

NS = kecepatan spesifik

N = kecepatan putaran turbin (rpm)

P = maksimum turbin output (kW)

H = head efektif (m)

Output turbin dihitung dengan formula :

$$P = 9.81 \times Q \times H \times \eta_{\text{turbin}} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana :

P = daya Turbin (kW)

Q = debit air (m³/s)

H = head efektif(m)

η_{turbin} = efisiensi turbin

- = 0.8 – 0.85 untuk turbin pelton
- = 0.8 – 0.9 untuk turbin francis
- = 0.7 – 0.8 untuk turbin crossflow
- = 0.8 – 0.9 untuk turbin propeller/Kaplan

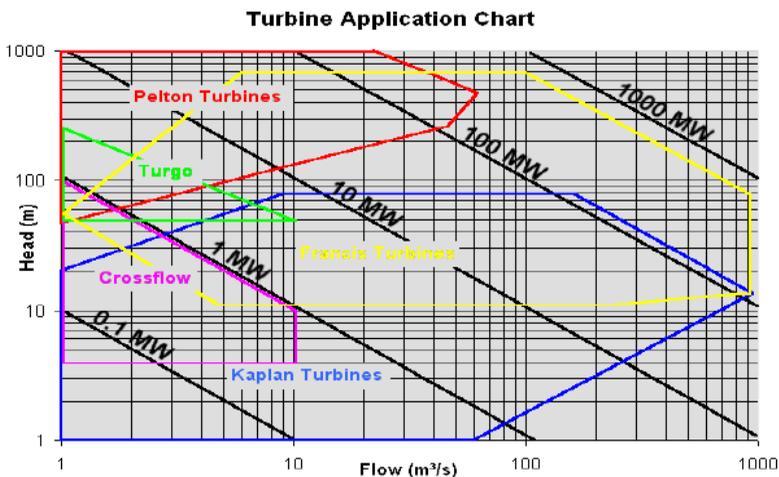
Kecepatan spesifik setiap turbin memiliki kisaran (*range*) tertentu berdasarkan data eksperimen. Kisaran kecepatan spesifik beberapa turbin air ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2. 2 Kecepatan Spesifik Turbin

No.	Jenis Turbin	Kecepatan Spesifik
1.	Turbin Pelton	$12 \leq N_s \leq 25$
2.	Turbin Francis	$60 \leq N_s \leq 300$
3.	Turbin Crossflow	$40 \leq N_s \leq 200$
4.	Turbin Propeller	$250 \leq N_s \leq 1000$

(sumber: <https://yokealjauga.wordpress.com/2014/02/28/water-turbine/>)

Turbin biasanya dapat digunakan di suatu wilayah yang luas dengan tinggi tekan mulai dari 2 meter sampai 2.000 meter. Supaya lebih jelas, berikut klasifikasi turbin berdasarkan wilayahnya. Operasi daerah turbin air berdasarkan *head* gambar 2.29 diagram aplikasi berbagai jenis turbin



Gambar 2. 32 Diagram Aplikasi Berbagai Jenis Turbin

Pada umumnya, penggunaan turbin air mempertimbangkan *head* air. Turbin impuls biasanya cocok digunakan pada tempat yang mempunyai *head* tinggi. Turbin reaksi biasanya cocok digunakan pada tempat yang mempunyai

head rendah. Sedangkan turbin kaplan biasanya cocok digunakan untuk semua jenis debit dan *head*.

Poros horizontal biasanya digunakan pada turbin yang mempunyai daya kurang dari 10 MW atau digolongkan turbin kecil. Sedangkan poros vertikal digunakan untuk turbin jenis francis dan kaplan. Khusus untuk turbin pelton bisa menggunakan poros horizontal maupun vertikal. Hal ini karena turbin pelton *head* yang ada lebih besar dari ukuran turbin.

Ditinjau dari komponen utama turbin dapat dibedakan menjadi Stator, Casing dan Rotor. Stator turbin terdiri dari dua bagian, yaitu casing dan sudu diam (*fixed blade*). Namun, untuk tempat kedudukan sudu-sudu diam yang pendek dipasang diapragma.

Casing atau *shell* adalah suatu wadah berbentuk menyerupai sebuah tabung dimana rotor ditempatkan. Pada ujung *casing* terdapat ruang besar mengelilingi poros turbin disebut *exhaust hood*, dan di luar *casing* dipasang bantalan yang berfungsi untuk menyangga rotor.

a. Sudu Tetap (*fixed blade*)

Sudu merupakan bagian dari turbin saat konversi energi terjadi. Sudu terdiri dari bagian akar sudu, badan sudu dan ujung sudu. Sudu kemudian dirangkai sehingga membentuk satu lingkaran penuh.

b. Sudu-sudu tetap dipasang melingkar pada dudukan berbentuk piringan yang disebut diapragma. Pemasangan sudu-sudu tetap ini pada diapragma menggunakan akar berbentuk T sehingga memberi posisi yang kokoh pada sudu. Diapragma terdiri dari dua bagian (atas dan bawah) dan dipasang pada alur-alur yang ada didalam casing. Setiap baris dari rangkaian sudu-sudu tetap ini membentuk suatu lingkaran penuh dan ditempatkan langsung di depan setiap baris dari sudu-sudu gerak.

Rotor adalah bagian yang berutar terdiri dari poros dan sudu-sudu gerak yang terpasang mengelilingi rotor. Jumlah baris sudu gerak pada rotor sama dengan jumlah baris sudu diam pada *casing*. Pasangan antara sudu diam dan sudu gerak disebut tingkat (*stage*).

- a. Poros dapat berupa silinder panjang yang solid (pejal) atau berongga (*hollow*). Pada umumnya poros turbin sekarang terdiri dari silinder panjang yang solid. Sepanjang poros dibuat alur-alur melingkar yang biasa disebut akar (*root*) untuk tempat dudukan, sudu-sudu gerak (*guide vane*).
- b. Sudu Gerak (*Guide Vane*) adalah sudu-sudu yang dipasang di sekeliling

rotor membentuk suatu piringan. Dalam suatu rotor turbin terdiri dari beberapa baris piringan dengan diameter yang berbeda-beda, banyaknya baris sudu gerak biasanya disebut banyaknya tingkat.

- c. Bantalan (Bearing) berfungsi sebagai penyangga rotor sehingga membuat rotor dapat stabil/lurus pada posisinya didalam casing dan rotor dapat berputar dengan aman dan bebas. Adanya bantalan yang menyangga turbin selain bermanfaat untuk menjaga rotor turbin tetap pada posisinya juga menimbulkan kerugian mekanik karena gesekan. Sebagai bagian yang berputar, rotor memiliki kecenderungan untuk bergerak baik dalam arah radial maupun dalam arah aksial. Karena itu rotor harus ditumpu secara baik agar tidak terjadi pergeseran radial maupun aksial yang berlebihan. Komponen yang dipakai untuk keperluan ini disebut bantalan (bearing).

G. Generator

Generator menjadi salah satu ‘nyawa’ pada pembangkit listrik tenaga air. Peralatan yang satu ini berperan untuk memproses energi mekanik menjadi energi listrik. Di dalam generator terdapat komponen yang bergerak dan komponen yang diam. Komponen yang bergerak atau rotor berkaitan dengan poros generator yang berputar di pusat komponen yang diam atau stator.

Rangka penyusun stator memakai baja yang dipipihkan. Komponen ini berperan sebagai inti magnet sebagai pusat gulungan di luar. Komponen stator dengan bagian yang lain perlu disekat supaya tidak korsleting. Bahan penyekat yang digunakan biasanya berupa mika yang tahan panas hingga suhu 150⁰ C. Peletakan stator biasanya menggunakan fondasi beton supaya aman dan kuat.

Bahan pembuatan rotor biasanya menggunakan baja yang dibuat secara radial. Setelah itu, dipasang dengan acuan atau titik pusat pada tabung generator yang terhubung dengan pusat kabel. Jaring laba-laba merupakan sebuah sebutan dalam sistem pemasangan susunan radial pada rotor.

Tahukah Anda mengapa pemasangan dibuat dengan pola jaring laba-laba? Pola ini bisa membuat piringan baja menjadi lebih kuat. Pada permukaan luar bangunan terdapat celah-celah yang digunakan sebagai pengikat bangunan. Pengikat dibuat menggunakan tembaga yang dibentuk seperti ekor burung layang-layang.

1. Sistem Kerja Generator Sinkron

Generator bisa bekerja karena komponen-komponen yang ada di dalamnya bekerja sesuai dengan fungsinya. Generator akan membangkitkan

gelombang sinus ketika generator diputar secara tetap dengan medan magnet yang sama. Medan magnet yang dihasilkan generator berasal dari kumparan yang diberi arus listrik searah (DC).

Posisi magnet yang diposisikan di stator bisa membuat slip *ring* dan karbon sikat rusak. Jika hal ini terjadi, tidak bisa digunakan pada pembangkitan daya tinggi. Solusi yang bisa Anda gunakan adalah menggunakan model generator dengan kutub internal. Model generator ini memanfaatkan kutub rotor dan tegangan bolak-balik (AC) untuk menghasilkan medan magnet.

Generator kutub internal dibangkitkan pada rangkaian stator. Pada rotor kutub sepatu, gerakan bersinambung (*fluks*) dialiri gelombang yang berliku-liku (gelombang sinus) yang diperoleh dengan mendesain bentuk sepatu kutub. Berbeda pada rotor silinder, kumparan rotor disusun secara khusus supaya *fluks* teraliri gelombang sinus.

Terkait pada generator kutub internal, hanya mempunyai pengaruh yang kecil saat arus DC dialirkan ke kumparan rotor melalui slip *ring* dan sikat untuk menghasilkan medan magnet. Keberadaan slip *ring* dan sikat karbon tidak berperan penting jika rotor menggunakan magnet permanen. Berikut sistem kerja generator secara umum.

- a. Rotor yang berputar juga akan memutar medan magnet dari kumparan medan.
- b. Rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya saat penggerak mula yang sudah berpasangan dengan rotor mulai dijalankan.
- c. Untuk menghasilkan arus searah terhadap kumparan medan, perlu menghubungkan kumparan medan yang terdapat pada rotor dengan sumber penambah tenaga.

2. Model Generator Sinkron

Mesin generator sinkron mempunyai dua struktur kumparan yang berfungsi sebagai dasar kerja. Kedua struktur komponen yang dimaksud ialah kumparan medan dan kumparan jangkar. Kumparan medan berfungsi untuk mengalirkan penguat arus DC. Sementara kumparan jangkar sebagai tempat peningkatan gaya gerak listrik arus AC. Sebagian besar mesin sinkron mempunyai kumparan jangkar berupa stator.

Perputaran kumparan DC yang tidak menggunakan sikat arang disebut *brushless excitation*. Medan magnet yang berputar pada mesin dihasilkan dari rotor generator yang diputar oleh *prime mover*. Medan magnet putar ini

menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Ada dua bentuk kutub medan magnet rotor, yakni salient (kutub sepatu) dan non salient (rotor silinder).

Terdapat perbedaan bentuk kutub magnet antara kutub salient dengan kutub non salient. Kutub magnet pada kutub salient akan menonjol keluar dari permukaan rotor. Sementara kutub magnet pada kutub non salient mempunyai bentuk yang rata dengan permukaan rotor. Tidak hanya berbeda dari posisi kutub magnet, tetapi juga berbeda terkait kegunaan. Rotor silinder digunakan pada rotor dua kutub dan empat kutub. Sementara rotor kutub sepatu digunakan pada rotor dengan empat kutub atau lebih.

Ketika memilih rotor, perhatikan juga terkait konstruksinya. Konstruksi berhubungan dengan kecepatan putar prime mover, frekuensi, dan rating daya generator. Pilihlah generator yang menggunakan rotor silinder jika kecepatan generator 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10 MVA. Gunakanlah generator dengan rotor kutub sepatu jika daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah.

Ada dua cara untuk menyalurkan arus DC menuju rangkaian medan rotor. *Pertama*, menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron. *Kedua*, Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC eksternal dengan sarana *slip ring* dan sikat.

Komponen generator terdiri atas stator dan rotor. Kedua komponen ini mempunyai fungsi yang berbeda. Meskipun berbeda, stator dan rotor saling melengkapi dan tidak bisa dipisahkan. Generator tanpa ada rotor tidak bisa berfungsi. Begitu juga kalau tidak ada stator, generator juga tidak bisa digunakan.

Stator yang terdapat pada generator berupa kotak terminal, belitan stator, kerangka stator, dan inti stator. Bagian dari stator ini tidak bergerak dan menghasilkan arus AC. Sementara inti dari stator berupa laminasi pelat tipis baja silikon yang terisolir satu sama lain, disatukan dengan klem dan terpasang secara tetap pada rangka stator.

Belitan stator merupakan kawat-kawat konduktor yang akan mengalirkan arus beban dan dibuat terisolir satu sama lain. Bahan isolasi belitan dan laminasi ini mempunyai batas kemampuan thermis dan mekanik tertentu yang akan menentukan kelas isolasinya. Oleh karena itu, terdapat pembatasan terhadap besarnya arus jangkar maksimum yang diperbolehkan. Inti stator terdapat celah-celah saluran sirkulasi udara yang digunakan untuk proses

pendinginan.

Berbeda dengan stator, bagian rotor pada generator merupakan komponen yang bisa bergerak. Komponen-komponen yang termasuk rotor, misalnya cincin, belitan rotor, sikat, dan inti rotor. Belitan rotor pada umumnya merupakan belitan penguat (belitan eksitasi) yang akan membentuk kemagnetan elektrik kutub U dan S pada inti rotor.

Jumlah garis gaya dalam medan magnet dikarenakan adanya arus dan belitan eksitasi yang keluar dari kutub U inti rotor. Setelah itu, mengalir melalui celah udara di antara rotor dan stator. Kemudian akan mengalir ke kutub S rotor dan selanjutnya mengalir melalui inti rotor kembali ke kutub U. Komponen yang diam dan bergerak saat mengalirkan arus dihubungkan dengan sikat dan cincin.

3. Kemampuan Putar pada Generator Sinkron

Generator sinkron mempunyai rotor yang berupa rangkaian elektromagnet dengan suplai arus searah (DC). Generator sinkron menghasilkan frekuensi listrik yang berbanding lurus dengan kecepatan putar generator. Arah putaran rotor menjadi arah dari gerakan medan magnet rotor. Berikut rumus yang digunakan untuk mencari hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator.

$$f_e = \frac{n_r \cdot P}{120}$$

Keterangan:

f_e = frekuensi listrik (Hz)

n_r = kecepatan putar rotor = kecepatan medan magnet (rpm) P = jumlah kutub magnet

Perputaran rotor perlu dijaga agar tetap stabil dengan jumlah kutub mesin yang sudah diatur. Hal ini dilakukan agar daya listrik yang dihasilkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz. Sebagai contoh, arus perputaran rotor diatur pada kecepatan 3600 rpm untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub. Arus perputaran rotor diatur pada 1500 rpm untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub.

4. Generator Sinkron Tanpa Beban

Arus jangkar di dalam generator sinkron tanpa beban tidak akan mengalir pada stator. Oleh karena itu, tidak reaksi jangkar tidak akan berpengaruh apa-

apa. Gerakan yang bersinambung hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Apabila besarnya arus medan dinaikkan, tegangan output juga akan naik sampai titik saturasi (jenuh).

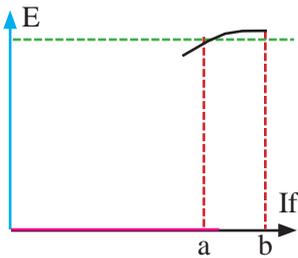
$$E_a = c.n. \Phi$$

Keterangan:

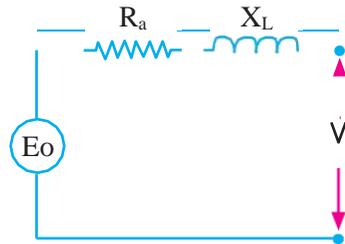
E_a = tegangan (volt) c = konstanta mesin

n = putaran sinkron (rpm)

Φ = fluks yang dihasilkan oleh I_f



kurva karakteristik generator sinkron tanpa beban



rangkaian karakteristik generator sinkron tanpa beban

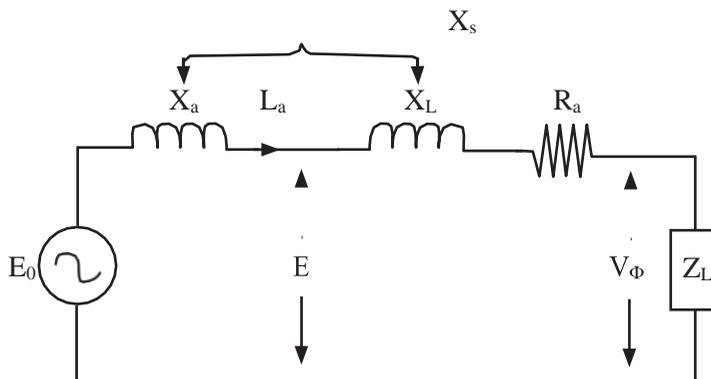
5. Generator Sinkron dengan beban

Arus jangkar yang terdapat pada generator berbeban akan mengalir hingga menghasilkan reaksi jangkar. Reaksi jangkar dinyatakan sebagai reaktansi karena bersifat reaktif dan disebut reaktansi magnetisasi (X_m). Reaktansi pemagnet (X_m) dan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s).

Tegangan terminal V dipengaruhi oleh beban generator. Saat beban generator diubah, maka tegangan terminal V juga akan berubah. Ketika hal ini terjadi, kemungkinan terjadi kerugian pada resistensi jangkar R_a , reaktansi bocor jangkar X , atau reaksi jangkar X_a . Kerugian yang terjadi pada tegang/fasa dan R_a sefasa dengan arus jangkar dan kemungkinan diakibatkan karena resistensi jangkar/fasa R_a .

Reaktansi bocor jangkar terjadi ketika arus mengalir melalui penghantar jangkar. Akan tetapi, sebagian fluks yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan. Sedangkan reaksi jangkar bisa terjadi ketika arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan fluksi jangkar.

Ketika tegangan terminal V_t berubah-ubah yang disebabkan akibat beban generator yang berubah-ubah, kemungkinan yang terjadi bisa diakibatkan dari tiga hal, yakni (a) tegangan turun yang disebabkan karena resistensi jangkar; (b) tegangan turun yang disebabkan karena reaktansi bocor jangkar; dan (c) tegangan turun yang disebabkan karena reaksi jangkar. Berikut rangkaian generator sinkron berbeban.



Keterangan:

E_a = tegangan induksi pada jangkar per fasa (volt)

$V\Phi$ = tegangan terminal output per fasa (volt)

R_a = resistansi jangkar per fasa (ohm) I_a = Arus nominal (ampere)

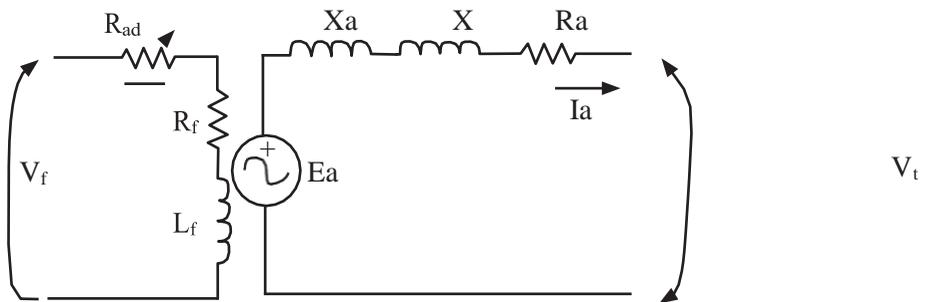
X_s = reaktansi sinkron per fasa (ohm) X_L = reaktansi bocor per fasa (ohm)

X_a = reaktansi reaksi jangkar per fasa (ohm)

6. Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Tegangan yang muncul pada terminal generator pada umumnya berbeda dengan tegangan induksi. Pada fasa generator sinkron terjadi pem-bangkitan tegangan induksi E_a . Saat tidak ada arus jangkar yang mengalir pada mesin, besaran atau tegangan induksi sama dengan tegangan terminal *output*. Perbedaan tegangan induksi dengan tegangan terminal disebabkan oleh beberapa hal, yaitu (a) induktansi yang berasal dari kumparan jangkar itu sendiri; (b) daya taah dari kumparan jangkar; (c) efek permukaan rotor kutub sepatu; dan (d) distorsi medan magnet yang terjadi pada celah udara oleh mengalirnya arus pada stator.

Bahan pembuat belitan-belitan pada stator menggunakan tembaga. Belitan-belitan yang sudah terbentuk selanjutnya akan diletakkan pada alur-alur. Belitan konduktor mengandung tahanan (R) dan induktansi (L). Sementara belitan stator mengandung tahanan stator (R_a) dan induktansi sendiri (L_f). Ketika rangkaian ekivalen suatu generator sinkron, maka muncul pengaruh reaktansi reaksi jangkar X_a dan reaktansi bocor jangkar X .



Rangkaian ekivalent generator sinkron

Keterangan:

V_f = Tegangan eksitasi (volt)

R_f = Tahanan belitan medan (ohm)

L_f = Induktansi belitan medan (henry) R_a = Tahanan variabel (ohm)

E_a = Ggl yang dibangkitkan generator sinkron (volt) V_t = Tegangan terminal generator sinkron (volt)

X_a = Reaktansi armatur (ohm)

X = Reaktansi bocor (ohm)

X_s = Reaktansi sinkron (ohm)

I_a = Arus jangkar (ampere)

H. Governor



Gambar 2. 33 Governor pada Sistem
PLTA Ubrug Sukabumi
(Sumber: Hasil survei Eka Nur Ajiz,
November 2016)

Berbagai teknologi modern yang ada saat ini mempunyai komponen bernama mesin. Keberadaan mesin mempunyai peran penting untuk menghidupkan supaya bisa digunakan secara optimal. Pada dasarnya tidak mudah untuk mengatur supaya mesin berputar secara konstan. Hal ini tidak terlepas dari beban yang diterima secara tiba-tiba. Salah satu solusi yang bisa digunakan untuk menjaga putaran mesin agar konstan adalah dengan memanfaatkan governor

Alat yang yang satu ini bisa mampu merespons secara cepat saat kecepatan mesin berubah secara tiba-tiba. Cara kerja dari governor yakni mengatur jumlah gas, uap, maupun cair yang masuk ke turbin ataupun ruang bakar. Menurut sejarah yang ada, governor kali pertama dipergunakan untuk pengoperasian mesin uap. Saat itu, sistem kerja dari governor digunakan untuk pengaturan jumlah aliran uap yang masuk ke turbin uap. Setelah itu, mesin diesel dan turbin gas mulai menggunakan governor untuk menstabilkan putaran mesin.

Governor sebenarnya hanya mengandalkan kecepatan putaran mesin itu sendiri ketika beroperasi. Ketika menggunakan governor hubungkan alat ini dengan poros yang berputar. Perlu diingat juga mengenai sepasang bandul yang harus dihubungkan pada poros. Bandul ini juga akan ikut berputar ketika poros berputar. Gaya sentrifugal yang terjadi akibat adanya putaran menyebabkan bandul terlempar.

Bandul tersebut dihubungkan pada bagian poros, tepatnya ke *collar*. Pergerakan *collar* akan naik sesuai dengan pergerakan keluar dari gaya berat pada bandul. Apabila bandul bergerak turun, arah gerak *collar* juga akan turun. Penggunaan *collar* pada mesin diesel dimaksudkan untuk mengoperasikan atau mengatur tuas bahan bakar. Sementara penggunaan *collar* pada turbin gas atau uap dimaksudkan untuk mengoperasikan atau mengatur aliran fluida.

I. Automatic Voltage Regulator (AVR)



Automatic Voltage Regulator merupakan salah satu komponen dalam membuat PLTA. *Automatic voltage regulator* (AVR) sering kali juga disebut dengan istilah STAVOL atau *stabilizer voltage*. Penggunaan komponen yang satu ini dimaksudkan untuk menstabilkan tegangan listrik yang dipakai untuk menghidupkan atau mengoperasikan berbagai peralatan elektronik, misalnya komputer, kulkas, pendingin ruangan, dan televisi.

Gambar 2. 34 AVR pada Sistem PLTA Ubrug
(Sumber: Hasil survei Eka Nur Ajiz, November 2016)

Penggunaan AVR generator bertujuan supaya arus penguatan (*excitacy*) pada *exciter* bisa diatur atau dikondisikan. Arus tegangan akan diperbesar oleh AVR atau STAVOL ketika tegangan *output* generator di bawah tegangan batas normal. Sebaliknya, arus tegangan akan diperkecil oleh AVR atau STAVOL ketika tegangan *output* generator melebihi tegangan batas normal. Jadi, Anda tidak perlu mengatur ulang tegangan *output* generator secara manual. Mengapa demikian? Hal ini karena sudah dikerjakan oleh AVR atau STAVOL.

Penggunaan AVR pada generator bukan sekadar pajangan belaka, tetapi mempunyai tujuan yang akan dicapai, yakni (1) menaikkan batas daya stabilitas peralihan; (2) menekan kenaikan tegangan pada pembuangan beban; (3) mengatur nilai daya reaktif; (4) mengatur tegangan pada keadaan kerja normal menjadi konstan; dan (5) mempertinggi kapasitas pemuat saluran transmisi tanpa beban dengan mengontrol eksitasi sendiri.

J. Jumlah Aliran Air

Berbicara mengenai aliran air, dekat rasanya dengan pembahasan debit air. Kedua hal ini memang mempunyai kedekatan dan seakan tidak bisa dipisahkan. Tahukah Anda apa itu debit air? Debit air adalah jumlah air yang mengalir dalam satuan waktu. Debit air tidak selalu kecil dan juga tidak selalu tinggi. Perbedaan debit air dipengaruhi oleh beberapa faktor, misalnya curah hujan, keadaan geologi, dan temperatur.

Perubahan debit air bisa terjadi secara tiba-tiba tanpa ada tanda- tanda. Butuh waktu yang tidak sebentar untuk mengetahui karakteristik dan jumlah debit secara kasar. Debit sungai perlu dicek untuk mengetahui tenaga yang dihasilkan oleh pusat listrik tenaga air. Pada akhirnya, pembangunan PLTA sudah direncanakan dengan sebaik-baiknya. Anda bisa mengukur debit air dengan rumus berikut ini.

$$Q = V \times A$$

Keterangan:

Q = debit air (m³/detik)

V = kecepatan aliran air (m/detik) A = luas penampang sungai (m²)

Untuk mengetahui debit air tidak harus menyelam sampai dasar. Akan tetapi, Anda bisa mengetahui dari permukaan air. Peralatan yang digunakan bisa berupa pelampung atau papan duga. Apabila Anda menggunakan pelampung, pastikan lokasi yang dipilih mempunyai arus air yang seragam. Kegiatan ini dilakukan untuk mengetahui kecepatan air.

Pengukuran menggunakan pelampung setidaknya dilakukan oleh tiga orang (misal A, B, dan C). Si A berada di titik awal untuk melepaskan pelampung. Si B berada di titik akhir. Si C mencatat waktu yang diperlukan pelampung dari titik awal sampai ke titik akhir. Berikut ini beberapa peralatan yang perlu Anda persiapkan.

1. Alat ukur panjang, Anda bisa menggunakan meteran atau tali plastik yang sudah diukur panjangnya dengan meteran.
2. Bola pingpong atau Anda bisa mengganti dengan gabus atau kayu kering.
3. *Stopwatch* atau alat ukur waktu yang lain asalkan dilengkapi dengan *stopwatch*.

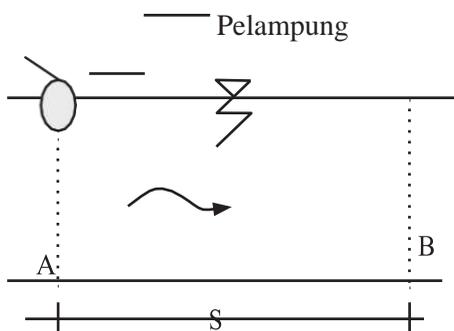
Meskipun terlihat mudah, tetapi mengukur debit air dengan pelampung perlu memperhatikan langkah-langkah atau prosedur yang ada. Hal ini diperlukan supaya hasil yang didapat akurat. Berikut langkah-langkah mengukur debit air dengan pelampung.

1. Amati dan pilih bagian aliran air yang tenang dan seragam, Anda perlu

menghindari aliran yang memiliki pusaran air.

2. Tentukan titik awal dan akhir, lalu catat panjang saluran sungai.
3. Bersihkan aliran air dan bentuklah menjadi aliran yang lurus dengan penampang aliran yang memiliki kedalaman yang relatif sama.
4. Bagilah panjang saluran/lintasan menjadi beberapa bagian.
5. Ukurlah lebar sungai (L) dan kedalamannya (H) pada titik-titik bagian bagian tepi kanan, tepi kiri, serta tengah aliran. Kemudian hitung masing-masing rata-ratanya.
6. Hitung luas penampang (A) rata-rata.
7. Gunakan benda apung (bola pingpong, kayu kering, gabus, dll) yang dapat mengalir mengikuti aliran air dan tidak terpengaruh angin.
8. Lepaskan benda terapung di titik awal lintasan bersamaan dengan menekan *stopwatch* dan tekan kembali *stopwatch* pada titik akhir lintasan
9. Hitung waktu waktu dari titik awal sampai titik akhir.
10. Ulangi pengukuran waktu tempuh 5 kali ulangan.
11. Catat waktu tempuh benda apung dan hitung waktu rata-ratanya.
12. Hitung kecepatan benda dari titik awal sampai titik akhir (V) menggunakan variabel luas penampang rata-rata (A) dan waktu rata-rata (T) sesuai rumus.
13. Debit air (Q) di aliran bisa diketahui dengan sesuai rumus.

Supaya lebih jelas mengenai mengecek debit air menggunakan pelampung, berikut gambar ilustrasinya.



Pengukuran debit air dengan pelampung

Keterangan:

V = Kecepatan aliran pelampung (m/det)

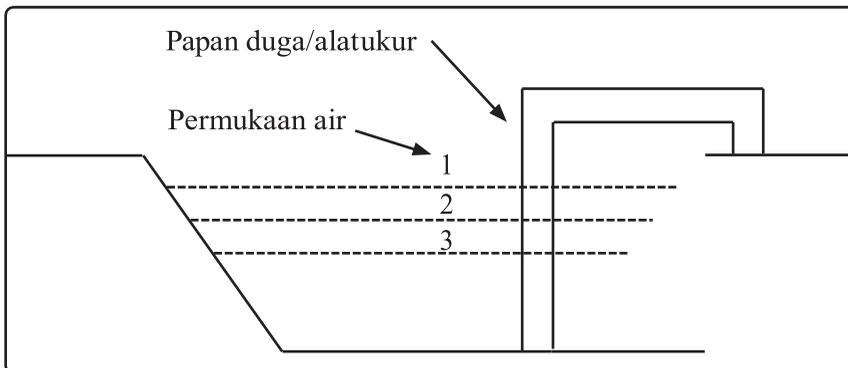
S = jarak dari titik A, ke titik B (m)

T = Waktu tempuh pelampung (det)

Selain menggunakan pelampung, Anda juga bisa mengukur debit air menggunakan papan duga. Jika Anda memilih dengan cara ini, pilihlah lokasi pembuatan bendungan terlebih dahulu sembari memasang papan duga air di pinggir sungai. Papan yang digunakan kira-kira mempunyai lebar 10 cm atau 15 cm.

Langkah selanjutnya Anda bisa memberi papan duga tersebut dengan ukuran dalam satuan sentimeter lalu pasang di pinggir sungai yang sama dalamnya dengan dasar sungai terdalam. Hasil pengukuran ini menunjukkan hubungan antara tinggi permukaan air dengan debit. Setelah itu, Anda bisa mencari persamaan garis yang menunjukkan hubungan tinggi dengan muka air.

Anda bisa melakukan pengukuran ini beberapa kali. Lakukan sampai batas benda-benda atau batu yang berada di tengah maupun dipinggir sungai. Batas inilah yang disebut dengan muka air normal. Setelah itu, barulah debit perencanaan bisa dilakukan dengan menggunakan muka air normal.



Pengukuran debit air menggunakan papan duga

K. Menghitung Tinggi Jatuh Air (*Head*)

Pembuatan pembangkit listrik tenaga air berhubungan dengan ketinggian jatuhnya air. Ketinggian ini dimulai dari jarak vertikal antara permukaan air pada sisi *intake* terhadap nozel turbin air. Perlu Anda ketahui kalau ketinggian jatuh air dibedakan menjadi dua, berikut penjelasannya.

1. Ketinggian dinamis, digunakan ketika mencari jumlah daya air yang tersedia. Jenis ketinggian ini diperoleh dengan cara mengurangi ketinggian statis yang terjadi sepanjang aliran air dari titik saluran pengambil air sampai dengan titik di mana air memasuki turbin.
2. Ketinggian statis, titik saluran antara pengambil air dengan titik di mana air memasuki turbin membentuk jarak vertikal.

Anda bisa menentukan tinggi terjun total dengan menggunakan alat atau metode yang sudah ada. Metode atau model ini sudah pernah digunakan dalam beberapa hal serupa. Berikut alat atau metode untuk mengukur tinggi terjun total.

1. *Altimeter*, digunakan untuk mengukur tekanan atmosfer yang berkaitan dengan perbedaan ketinggian.
2. *Manometer*, digunakan untuk mengukur tekanan air yang turun dari ketinggian tertentu melalui selang atau pipa fleksibel.
3. Selang plastik panjang, taruh pada kedua ketinggian yang berbeda sehingga membentuk bidang lurus/garis dari kedua ujungnya.
4. *Theodolite*, digunakan untuk menentukan tinggi tanah dengan sudut mendatar dan sudut tegak.
5. *Clinometers*, digunakan untuk mengukur sudut kemiringan.
6. Tongkat ukur, digunakan untuk menentukan total *head*.

L. Karakteristik Beban

Kebutuhan beban listrik tidak bisa dimungkiri akan terus bertambah. Hal ini berbanding lurus dengan perkembangan zaman yang kian modern. Berbagai teknologi yang muncul bisa dioperasikan setelah dihubungkan dengan aliran listrik. Oleh karena itu, keberadaan listrik saat ini seakan

menjadi kebutuhan primer. Tidak hanya untuk kalangan rumah-rumah, tetapi juga kalangan industri.

Kebutuhan atau beban listrik yang dibutuhkan tidak bisa dipastikan akan konstan. Oleh karena itu, daya yang dihasilkan dari generator juga tidak bisa konstan. Hal ini mengingat daya yang dihasilkan generator dipengaruhi oleh beban atau kebutuhan listrik. Daya yang dihasilkan generator harus diselaraskan dengan beban yang setiap saat bisa berubah. Perbedaan beban yang terjadi setiap saat bisa diketahui dari lengkung beban. Dalam hal ini, tentu saja jenis beban memengaruhi bentuk lengkung beban. Lengkung beban harian merupakan jenis lengkung beban yang paling banyak digunakan untuk 24 pukul dalam sehari. Selain lengkung beban harian, juga ada lengkung beban bulanan dan tahunan. Keberadaan lengkung beban sendiri mempunyai peran yang penting.

Bukan sekadar sebagai operasi sistem tenaga, tetapi juga sebagai bahan perancangan, pertimbangan-pertimbangan ekonomis pembangkitan, dan sebagainya. Oleh karena itu, keberadaan lengkung beban perlu diperhatikan.

Bab 3

Sejarah dan Konstruksi Bangunan PLTA Ubrug

Permintaan pasokan listrik untuk memenuhi kebutuhan masyarakat dan industri masih tinggi. Oleh karena itu, sampai saat ini berbagai pihak masih mengembangkan potensi sumber daya listrik inovatif. Salah satu usaha yang bisa dilakukan melalui pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Kalau dicermati, Indonesia mempunyai potensi alam yang menjanjikan.

Indonesia mempunyai berbagai lokasi yang dijadikan pembangkit listrik tenaga air, salah satunya PLTA Ubrug. Pembangkit listrik yang berada di Kabupaten Sukabumi ini dibangun pada tahun 1923. Seperti dengan namanya, pembangkit listrik Ubrug memanfaatkan air sebagai media untuk menggerakkan turbin.

A. Napak Tilas PLTA Ubrug

Pembangkit listrik tenaga air Ubrug yang mempunyai tiga unit pembangkit ini mempunyai cerita di balik pembangunannya. Kira-kira, informasi apa yang sudah Anda ketahui tentang PT PLN? Saat ini, PT PLN termasuk salah satu Badan Usaha Milik Negara (BUMN).

Dahulu, PT PLN mempunyai anak perusahaan bernama PT PLN PJB 1 yang didirikan pada 3 Oktober 1995. Nama PT PLN PJB 1 secara resmi berganti nama menjadi PT Indonesia Power pada 3 Oktober 2000. Pergantian nama ini menandakan sebagai penegas atas perusahaan yang menjadi perusahaan pembangkit listrik independen dengan orientasi bisnis murni.

PT Indonesia Power mempunyai delapan unit pembangkitan yang berada di berbagai lokasi. Ada yang berlokasi di Pulau Jawa, Pulau Bali, dan satu Unit Jasa Pemeliharaan. Suatu ketika, PT PLN mempercayakan PT Indonesia Power pada proyek diversifikasi energi (PDE) untuk mengelola empat pembangkit listrik. Pembangkit listrik tersebut adalah PLTU Banten 1 Suralaya,

PLTU Banten 2 Labuan, PLTU Banten 3 Lontar, dan PLTU Jabar 3 Pelabuhan Ratu.

Salah satu unit perusahaan pelaksana yang berada di bawah PT Indonesia Power adalah PT Indonesia Power up Saguling. Perusahaan ini sebelumnya bernama PLN Sektor Saguling.

Tabel 3. 1 Delapan Unit PLTA yang Dikelola PT Indonesia Power up

Nama PLTA	Kapasitas	Tahun Beroperasi
PLTA Saguling	4 × 175 MW	1986
PLTA Plengan	3 × 1050 KW ditambah 2000 KW	1923 1962
PLTA Lamajan	2 × 6400 KW ditambah 6400 KW	1924 1933
PLTA Cikalong	3 × 6400 KW	1962
PLTA Ubrug	2 × 5,94 MW ditambah 1 × 6,48 MW	1923 1939
PLTA Kracak	2 × 5500 KW ditambah 1 × 5500 KW	1926 1946
PLTA Bengkok	3 × 1050 KW	
PLTA Dago	1 x 700 KW	1923

B. Mengenal Daerah Aliran Sungai (DAS) Cicatih

Daerah aliran sungai adalah daerah yang berlokasi di sekitar aliran sungai sebagai tempat curahan air hujan yang pada akhirnya akan mengalir ke sungai. Tidak jauh berbeda dengan aliran sungai yang ada di Indonesia, Cicatih juga mempunyai daerah aliran sungai (DAS).

Tahukah Anda kalau Sub DAS Cicatih merupakan anak sungai dari DAS Cimandiri? Dilihat dari geografis, Sub DAS Cicatih terletak antara 106°39'8''–106°57'30'' BT dan 6°42'54''–7°00'43'' LS. Secara administratif, Sub DAS Cicatih masuk Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat.

Sub DAS Cicitih memiliki lima sub-sub DAS, yaitu Sub-sub DAS Ciheulang, Sub-sub DAS Cileuleuy, Sub-sub DAS Cicitih Hulu, Sub-sub DAS Cipalasari, dan Sub-sub DAS Cikembar. Sub DAS Cicitih mencakup 15 kecamatan, yaitu Bojong Geteng, Caringin, Centayan, Cibadak, Cicurug, Cidahu, Cikembar, Cikidang, Cisaat, Kadudampit, Kalapanunggal, Nagrak, Parakansalak, Parungkuda, dan Warungkiara.

Sub DAS Cicitih mempunyai luas 52.979 ha atau 530 km². Sub-sub DAS Ciheulang merupakan wilayah terluas yang mencapai 30% seluruh total Luas Sub DAS atau 15.911 ha. Perhatikan tabel luas wilayah sub-sub DAS di Sub DAS Cicitih berikut ini.

Tabel 3. 2 Luas Wilayah Sub-Sub DAS yang berada di Sub DAS Cicitih

No	Nama	Luas (ha)	Lain (%)
1	Cicitih hulu	9.939	18,8
2	Cipalasari	9.306	17,6
3	Ciheulang	15.911	30,0
4	Cileuleuy	9.234	17,4
5	Cikembar	8.589	16,2
	Total	52.979	100,0

C. Lokasi Ideal Membangun Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Langkah pertama dalam membangun PLTA ialah menentukan lokasi sehingga apa yang dilakukan bisa memberi manfaat yang maksimal. Hal ini juga dilakukan dalam pembuatan PLTA Ubrug. Setelah dilakukan kajian dan observasi, pembuatan PLTA Ubrug berlokasi di Desa Ubrug, Kecamatan Warug Kiara, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat.

Lokasi pembuatan PLTA dipilih di lembah dengan ketinggian 69 meter. Tidak ada salahnya Anda berkunjung ke PLTA Ubrug karena lokasinya berada sekitar 30 km dari kota Sukabumi ke arah Pelabuhan Ratu. Selain itu, kira-kira 1 km dari lokasi PLTA Anda sudah bisa menemukan pemukiman

penduduk sekitar.

PLTA Ubrug mempunyai Power House yang berada dekat aliran Sungai Cicatih. Akses menuju PLTA Ubrug bisa dibilang sangat mudah. Anda bisa menggunakan kendaraan pribadi maupun kendaraan umum. Perla Anda ketahu juga sekitar jalan menuju PLTA Ubrug terdapat tebing dan pohon-pohon besar. Oleh karena itu, Anda diwajibkan untuk selalu berhati-hati.

D. Bangunan Penunjang PLTA

Pembangunan PLTA Ubrug diharapkan bisa menghasilkan daya listrik yang maksimal untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Selain membutuhkan konstruksi bangunan pokok, PLTA Ubrug juga membutuhkan bangunan penunjang. Fasilitas bangunan penunjang ini biasanya disebut dengan fasilitas teknik sipil PLTA.

Kalau dicermati, ada beberapa fasilitas teknik sipil PLTA yang harus ada. Masing-masing bangunan mempunyai manfaat dan kegunaan yang saling mendukung dan mempengaruhi. Berikut bangunan penunjang yang digunakan dalam PLTA.

1. Bendungan



Gambar 3. 1 Bendungan PLTA Ubrug Sukabumi.

Arismunandar (2004: 25) menjelaskan bahwa keberadaan suatu bendungan digunakan untuk menampung air yang selanjutnya akan dialirkan menuju mesin PLTA. Air yang ditampung di bendungan akan diatur dan dikontrol. Hal ini dilakukan untuk memperoleh tinggi terjun air buatan. Pembuatan bendungan pada umumnya juga berfungsi sebagai penampung, penyimpanan, dan memasukkan aliran air ke turbin. Jadi keberadaan bendungan tidak bisa dipandang sebelah mata.



fungsi sebagai penampung, penyimpan, dan memasukkan aliran air ke turbin. Jadi keberadaan bendungan tidak bisa dipandang sebelah mata.

Debit air yang dialirkan dari bendungan menuju turbin disesuaikan dan dikontrol dengan kebutuhan. Salah satu bendungan yang dialirkan ke PLTA Ubrug ialah Bendungan Kebon Randu. Berikut spesifikasi Bendungan Kebon Randu.

Tabel 3. 3 Spesifikasi Bendungan

Tipe	Beton (m)
Panjang bendungan	33
Tinggi bendungan	1,8
Kedalaman bendungan	3

Sumber: Profile PLTA Ubrug Sukabumi

Bendungan PLTU Ubrug mempunyai dua saluran tertutup. Pembuatan dua saluran ini difungsikan untuk meningkatkan debit air ketika mengalirkan air menuju saluran pengambil air. Saluran kedua dibuat pada tahun 1999 yang pada awalnya sebagai solusi untuk meningkatkan debit air. Hal ini dikarenakan aliran air dari saluran pertama kurang maksimal lantaran masalah sampah dan penyempitan.

Ir. Ch F. van Haeften adalah sosok pelopor pembuatan bendungan PLTU Ubrug. Pembangunan bendungan ini membutuhkan waktu dua tahun, yakni dimulai pada tahun 1918 dan selesai pada tahun 1920. Untuk mengawasi dan mengatur debit air yang mengalir ke PLTU Ubrug terdapat tiga petugas di pos bendungan.

2. Saluran Pengendali Pasir



Gambar 3. 2 Saluran Pengendali Pasir PLTA Ubrug Sukabumi.

Saluran air PLTU Ubrug tidak terlepas dari bayang-bayang pendangkalan dan penyempitan. Kondisi semacam ini bisa terjadi akibat dari adanya endapan tanah, sampah, dan pasir. Tidak bisa dimungkiri, sampah berdampak merugikan jika tidak diolah dengan tepat. Salah satu upaya yang bisa dilakukan ialah dengan membuat saluran pengendali pasir. Tidak ada salahnya kita mendaur ulang sampah nonorganik supaya tidak mencemari lingkungan.

Pembuatan saluran pengendali pasir bertujuan untuk mengendapkan pasir yang berada di bendungan secara tersistem sebelum air dialirkan ke saluran pengambil air. Saluran pengendali pasir PLTA Ubrug setidaknya terdiri dari bagian pintu air dan saringan. Kedua komponen ini saling berpengaruh dan tidak bisa dipisahkan.

Keberadaan pintu air digunakan untuk mengatur debit air yang masuk. Sementara saringan berfungsi untuk menyaring materi supaya tidak mengganggu sistem kerja turbin. Materi yang mengganggu ini bisa berupa sampah, batu kerikil, atau pasir. Berbagai materi ini bisa merusak turbin jika terbawa air ke turbin. PLTU Ubrug saat ini mempunyai 1 saluran pengendali air yang dilengkapi dengan pitu air utama. Selain itu, bangunan sadap berada di sebelah kiri bendungan.

3. Saluran Penghantar

Seperti dengan namanya, saluran penghantar berfungsi untuk menyalurkan air yang bersumber dari bendungan menuju kolam tandon. Ada dua jenis saluran penghantar, yakni terowongan dan saluran penghantar terbuka. Masing-masing jenis saluran penghantar tentu saja disesuaikan dengan lokasi dan letak geografis.



Gambar 3. 3 Saluran Penghantar Terbuka PLTA Ubrug

PLTA Ubrug sendiri menggunakan kedua jenis saluran penghantar tersebut. Setidaknya ada empat saluran pengantar jenis terowongan yang dimiliki PLTA Ubrug dengan panjang 5.415 meter. Sementara itu, saluran penghantar terbuka memiliki panjang 5.415 meter. Semua saluran penghantar ini perlu perawatan secara berkala.

PLTA Ubrug juga mempunyai syphon cikuya yang berfungsi untuk mengalirkan air di antara dua bukit. Alasan pembuatan syphon cikuya sepanjang 165 m ini karena tidak memungkinkan untuk membuat jembatan karena debit air yang berat.

4. Kolam Tandon (Bak Penenang)

Keberadaan kolam tandon dalam sebuah PLTA mempunyai peran yang sangat penting. Oleh karena itu, PLTA Ubrug mempunyai kolam tandon yang berfungsi untuk penampung air debit supaya aliran air bisa stabil. Selain itu kolam tandon juga berfungsi sebagai tempat mengendapkan lumpur, pasir, dan batu kerikil.

Saat ini, PLTA Ubrug mempunyai dua kolam tandon. Kolam tandon yang pertama mempunyai luas 18.450 m² dengan kedalaman 5 m. Kolam tandon yang kedua mempunyai luas 32.850 m² dengan kedalaman 5 m. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan penulis, kolam tandon PLTA Ubrug saat ini masih bagus. Hal ini karena perawatan dilakukan secara berkala.

Kolam tandon PLTA Ubrug mempunyai berbagai fasilitas, yakni (a) pintu air masuk yang terbuat dari besi; (b) saringan sampah yang terbuat dari anyaman besi; (c) bak pengendap pasir; (d) bangunan pelimpah; (e) pintu penguras; dan (f) lubang sadap yang digunakan untuk menguras dasar kolam tandon.

Saringan sampah menjadi salah satu solusi mengatasi masalah yang dihadapi PLTA Ubrug. Masalah yang dimaksud berkaitan dengan sampah atau ranting pohon. Sampah dan ranting ini jika dibiarkan bisa menyumbat aliran air di Dam Kebon Randu, Zupring bak, syphon, dan kolam tandon harian. Saat musim hujan tiba, setidaknya saringan sampah dibersihkan maksimal 30 menit sekali.



Gambar 3. 4 Saringan Sampah



Gambar 3. 5 Saluran Pelimpah PLTA Ubrug

5. Surge Tank

Arismunandar (1982: 39) menjelaskan bahwa *surge tank* atau tangki lepas tekanan mendadak bisa ditempatkan pada terminal terowongan tekan dan terminal terowongan tanpa-tekan. Akan tetapi, fungsi surge tank pada masing-masing saluran mempunyai fungsi atau tugas yang berbeda. Jika ditempatkan pada terminal terowongan tekan pada pusat listrik jenis bendungan bersaluran, *surge tank* berfungsi untuk mengatur debit air untuk menyerap pukulan air. *Surge tank* akan berfungsi ketika debit air yang ada pada turbin berubah secara tiba-tiba. Sementara *surge tank* yang terpasang pada terowongan tanpa tekan berfungsi untuk membersihkan pasir.



Gambar 3. 6 Tangki Surja pada PLTA Ubrug Sukabumi

6. Pipa Pesat



Gambar 3. 7 Penstock yang digunakan di PLTA Ubrug Sukabumi

Pipa pesat digunakan untuk menyalurkan air dari satu tempat ke tempat lain. Dalam hal ini, akan menyalurkan air yang berasal dari kolam tandon menuju rumah pembangkit. Dilihat dari fungsi mekanis, pipa pesat berfungsi sebagai media untuk mengubah tenaga kinetis dari hidrostatik pada penampung.

Setelah itu, tenaga air yang dihasilkan diubah menjadi tenaga mekanik. Proses ini terjadi pada bagian turbin. Pada akhirnya, turbin yang bergerak akan menghasilkan daya listrik. Daya listrik yang dihasilkan dari turbin inilah yang selanjutnya akan ditampung pada komponen yang lain sebelum dialirkan ke masyarakat.

Pipa pesat yang digunakan PLTA Ubrug saat ini berjumlah tiga buah untuk masing-masing turbin air. Pipa pesat ini mempunyai diameter 1,7 m dan panjang 354,62 m. Apabila turbin yang dioperasikan berjumlah dua, maka tiga pipa pesat akan terisi air. Hal ini untuk berjaga-jaga ketika satu unit turbin dioperasikan sewaktu-waktu.

Pipa pesat mempunyai *surge tank* yang terletak pada ruangan katup pipa pesat. Pemasangan *surge tank* bertujuan untuk memperkecil tekanan air akibat perubahan beban, mensuplai air ketika pembebanan mendadak, dan menampung air ketika beban turun secara tiba-tiba.

7. Saluran Pembuangan



Gambar 3. 8 Saluran Pembung PLTA Ubrug Sukabumi

Saluran pembuangan pada umumnya difungsikan sebagai jalur pembuangan aliran air setelah digunakan oleh turbin. Selain itu, saluran ini juga berfungsi untuk mencegah supaya air tidak masuk ke saluran ketika debit Sungai Cicitih sedang naik. PLTA Ubrug sendiri mempunyai satu saluran pembuangan untuk menampung air dari tiga turbin.

Debit aliran air di saluran pembuangan disesuaikan dengan aliran air dari turbin. Oleh karena itu, debit air tidak bisa konstan. PLTA Ubrug mempunyai lokasi penampungan air buangan dengan ukuran panjang 25 m, lebar 4 m, dan tinggi 3 m. Penampung air buangan ini berada di bawah bangunan *power house*. Perlu diingat, tidak ada seorang pun yang boleh berada di saluran ini ketika sedang beroperasi. Hal ini mengingat bahaya dan risiko yang ditimbulkan cukup berbahaya.

8. Bangunan Pembangkit



Gambar 3. 9 Bangunan Pembangkit (Power House) PLTA Ubrug

Bangunan pembangkit atau *power house* sebaiknya dibuat di tempat yang tinggi. Hal ini untuk mengantisipasi dan mengurangi risiko yang terjadi ketika ada luapan air benda-benda yang ada di bangunan pembangkit tidak rusak. Berbagai benda yang disimpan di bangunan pembangkit, misalnya generator dan turbin.



PLTA Ubrug juga mempunyai bangunan pembangkit dengan lokasi pembuatan yang sudah diperhitungkan. Bangunan ini dibuat dengan luas bangunan 1.936 m². Bangunan pembangkit PLTA Ubrug saat ini masih dalam kondisi baik dan mendukung untuk sistem kerja PLTA.

E. Struktur Utama PLTA

Pembangkit listrik tenaga air membutuhkan peralatan mekanis atau struktur utama dan peralatan tambahan atau pendukung. Peralatan- peralatan mekanis dan tambahan saling berpengaruh sekaligus melengkapi sistem kerja antarkomponen. Salah satu peralatan mekanis PLTA adalah turbin air. Turbin air yang digunakan di PLTA ubrug adalah jenis turbin francis mendatar.

Wiranto Arismunandar (1980: 48) menjelaskan bahwa keberadaan air digunakan sebagai fluida kerja dalam turbin air. Air bersifat potensial, artinya mengalir dari tempat tinggi menuju ke tempat yang rendah. Ketika mengalir di dalam pipa-pipa, energi potensial diubah menjadi energi kinetik dan energi kinetik diubah menjadi energi mekanis. Pada akhirnya, turbin akan bergerak karena ada energi mekanis.

F. Peralatan Elektrik

PLTA selain memerlukan peralatan mekanik juga memerlukan peralatan elektrik. Saat berbicara tentang peralatan elektrik seakan langsung terbayang dengan peralatan yang bisa menghasilkan listrik. Salah satu peralatan elektrik yang ada di sistem PLTA adalah generator. Jenis generator bolak-balik menjadi jenis generator yang digunakan di PLTA Ubrug.

Sistem kerja generator berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yaitu kumparan yang diputar dalam medan magnet akan menimbulkan ggl induksi. Tegangan listrik yang ada di generator diperoleh dari perubahan energi mekanik menjadi energi listrik. Komponen utama di generator ada dua, yakni rotor dan stator.

PLTA Ubrug menggunakan jenis generator sinkron 3 fasa. Daya pada

unit 1 dan unit 2 sebesar 6.600 kva, sedangkan daya pada unit 3 sebesar 7.200 kva dengan frekuensi masing-masing generator 50 Hz. Kondisi generator yang digunakan di PLTA Ubrug belum pernah diganti. Akan tetapi, selalu dilakukan perawatan secara berkala.

Tabel 3. 4 Data Teknis Generator PLTA Ubrug

Generator	Unit I	Unit II	Unit III
merk	ELIN	ELIN	ELIN
tipe	SV 205/10-160	SV 205/10-160	SV 204/10-136
jenis	Sinkron	Sinkron	Sinkron
daya	6,600 Kva	6,600 Kva	7,200 Kva
speed	600 rpm	600 rpm	600 rpm
tegangan	6.300 Volt	6.300 Volt	6.300 Volt
arus max	605 A	605 A	660 A

Generator	Unit I	Unit II	Unit III
phase	3 (tiga)	3 (tiga)	3 (tiga)
power factor	0,9	0,9	0,9
frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz
fasa	3	3	3
jumlah kutub	10	10	10
thn. operasi	1923	1923	1939
ins class	B	B	B

(Sumber: Profile PLTA Ubrug Sukabumi)

G. Automatik Voltage Regulator (AVR)

Anda sebenarnya bisa melihat AVR di berbagai peralatan elektronik

rumah tangga, misalnya televisi, kulkas, dan komputer. Berbagai peralatan tersebut dipasang AVR dengan tujuan untuk menstabilkan tegangan listrik. Berkat kegunaan yang dimiliki, PLTA juga membutuhkan AVR untuk menstabilkan daya listrik. Komponen yang satu ini akan bekerja secara otomatis.

AVR sering kali disebut sebagai *stabilizer voltage* (STAVOL). AVR yang terpasang di generator bertugas mengontrol arus penguat pada *exciter*. AVR akan memperbesar arus tegangan ketika tegangan yang dikeluarkan generator di bawah tegangan batas normal. Sebaliknya, AVR akan memperkecil arus tegangan ketika tegangan yang dikeluarkan generator di atas tegangan batas normal. Berikut beberapa tujuan pemasangan AVR pada generator sinkron.

1. Meningkatkan batas daya stabilitas peralihan.
2. Menekan peningkatan tegangan yang terjadi di pembuangan beban.
3. Mengontrol tegangan supaya normal dan stabil selama bekerja.
4. Mengatur nilai daya reaktif.
5. Meningkatkan kapasitas pemuat saluran transmisi tanpa beban dengan cara mengontrol eksitasi sendiri.

Bab 4

Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Ubrug

Indonesia terkenal sebagai negara dengan berbagai potensi alam yang luar biasa. Dalam hal ini, baik sumber daya tanah maupun sumber daya air. Akan tetapi, berbagai sumber daya alam yang ada belum dimanfaatkan secara maksimal. Bisa dibayangkan manfaat yang diperoleh jika masyarakat Indonesia bisa memaksimalkan potensi alam di negeri sendiri.

Tidak bisa dimungkiri, Indonesia masih membutuhkan sumber listrik yang amat besar. Hal ini mengingat berbagai teknologi yang ada perlu arus listrik untuk mengoperasikannya. Misalnya saja televisi, AC, mesin pendingin ruangan, dan kulkas membutuhkan listrik untuk beroperasi. Oleh karena itu, keberadaan listrik saat ini sudah menjelma menjadi kebutuhan primer.

Pemerintah, perusahaan swasta, dan masyarakat terus bersinergi melakukan penelitian dan pendalaman terkait potensi alam Indonesia. Kegiatan ini tidak lain supaya potensi yang dimiliki bisa dinikmati oleh masyarakat. Salah satu bukti nyata yang sudah terwujud ialah pembangunan PLTA Ubrug. Pembangunan PLTA Ubrug untuk menghasilkan sumber listrik dengan memanfaatkan aliran air.

Ketika PLTA Ubrug sudah dibangun dan beroperasi, tentu saja masih dilakukan analisis secara berkala. Analisis ini berkaitan dengan potensi daya listrik yang dihasilkan. Hal ini perlu dilakukan supaya PLTA Ubrug masih terus beroperasi dan bisa memasok daya listrik kepada masyarakat. Penulis pernah melakukan penelitian dan observasi di PLTA Ubrug dengan hasil yang dijelaskan di bawah ini.

A. Kecepatan Aliran Air di Saluran Penghantar

Pembangkit listrik tenaga air mengandalkan aliran air untuk menghasilkan daya listrik. Oleh karena itu, kecepatan air perlu diperhatikan supaya daya listrik yang dihasilkan bisa maksimal. Saat aliran air kecil, otomatis sumber listrik yang didapatkan akan berkurang. Air yang digunakan pada PLTA Ubrug dialirkan melalui saluran penghantar.

Saluran pengantar diperlukan untuk menyalurkan air menuju kolam tandon yang diambil dari bendungan. Kecepatan aliran air yang mengalir pada saluran penghantar perlu dilakukan analisis. Kegiatan ini untuk menentukan apakah aliran air pada saluran pengantar sudah maksimal atau belum. Suatu kesempatan, penulis melakukan penelitian dan mengukur kecepatan air di saluran penghantar PLTA Ubrug. Pengukuran ini dilakukan sebanyak tiga kali pada tiap-tiap titik dengan jarak pengukuran 10 m dengan perhitungan memakai persamaan di bab 2 dapat dihitung sebagai berikut.

Pengukuran kecepatan aliran air, dilakukan sebanyak 3 kali pengukuran pada masing-masing titik, dengan jarak pengukuran 10 meter sehingga diperoleh kecepatan aliran air saluran penghantar (V) dari hasil pengukuran dapat dihitung dengan persamaan (2.15), misalnya pada saluran penghantar di titik A dengan 3 kali percobaan, contoh pada percobaan 1 dengan jarak (S) sepanjang 10 meter dengan waktu (T) 14,56 detik, maka:

$$V1 = \frac{10}{14,56} = 0,686 \text{ m/det}$$

Jadi, waktu kecepatan air dititik A pada percobaan 1 adalah 0,686 m/det, dengan cara yang sama dapat dihitung kecepatan air di titik A pada percobaan 2 dan percobaan 3 sebagai berikut.

$$V2 = \frac{10}{14,73} = 0,678 \text{ m/det}$$

$$V3 = \frac{10}{14,66} = 0,682 \text{ m/det}$$

Jadi, waktu kecepatan air di titik A pada percobaan 2 dan 3 adalah 0,678 m/det dan 0,682 m/det. Dengan cara yang sama dapat dihitung kecepatan

aliran pada titik B dan titik C yang dapat dilihat pada tabel 4.1 hasil perhitungan kecepatan air berikut.

Tabel 4. 1 Kecepatan Aliran Air pada Saluran Terbuka

Percobaan	Jarak (m)	Kecepatan aliran		
		Titik A	Titik B	Titik C
1	10	0,686	0,683	0,680
2	10	0,678	0,666	0,672
3	10	0,682	0,674	0,691

Kecepatan rata-rata disetiap titik dapat dihitung sebagai berikut.

$$V_{rA} = \frac{0,686 + 0,678 + 0,682}{3}$$

$$= 0,682 \text{ m/det}$$

$$V_{rB} = \frac{0,683 + 0,666 + 0,674}{3}$$

$$= 0,674 \text{ m/det}$$

$$V_{rC} = \frac{0,680 + 0,672 + 0,691}{3}$$

$$= 0,681 \text{ m/det}$$

Kecepatan rata-rata aliran air di saluran penghantar dapat dihitung sebagai berikut :

$$V_r \text{ total} = \frac{0,682 + 0,674 + 0,681}{3}$$

$$= 0,678 \text{ m/det}$$

Setelah dilakukan perhitungan, diketahui rata-rata aliran di saluran penghantar PLTA Ubrug adalah 0,678 m/detik.

Luas penampang aliran air dan debit air saluran penghantar saluran aliran air mempunyai yang namanya penampang. Penampang adalah permukaan yang rata. Pada umumnya, saluran air mempunyai ukuran penampang yang tidak sama. Ada yang berukuran besar dan berukuran kecil. Menentukan luas penampang aliran air perlu mempertimbangkan beberapa hal.

Pembuatan luas penampang aliran air disesuaikan dengan kebutuhan dan

debit air yang akan mengalir. Dalam hal ini, PLTA Ubrug menggunakan penampang aliran air yang mempunyai lebar dasar 2 meter dan kemiringan 1,5 meter. Setelah dihitung, luas penampang aliran air saluran penghantar PLTA Ubrug adalah 11,66 meter. Hasil ini dihitung dengan rumus berikut ini.

$$A = (b + m \cdot h) h$$

Keterangan:

A = Luas penampang aliran air

b = Lebar dasar

m = kemiringan

h = tinggi air

Setelah luas penampang saluran air sudah diketahui, barulah Anda bisa menghitung debit air pada saluran penghantar. Debit air perlu dihitung untuk mengetahui jumlah air yang mengalir melalui saluran penghantar. Artinya, apakah debit air yang mengalir mengalami penyusutan atau tidak. Saat terjadi penyusutan, langkah selanjutnya perlu mencari tahu faktor penyebab.

Anda bisa menghitung luas penampang aliran air saluran penghantar dengan lebar dasar 2 m, tinggi air 2,2 m dan faktor kemiringan 1,5 dapat dihitung dengan persamaan (2.21) berikut:

$$\begin{aligned} A &= (b + m \cdot h) h \\ &= (2 + 1,5 \cdot 2,2) 2,2 \\ &= 11,66 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Jadi dari hasil analisa tersebut didapat luas aliran air saluran penghantar sebesar 11,66 m², dengan kedalaman air 2,2 m.

A. Perhitungan Terkait Kolam Tandon

Sedangkan kolam tandon biasanya digunakan untuk menampung aliran air. Oleh karena itu, komponen ini perlu dilakukan analisis secara teratur supaya sistem kerja bisa maksimal. PLTA Ubrug mempunyai dua kolam tandon, kolam tandon kecil dan kolam tandon besar. Kolam tandon kecil di

PLTA Ubrug mempunyai luas 18.450 m², sedangkan kolam tandon besar mempunyai luas 32.850 m².

Setelah diketahui masing-masing luas kolam tandon, selanjutnya dijumlahkan. Total kolam tandon PLTA Ubrug adalah 51.300 m² dengan kedalaman total 5 meter. Apabila kolam tandon bisa terisi penuh, maka volume kolam tandon PLTA Ubrug adalah 256.500 m³ dengan kedalaman 5 meter. Akan tetapi, kedalaman batas maksimal kolam tandon adalah 4 meter. Alhasil, volume kolam tandon sebesar 205.200 m³.

B. Debit Air Saluran Penghantar

Setelah didapatkan luas penampang pada saluran air (A) yaitu 11,66 m² dan kecepatan rata-rata aliran air saluran penghantar (V) yaitu 0,678 m/det maka debit air saluran penghantar (Q) dapat dihitung dengan persamaan (2.14) berikut.

$$\begin{aligned} Q &= V \times A \text{ (m}^3\text{/det)} \\ &= 0,678 \times 11,66 \\ &= 7,905 \text{ m}^3\text{/det} \end{aligned}$$

Jadi, dari hasil analisa tersebut didapat debit air saluran penghantar sebesar 7,905 m³/det. Berdasarkan data diperoleh bahwa debit yang digunakan adalah 10,25 m³/det, sehingga terlihat adanya penyusutan debit air, hal ini disebabkan hulu sungai banyak beralih fungsi.

C. Tinggi Jatuh Air Efektif

Untuk luas penampang *penstock* dapat dihitung dengan persamaan berikut. Diameter pipa *penstock* (D) memiliki ukuran 1,7 m untuk unit #1 dan unit #2, yang dapat dilihat pada data teknis *penstock*. Maka dari itu, dilakukan perhitungan dengan persamaan (2.22) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} A_n &= \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \\ &= 3,14 \times \left(\frac{1,7}{2}\right)^2 = 2,268 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Jadi, luas penampang *penstock* dengan diameter *penstock* 1,7 m adalah 2,268 m².

Untuk kecepatan air dalam aliran *penstock* dengan debit (Q) 7,905 m³/det dan diameter *penstock* 1,7 m dapat dihitung dengan persamaan (2.23) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V &= \left(\frac{Q}{\frac{1}{4}\pi D^2} \right) \\
 &= \left(\frac{7,905}{\frac{1}{4} \times 3,14 \times 1,7^2} \right) \\
 &= \left(\frac{7,905}{2,268} \right) \\
 &= 3,485 \text{ m/det.}
 \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan air dalam aliran *penstock* adalah 3,485 m/det.

Untuk *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat saringan (*trashrack*) dengan koefesien kehilangan energi karena bentuk kisi sebesar 0,5, tebal kisi 0,01 m, jarak antar kisi 0,028 m, sudut pemasangan 45° dapat dihitung dengan persamaan (2.24) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 h_t &= k_t \left(\frac{t_k}{b_k} \right)^{4/3} \sin \alpha \frac{V^2}{2g} \\
 &= 0,5 \left(\frac{0,01}{0,028} \right)^{4/3} \sin 45 \frac{3,485^2}{2 \times 9,8} \\
 &= 0,5 \times 0,253 \times 0,7 \times 0,619 \\
 &= 0,0548 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi, *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat saringan (*trashrack*) adalah 0,0548 m.

Losses (kehilangan tinggi tekan) pada saluran *penstock* akibat pemasukan pada pipa dengan koefesien kecepatan 0,95 dapat dihitung dengan persamaan (2.25) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 h_p &= K \times \frac{V^2}{2g} \\
 &= 0,95 \times \frac{3,485^2}{2 \times 9,8} \\
 &= 0,95 \times 0,619 \\
 &= 0,5880 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi, *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat pemasukan

pada pipa adalah 0,588 m.

Losses (kehilangan tinggi tekan) pada saluran *penstock* akibat belokan dengan koefisien belokan 0,67 dapat dihitung dengan persamaan (2.26) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}h_b &= K_b \times \frac{V^2}{2g} \\&= 0,67 \times \frac{3,485^2}{2 \times 9,8} \\&= 0,67 \times 0,619 \\&= 0,4147 \text{ m}\end{aligned}$$

Jadi, *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat belokan pada pipa adalah 0,4147 m.

Kehilangan tinggi tekan total dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}h_{\text{total}} &= 0,0548 + 0,5880 + 0,4147 \\&= 1,0575 \text{ m}\end{aligned}$$

Jadi, tinggi jatuh efektif yang tersedia dengan tinggi total 69 m adalah

$$\begin{aligned}H_{\text{eff}} &= 69 - 1,0575 \\&= 67,9425 \text{ m}\end{aligned}$$

sedangkan unit #3 memiliki ukuran 1,8 m yang dapat dilihat pada data teknis *penstock*. Maka dari itu, dilakukan perhitungan dengan persamaan (2.22) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}A_n &= \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \\&= 3,14 \times \left(\frac{1,8}{2}\right)^2 = 2,543 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Jadi luas penampang *penstock* dengan diameter *penstock* 1,8 m adalah 2,543 m².

Untuk kecepatan air dalam aliran *penstock* dengan debit 7,905 m³/det dan diameter *penstock* 1,8 m dapat dihitung dengan persamaan (2.23) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V &= \left(\frac{Q}{\frac{1}{4}\pi D^2} \right) \\
 &= \left(\frac{7,905}{\frac{1}{4} \times 3,14 \times 1,8^2} \right) \\
 &= \left(\frac{7,905}{2,543} \right) \\
 &= 3,108 \text{ m/det.}
 \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan air dalam aliran *penstock* adalah 3,108 m/det.

Untuk *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat saringan (*trashrack*) dengan koefisien kehilangan energi karena bentuk kisi sebesar 0,5, tebal kisi 0,01 meter, jarak antar kisi 0,028 meter, sudut pemasangan 45° dapat dihitung dengan persamaan (2.24) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 h_t &= k_t \left(\frac{t_k}{b_k} \right)^{4/3} \sin \alpha \frac{V^2}{2g} \\
 &= 0,5 \left(\frac{0,01}{0,028} \right)^{4/3} \sin 45 \frac{3,108^2}{2 \times 9,8} \\
 &= 0,5 \times 0,253 \times 0,7 \times 0,492 \\
 &= 0,0435 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi, *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat saringan (*trashrack*) adalah 0,0435 m.

Losses (kehilangan tinggi tekan) pada saluran *penstock* akibat pemasangan pada pipa dengan koefisien kecepatan 0,95 dapat dihitung dengan persamaan (2.25) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 h_p &= K \times \frac{V^2}{2g} \\
 &= 0,95 \times \frac{3,108^2}{2 \times 9,8} \\
 &= 0,95 \times 0,492 \\
 &= 0,4674 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi, *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat pemasangan pada pipa adalah 0,4674 m.

Losses (kehilangan tinggi tekan) pada saluran *penstock* akibat belokan dengan koefisien belokan 0,67 dapat dihitung dengan persamaan (2.26)

sebagai berikut.

$$\begin{aligned}h_b &= K_b \times \frac{V^2}{2g} \\ &= 0,67 \times \frac{3,485^2}{2 \times 9,8} \\ &= 0,67 \times 0,492 \\ &= 0,3296 \text{ m}\end{aligned}$$

Jadi, *losses* (kehilangan energi) pada saluran *penstock* akibat belokan pada pipa adalah 0,3296 m.

Kehilangan tinggi tekan total dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}h_{\text{total}} &= 0,0435 + 0,4674 + 0,3296 \\ &= 0,8405 \text{ m}\end{aligned}$$

Jadi tinggi jatuh efektif yang tersedia dengan tinggi total 69,4 m adalah:

$$\begin{aligned}H_{\text{eff}} &= 69,4 - 0,8405 \\ &= 68,5595 \text{ m}\end{aligned}$$

Secara teoritis potensi daya (P_t) yang dibangkitkan oleh PLTA Ubrug dapat dihitung dengan menambahkan efisiensi peralatan yaitu peralatan turbin dan generator, maka daya *output* yang dibangkitkan adalah sebagai berikut.

D. Potensi Daya Listrik untuk beberapa Generator

Potensi daya listrik untuk unit 1 dengan memasukkan nilai efisiensi turbin bersama generator sebesar 0,95 maka potensi daya output unit 1 adalah:

$$\begin{aligned}P_t &= 9,8 \times 7,905 \times 67,9425 \times 0,95 \\ &= 5.000,265 \text{ kW} \\ &= 5,000 \text{ MW}\end{aligned}$$

Jadi, potensi daya yang dibangkitkan oleh turbin generator unit 1 sebesar 5,000 MW.

Potensi daya unit 2, dengan memasukan nilai efisiensi turbin bersama generator sebesar 0,95 maka potensi daya *output* unit adalah:

$$\begin{aligned}P_t &= 9,8 \times 7,905 \times 67,9425 \times 0,95 \\ &= 5.000,265 \text{ kW} \\ &= 5,000 \text{ MW}\end{aligned}$$

Jadi potensi daya yang dibangkitkan oleh turbin generator unit 2 sebesar 5,00 MW.

Potensi daya unit 3, dengan memasukan nilai efisiensi turbin bersama generator sebesar 0,95 maka potensi daya output unit 3 adalah:

$$\begin{aligned} P_t &= 9,8 \times 7,905 \times 68,5595 \text{ m} \times 25 \times 0,95 \\ &= 5.045,674 \text{ kW} \\ &= 5,045 \text{ MW} \end{aligned}$$

Jadi, potensi daya yang dibangkitkan oleh turbin generator unit 3 sebesar 5,045 MW. Total potensi daya yang dibangkitkan di PLTA Ubrug adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= \text{unit 1} + \text{unit 2} + \text{unit 3} \\ &= 5,000 + 5,000 + 5,045 \\ &= 15,045 \text{ MW} \end{aligned}$$

Jadi, total potensi daya yang dapat dibangkitkan di PLTA Ubrug sebesar 15,045 MW.

E. Analisa Daya Terpasang

Secara teoritis *output* daya terpasang yang dibangkitkan oleh PLTA Ubrug dapat dihitung dengan persamaan (2.7) dengan melihat *nameplate* atau data teknis yang ada pada tiap-tiap generator dan turbin yang ada pada PLTA Ubrug. Maka, *output* daya terpasang adalah sebagai berikut.

Daya terpasang unit 1, dengan memasukan data yang diperoleh dari *nameplate* atau data teknis turbin dan generator unit #1, maka daya terpasang adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_{\#1} &= \sqrt{3} \times 6.300 \text{ V} \times 605 \text{ A} \times 0,9 \\ &= 5.941 \text{ kW} \\ &= 5,94 \text{ MW} \end{aligned}$$

Jadi, *output* daya yang terpasang oleh generator sebesar 5,94 MW.

Daya terpasang unit 2, dengan memasukan data yang diperoleh dari *nameplate* atau data teknis turbin dan generator unit 2, maka daya terpasang adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
P_{\#2} &= \sqrt{3} \times 6.300 \text{ V} \times 605 \text{ A} \times 0,9 \\
&= 5.941 \text{ kW} \\
&= 5,94 \text{ MW}
\end{aligned}$$

Jadi, *output* daya yang terpasang oleh generator sebesar 5,94 MW.

Daya terpasang unit 3, dengan memasukan data yang diperoleh dari *nameplate* atau data teknis turbin dan generator unit 3, maka daya terpasang adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
P_{\#3} &= \sqrt{3} \times 6.300 \text{ V} \times 660 \text{ A} \times 0,9 \\
&= 6.481 \text{ kW} \\
&= 6,48 \text{ MW}
\end{aligned}$$

Jadi, *output* daya yang terpasang oleh generator sebesar 6,48 MW.

Total daya terpasang di PLTA Ubrug adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
P_{\text{total}} &= \text{unit 1} + \text{unit 2} + \text{unit 3} \\
&= 5,94 + 5,94 + 6,48 \\
&= 18,36 \text{ MW}
\end{aligned}$$

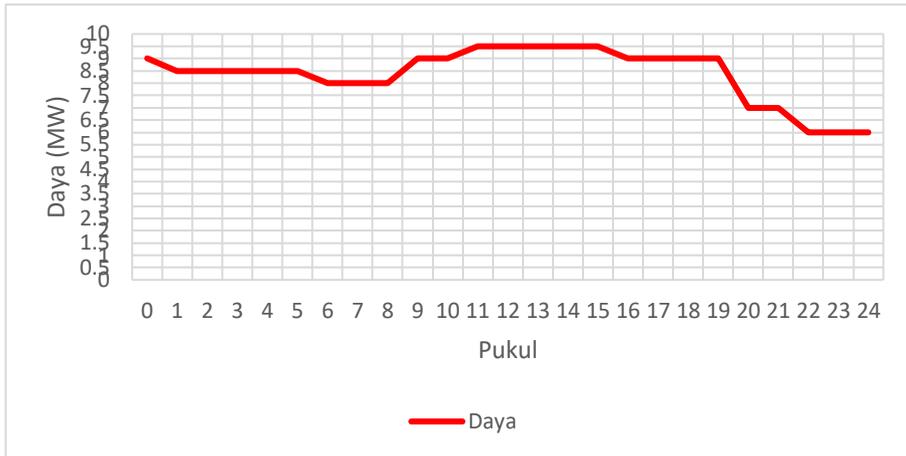
Jadi, total *output* daya yang terpasang di PLTA Ubrug berdasarkan pembacaan di *Nameplate* sebesar 18,36 MW.

F. Karakteristik Beban

Pada analisa sebelumnya telah diketahui bahwa debit air saluran penghantar sebesar 7,905 m³/s hanya mampu membangkitkan potensi daya dengan kinerja sebesar 15,045 MW. Berdasarkan data diperoleh bahwa debit yang digunakan adalah 10,25 m³/s mampu membangkitkan daya dengan kinerja sebesar 18,36 MW sehingga terlihat adanya penyusutan debit air.

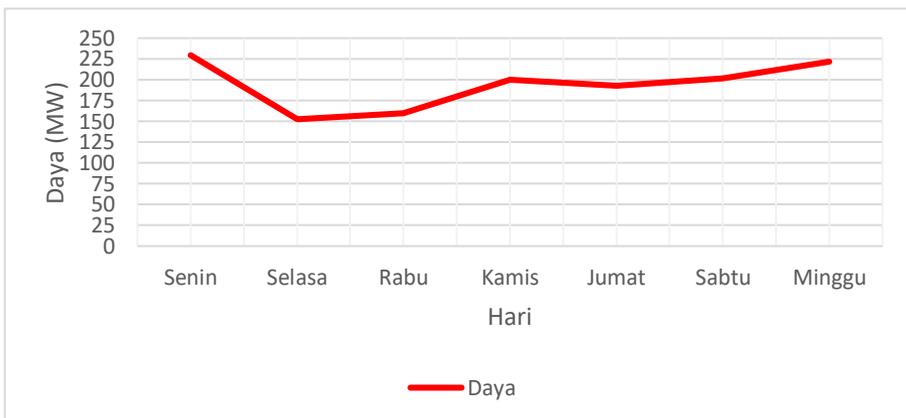
Hal ini disebabkan oleh pendangkalan bending dan juga hutan di hulu sungai yang berfungsi sebagai sumber resapan air banyak yang dialihfungsikan sebagai pemukiman warga, kawasan industri, dan paling utama masalah sampah yang terbawa oleh aliran air sungai Cicatih ikut masuk bersama aliran air di saluran penghantar yang merupakan kendala operasi unit pembangkit PLTA Ubrug. Akibat dari penyusutan debit air, PLTA Ubrug Sukabumi mengalami penurunan kinerja karena debit air yang digunakan

untuk menggerakkan turbin air berkurang. Akibatnya daya yang dihasilkan PLTA Ubrug Sukabumi juga berkurang. Berikut adalah data beban harian dari PLTA Ubrug dapat dilihat pada gambar 4.1 di bawah ini.



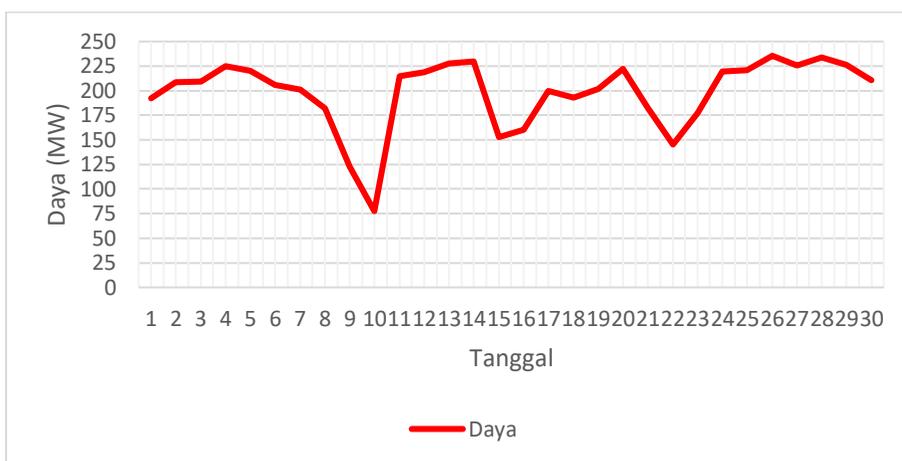
Gambar 4. 1 Karakteristik beban harian PLTA Ubrug

Berdasarkan data dari hasil pengukuran di lapangan dapat ditentukan karakteristik beban mingguan dengan bentuk lengkung beban. Lengkung beban (*load curve*) menunjukkan variasi dari beban setiap saat. Bentuk lengkung beban tersebut tergantung dari jenis beban yang ada. Berikut adalah gambar grafik karakteristik beban mingguan seperti terlihat pada gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4. 2 Grafik Karakteristik Beban Mingguan

Berdasarkan data dari hasil pengukuran di lapangan dapat ditentukan karakteristik beban bulanan dengan bentuk lengkung beban. Lengkung beban (*load curve*) menunjukkan variasi dari beban setiap saat. Bentuk lengkung beban tersebut tergantung dari jenis beban yang ada. Berikut adalah gambar grafik karakteristik beban bulanan seperti terlihat pada gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4. 3 Grafik Karakteristik Beban Bulanan

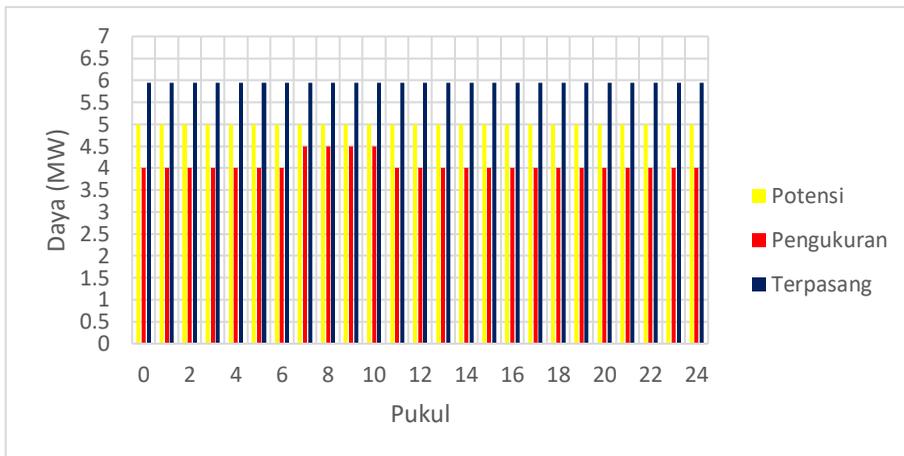
A. Analisa Kinerja PLTA Ubrug

Dalam analisa untuk perhitungan kinerja PLTA Ubrug, dilakukan perbandingan antara daya potensi yang dapat dibangkitkan. Hasil pengukuran kinerja turbin generator dan daya yang terpasang pada unit pembangkit seperti yang dimuat pada tabel perbandingan beban (*terlampir*). Berikut adalah perbandingan beban masing-masing unit pembangkit.

Analisis *kinerja generator unit 1*, berdasarkan data pada gambar di bawah ini dan setelah menganalisis perbandingan kinerja generator antara daya terpasang, daya pengukuran, dan daya potensi. Anda dapat melihat hasilnya daya hasil pengukuran lebih rendah dibandingkan dengan daya

potensi dan daya terpasang. Hal ini disebabkan oleh debit air yang kurang dan kondisi mesin unit 1 yang hanya digunakan sebagai cadangan.

Debit air berkurang disebabkan oleh hutan di hulu sungai yang berfungsi sebagai sumber resapan air banyak yang dialih fungsikan sebagai pemukiman warga dan kawasan industri. Untuk kasus khusus di PLTA Ubrug banyak disebabkan oleh pendangkalan bendungan dan yang masalah sampah yang merupakan kendala operasi unit pembangkit PLTA Ubrug. Hal ini mengakibatkan debit air yang kurang berpengaruh pada daya yang dihasilkan PLTA Ubrug Sukabumi juga berkurang sehingga dari 3 (tiga) unit yang terpasang di PLTA Ubrug Sukabumi hanya 2 (dua) unit yang dapat membangkitkan energi listrik. Sedangkan kondisi generator yang sudah tua mengakibatkan penurunan efektivitas kinerja dari unit pembangkitan itu sendiri.

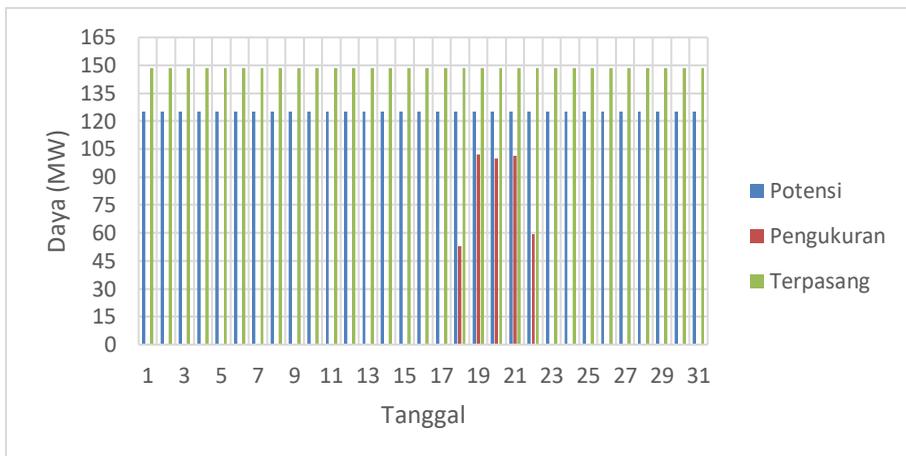


Gambar 4. 4 Perbandingan Beban Harian Unit

Berdasarkan gambar 4.4 grafik perbandingan beban harian generator unit 1 di PLTA Ubrug Sukabumi yang diambil pada 19 Desember 2016. Hanya generator unit 1 yang beroperasi, sedangkan generator unit 2, dan generator unit 3 tidak beroperasi. Kondisi daya pada pukul 00.00 WIB sebesar 4 MW.

karena tinggi muka air di KTH (kolam tandon harian) dirasa cukup untuk menaikkan daya yang dihasilkan turbin generator. Keadaan daya sebesar 4 MW bertahan sampai pukul 06.00 WIB. Pada pukul 07.00 WIB daya meningkat menjadi 4,5 MW dikarenakan tinggi muka air di KTH dirasa cukup untuk menaikkan daya yang dihasilkan turbin generator. Keadaan daya sebesar 4,5 MW bertahan sampai dengan pukul 10.00 WIB. Pada pukul 11.00 WIB daya menurun kembali menjadi 4 MW karena tinggi muka air di KTH yang mengalami pengurangan. Kondisi tersebut bertahan sampai dengan pukul 24.00 WIB.

Berdasarkan gambar 4.4 grafik perbandingan beban harian unit #1 di PLTA Ubrug Sukabumi kinerja turbin generator kurang maksimal karena ada potensi yang kurang dimanfaatkan. Berikut adalah gambar grafik perbandingan beban bulanan generator unit 1 seperti terlihat pada gambar 4.5 di bawah ini.

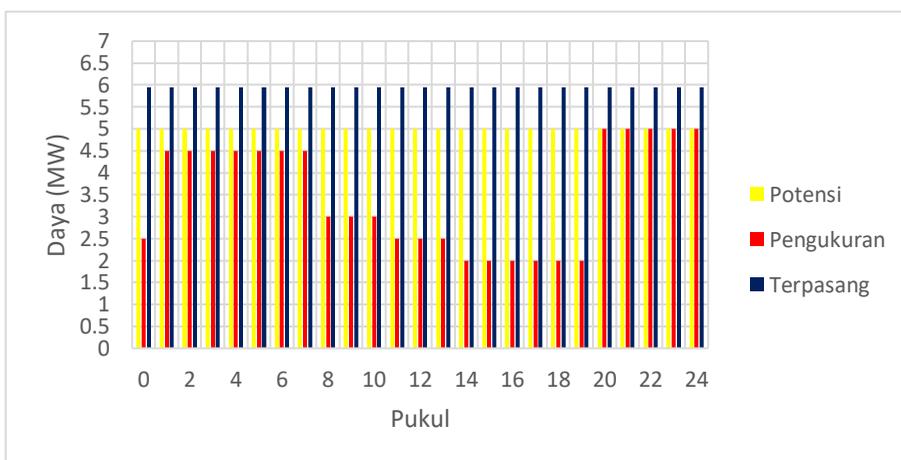


Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Beban Bulanan Unit 1

Berdasarkan gambar 4.5 grafik perbandingan beban bulanan

generator unit 1 di PLTA Ubrug Sukabumi yang diambil pada bulan Desember 2016. Generator unit 1 hanya beroperasi pada tanggal 18 Desember 2016 sampai dengan tanggal 22 Desember 2016. Beban tertinggi terjadi pada tanggal 21 Desember 2016 sebesar 101,5 MW dan beban terendah terjadi pada tanggal 18 Desember 2016 sebesar 53 MW. Berdasarkan gambar 4.5 grafik perbandingan beban bulanan generator unit 1 kinerja turbin generator unit 1 kurang maksimal karena ada potensi yang kurang dimanfaatkan dan kinerja turbin generator generator unit 1 hanya bekerja sebagai unit cadangan.

Perbandingan kinerja generator unit 2, berdasarkan perbandingan beban (*terlampir*) diambil pada hari Rabu, 23 November 2016. Daya hasil pengukuran fluktuatif terhadap daya potensi dan daya terpasang. Hal ini disebabkan oleh debit air yang dipengaruhi oleh cuaca dan kondisi mesin yang sudah tua sehingga mengurangi kinerja dari unit itu sendiri. Berikut adalah gambar perbandingan beban harian generator unit 2 seperti terlihat pada gambar 4.6 di bawah ini.



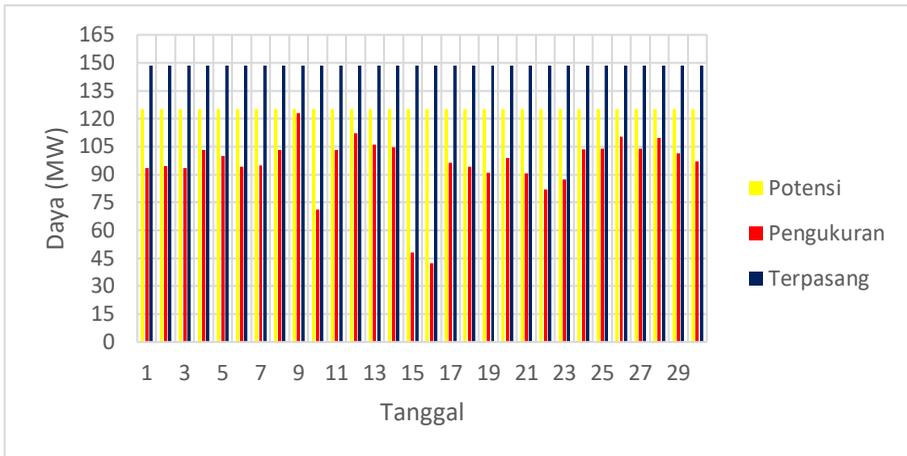
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Beban Harian Generator Unit 2

Berdasarkan gambar 4.6 grafik perbandingan beban harian Generator unit 2 di PLTA Ubrug Sukabumi yang diambil pada 23 November 2016. Kondisi daya pada pukul 00.00 WIB sebesar 2,5 MW. karena tinggi muka air di KTH (kolam tandon harian) terjadi penurunan. Pada pukul 07.00 WIB daya beban meningkat menjadi 4,5 MW dikarenakan tinggi muka air di KTH dirasa cukup untuk menaikkan daya yang dihasilkan turbin generator. Keadaan daya sebesar 4,5 MW bertahan sampai dengan pukul 07.00 WIB. Pada pukul 08.00 WIB daya menurun menjadi 3 MW karena tinggi muka air di KTH yang mengalami pengurangan. Kondisi tersebut bertahan sampai dengan pukul 10.00 WIB. Pada pukul 11.00 WIB daya menurun kembali menjadi 2,5 MW karena tinggi muka air di KTH mengalami pengurangan.

Kondisi tersebut bertahan sampai dengan pukul 13.00 WIB. Pada pukul 14.00 WIB daya menurun kembali menjadi 2,5 MW karena tinggi muka air di KTH yang mengalami pengurangan. Kondisi tersebut bertahan sampai dengan pukul 19.00 WIB. Pada pukul 20.00 WIB daya meningkat menjadi 5 MW, dikarenakan tinggi muka air di KTH dirasa cukup untuk menaikkan daya yang dihasilkan turbin generator, keadaan daya sebesar 5 MW bertahan sampai dengan pukul 24.00 WIB.

Berdasarkan gambar 4.6 grafik perbandingan beban harian unit generator 1 di PLTA Ubrug Sukabumi kinerja turbin generator kurang maksimal karena ada potensi yang kurang dimanfaatkan. Tetapi pada pukul 20.00 WIB sampai dengan pukul 24.00 WIB daya pengukuran sama dengan daya potensi. Berikut adalah gambar grafik perbandingan beban bulanan unit generator 2 seperti terlihat pada gambar 4.7 di bawah

ini.

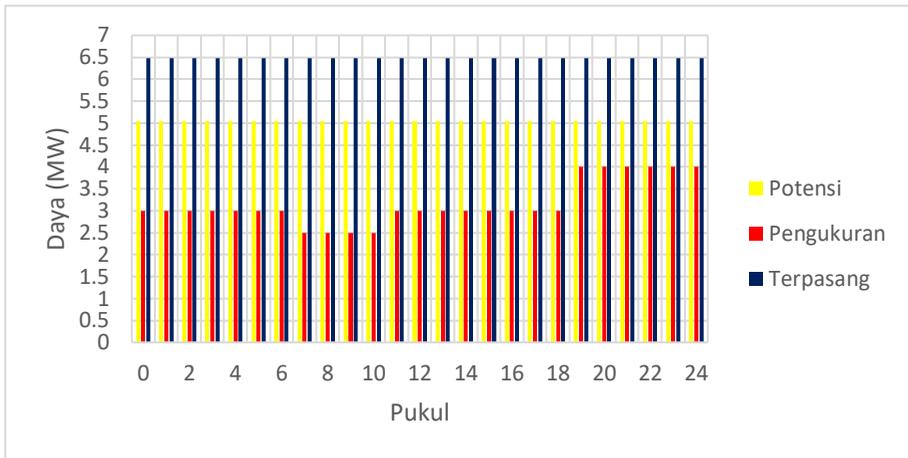


Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Beban Bulanan Generator Unit 2

Berdasarkan gambar 4.7 grafik perbandingan beban bulanan unit 2 di PLTA Ubrug Sukabumi yang diambil pada bulan November 2016, unit 2 beroperasi 1 (satu) bulan penuh. Daya tertinggi terjadi pada tanggal 09 November 2016 sebesar 123 MW dan daya terendah terjadi pada tanggal 16 November 2016 sebesar 42,5 MW. Berdasarkan gambar 4.7 grafik perbandingan beban bulanan unit 2 kinerja turbin generator unit 2 kurang maksimal karena ada potensi yang kurang dimanfaatkan tetapi pada tanggal 09 November 2016 daya pengukuran sama dengan daya potensi.

Perbandingan kinerja generator unit 3, berdasarkan perbandingan beban (*terlampir*) diambil pada hari Rabu, 15 Desember 2016. Daya hasil pengukuran lebih rendah terhadap daya potensi dan daya terpasang. Hal ini disebabkan oleh debit air yang dipengaruhi oleh cuaca

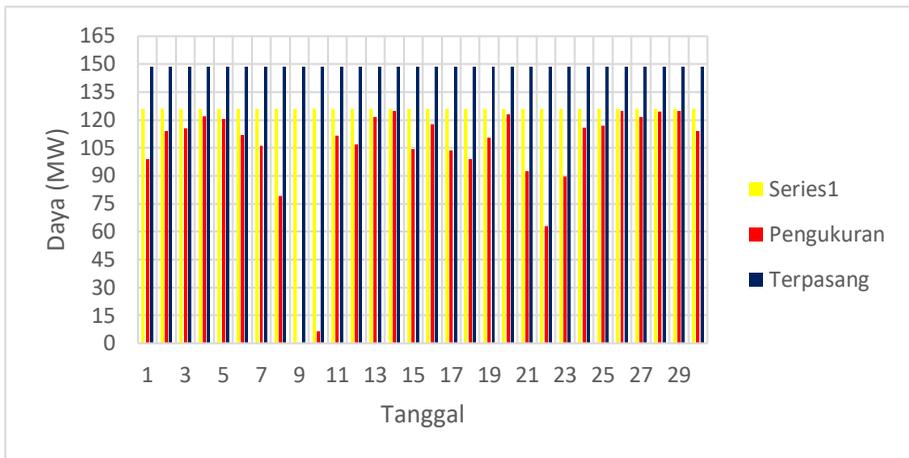
dan kondisi mesin yang sudah tua sehingga mengurangi kinerja dari unit itu sendiri. Berikut adalah gambar perbandingan beban harian unit 3 seperti terlihat pada gambar 4.8 di bawah ini.



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Beban harian Unit 3

Berdasarkan gambar 4.8 grafik perbandingan beban harian unit #2 di PLTA Ubrug Sukabumi yang diambil pada 23 November 2016. Kondisi daya pada pukul 00.00 WIB sebesar 3 MW. Keadaan daya sebesar 3 MW bertahan sampai pukul 06.00 WIB. Pada pukul 07.00 WIB daya menurun menjadi 2,5 MW karena tinggi muka air di KTH yang mengalami pengurangan. Kondisi tersebut bertahan sampai dengan pukul 10.00 WIB. Pada pukul 11.00 WIB daya meningkat menjadi 3 MW dikarenakan tinggi muka air di KTH dirasa cukup untuk menaikkan daya yang dihasilkan turbin generator. Keadaan daya sebesar 3 MW bertahan sampai dengan pukul 18.00 WIB. Pada pukul 19.00 WIB daya meningkat menjadi 4 MW dikarenakan tinggi muka air di KTH dirasa cukup untuk menaikkan daya yang dihasilkan turbin generator. Keadaan daya sebesar 4 MW bertahan sampai dengan pukul 24.00 WIB. Berdasarkan gambar 4.8 grafik perbandingan beban harian unit #3 di PLTA Ubrug Sukabumi kinerja turbin generator kurang maksimal karena ada potensi yang

kurang dimanfaatkan. Berikut adalah gambar grafik perbandingan beban bulanan unit generator 3 seperti terlihat pada gambar 4.9 dibawah ini.



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Beban Bulanan Unit 4

Berdasarkan gambar 4.9 grafik perbandingan beban bulanan unit 3 di PLTA Ubrug Sukabumi yang diambil pada bulan November 2016, unit 3 beroperasi 1 (satu) bulan. Pada tanggal 9 November 2016, unit 3 tidak beroperasi. Daya tertinggi terjadi pada tanggal 28 November 2016 sebesar 124,5 MW dan daya terendah terjadi pada tanggal 10 November 2016 sebesar 6,5 MW. Berdasarkan gambar 4.9 grafik perbandingan beban bulanan unit 2 kinerja turbin generator unit 2 kurang maksimal karena ada potensi yang kurang dimanfaatkan tetapi pada tanggal 28 November 2016 daya pengukuran sama daya potensi.

B. Sinkronisasi Pada Sistem Pembangkit Listrik

Pada operasi paralel pusat-pusat tenaga listrik dan tenaga air seperti PLTA Ubrug, pada dasarnya merupakan kerja paralel satu atau dua lebih generator dengan generator lain dengan tambahan resistansi dan reaktansi saluran-saluran interkoneksi. Dalam memenuhi perkembangan beban di

tingkat konsumen, maka proses kerja paralel antara generator harus dilakukan. Proses kerja paralel dengan menghubungkan paralel satu generator dengan generator lainnya disebut sinkronisasi atau dapat juga didefinisikan bahwa sinkronisasi pada generator adalah memparalelkan kerja dua atau lebih generator untuk mendapatkan daya listrik yang besar. Untuk proses kerja paralel antara generator ini tentunya harus memenuhi beberapa persyaratan yang sangat ketat dan harus dipenuhi.

Syarat-Syarat Proses Sinkronisasi Generator

Proses kerja paralel atau sinkronisasi dilaksanakan dengan cara menghubungkan paralel antargenerator. Persyaratan yang harus dipenuhi minimal ada empat persyaratan teknis untuk mendapatkan hasil yang optimal, yaitu

1. Mempunyai tegangan kerja yang sama.
2. Frekuensi sama.
3. Sefasa.
4. Mempunyai sudut *phase* yang sama.

Penjelasan persyaratan sinkronisasi antargenerator. Pesyaratan sinkronisasi dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Mempunyai tegangan kerja yang sama

Dengan adanya tegangan kerja yang sama diharapkan pada saat terjadi kerja paralel dengan beban kosong *power* faktornya 1. Dengan *power* faktor 1 berarti tegangan antara 2 generator persis sama. Pada saat 2 sumber tegangan itu berasal dari dua sumber yang sifatnya statis sebagai contoh sumber yang berasal dari *battery* atau transformator, maka tidak akan ada arus antara keduanya. Namun, karena dua sumber merupakan sumber tegangan dinamis yang berasal dari generator, maka faktor dayanya (Pf) akan terjadi deviasi naik dan turun secara periodik secara bergantian dan berlawanan. Hal ini terjadi karena adanya sedikit perbedaan sudut *phase* yang sesekali bergeser

karena faktor gerak dinamis dari penggerak turbinya. Kondisi ini bisa dibuktikan dengan membaca secara bersamaan kecepatan putar dari dua generator dalam keadaan kondisi sinkron dengan kecepatan sinkron sebesar 1500 dan pada kondisi generator 2. Mempunyai kecepatan putar sebesar 1501 maka terdapat selisih 1 putaran/menit. Jika kita hitung $1/1500 \times 360$ derajat maka terdapat beda fase 0,24 derajat dan perbedaan tersebut jika dihitung berdasarkan selisih tegangan sebesar $\cos \phi$ 0,24 derajat x tegangan nominal (400 V), maka akan didapatkan selisih tegangan sebesar 96 V dan selisih tegangan tersebut cukup mengakibatkan timbulnya arus sirkulasi antara 2 buah generator tersebut dan sifatnya menjadi tarik menarik. Meskipun tidak membahayakan, pada saat dibebani bersama sama maka *power* faktornya akan relatif sama sesuai dengan *power* faktor beban. Memang sebaiknya dan idealnya tiap-tiap generator menunjukkan *power factor* yang sama. Namun, jika terjadi *power factor* yang berbeda dengan selisih tidak terlalu banyak tidak berdampak pada proses kerja paralel.

Faktor daya yang rendah akan mempunyai nilai arus yang sedikit lebih tinggi. Hal penting dan harus diperhatikan adalah tidak melebihi arus nominalnya dan daya nominal dari generator. Pada generator yang akan diparalel biasanya didalam alternatornya ditambahkan peralatan yang dinamakan *droop kit*. Peralatan *droop kit* ini berupa *current* transformer yang dipasang di sebagian lilitan dan *output*-nya disambungkan ke AVR. Peralatan *droop kit* ini berfungsi untuk mengatur *power factor* berdasarkan besarnya arus beban sehingga pembagian beban KVAR diharapkan sama pada KW yang sama.

2. Mempunyai urutan phase yang sama

Urutan *phase* adalah arah putaran dari ketiga *phase*. Arah urutan ini di dalam dunia industri dikenal dengan sebutan *clock wise* (CW) yang artinya searah jarum pukul dan *counter clock wise* (CCW) yang artinya berlawanan dengan jarum pukul. Hal ini dapat diukur dengan alat *phase sequence type*

jarum. Saat mengukur jarum bergerak berputar ke kanan dinamakan CW dan jika berputar ke kiri dinamakan CCW. Disamping itu, dikenal juga urutan *phase* dengan sebutan ABC dan CBA. Arah urutan *phase* ABC identik dengan CW sedangkan CBA identik dengan CCW. Semua dikenal sebagai urutan *phase* dan *bounter clock wise*.

3. Mempunyai frekuensi kerja yang sama

Standart system frekwensi di dunia mempunyai *standart* dan dikenal dua buah *system* frekuensi, yaitu 50 hz dan 60 hz. Dalam operasionalnya sebuah generator bisa saja mempunyai frekuensi yang fluktuatif (berubah ubah) karena dipengaruhi faktor kecepatan atau beban tertentu. Pada jaringan distribusi dipasang alat pembatas frekuensi yang membatasi frekuensi pada minimal 48,5 hz dan maksimal 51,5 Hz. Namun, pada generator pabrik *over* frekuensi dibatasi sampai 55 Hz sebagai *over speed*. Pada kondisi kerja paralel antara dua buah generator, pada awalnya tidak mempunyai frekuensi yang sama persis. Jika mempunyai frekuensi yang sama persis, maka generator tidak akan bisa paralel karena sudut *phase*-nya belum sesuai. Untuk itu, harus diatur dengan cara mengurangi sedikit atau melebihkan sedikit agar mendapatkan sudut *phase* yang tepat. Setelah dapat disinkron dan berhasil sinkron, baru kedua generator mempunyai frekuensi yang sama-sama persis.

4. Mempunyai sudut phase yang sama

Pada pengaturan sudut *phase* dapat ditempuh dengan cara sudut *phase* menyamakan kedua *phase* dari dua generator akan mempunyai sudut *phase* yang berhimpit sama atau 0 derajat. Dalam kenyataannya, tidak memungkinkan mempunyai sudut yang berhimpit karena genset yang berputar meskipun dilihat dari parameternya mempunyai frekuensi yang sama. Namun, jika dilihat menggunakan *synchronoscope* pasti bergerak labil. Ke kiri dan ke kanan dengan kecepatan sudut radian yang ada sangat sulit untuk mendapatkan sudut berhimpit dalam jangka waktu 0,5 detik. *Breaker* butuh waktu tidak kurang dari 0,3 detik untuk *close* pada saat ada perintah *close* pada proses

sinkron masih diperkenankan perbedaan sudut maksimal 10 derajat. Dengan perbedaan sudut maksimal 10 derajat, selisih tegangan yang terjadi berkisar 4 Volt. Peralatan modul untuk mengakomodasi kebutuhan *synchrone generator*, yaitu *load sharing*, *synchronizing*, *dependent start stop*, dan juga dimungkinkan menggunakan peralatan lainnya.

Persyaratan kerja paralel bisa terjadi untuk lebih dari 2 genetaror. Apabila perkembangan beban makin naik, maka proses kerja paralel lebih dari generator. Biasanya dilakukan secara bertahap dan ini juga berlaku tidak hanya di pembangkit listrik tenaga air (PLTA), namun juga terjadi pada kerja paralel di dunia industri.

Bab 5

Impian PLTA Ubrug pada Masa Depan

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) mempunyai peran penting untuk menyuplai kebutuhan listrik untuk masyarakat dan industri. Tidak hanya di Indonesia, pengembangan sumber daya listrik dengan memanfaatkan potensi alam ini juga dilakukan di banyak negara. Selain menghasilkan sumber listrik yang besar, potensi yang satu ini juga ramah lingkungan.

Salah satu PLTA potensial di Indonesia adalah PLTU Ubrug. Seperti halnya yang sudah dilakukan penulis mengenai penelitian dan observasi langsung di PLTU Ubrug. Dari kegiatan inilah ditemukan berbagai data terkait kondisi dan peralatan PLTA Ubrug. Berikut ringkasan temuan hasil dari penelitian dan dan observasi yang telah dilakukan.

1. Total daya yang terpasang sebesar 18,36 MW. Total daya tersebut diperoleh dari unit 1 sebesar 5,94 MW, unit 2 sebesar 5,94 MW, dan unit 3 sebesar 6,48 MW.
2. Total daya yang dapat dibangkitkan sebesar 15,045 MW. Total daya tersebut diperoleh dari unit 1 sebesar 5.000 MW, unit 2 sebesar 5.000 MW, dan unit 3 sebesar 5.045 MW. Total daya ini lebih kecil dari daya yang terpasang di PLTA Ubrug.
3. Debit air dari saluran Sungai Cicatih hanya cukup menggerakkan 2 unit pembangkit di PLTA Ubrug.
4. Daya hasil pengukuran lebih rendah terhadap beban potensi dan daya terpasang. Ada juga daya hasil pengukuran yang sama dengan hasil daya potensi. Hal ini disebabkan oleh debit air yang dipengaruhi oleh cuaca sehingga berdampak pada salah satu faktor, yaitu sampah. Selain itu, kondisi mesin yang sudah tua mengurangi kinerja dari unit itu sendiri

sehingga diperlukan pembaharuan atau perbaikan/*overhaul* mesin.

Berdasarkan hasil observasi dan penelitian di atas, diharapkan PLTA Ubrug bisa dimanfaatkan secara optimal. Struktur dan komponen kerja PLTA Ubrug perlu dirawat secara berkala. Pada akhirnya, pasokan energi yang didapat bisa dinikmati masyarakat dan industri yang lebih luas.

Daftar Pustaka

- Ajiz, Nur. 2007. “Studi Potensi dan Karakteristik Output Daya di Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Ubrug Sukabumi”. dalam *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik Elektro*, 1(1), h. 1–13. Juli 2007.
- Arismunandar, Artono dan Kuwahara Susumu. 2004. *Teknik Tenaga Listrik Jilid I. Pembangkitan Dengan Tenaga Air*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Arismunandar, Wiranto. 1977. *Penggerak Mula, Turbin*. Bandung: Insitut Teknologi Bandung.
- Dandekar.M.M. dan Sharma. K.N. 1991. *Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Universitas Indonesia.
- Jonsen. 2006. “Pemodelan Hidrograf Menggunakan Pendekatan Geomorfologi (Studi Kasus Sub Daerah Aliran Sungai Cicatih, Kabupaten Sukabumi)”. Skripsi pada Departemen Geofisika dan Meteorologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor.
- Marsudi, Djiteng. 2005. *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Misbachudin, Muh, dkk. 2016. “Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hidro Mikro di Desa Kayuni Kabupaten Fakfak Provinsi Papua Barat”. dalam *Jurnal Austenit*, 8 (2), h. 1–12. Oktober 2016.
- Petruzella, Frank D. 2002. *Elektronik Industri*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Purnomo, Febry Arief. 2005. “Trash Racking Pembangkit Listrik Tenaga Air Besar”. Pada makalah presentasi.
- Putro, Yogi Suryo Setyo. 2015. “Studi Perencanaan Pembangkit Listrik

Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Sungai Atei Desa Tumbang Atei Kecamatan Sanamang Mantikai Kabupaten Katingan Provinsi Kalimantan Tengah”. Tesis pada Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

- Sebayang, Sedyo. 2002. *Evaluasi Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro*. Bandung.
- Sidharta, S.K. 1997. *Irigasi dan Bangunan Air*. Jakarta: Gunadarma.
- Suyitno. 2014. *Pembangkit Energi Listrik*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Taufan, Moch B. Santiago. 2014. “Grafik Hubungan Daya Listrik dengan Biaya Konstruksi Sipil pada Sungai Watunohu Kabupaten Kolaka Utara Sulawesi Tenggara”. Tugas akhir pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- Wijaya, Mochtar. 2001. *Dasar Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Dpukulbatan. Sumber Situs.
- Akbar. 2012. “Turbin”. *tajilapak*, 23 November 2012, dilihat 9 Desember 2016. <<https://tajilapak.wordpress.com/2012/11/23/turbin-pelton/>>.
- Al-Jauza, Yoke. 2014. “Water Turbine”. *yokealjauza*, 28 Februari 2014, dilihat 9 Desember 2016. <<https://yokealjauza.wordpress.com/2014/02/28/water-turbine/>>.
- Aziz, Deden Abdul. 2010. “Ribuan Warga Dekat Bendungan PLTA Ubrug Sukabumi Diminta Waspada”. *Tempo.co*, 17 Juni 2010, dilihat 9 Desember 2016. <<https://nasional.tempo.co/read/256097/ribuan-warga-dekat-bendungan-plta-ubrug-sukabumi-diminta-waspada/full&view=ok>>.
- Ismanto, Ardi. 2012. “Pengukuran Debit Air Secara Sederhana”. Konservasi alam–BBKSDA NTT, 24 Mei 2012, dilihat 9 Desember 2016. <<http://konservasi-bidang1ntt.blogspot.com/2012/05/pengukuran-debit-air-secara-sederhana.html>>.
- NN. 2011. “Rumus-Rumus Dasar Elektronokal”. *duniatehnikku*, 5 Januari 2011, dilihat 17 Desember 2016. <<https://duniatehnikku.wordpress.com/2011/01/05/981/>>.

Profil Penulis

Prof. Dr. rer. pol. Ir. H. Didik Notosudjono, M.Sc. adalah guru besar di bidang Teknik Elektro dan Ilmu Manajemen, Pascasarjana, Universitas Pakuan, Bogor. Riwayat pendidikan S-1 dari Universitas Brawijaya sedangkan S-2 dan S-3 di Universitaet Flensburg, Deutschland/Germany. Pengalaman mengajar sejak tahun 1985 sampai sekarang di bidang Teknik Tenaga Listrik dan *Renewable* Energi. Sejak tahun 2001 aktif juga mengajar di bidang Ilmu Manajemen karena studi S-2 dan S-3 di Jerman mengambil bidang Energi dan Manajemen *Wirtschaftswissenschaftliche* pada bidang Energi. Pada tahun 2019 pernah menulis buku *Teknologi Energi Terbarukan*, aktif mengajara di bidang pembangkit tenaga listrik, dan energi terbarukan sampai dengan saat ini. Tidak hanya itu, mempunyai pengalaman mengembangkan Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM) di Wonosobo, Jawa Tengah; di Wonosalam, Jawa Timur; dan di Padang, Sumatra Barat.