

SKRIPSI

PERANCANGAN PIPA PESAT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

OLEH :

MUHAMMAD YASIR

D211 16 521



DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

SKRIPSI

PERANCANGAN PIPA PESAT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

OLEH :

MUHAMMAD YASIR

D211 16 509

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelas Sarjana Teknik pada
Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin pada Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

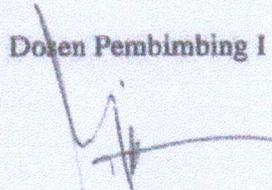
JUDUL :

PERANCANGAN PIPA PESAT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

MUHAMMAD YASIR
D21116521

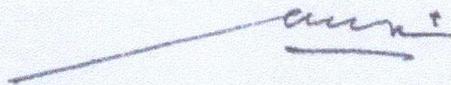
Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing 1



Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT
NIP. 19520706 197812 1 001

Dosen Pembimbing 2



Prof. Dr. Ir. Luther Sule, MT
NIP. 19560827 198503 1 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT.
NIP. 19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad yasir
Nomor mahasiswa : D21116521
Program studi : Teknik Mesin
Jenjang : Program Sarjana (S1)

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa karya tulisan saya yang berjudul :

PERANCANGAN PIPA PESAT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan pengambilan alihan tulisan orang lain, skripsi yang saya tulis benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri. Apabila dikemudian hari dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 13 Maret 2023

Yang menyatakan



Muhammad Yasir
Nim : D21116521

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

DATA DIRI

Nama : Muhammad Yasir
Tempat / Tanggal Lahir : Buton, 14 April 1998
Jenis Kelamin : Laki - laki
Agama : Islam
Alamat : Jl. Tidung VII No.108
No. Hp : 082195769984
E-mail : yasirmuh1498@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

SD NEGERI 1 BINTUNI (2004 – 2010)
SMP NEGERI TERPADU BINTUNI (2010 – 2013)
SMA NEGERI 1 BINTUNI (2013 – 2016)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas banyaknya Berkah, Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulisan Skripsi ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan studi serta dalam rangka memperoleh gelar Sarjana Teknik Strata Satu pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Judul yang penulis ajukan adalah : **“PERANCANGAN PIPA PESAT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR”**

Selesainya Skripsi ini tidak terlepas dari pihak yang telah memberikan banyak bantuan kepada penulis. Maka dari itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua dan saudara – saudara yang setiap saat mendoakan, mendukung dan memberikan motivasi untuk menyelesaikan pendidikan saya.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT dan Ibu Prof. Dr. Ir. Luther Sule, MT selaku pembimbing atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan dari penyusunan konsep dan proposal, pelaksanaan penelitian hingga penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
4. Seluruh dosen dan staff Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala ilmu, nasihat dan bantuan selama penulis berkuliah
5. Saudara – saudara seperjuangan COMPREZZOR 2016 yang setia menemani, mambantu, motivator dan mendukung penulis dari awal kuliah dan seterusnya.
6. Organisasi kemahasiswaan HMM FT-UH sebagai wadah belajar dan pembentukan karakter penulis hingga saat ini.

7. Teman – teman seperjuangan Laboratorium Energi Terbarukan dan Laboratorium Robotika yang telah bersedia menemani dan membantu selama masa penelitian dan penyusunan tugas akhir ini.
8. Saudara – saudara KOS yang selalu memberikan motivasi walaupun kadang tidak berguna namun sangat berarti dalam perjalanan tugas akhir ini.

Tentunya dalam penyusunan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Semua kebaikan berasal dari Allah semata, segala kekurangan dan kekeliruan berasal dari penulis maka dari itu penulis memohon maaf atas segala kesalahan, kritik dan saran sangat dibutuhkan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

Gowa, Maret 2023

Penulis

ABSTRAK

MUHAMMAD YASIR., *Perancangan pipa pesat pembangkit listrik tenaga air* (dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT dan Prof. Dr. Ir. Luther Sule, MT.)

Penelitian ini difokuskan pada penentuan dimensi pipa pesat pembangkit listrik tenaga air. Dengan aliran debit sungai yang telah mengalami penurunan debit akibat pendangkalan sungai. Hingga di dapat rancangan pipa pesat yang memenuhi kode standar ASME B31.1 untuk setiap kondisi pembebanan. Dan ASME 36,10 untuk kondisi dimensi Pipa

Pipa yang di gunakan untuk seluruh segmen ada pipa NPS 60, dengan diameter dalam pipa sebesar 1,401 m , tebal Pipa pipa 10,31 mm, dan diameter luar yang di gunakan 1421,31 mm atau 1,421 m

Jarak minimum yang digunakan untuk tumpuan pipa pesat sebesar 7,4m berdasarkan bending stress dan 12,01m Berdasarkan Defleksi dalam Arah Vertical

Kata kunci : PLTA, Pipa Pesat, *Penstock*, Bendungan

ABSTRACT

MUHAMMAD YASIR., Design of a rapid pipe for a hydroelectric power plant (supervised by Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT and Prof. Dr. Ir. Luther Sule, MT.)

This research is focused on determining the dimensions of the rapid pipe of a hydroelectric power plant. With the flow of river discharge which has experienced a decrease in discharge due to silting of the river. So that we can design a penstock that meets the ASME B31.1 standard code for each loading condition. And ASME 36.10 for pipe dimension conditions

The pipes used for all segments are NPS 60 pipes, with an inner diameter of 1.401 m, a thickness of 10.31 mm, and an outer diameter of 1421.31 mm or 1.421 m.

The minimum distance used for penstock piping is 7.4m based on bending stress and 12.01m based on deflection in the vertical direction

Keywords: hydropower, rapid pipe, penstock, dam

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
NOMENKLATUR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	7
2.2 Klasifikasi PLTA	11
2.3 Pipa Pesat.....	12

2.4 Analisis Hidrolik.....	14
2.5 Fenomena <i>Water Hammer</i>	21
2.6 Rentang Tumpuan Pipa.....	23
2.7 Beban Pada Sistem Perpipaan.....	25
2.8 Tegangan-Tegangan Pada Sistem Perpipaan	27
2.9 Kode Standar Perpipaan.....	31
2.10 Tegangan Izin ASME B31.1.....	31
2.11 Penentuan Tebal Pipa.....	3
BAB III METODELOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	35
3.2 Metode Pengerjaan Tugas Akhir.....	35
3.3 Diagram Penelitian	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Lokasi PLTA.....	38
4.2 Data Kondisi Bendungan.....	39
4.3 Data Site Jalur Pipa.....	40
4.4 Material Pipa Pesat.....	41
4.5 Data Potensi Gempat dan Kecepatan Angin.....	43
4.6 Perhitungan Diameter Pipa	45
4.7 Perhitungan <i>Head Loss</i> Pada Pipa.....	45
4.7.1 Perhitungan <i>Head Loss Mayor</i>	46

4.7.2 Perhitungan <i>Head Loss</i> Minor.....	48
4.7.3 head Loss Total	49
4.8 Perhitungan Tekanan Fluida di Dalam Pipa	50
4.9 Penentuan Tebal Pipa.....	51
4.10 Analisi Water Hammer.....	55
4.11 Penentuan Tekanan Maskimum Akibat Water Hammer.....	56
4.12 Penentuan Diameter Luar Pipa	56
4.13 Perhitungan Rentang Tumpuan Pipa	57
4.13.1 Perhitungan Rentang tumpuan berdasarkan bending stress....	57
4.13.2 Perhitungan Rentang tumpuan Berdasarkan Defleksi Arah Vertical	58
4.14 Tabel Efeisiensi Bulanan PLTA Bakaru.....	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Saran.....	60
5.2 Kesimpulan.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 4.1 Peta Bendungan.....	38
Gambar 4.3 Topografi dan <i>Site Line</i>	40
Gambar 4.4 Peta Potensial Gempa Indonesia.....	44
Gambar 4.5 Panjang Tiap Segmen Pipa.....	46
Gambar 4.6 Tegangan Izin Material Berdasarkan ASME B31.1.....	52
Gambar 4.8 Standar Dimensi Pipa Berdasarkan ASME B36.10.....	54
Gambar 4.7 Rentang Tumpuan Pipa.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rentang kecepatan fluida di dalam pipa	14
Tabel 2.2 Nilai kekasaran relatif pipa dan diagram Moody tertera di.....	18
Tabel 2.3 Nilai dari koefisien material (γ) bisa ditentukan berdasarkan.....	34
Tabel 4.1 Data Bendungan.....	39
Tabel 4.2 Kelebihan dan Kekurangan Material.....	41
Tabel 4.3 Sifat Material ASTM A285 B.....	43
Tabel 4.4 Panjang Segmen Pipa.....	46
Tabel 4.5 Perhitungan <i>Head Loss Mayor</i>	47
Tabel 4.6 Perhitungan Head Loss Minor.....	48
Tabel 4.7 Perhitungan Total <i>Head Loss</i>	49
Tabel 4.8 Tekanan Maksimum Tiap Segmen.....	51
Tabel 4.9 Tekanan Desain tiap Segmen Pipa.....	51
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Tebal Pipa Pada Setiap Segmen.....	53
Tabel 4.11 Efisiensi Bulanan PLTA	59

NOMEKLATUR

Simbol	Keterangan	Satuan
Q	Debit fluida	m ³ /s
V	Kecepatan fluida di dalam pipa	m/s
A	Luas penampang pipa	m ²
Re	Bilangan Reynolds	
Di	Diameter-dalam pipa	m
v	Viskositas dinamik fluida	m ² /s
f	Faktor gesekan	
Hl mayor	Head loss mayor	m
l	Panjang pipa	m
g	percepatan gravitasi	m/s ²
ε	Kekasaran relatif pipa	m
Hl minor	Head loss minor	m
kl	Koefisien head loss minor	
P	Tekanan fluida	Pa
Z	Ketinggian fluida terhadap acuan	m
ρ	Massa jenis fluida	kg/m ³
m	Laju massa fluida	kg/s
a	Kecepatan gelombang tekanan	m/s
K	Modulus bulk fluida	N/m ²
E	Modulus elastisitas pipa	N/m ²
ΔP	Kenaikan tekanan	Pa
L	Jarak tumpuan pada pipa	M
σL	Tegangan longitudinal	Pa
y	Koefisien sifat material	
Do	Diameter-luar pipa	mm

W	Berat sistem perpipaan	N/m
t	Tebal pipa	mm
P	Tekanan desain internal	MPa

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemerintah telah mengeluarkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) seperti tertuang dalam Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2014. KEN mengamanatkan prosentase pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional minimal sebesar 23% pada 2025 dan menjadi 31% pada tahun 2050. Dengan target tersebut pengembangan EBT dapat dioptimalkan sekaligus dapat memanfaatkan energi yang ramah lingkungan dan mendukung pembangunan di daerah-daerah terpencil dan terisolasi. (Agus Sugiyono dkk, 2015)

Indonesia memiliki potensi besar dalam mengembangkan EBT, diantaranya energi bayu (angin) sebesar 950 Megawatt, tenaga surya sebesar 11 Gigawatt, tenaga air sebesar 75 Gigawatt, energi biomassa 32 Megawatt, biofuel sebesar 32 Megawatt, potensi energi laut sebesar 60 Gigawatt, dan panas bumi (Geothermal) yang diperkirakan memiliki potensi sebesar 29 Gigawatt. Pemanfaatan EBT hingga kini masih belum maksimal. Berdasarkan catatan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, bauran pemanfaatan sumber energi per 2015 masih dikuasai oleh energi fosil. Jika dilihat secara nasional, sumber energi dari minyak bumi masih menjadi tumpuan utama masyarakat Indonesia dengan persentase sebesar 47 persen. Disusul kemudian batu bara dan gas bumi masing-masing telah dimanfaatkan 24 persen. Sisanya, yaitu sebanyak lima persen, EBT menyumbang porsinya dalam bauran pemanfaatan energi nasional. Jika ditinjau, angka lima

persen pun tergolong sedikit lantaran hanya 59 juta setara barel minyak dalam setahun. (Kementerian ESDM, 2016)

Peran tenaga air dalam bauran energi primer pembangkit tenaga listrik pada tahun 2013 adalah sekitar 7,7%, dimana pada tahun tersebut total kapasitas terpasang mencapai 8.109 MW. Untuk mendorong percepatan pencapaian tingkat pemanfaatan energi air dan penciptaan iklim investasi yang kondusif dengan mendorong partisipasi swasta, maka Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi perlu menyempurnakan kebijakan yang dapat mampu menyaring badan usaha yang mempunyai kemampuan cukup untuk mengembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. (Kementerian ESDM, 2016)

Pembangkit tenaga air adalah sumber energi terbarukan yang memanfaatkan air dari ketinggian yang lebih tinggi ke ketinggian yang lebih rendah untuk menghasilkan tenaga. Pembangkit tenaga air merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang terbukti, dapat diprediksi, dan hemat biaya. Sistem tenaga air terdiri dari sumber air, sistem pengalihan / penyimpanan, sistem konduktor air (pipa pesat / penstock), pembangunan rumah pembangkit, peralatan pembangkit dan kontrol. Penstock adalah saluran atau terowongan yang menghubungkan reservoir / forebay ke turbin hidro yang bertempat di gedung pembangkit tenaga listrik untuk pembangkit listrik. Ini menahan tekanan hidrolik air di bawah statis sebagai serta kondisi dinamis. Ini berisi perangkat penutup (gerbang / katup) di awal (tepat setelah reservoir / forebay dan di ujung ekor sebelum turbin untuk mengontrol aliran masuk penstock. Bahan penstock mungkin baja ringan, kaca plastik bertulang

(GRP), beton semen bertulang (RCC), tongkat kayu, besi cor dan high density polyethylene (HDPE) dll. Namun, dalam kebanyakan kasus, baja ringan telah digunakan untuk penstock sejak lama karena penerapan yang lebih luas dan ketersediaan. Biaya penstock memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap total biaya pekerjaan sipil proyek pembangkit listrik tenaga air. Dengan mengoptimalkan diameter penstock, pembangkit energi maksimum dapat diperoleh dengan biaya minimum (M.K. Singhal dan Arun Kumar, 2015)

Pembangunan suatu pembangkit listrik tenaga mikro hidro melibatkan banyak aspek keilmuan agar menjamin setiap komponen bekerja secara optimum. Salah satu komponen dari PLTA yang cukup penting adalah pipa pesat atau yang lebih dikenal dengan penstock. Pipa pesat berfungsi untuk menyalurkan air dari bak penenang menuju ke turbin yang berada di rumah pembangkit. Agar pipa pesat bisa bekerja dengan optimal, perlu dilakukan perancangan yang meliputi aspek hidrolis dan mekanik. Pemilihan material dan diameter yang sesuai bisa mengurangi head loss yang terjadi pada pipa serta bisa meminimalkan biaya investasi. Penentuan tebal pipa serta menganalisis tegangan juga menjadi hal yang penting untuk memastikan keamanan suatu sistem pembangkit listrik tenaga air. (M.K. Singhal dan Arun Kumar, 2015)

Besarnya energi yang dapat dibangkitkan oleh PLTA ditentukan oleh head yaitu beda ketinggian antara bagian atas aliran air sebelum masuk pipa pesat dengan ketinggian air saat keluar pipa pesat dan ditentukan pula oleh debit aliran air yang mengalir melalui pipa pesat yang menggerakkan turbin. Debit aliran air dapat diatur sesuai dengan kebutuhan energi listrik yang diperlukan, namun kendalanya volume

air yang dapat ditampung oleh waduk terkadang tidak mencukupi untuk menghasilkan energi listrik yang dibutuhkan. Hal ini dapat disebabkan karena debit air yang masuk ke waduk berkurang, umumnya terjadi pada musim kemarau atau dapat pula disebabkan oleh pendangkalan yang terjadi pada waduk akibat sedimentasi sehingga tidak dapat menampung aliran air secara maksimal pada musim penghujan. (Mawar Said, 2013)

Faktor utama yang mempengaruhi produktifitas PLTA adalah debit dan head pada aliran tersebut. Dengan head tersebut berpotensi untuk dibangun PLTA. Faktor lainnya adalah ketersediaan bahan bangunan, mudahnya akses jalan dan beberapa faktor lainnya menjadikan daerah Kepung layak didirikan PLTMA yang kedepannya diharapkan dapat dimanfaatkan penduduk setempat.(Ma'ali, Nasrul 2017)

Beberapa tahun terakhir ini fungsi hidrologis DAS Mamasa bagian hulu cenderung menurun. Pertambahan luas keberhasilan upaya reboisasi dan rehabilitasi lahan tidak dapat mengimbangi pertambahan luas kerusakan lahan yang menjadi lahan kritis. Tingginya laju erosi dan sedimentasi dari daerah bagian hulu telah menyebabkan berkurangnya umur pakai berbagai bangunan pengendali sedimen karena telah penuh dengan sedimen.(Nurdin dan Asikin, 2007)

Dalam perancangan penstock harus didasarkan pada ketentuan standar yang ada agar dalam proses perancangan keamanan pipa dapat dijamin. Pada tugas akhir ini akan dilakukan perencanaan pembangunan Penstock PLTA guna menentukan dimensi untuk menyalurkan air dari bendungan menuju power house

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana merancang *penstock* yang optimum dan sesuai dengan standar/ketentuan yang berlaku untuk menyalurkan air dari bak penenang menuju turbin.?

1.3 Tujuan

Mendapatkan dimensi *penstock* yang optimum dan sesuai dengan standar/ketentuan yang berlaku yaitu ASME B31.1 untuk menyalurkan air dari bak penenang menuju turbin, berikut dimensi yang ditentukan :

1. Bagaimana menentukan diameter pipa?
2. Bagaimana menentukan tebal pipa?
3. Bagaimana menentukan dia rentang tumpuan?

1.4 Batasan Masalah

Perancangan pipa pesat pada tugas akhir ini terbatas pada masukan pipa setelah bak penenang hingga katup sebelum turbin pada power house.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat menambah ilmu pengetahuan tentang perencanaan *penstock* pembangkit listrik tenaga air

2. Dapat menjadi referensi bila ada penelitian serupa atau penelitian lebih lanjut mengenai tegangan pada sistem perpipaan.
3. Dapat dijadikan Evaluasi untuk desain sistem perpipaan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Apa sebenarnya Pembangkit Listrik Tenaga Air? Mengapa air dihubungkan dengan listrik atau mengapa listrik dihubungkan dengan air? Bukankah keduanya saling bersinggungan? Bukankah jika ada air, aliran listrik justru sangat berbahaya? Secara awam, itu memang benar. Ketika ada air menggenang kemudian di sekitarnya ada aliran listrik, hal tersebut akan sangat berbahaya. Bisa mengancam nyawa siapapun yang menyentuh air tersebut. Akan tetapi, ketika membicarakan Pembangkit Listrik Tenaga Air, penjelasan tentang air dan listrik tentu tidak akan sesederhana itu. Membicarakan air dan listrik dalam bahasan Pembangkit Listrik Tenaga Air memerlukan penjelasan yang lebih ilmiah. Sebuah penjelasan yang nantinya mengacu pada keilmuan.

Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah upaya membangkitkan daya listrik melalui tenaga yang dimiliki oleh air. Sederhananya, kemunculan listrik dipancing menggunakan air. Tentu saja dengan ilmu penerapan yang tidak sembarangan. Tenaga air yang digunakan dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah tenaga kinetik serta energi potensial yang dimiliki oleh air. Meskipun tergolong tenang, air ternyata memiliki tenaga yang cukup besar. Air bahkan bisa digunakan untuk membangkitkan energi listrik. Energi listrik yang berhasil dibangkitkan oleh tenaga air tersebut dikenal dengan istilah hidroelektrik.

Untuk mengakomodasi tenaga air yang besar tersebut, beberapa peralatan dan sistem pun diterapkan. Peralatan yang umum digunakan dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air tersebut adalah turbin. Turbin lah yang nantinya akan dikenai tenaga besar dari air sehingga mampu membangkitkan listrik. Turbin yang berguna dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air ini merupakan sebuah mesin. Mesin ini mendapatkan energi dari aliran fluida. Aliran fluida tersebut bisa untuk menggerakkan baling-baling yang ada di dalam mesin turbin. Baling-baling itulah yang berperan untuk menggerakkan rotor. Jadi, singkatnya Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah memanfaatkan kekuatan air untuk membangkitkan sumber energi listrik.

Meskipun pada umumnya sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air menggunakan turbin sebagai sarannya, tetapi ada juga Pembangkit Listrik Tenaga Air yang hanya memanfaatkan kekuatan yang dimiliki oleh ombak. Hal itu menyebabkan pembangunan bendungan atau waduk sama sekali tidak diperlukan. Di Indonesia, Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah salah satu upaya yang dilakukan untuk memenuhi seluruh kebutuhan pasokan listrik bagi masyarakat Indonesia. Upaya ini cukup cerdas untuk menyiasati keberadaan bahan bakar batu bara sebagai salah satu bahan utama dalam membangkitkan tenaga listrik.

Banyaknya persediaan air yang dimiliki oleh Negara Indonesia menjadi salah satu alasan yang paling mendasar mengapa sistem pembangkitan listrik melalui tenaga air ini didirikan. Oleh karena itu, tidak mengherankan jika Indonesia pada akhirnya memiliki beberapa waduk serta bendungan. Hal itu karena waduk serta bendungan adalah rangkaian sistem dari Pembangkit Listrik Tenaga Air.

Dengan upaya menciptakan Pembangkit Listrik Tenaga Air ini, kebutuhan masyarakat Indonesia terhadap listrik diharapkan mampu terpenuhi.

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air ini bukan satu-satunya sistem pembangkit listrik yang dikenali dan digunakan oleh seluruh masyarakat. Ada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap, sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir, dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel. Prinsip Kerja PLTA adalah sebagai berikut:

1. Aliran sungai dengan jumlah debit air sedemikian besar ditampung dalam waduk/bendungan, sampai mencapai ketinggian tertentu.
2. Kemudian masuk ke dalam pipa pesat (*penstock*), Untuk mengubah energi potensial menjadi energi kinetik. Pada ujung pipa dipasang katup utama (*Main Inlet Valve*).
3. Untuk mengalirkan air ke turbin, katup utama akan dibuka dengan syarat air sesudah dan sebelum MIV tekanannya sudah sama (*Bypass*) dan air pendingin (*Cooling water*) telah di alirkan. Air yang telah mempunyai tekanan dan kecepatan tinggi (energi kinetik) diubah menjadi energi mekanik dengan dialirkan melalui spiral case, kemudian air akan mendorong sudu-sudu turbin yang bukaan air masuk di atur oleh guide vane.
4. Pada turbin, gaya jatuh air yang mendorong sudu-sudu turbin menyebabkan turbin berputar. Turbin air kebanyakan seperti kincir angin, dengan menggantikan fungsi dorong angin untuk memutar baling-baling digantikan air

untuk memutar turbin. Selanjutnya turbin merubah energi kinetik yang disebabkan gaya jatuh air menjadi energi mekanik.

5. Generator dihubungkan dengan turbin melalui gigi-gigi putar sehingga ketika baling-baling turbin berputar maka generator ikut berputar. Generator selanjutnya merubah energi mekanik dari turbin menjadi energi elektrik. Listrik pada generator terjadi karena kumparan tembaga yang diberi inti besi digerakkan (diputar) dekat magnet. Bolak-baliknya kutub magnet akan menggerakkan elektron pada kumparan tembaga sehingga pada ujung-ujung kawat tembaga akan mengeluarkan listrik, yang kemudian menghasilkan tenaga listrik.
6. Air keluar melalui draft tube kemudian ke tail race, selanjutnya kembali ke sungai.
7. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh generator masih rendah, maka dari itu tegangan tersebut terlebih dahulu dinaikkan dengan trafo step up.
8. Untuk efisiensi penyaluran energi dari pembangkit ke pusat beban, tegangan tinggi tersebut kemudian diatur/dibagi di gardu induk. Dan selanjutnya disalurkan ke sistem tenaga listrik melalui kawat saluran tegangan tinggi, listrik kemudian dapat disalurkan.

2.2 Klasifikasi PLTA

1. Berdasarkan Tinggi Terjun PLTA

a. PLTA Jenis Terusan Air (*Water Way*)

Adalah pusat listrik yang mempunyai tempat ambil air (intake) di hulu sungai dan mengalirkan air ke hilir melalui terusan air dengan kemiringan (gradient) yang agak kecil. Tenaga listrik dibangkitkan dengan cara memanfaatkan tinggi terjun dan kemiringan sungai.

b. PLTA Jenis DAM /Bendungan

Adalah pembangkit listrik dengan bendungan yang melintang di sungai, pembuatan bendungan ini dimaksudkan untuk menaikkan permukaan air dibagian hulu sungai guna membangkitkan energi potensial yang lebih besar sebagai pembangkit listrik.

c. PLTA Jenis Terusan dan DAM (Campuran)

Adalah pusat listrik yang menggunakan gabungan dari dua jenis sebelumnya, jadi energi potensial yang diperoleh dari bendungan dan terusan.

2. Berdasarkan Aliran Sungai

a. PLTA Jenis Aliran Sungai Langsung (*Run of River*)

Banyak dipakai dalam PLTA saluran air/terusan, jenis ini membangkitkan listrik dengan memanfaatkan aliran sungai itu sendiri secara alamiah.

b. PLTA Dengan Kolam Pengatur (*Regulating Pond*)

Mengatur aliran sungai setiap hari atau setiap minggu dengan menggunakan kolam pengatur yang dibangun melintang sungai dan membangkitkan listrik sesuai dengan beban. Disamping itu juga dibangun kolam pengatur di hilir untuk dipakai pada waktu beban puncak (peaking power plant) dengan suatu waduk yang mempunyai kapasitas besar yang akan mengatur perubahan air pada waktu beban puncak sehingga energi yang dihasilkan lebih maksimal.

c. Pusat Listrik Jenis Waduk (*Reservoir*)

Dibuat dengan cara membangun suatu waduk yang melintang sungai, sehingga terbentuk seperti danau buatan, atau dapat dibuat dari danau asli sebagai penampung air hujan sebagai cadangan untuk musim kemarau.

d. PLTA Jenis Pompa (*Pumped Storage*)

PLTA yang memanfaatkan tenaga listrik yang berlebihan ketika musim hujan atau pada saat pemakaian tenaga listrik berkurang saat tengah malam, pada waktu ini sebagian turbin berfungsi sebagai pompa untuk memompa air yang di hilir ke hulu, jadi pembangkit ini memanfaatkan kembali air yang dipakai saat beban puncak dan dipompa ke atas lagi saat beban puncak terlewati.

2.3 Pipa Pesat

Pipa pesat atau yang dikenal dengan penstock merupakan pipa yang berfungsi untuk mengalirkan air dari bak penenang menuju turbin. Pipa pesat memiliki panjang yang bervariasi tergantung kepada karakteristik lokasi pembangunan PLTA. Untuk memperoleh kinerja yang optimum dari pipa pesat, 7

maka dalam pemilihan rute pipa pesat perlu memperhatikan beberapa faktor berikut yaitu:

1. **Accessibility** Pemilihan rute pipa pesat harus mempertimbangkan kemudahan dalam mengakses lokasi pipa tersebut. Kemudahan dalam mengakses tidak hanya untuk manusia tetapi juga untuk peralatan ketika melakukan instalasi, inspeksi dan perawatan.
2. **Kondisi Tanah** Kondisi tanah sepanjang pipa pesat harus dianalisis untuk mengidentifikasi batu-batuan pada tanah, tanah lunak atau tanah tidak stabil, dan karakteristik lainnya yang dapat merusak pipa atau dapat mengganggu instalasi pipa.
3. **Kemiringan** Sebuah PLTA memanfaatkan head dan debit dari aliran untuk menggerakkan turbin. Pemilihan rute pipa yang baik mampu memanfaatkan kemiringan tanah yang sudah ada sehingga head yang dibutuhkan bisa tercapai.
4. **Instalasi di atas dan di bawah tanah** Instalasi pipa di bawah dan di atas tanah memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pemilihan instalasi tergantung kepada kondisi lokasi dan material yang digunakan. Instalasi pipa di bawah tanah memberi keuntungan terhadap radiasi sinar ultraviolet dan perubahan cuaca yang terjadi terutama untuk pipa plastik. Selain itu, instalasi pipa di bawah tanah juga memberi keuntungan terhadap kerusakan fisik akibat benturan dengan benda di sekitar pipa. Disisi lain instalasi pipa di atas tanah membutuhkan biaya investasi yang lebih rendah. Instalasi pipa di atas tanah juga memberi kemudahan untuk melakukan inspeksi dan perawatan pada sistem pipa pesat.

5. Gangguan pada rute pipa pesat Pemilihan rute pipa pesat juga harus mempertimbangkan gangguan-gangguan yang mungkin terjadi sepanjang pipa baik itu dari alam maupun manusia. Gangguan tersebut termasuk pohon, bangunan, jalan raya, stream crossings, atau gangguan lain yang membutuhkan perhatian khusus. (Asryadi, Delfi.2019).

2.4 Analisis Hidrolik Pipa

Analisis hidrolik pada sistem pipa dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari fluida yang mengalir di dalam pipa. Karakteristik fluida yang diperhatikan adalah temperatur, kecepatan fluida dan debit. Analisis hidrolik yang dilakukan mencakup perhitungan diameter pipa berdasarkan kecepatan fluida yang direkomendasikan di dalam pipa, perhitungan head loss, dan tekanan sepanjang pipa. Dalam melakukan analisis hidrolik pada pipa menggunakan dasar-dasar mekanika fluida seperti persamaan energi, prinsip kontinuitas massa, dan jenis aliran.

1. Penentuan Diameter Pipa

Diameter pipa dapat ditentukan berdasarkan kecepatan dan debit aliran fluida yang melalui pipa tersebut. Kecepatan fluida di dalam pipa memiliki rentang tertentu tergantung kepada jenis fluida. Kecepatan fluida yang terlalu tinggi akan menyebabkan getaran yang tinggi dan kebisingan pada pipa. Selain itu, kecepatan yang terlalu tinggi juga meningkatkan head loss yang terjadi sepanjang pipa. Kecepatan pipa yang terlalu rendah juga akan mengakibatkan timbulnya endapan pada pipa. (Pudja, IGN Wiratmaja..2011)

Tabel 2.1 Rentang kecepatan fluida di dalam pipa[7]

Jenis Fluida	Kecepatan
Minyak Mentah	3 – 13
Gas	30 – 60
Lumpur	5 - 10
Uap Proses	100 – 150
Uap Air	100 – 130
Uap Air 2 Fasa	15 – 60
zAir	3 – 10
Fluida Cair	$100/p^{0.5}$

Untuk fluida cair, perhitungan diameter pipa yang dibutuhkan dihitung menggunakan persamaan debit aliran fluida di dalam pipa, yang dirumuskan
 Persamaan :

$$Q = V \cdot A$$

Keterangan :

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

$$V = \text{Kecepatan fluida di dalam pipa (m/s)}$$

$$A = \text{Luas penampang pipa (m}^2 \text{)}$$

Untuk luas penampang pipa bisa dirumuskan dengan Persamaan :

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4}; \text{ Dengan } D_i \text{ sebagai diameter-dalam pipa.}$$

Dari dua persamaan di atas maka diameter pipa yang dibutuhkan bisa dihitung dengan menggunakan Persamaan :

$$D_i = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

Diameter yang diperoleh dari hasil perhitungan harus disesuaikan dengan diameter pipa standar yang tersedia di pasaran. Diameter pipa yang tersedia di pasaran dinyatakan dengan NPS (Nominal Pipe Size) yang nilainya telah diatur oleh standar.

2. Perhitungan Head Loss

Setiap fluida yang mengalir di dalam pipa akan mengalami rugi-rugi head atau head loss. Head loss total merupakan penjumlahan dari head loss mayor dan head loss minor. Head loss mayor adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh gesekan fluida dengan pipa. Sedangkan head loss minor adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh adanya aksesoris pada pipa seperti belokan pada pipa, katup, reducer, dll.

Sebelum menghitung head loss mayor yang terjadi sepanjang pipa, jenis aliran fluida di dalam pipa harus diketahui dulu. Aliran fluida di dalam pipa bisa dibagi menjadi tiga jenis, yaitu aliran laminar, transisi, dan turbulen. Aliran laminar memiliki pola aliran yang seragam dan memiliki kecepatan relatif rendah. Aliran turbulen memiliki pola aliran yang acak dan kecepatan aliran yang tinggi. Sedangkan aliran transisi pola aliran berubah dari seragam menjadi acak. Jenis aliran bisa ditentukan dari bilangan Reynolds. Aliran laminar memiliki bilangan Reynolds kecil dari 2000, aliran transisi memiliki bilangan Reynolds antara 2000 dan 4000, sedangkan aliran turbulen memiliki bilangan Reynolds lebih besar dari 4000. Bilangan Reynolds sendiri adalah bilangan yang tak berdimensi yang

menyatakan rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskositas (Munshon, Bruce R. 2006). Bilangan Reynolds dapat dinyatakan dengan Persamaan :

$$Re = \frac{VD_i}{\nu}$$

Keterangan:

Re = Bilangan Reynolds

V = Kecepatan fluida di dalam pipa (m/s)

Di = Diameter-dalam pipa (m)

ν = Viskositas dinamik fluida (m²/s)

Setelah mengetahui jenis aliran fluida di dalam pipa, besar head loss mayor yang terjadi bisa di hitung menggunakan Persamaan

$$H_i \text{ mayor} = \frac{f l V^2}{2 D_i g}$$

Keterangan :

Hl mayor = Head loss mayor (m)

f = Faktor gesekan

l = Panjang pipa (m)

V = Kecepatan fluida di dalam pipa (m/s)

Di = Diameter-dalam pipa (m)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

Menentukan nilai faktor gesekan tergantung kepada jenis aliran fluida di dalam pipa. Untuk aliran laminar, nilai faktor gesekan hanya tergantung kepada bilangan Reynolds aliran. Nilai faktor gesekan untuk aliran laminar bisa dihitung menggunakan Persamaan :

$$f = \frac{Re}{64}$$

Untuk aliran turbulen, nilai faktor gesekan tergantung kepada bilangan Reynolds, kekasaran relatif pipa, dan diameter pipa. Ada dua cara untuk menghitung nilai faktor gesekan untuk aliran turbulen, yaitu menggunakan diagram Moody dan menggunakan persamaan Colebrook. Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, persamaan Colebrook lebih cocok digunakan. Akan tetapi, persamaan ini merupakan persamaan implisit sehingga perlu dilakukan beberapa kali iterasi untuk memperoleh nilai faktor gesekan. Sedangkan diagram Moody lebih mudah digunakan dan cepat, tetapi nilai faktor gesekan yang diperoleh tidak seakurat menggunakan persamaan Colebrook. Persamaan Colebrook dapat ditulis seperti

Persamaan :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \log \left(\frac{\epsilon/D_i}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Keterangan:

f = Faktor gesekan

ϵ = Kekasaran relatif pipa (m)

D_i = Diameter-dalam pipa (m)

Re = Bilangan Reynolds

Nilai kekasaran relatif pipa dan diagram Moody tertera di Tabel 2.2

Material	Nilai Kekerasan
Baja Rivet	0,9 – 9,0
Beton	0,3 – 3,0

Kayu	0,18 – 0,9
Besi Cor	0,26
Besi Galvanisasi	0,18
Besi Komersil	0,045
Plastik	0

Besar head loss minor pada pipa tergantung kepada jenis aksesoris pipa yang terpasang pada sistem perpipaan tersebut. Besar head loss tersebut dapat dihitung menggunakan :

$$H_{i\ minor} = \frac{K_1 V^2}{2g}$$

Keterangan:

Hl minor = Head loss minor (m)

kl = Koefisien head loss minor

V = Kecepatan fluida di dalam pipa (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

3. Tekanan Fluida di Dalam Pipa

Tekanan fluida di sepanjang pipa bisa diketahui dengan menggunakan persamaan energi. Persamaan energi dapat dirumuskan pada Persamaan :

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) - H = \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right)$$

Keterangan:

P = Tekanan fluida (Pa)

V = Kecepatan fluida di dalam pipa (m/s)

Z = Ketinggian fluida terhadap acuan (m)

H_l = Head loss total (m)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

Selain persamaan energi, aliran fluida di dalam pipa menganut prinsip kontinuitas massa, dimana laju aliran massa di dua titik berbeda di dalam pipa adalah sama. Prinsip kontinuitas massa dapat dirumuskan dengan Persamaan :

$$m_1 = m_2 \quad \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \text{ Keterangan:}$$

m = Laju massa fluida (kg/s)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

A = Luas penampang pipa (m^2)

V = Kecepatan fluida di dalam pipa (m/s)

Untuk fluida yang tak mampu mampat atau fluida incompressible, tidak terjadi perubahan massa jenis fluida di sepanjang pipa, sehingga $\rho_1 = \rho_2$. Air sebagai fluida kerja dalam tugas akhir ini diasumsikan sebagai fluida tak mampu mampat, sehingga persamaan kontinuitas massa bisa di tulis seperti Persamaan :

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Dari Persamaan ketika diameter sepanjang sistem perpipaan sama, maka luas penampang pipa juga akan sama. Sehingga, kecepatan fluida di sepanjang sistem perpipaan juga akan sama. Untuk pipa yang memiliki diameter sama sepanjang sistem perpipaan maka persamaan energi bisa ditulis seperti Persamaan:

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 \right) - H_1 = \left(\frac{P_2}{\rho g} + Z_2 \right)$$

2.5 Fenomena Water Hammer

Water hammer adalah fenomena dimana ada perubahan tekanan/momentum secara tiba-tiba yang terjadi pada fluida di saluran pipa akibat perubahan arah aliran atau fluida berhenti secara tiba-tiba. Secara umum, fenomena water hammer terjadi pada fluida incompressible tetapi dapat juga terjadi pada fluida compressible. Water hammer dapat menyebabkan kerugian pada sistem perpipaan, seperti rupture pada pipa, getaran dan kebisingan, defleksi pipa yang lebih besar, pembentukan uap kavitasi, dan kerugian ekonomi.

Pada sistem perpipaan, water hammer sering terjadi akibat penutupan katup tiba-tiba. Ketika katup ditutup, air yang berada di dekat katup menjadi berhenti. Air di dekat katup kemudian ditekan oleh air yang berada di bagian upstream yang masih mengalir. Penekanan tersebut menyebabkan tekanan lokal pada titik tersebut naik. Reaksi berantai terjadi sepanjang jalur pipa menghasilkan gelombang tekanan merambat sepanjang jalur pipa. Ketika gelombang tekanan mencapai reservoir, tekanan yang terjadi tidak dapat melebihi ketinggian air pada reservoir, sehingga gelombang tekanan berbalik menuju katup. Gelombang tekanan kembali berbalik setelah mencapai katup dan terjadi berulang-ulang. Gesekan pipa memiliki efek samping terhadap gelombang tekanan. Kecepatan gelombang tekanan dihitung menggunakan Persamaan :

$$a = \sqrt{\frac{K/P}{1 + \left(\frac{K}{E} \cdot \frac{D_i}{e}\right)}}$$

Keterangan:

a = Kecepatan gelombang tekanan (m/s)

K = Modulus bulk fluida (N/m^2)

E = Modulus elastisitas pipa (N/m^2)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

D_i = Diameter-dalam pipa (m)

e = Ketebalan pipa (m)

Dalam fenomena water hammer juga dikenal istilah waktu kritis, yaitu waktu yang dibutuhkan gelombang tekanan untuk merambat dari katup ke reservoir dan kembali ke katup.

Waktu kritis dapat dihitung menggunakan Persamaan :

$$t = \frac{2L}{a}$$

Keterangan:

t = Waktu kritis (s)

L = Panjang pipa (m)

a = Kecepatan gelombang tekanan (m/s)

Perhitungan kenaikan tekanan akibat fenomena water hammer tergantung kepada waktu penutupan katup. Penutupan katup dianggap bertahap jika waktu penutupan katup lebih besar daripada waktu kritis. Sebaliknya, penutupan katup dianggap tiba-tiba jika waktu penutupan katup lebih kecil daripada waktu kritis. Perubahan tekanan ketika penutupan katup dianggap bertahap dapat dihitung menggunakan Persamaan :

$$\Delta P = \frac{LV_0\rho}{t}$$

Keterangan:

ΔP = Kenaikan tekanan (Pa)

L = Panjang Pipa (m)

V_0 = Kecepatan fluida (m/s)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)

t = Waktu kritis (s)

Perubahan tekanan ketika penutupan katup dianggap tiba-tiba dapat dihitung menggunakan Persamaan :

$$\Delta P = aV_0\rho$$

Keterangan:

ΔP = Kenaikan tekanan (Pa)

a = Kecepatan gelombang tekanan (m/s)

V_0 = Kecepatan fluida (m/s)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)

2.5 Rentang Tumpuan pada Pipa

Sebuah sistem perpipaan yang konstruksinya dan operasinya berada di daratan memiliki dua cara instalasi, yaitu pipa di bawah tanah dan pipa di atas tanah. Kedua tipe ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pipa yang diinstalasi di bawah tanah akan terlindungi dari radiasi sinar ultraviolet dan kerusakan fisik akibat benturan dengan benda di sekitar pipa. Selain itu, pergerakan pipa di bawah tanah dibatasi oleh tanah yang menutupi pipa sehingga tidak memerlukan tumpuan atau support pada pipa. Untuk pipa yang diinstalasi di atas tanah, harus ditumpu atau diberi support untuk membatasi gerak pipa saat menerima beban.

Analisis rentang tumpuan pada pipa bertujuan untuk menentukan letak dan jarak optimum dari tumpuan di sepanjang pipa. Penentuan rentang tumpuan pada pipa dibatasi oleh bending stress pada pipa dan defleksi dalam arah vertikal pada pipa. Dalam melakukan analisis rentang tumpuan, pipa lurus dianggap sebagai beam dengan asumsi tumpuan simply support pada kedua ujung pipa.

Penentuan rentang tumpuan pada pipa berdasarkan bending stress yang diijinkan, dapat dihitung menggunakan Persamaan :

$$L = \sqrt{\frac{4ZS}{W}}$$

Keterangan:

L = Jarak tumpuan pada pipa (m)

Z = Section modulus (m³)

S = Tegangan ijin pipa (Pa)

W = Berat sistem perpipaan (N/m)

Penentuan rentang tumpuan pada pipa juga didasarkan pada defleksi dalam arah vertikal. Untuk menghitung jarak tumpuan berdasarkan defleksi dalam arah vertikal dihitung menggunakan Persamaan :

$$L = \sqrt[4]{\frac{76,8 E I \Delta}{W}}$$

Keterangan:

L = Jarak tumpuan pada pipa (m)

E = Modulus elastisitas pipa (Pa)

I = Inersia pipa (m⁴)

Δ = Defleksi dalam arah vertikal yang diijinkan (m)

W = Berat sistem perpipaan (N/m)

Setelah dilakukan perhitungan rentang tumpuan pada pipa, kemudian dipilih rentang tumpuan maksimum pada pipa. Agar sistem perpipaan aman, maka nilai yang paling kecil diantara kedua perhitungan dipilih sebagai rentang tumpuan maksimum pada pipa.

2.6 Beban pada Sistem Perpipaan

Dalam suatu sistem perpipaan menerima berbagai macam beban pada saat operasi. Setiap beban akan menghasilkan tegangan yang berbeda-beda pada sistem perpipaan tersebut. Oleh karena itu, sebelum menganalisis tegangan yang terjadi pada pipa perlu diketahui beban apa saja yang bekerja pada sistem perpipaan tersebut. Secara umum beban yang bekerja pada sistem perpipaan dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu beban sustain, beban occasional, dan beban ekspansi termal.

1. Beban Sustain

Beban sustain adalah beban yang bekerja secara terus menerus selama kondisi operasi. Beban sustain terdiri dari beban berat dan beban tekanan

a. Beban Berat

Beban berat adalah beban yang berasal dari berat sistem perpipaan itu sendiri. Mulai dari berat fluida yang mengalir, komponen, dan struktur pipa itu sendiri.

b. Beban Tekanan

Beban tekanan adalah beban yang berasal dari tekanan fluida yang mengalir di dalam pipa. Beban tekanan akan lebih berpengaruh pada tegangan pada dinding pipa.

2. Beban Occasional

Beban occasional adalah beban yang kadang-kadang terjadi pada sistem perpipaan dalam kondisi operasi normal. Periode beban yang terjadi berkisar antara 1-10% dari total periode operasi sistem. Beban occasional dapat berupa:

a. Beban angin

Beban angin yang diterima oleh sistem perpipaan tergantung dari kecepatan angin dan kondisi lokal dan bervariasi terhadap ketinggian. Sistem perpipaan dirancang agar mampu menahan beban angin maksimum yang terjadi sepanjang pipa.

b. Beban gempa

Dalam merancang sistem perpipaan diperlukan untuk menganalisis potensi gempa pada daerah tempat pipa dipasang.

c. Beban relief valve discharge

Relief valve berfungsi sebagai pelepasan tekanan saat tekanan sistem melebihi tekanan operasi yang diijinkan. Pada saat discharge terjadi kenaikan beban yang tiba-tiba.

3. Beban Ekspansi Termal

Beban ekspansi termal bisa dibagi menjadi tiga, yaitu:

- a. Beban ekspansi termal yang terjadi akibat pembatasan gerak dari pipa saat pipa mengalami ekspansi sehingga menimbulkan tegangan.
- b. Beban ekspansi termal yang terjadi akibat perbedaan temperatur yang besar dalam waktu yang sangat singkat dalam dinding pipa sehingga menimbulkan tegangan.
- c. Beban ekspansi termal yang terjadi akibat perbedaan koefisien ekspansi pipa yang terbuat dari dua material yang berbeda.

2.7 Tegangan-Tegangan Pada sistem perpipaan

Tegangan pada Sistem Perpipaan berdasarkan beban-beban yang diterima oleh pipa, maka akan menimbulkan tegangan-tegangan sebagai berikut. Analisa tegangan pada sistem perpipaan dilakukan untuk menjadin keamanan dari sistem tersebut dalam berbagai kondisi pembebanan, analisis dilakukan dengan memperhitungkan besaran-besaran yang diijinkan, seperti :

1. Tegangan Longitudinal

Tekanan fluida yang arahnya sejajar dengan sumbu pipa akan menghasilkan tegangan longitudinal pada pipa. Gambar menunjukkan tegangan longitudinal pada pipa akibat tekanan dalam dari fluida, dan untuk besar tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$\sigma_L = \frac{PD_o}{4t}$$

Keterangan :

σ_L = Tegangan longitudinal (Pa)

P = Tekanan dalam fluida (Pa)

D_o = Diameter-luar pipa (m)

t = Tebal pipa (m)

2. Tegangan Hoop

Tekanan fluida yang arahnya tegak lurus dengan sumbu pipa akan menghasilkan tegangan hoop pada pipa. Gambar menunjukkan tegangan hoop pada pipa akibat tekanan dalam dari fluida, dan untuk besar tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$\sigma_H = \frac{PD_o}{2t}$$

Keterangan:

σ_H = Tegangan hoop (Pa)

P = Tekanan dalam fluida (Pa)

D_o = Diameter-luar pipa (m)

t = Tebal pipa (m)

3. Tegangan Radial

Tegangan radial yang terjadi pada pipa diakibatkan oleh tekanan dalam dari fluida pada arah radial menuju dinding pipa. Gambar 2.6 menunjukkan tegangan radial pada pipa akibat tekanan dalam dari fluida, dan untuk besar tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$\sigma_R = \frac{P \left(r_i^2 \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} \right)}{r_o^2 - r_i^2}$$

Keterangan:

σ_R = Tegangan radial (Pa)

P = Tekanan dalam fluida (Pa)

r_o = Jari-jari luar pipa (m)

r_i = Jari-jari dalam pipa (m)

4. Tegangan Normal Akibat Gaya Aksial

Tegangan normal ini terjadi akibat adanya gaya tarik atau tekan yang arahnya sejajar dengan sumbu pipa. Gambar 2.7 menunjukkan tegangan normal akibat gaya aksial, dan untuk besar tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$\sigma_N = \frac{F_{AX}}{A}$$

Keterangan: σ_N = Tegangan normal akibat gaya aksial (Pa)

F_{AX} = Gaya aksial (N)

A = Luas penampang (m^2)

5. Tegangan Normal Akibat Momen Lentur

Momen lentur akibat beban-beban yang bekerja pada pipa akan menyebabkan tegangan normal pada pipa. Tegangan normal maksimum akan terjadi pada titik terjauh dari sumbu pipa. Gambar 2.8 menunjukkan tegangan normal akibat momen lentur, dan untuk besar tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$\sigma_B = \frac{M_B C}{I}$$

Keterangan: σ_B = Tegangan normal akibat momen lentur (Pa)

M_B = Momen lentur (Nm)

I = Inersia pipa (m^4)

C = Jarak sumbu netral ke titik yang akan dianalisis (m)

6. Tegangan Geser Akibat Gaya Geser

Gaya geser yang terjadi akibat beban-beban yang berkerja pada pipa akan menghasilkan tegangan geser pada pipa. Tegangan geser minimum terjadi di titik terjauh dari sumbu pipa. Gambar menunjukkan tegangan geser akibat gaya Gambar 2.8 Tegangan normal akibat momen lentur [9] geser, dan untuk besar tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$\tau V = \frac{VQ}{It}$$

Keterangan:

τV = Tegangan geser akibat gaya geser (Pa)

V = Gaya geser (N)

Q = Shear form factor (m³)

I = Inersia pipa (m⁴)

t = Tebal permukaan (m)

7. Tegangan Geser Akibat Momen Puntir

Momen puntir yang terjadi pada pipa akan mengakibatkan tegangan geser pada pipa. Besar tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.26) dan Gambar 2.10 menunjukkan tegangan geser akibat momen puntir yang terjadi pada pipa

$$\tau T = \frac{M_T C}{J}$$

Keterangan:

τT = Tegangan geser akibat momen punter (Pa)

MT = Momen puntir (Nm)

C = Jarak sumbu netral ke titik (m)

J = Inersia polar pipa (m⁴)

2.8 Kode Standar Sistem Perpipaan

Dalam perancangan dan produksi, dibutuhkan acuan untuk memastikan desain atau produk yang dihasilkan aman dan layak digunakan. Acuan tersebut diperoleh dari standar yang telah ditulis oleh ahli di bidangnya. Oleh karena itu dalam perancangan sistem perpipaan perlu mengikuti kode atau standar yang sesuai. Dalam pengerjaan tugas akhir ini menggunakan beberapa kode dan standar yaitu ASME B31.1 Power Piping (Pudja, IGN Wiratmaja. 2011).

2.9 Tegangan Ijin ASME B31.1

Berdasarkan ASME B31.1, ada tiga kriteria tegangan yang harus dipenuhi, yaitu kriteria tegangan akibat beban sustain, occasional, dan ekspansi termal.

1. Kriteria Tegangan Akibat Beban Sustain

Untuk tegangan akibat beban sustain, sistem perpipaan dikatakan aman apabila nilai seluruh tegangan longitudinal (S_L) tidak melebihi tegangan ijin material pada temperatur maksimum (S_h). Kriteria ini dapat dihitung berdasarkan Persamaan

$$S_L = \frac{PD_o}{4T_n} + \frac{0,75i M_A}{Z} \leq 1,0S_h$$

Keterangan:

S_L = Tegangan longitudinal (MPa)

P = Tekanan desain internal (MPa)

D_o = Diameter-luar pipa (mm)

t_n = Tebal nominal pipa (mm)

i = Faktor intensifikasi tegangan

M_A = Resultan momen pada penampang akibat beban sustain (Nmm)

Z = Section modulus (mm³)

S_h = Tegangan ijin material pada temperatur maksimum material (MPa)

2. Kriteria Tegangan Ijin Akibat Beban Occasional

Untuk kriteria tegangan ijin akibat beban occasional, sistem perpipaan akan dikatakan aman apabila tegangan longitudinal total akibat beban sustain (S_L) dan akibat beban occasional tidak melebihi tegangan ijin material pada temperatur maksimum (S_h) dikalikan dengan faktor durasinya (k). Kriteria tegangan akibat beban occasional dapat dihitung berdasarkan Persamaan

$$\frac{PD_o}{4T_n} + \frac{0,75i M_A}{Z} + \frac{0,75i M_B}{Z} \leq kS_h$$

Keterangan:

P = Tekanan desain internal (MPa)

DO = Diameter-luar pipa (mm)

t_n = Tebal nominal pipa (mm)

i = Faktor intensifikasi tegangan

M_A = Resultan momen pada penampang akibat beban sustain (Nmm)

M_B = Resultan momen pada penampang akibat beban occasional (Nmm)

Z = Section modulus (mm³)

S_h = Tegangan ijin material pada temperatur maksimum material (MPa)

k = Faktor durasi Faktor durasi bernilai 1,15

untuk beban occasional terjadi tidak lebih dari 8 jam untuk satu waktu. Faktor durasi bernilai 1,2 untuk beban occasional terjadi tidak lebih dari 1 jam untuk satu waktu.

3. Tegangan Ijin Akibat Beban Ekspansi Termal

Untuk kriteria tegangan ijin akibat beban ekspansi termal, sistem perpipaan akan dikatakan aman apabila tegangan akibat beban ekspansi (S_E) tidak melebihi tegangan ijin material (S_A) yang dihitung menggunakan persamaan. Kriteria tegangan akibat beban ekspansi termal dapat dihitung berdasarkan Persamaan.

$$S_E = \frac{0,75i M_C}{Z} \leq S_A$$

$$S_A = f(1,25S_C + 0,25S_h)$$

Keterangan:

S_E = Tegangan akibat beban ekspansi termal

(MPa) i = Faktor intensifikasi tegangan

M_C = Resultan momen pada penampang akibat beban Ekspansi Termal (Nmm)

Z = Section modulus (mm³)

S_A = Tegangan ijin material akibat beban ekspansi termal (MPa)

S_C = Tegangan ijin material pada temperatur minimum material (MPa)

S_h = Tegangan ijin material pada temperatur maksimum material (MPa)

f = Faktor reduksi tegangan

2.10 Penentuan Tebal Pipa

Tebal pipa dirancang agar mampu menahan beban dari tekanan fluida yang mengalir di dalam pipa. Berdasarkan ASME B31.1, perhitungan tebal pipa minimum dapat dihitung menggunakan Persamaan :

$$t_m = \frac{PD_0}{2(SE + Py)} + A$$

sedangkan tebal pipa yang dibutuhkan dihitung menggunakan Persamaan :

$$t_{req} = \frac{t_m}{(1 - MT/100)}$$

Keterangan :

t_m = Tebal pipa minimum (mm)

t_{req} = Tebal pipa yang dibutuhkan (mm)

P = Tekanan desain, psig (MPa)

D_o = Diameter-luar pipa, in (mm)

S = Tegangan ijin material (MPa)

E = Efisiensi sambungan

y = Koefisien sifat material

A = Tambahan tebal pipa akibat korosi dan faktor mekanik (mm)

MT = Toleransi manufaktur pipa (%)

Nilai dari koefisien material (y) bisa ditentukan berdasarkan **Tabel 2.3**

Temperature (°C)	Di bawah 482	510	538	566	593	621	649	Di atas 677
Baja feritik	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Baja austenik	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7
Nickel Alloys UNS Nos NO6617, NO8800, NO8810, NO885	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7