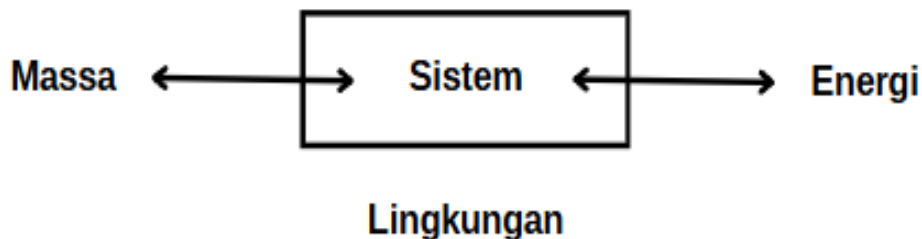


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Hukum Termodinamika

Termodinamika adalah cabang ilmu yang mempelajari hubungan antara energi panas (*heat*) dengan bentuk energi lainnya seperti energi kinetik, energi potensial, panas, energi kimia, energi nuklir, energi listrik, energi mekanik, dsb. Termodinamika didasarkan pada dua hukum termodinamika, yaitu hukum termodinamika I dan termodinamika II. Pembahasan termodinamika dibatasi pada suatu batasan yang disebut sistem. Sistem merupakan bagian tertentu dari alam semesta yang dibatasi oleh suatu bidang batas yang nyata maupun tidak nyata dari daerah di luar sistem. Daerah di luar sistem disebut lingkungan. Perpindahan massa zat dan perpindahan energi dapat terjadi dalam sistem termodinamika. Perpindahan tersebut dapat berlangsung dari dalam sistem ke lingkungan atau sebaliknya. Energi maupun massa zat-zat dapat melewati bidang batas ini, baik dari lingkungan ke sistem maupun dari sistem ke lingkungan. Perpindahan energi dari sistem panas (*heat*) atau kerja. Dalam beberapa kasus, untuk memecahkan permasalahan termodinamika dapat menggunakan sistem ideal. Sebagai contoh, sistem yang berupa gas didasarkan pada sifat-sifat gas yang ideal (Syamsir *et al.*, 1999).



Gambar 2. 1 Perpindahan massa dan energi dalam sistem termodinamika

Konservasi energi adalah upaya yang dilakukan untuk dapat meningkatkan efisiensi energi. Hukum termodinamika 1 merupakan sumber dari perhitungan efisiensi energi tanpa mempertimbangkan kualitas dari energi (Intang, 2015). Hukum ini berbunyi: “Kalor dan kerja mekanik adalah bisa saling tukar”. Sesuai dengan hukum ini, maka sejumlah kerja mekanik dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah kalor, dan sebaliknya. Hukum ini bisa juga dinyatakan sebagai: “Energi tidak bisa dibuat atau dimusnahkan, namun bisa dirubah dari satu bentuk ke

bentuk lainnya”. Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh kalor mesti sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur (Shapiro, 2006). Persamaan yang digunakan untuk perhitungan termodinamika adalah hukum kesetimbangan energi dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan 2.2.

$$E_{in} = E_{out} \quad (2.1)$$

$$Q_{in} + W_{in} + \sum \dot{m}_{in}(h_{in}) = Q_{out} + W_{out} + \sum \dot{m}_{out}(h_{out}) \quad (2.2)$$

Keterangan:

Q : kalor yang dipindahkan

W : kerja yang dilakukan dalam satuan kalor

$\dot{m}$  : lajur aliran massa

h : entalpi

Pernyataan dari hukum pertama Termodinamika yaitu “energi tidak bisa dibuat atau dimusnahkan, namun bisa dirubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya”. Dari hukum pertama ini bisa disimpulkan bahwa kerja eksternal yang dilakukan sama dengan energi yang diberikan oleh kalor ditambah dengan kenaikan temperatur yang menghasilkan energi dalam. Sistem, volume dan suhu sistem akan bertambah jika kalor diberikan, sebaliknya sistem, volume dan suhu akan berkurang jika kalor diambil. Berikut merupakan persamaan dari Hukum 1 Termodinamika:

$$Q = W + \Delta U \quad (2.3)$$

Dimana:

Q = kalor (J)

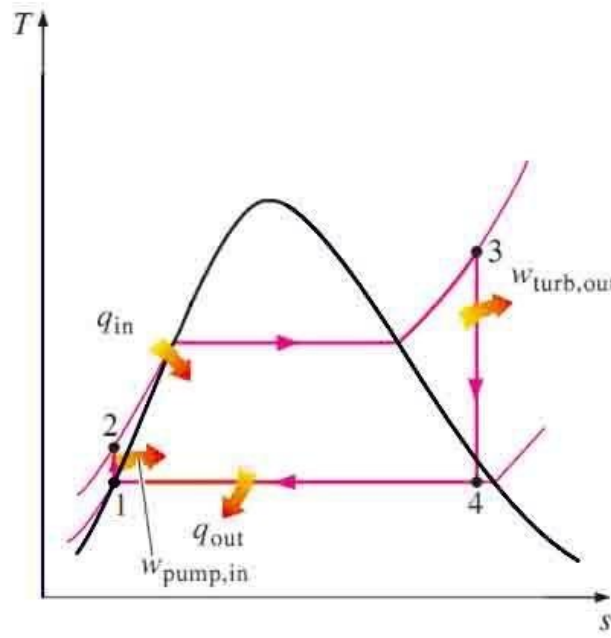
W = usaha (J)

$\Delta U$  = perubahan energi dalam (J)

Persamaan 2.3 berlaku jika sistem melakukan kerja dan menyerap kalor pada lingkungannya. Hukum kedua Termodinamika memiliki 2 pernyataan dari Clausius dan Kelvin-Planck. Pernyataan hukum kedua Termodinamika berdasarkan Clausius adalah tidak mungkin bagi sistem apapun untuk beroperasi sedemikian rupa sehingga hasil tunggalnya akan berupa suatu perpindahan energi dalam bentuk kalor dari benda yang lebih dingin ke benda yang lebih panas. Sedangkan pernyataan berdasarkan Kevin-Planck yaitu adalah tidak mungkin untuk sistem apapun dapat beroperasi dalam siklus termodinamika dan memberikan sejumlah kerja netto

kesekelilingnya sementara menerima energi melalui perpindahan kalor dari suatu reservoir termal tunggal (Moran, 2006). Jadi dari kedua pernyataan diatas dapat disimpulkan bahwa tidak mungkin membuat sebuah sistem bekerja dalam suatu siklus untuk mengubah energi panas seluruhnya menjadi kerja atau dengan kata lain memiliki efisiensi termal 100% (Dincer, 2007).

Penurunan tekanan secara fraksional tidak akan terjadi di dalam kondensor jika fluida kerja mengalir melalui berbagai komponen dari sebuah siklus tenaga uap sederhana tanpa ireversibilitas serta fluida kerja akan mengalir melalui komponen-komponen tersebut dengan tekanan yang konstan. Jadi, dengan tidak adanya ireversibilitas dan perpindahan kalor dengan lingkungan sekitar, proses yang terjadi pada turbin dan pompa adalah isentropik (Moran, 2006).



Gambar 2. 2 Siklus Rankine Ideal (Laila, 2019)

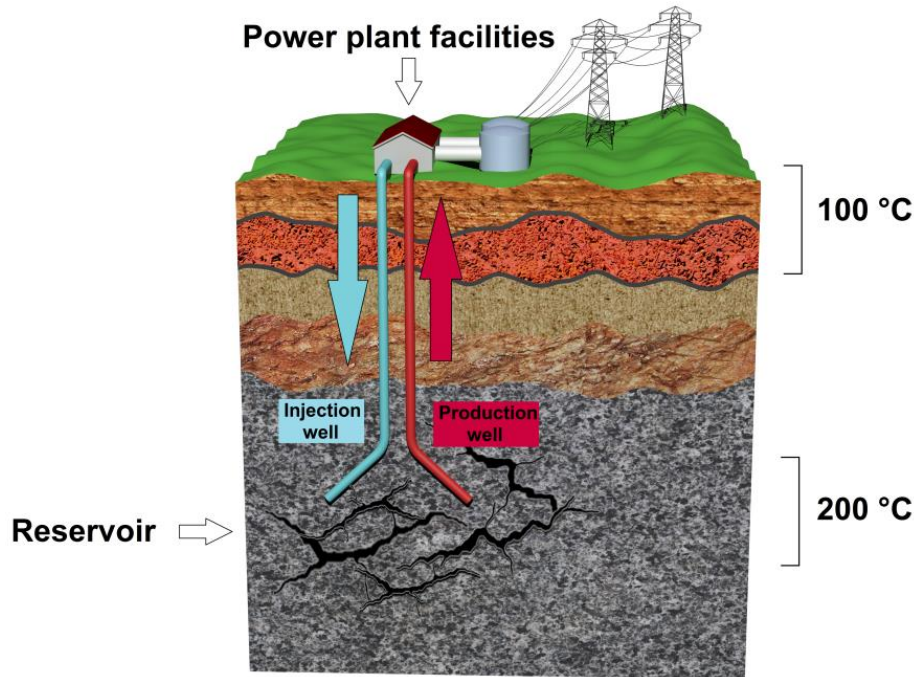
Pada gambar 2. 2 terdapat beberapa proses yang terjadi pada setiap tingkat keadaan siklus Rankine ideal. Berikut keterangan proses siklus Rankine ideal:

- Proses 1 – 2: Merupakan kompresi isentropis pada pompa.
- Proses 2 – 3: Pemanasan isobarik pada boiler.
- Proses 3 – 4: Ekspansi isentropis di dalam turbin.
- Proses 4 – 1: Proses pengembunan pada condenser dengan tekanan dan temperatur konstan.

## **2.2.Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi**

Pembangkit listrik tenaga panas bumi merupakan pembangkit listrik yang bekerja dengan memanfaatkan energi panas bumi (geothermal). Energi geothermal adalah sumber energi panas dari dalam perut bumi yang tidak ada habisnya dalam skala waktu manusia (Mazaya & Kurniawan, 2022). Energi panas bumi dihasilkan dan di simpan di bawah permukaan bumi melalui dua proses yaitu dengan radiasi matahari dan radioaktivitas natural di inti bumi (Magdy et al., 2025). Radioaktivitas di inti bumi merupakan sumber utama yang menghasilkan panas internal bumi, yang dimanfaatkan dalam pembangkit listrik tenaga panas bumi. Panas ini terperangkap dalam reservoir geothermal berupa uap atau air panas yang tersimpan di bawah lapisan batuan, dan digunakan untuk menghasilkan energi listrik (Major et al., 2018). Air panas ini dapat digunakan sebagai sumber energi yang hampir gratis, baik secara langsung sebagai air panas, uap atau panas, atau sebagai sarana pembangkit listrik (Igwe, 2024). Air terkadang dapat diperoleh dengan pengeboran jika air tidak mengalir secara alami ke permukaan bumi karena lapisan batuan panas di bawah kerak bumi yang sering mengandung kantong air (Chijindu Ikechukwu, n.d., 2021).

Energi panas bumi digunakan sebagai pembangkit listrik dan berpotensi untuk menjadi sumber daya terbarukan (Moore and Holländer, 2021). Tenaga panas bumi hemat biaya, andal, berkelanjutan, dan ramah lingkungan (Glassley, 2010), tetapi secara historis terbatas pada wilayah dekat batas lempeng tektonik. Kemajuan teknologi terkini telah memperluas jangkauan dan ukuran sumber daya yang layak secara drastis, terutama untuk aplikasi seperti pemanas rumah, sehingga membuka potensi eksploitasi yang meluas. Sumur panas bumi melepaskan gas rumah kaca yang terperangkap jauh di dalam bumi, tetapi emisi ini jauh lebih rendah per unit energi dibandingkan dengan bahan bakar fosil.



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Panas dapat diekstraksi pada berbagai tingkat. Untuk menjamin penggunaan energi panas bumi yang berkelanjutan, tingkat konsumsi tidak boleh melebihi tingkat pembangkitan, sehingga panas yang dikeluarkan dari sumber daya diganti pada skala waktu yang sama. Pembangkit listrik tenaga panas bumi biasanya berkembang di bawah tingkat produksi energi tertentu. Panas bumi biasanya menyediakan pembangkitan beban dasar, karena umumnya kebal terhadap cuaca dan variasi musiman, oleh karena itu menghasilkan hampir secara konstan dan membedakannya dari beberapa teknologi terbarukan lainnya yang menghasilkan daya atau panas variabel seiring waktu (Manzella, 2017). Proses ekstraksi energi panas bumi secara sederhana sebagai berikut :

- Air panas bertekanan tinggi dipompa dari bawah tanah melalui sumur
- Saat air mencapai permukaan, tekanan turun, menyebabkan air berubah menjadi uap
- Uap memutar turbin yang terhubung ke generator yang menghasilkan listrik
- Uap mendingin di menara pendingin dan mengembun kembali menjadi air
- Air yang didinginkan dipompa kembali ke bumi untuk memulai siklus baru.

Indonesia telah melakukan eksplorasi sumber energi panas bumi sejak tahun 1918 di kawasan kawah Kamojang. Upaya eksplorasi dimulai dengan melakukan survey di wilayah Indonesia, survey tersebut dilakukan oleh Direktorat Vulkanologi dan Pertamina, Pemerintah Prancis dan

Selandia Baru. Hasil survey tersebut dilaporkan bahwa Indonesia memiliki 217 wilayah potensi panas bumi (Masdi, 2014)

Sistem pengumpulan uap (steam gathering system) dalam pembangkit listrik tenaga panas bumi merupakan jaringan pipa dan peralatan yang digunakan untuk mengalirkan uap atau fluida panas bumi dari sumur produksi ke pembangkit Listrik (Garcia-Gutierrez et al., 2014). Sistem ini merupakan komponen kritis dalam memanfaatkan energi panas bumi untuk menghasilkan Listrik (Barasa Kabeyi and Olanrewaju, 2022). Prosesnya dimulai dengan pengeboran sumur produksi untuk mengekstraksi fluida panas bumi, yang dapat berupa campuran air panas dan uap. Fluida ini kemudian dipisahkan dalam separator untuk memisahkan uap dari air panas. Uap yang dihasilkan selanjutnya dialirkan melalui jaringan pipa ke turbin di pembangkit listrik, di mana energi kinetiknya diubah menjadi energi mekanik untuk memutar generator dan menghasilkan listrik.

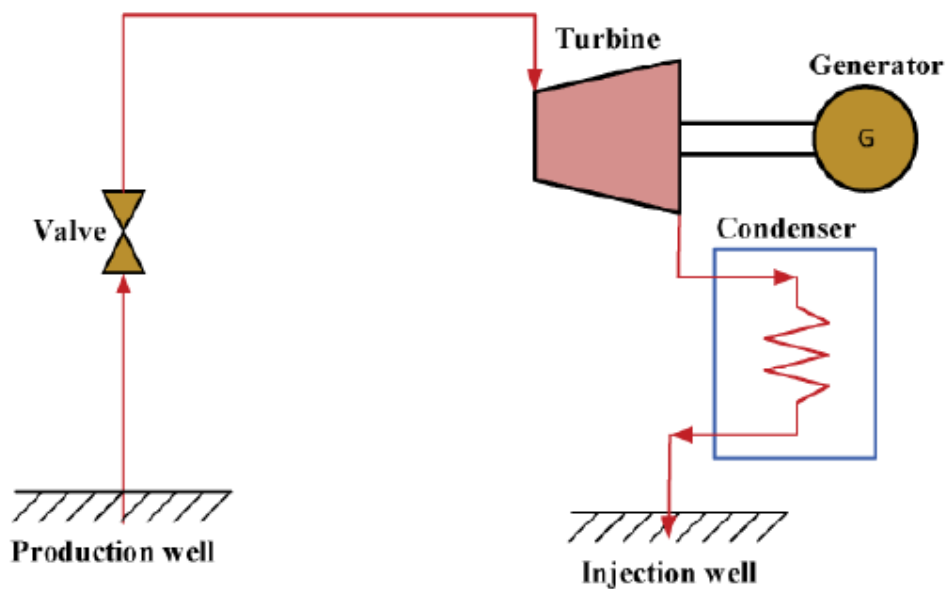
Jaringan pipa dalam sistem ini dirancang untuk menahan tekanan dan suhu tinggi, serta dilengkapi dengan isolasi termal untuk mengurangi kehilangan panas selama transportasi (Barasa Kabeyi and Olanrewaju, 2022). Sistem pengumpulan uap juga mencakup sumur injeksi yang berfungsi mengembalikan air panas sisa ke dalam reservoir panas bumi, menjaga keberlanjutan sumber daya. Pengaturan ini tidak hanya memastikan operasi yang efisien tetapi juga mendukung kelestarian lingkungan dengan mengurangi emisi gas rumah kaca. Sistem pengumpulan uap yang dirancang dengan baik memainkan peran kunci dalam keberhasilan pembangkit listrik tenaga panas bumi, memastikan pengangkutan energi yang aman, efisien, dan berkelanjutan dari sumber alam ke jaringan listrik (Onyango, 2015).

### **2.3. Teknologi Pembangkit Panas Bumi**

Pembangkit yang digunakan untuk meng-konversi fluida *geothermal* menjadi tenaga listrik secara umum mempunyai komponen yang sama dengan *power plants* lain yang bukan berbasis geothermal, yaitu terdiri dari generator, turbin sebagai penggerak generator, *heat exchanger*, *chiller*, pompa, dan sebagainya. Saat ini terdapat tiga macam teknologi pembangkit panas bumi (geothermal power plants) yang dapat mengkonversi panas bumi menjadi sumber daya listrik yaitu: *dry steam*, *flash steam* dan *binary cycle*. Ketiga macam teknologi ini pada dasarnya digunakan pada kondisi yang berbeda-beda.

### 2.3.1. Dry Steam Power Plants

Pembangkit listrik uap kering atau *Dry Steam Plants* merupakan jenis pembangkit listrik geotermal yang menggunakan uap langsung dari reservoir geotermal untuk menghasilkan energi listrik (Barasa Kabeyi and Olanrewaju, 2022). Prosesnya melibatkan pengambilan uap dari sumur bawah tanah, yang kemudian diarahkan ke turbin untuk menggerakkan generator. Keunikan pembangkit ini terletak pada pemanfaatan fluida hidrotermal yang hampir seluruhnya berupa uap, sehingga tidak memerlukan tambahan air atau fluida lain. Uap tersebut dialirkan langsung dari sumber bawah tanah ke pembangkit, menjadikannya salah satu metode produksi energi geotermal tertua dan paling efisien.



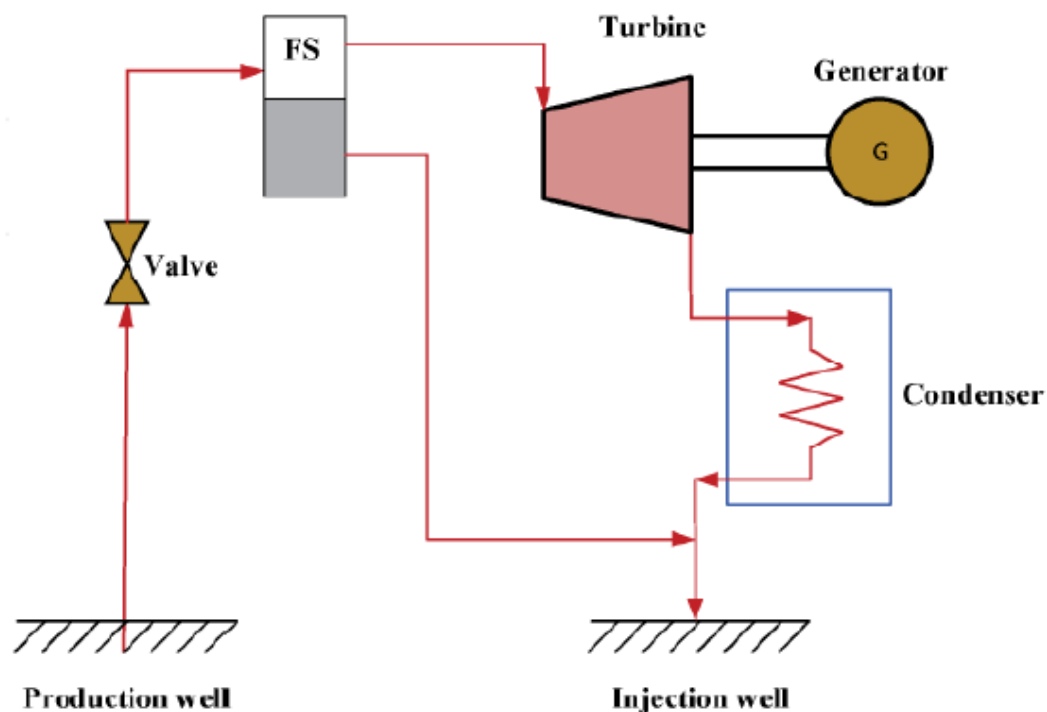
Gambar 2. 4. *Dry Steam power Plant* (Yusupov & Almaktar, 2021)

Pembangkit tipe tertua ini pertama kali digunakan di Lardarello, Italia, pada 1904 dimana saat ini masih berfungsi dengan baik di Amerika Serikat pun *dry steam power* masih digunakan seperti yang ada di Geysers, California Utara. Pengembangan pembangkit listrik tenaga uap kering di Indonesia semakin menjadi sorotan sebagai solusi untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat. Beberapa wilayah di Indonesia, khususnya daerah dengan potensi geotermal tinggi seperti Jawa dan Sumatra, telah mulai dimanfaatkan untuk pembangunan pembangkit ini seperti WKP Kamojang dan Drajat Jawa Barat (Pambudi, 2018). Berdasarkan penelitian yang diterbitkan dalam Jurnal Energi dan Lingkungan (2018), sumber daya geotermal di Indonesia memiliki potensi hingga 28,5 Giga Watt, menunjukkan peluang besar untuk pengembangan energi

terbarukan. Namun, tantangan yang dihadapi dalam pengembangan pembangkit ini mencakup kebutuhan investasi awal yang besar serta penerapan teknologi yang tepat untuk mengoptimalkan efisiensi.

### 2.3.2. *Single Flash Steam Power Plants*

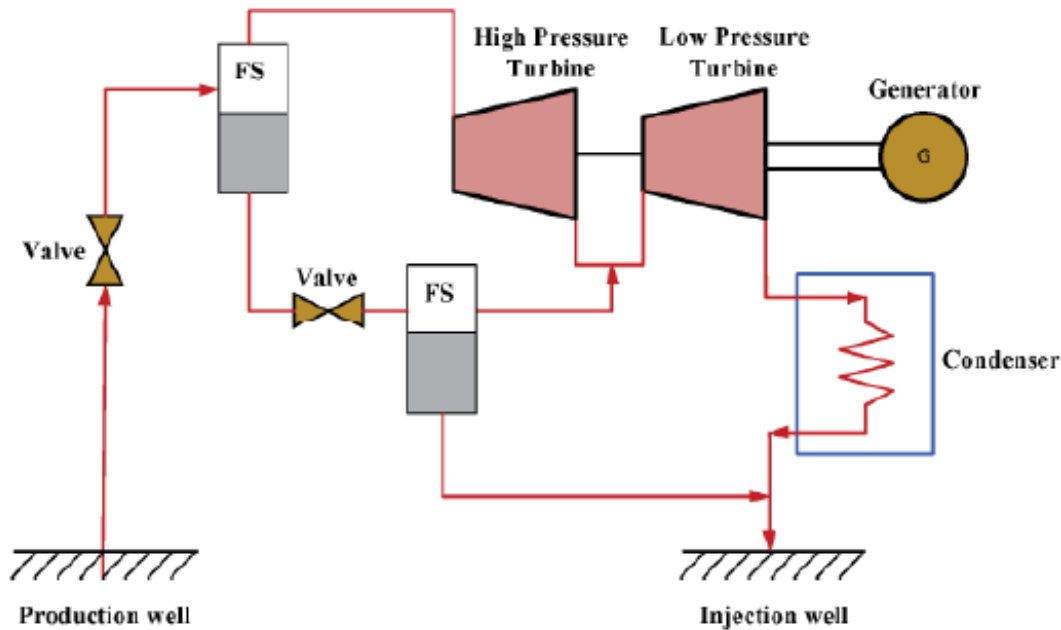
Sistem *single flash* ini hanya menggunakan satu tingkat *flash tank* atau biasa disebut dengan separator yang berfungsi untuk memisahkan kandungan air yang ada pada uap. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat uap dari sumur produksi dialirkan menuju turbin melalui valve sebagai pengatur tekanan dan juga aliran uap dan juga melalui separator. Setelah itu kandungan air dipisahkan dari uap didalam separator dengan cara menurunkan tekanan uap. Dikarenakan adanya penurunan tekanan uap dari sumur produksi ini jenis turbin yang digunakan biasanya adalah jenis turbin tekanan rendah (*low pressure turbine*). Contoh dari *Flash Steam Power Plants* adalah Cal-Energy Navy I flash geothermal power plants di Coso Geothermal field, California, USA. Sedangkan di Indonesia sendiri yang menggunakan teknologi ini banyak tersebar di pulau Jawa, Sumatera dan Sulawesi seperti: PLTP Star Energy Wayang Windu, Gunung Salak Jawa Barat, PLTP Ulubelu, Lumut Balai milik Pertamina Geothermal Energy Tbk. Di Sumatera Utara, PLTP Lahendong dan Kotamobago Sulawesi.



Gambar 2. 5. *Flash Steam power Plant* (Yusupov & Almaktar, 2021)

### 2.3.3. Double Flash System

Sistem *double flash* sistem hampir sama dengan prinsip kerja *single flash*, perbedaannya terletak pada proses *flashing* uap dengan menggunakan 2 tingkat *flash tank* atau menggunakan dua separator untuk memisahkan air yang terbawa pada uap.



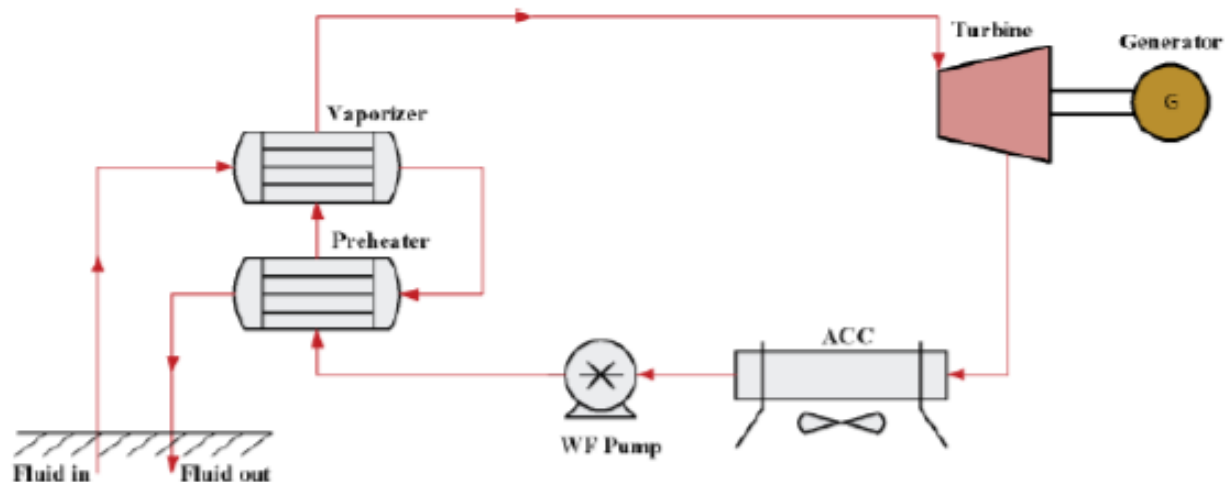
Gambar 2. 6. *Double Flash System* (Yusupov & Almaktar, 2021)

Dari Gambar 2.6 diketahui uap dari sumur produksi dialirkan melalui *valve* sebagai pengatur tekanan dan juga aliran uap. Setelah itu proses pemisahan uap dan air terjadi pada flash tank pertama, dan uap yang bertekanan dialirkan menuju turbin tekanan tinggi (*high pressure turbine*) dan uap keluaran yang masih cukup memiliki energi (tekanan) dialirkan menuju turbin tekanan rendah. Biasanya pada sistem ini uap dari sumur memiliki karakteristik tekanan yang cukup tinggi. Selanjutnya air yang dipisahkan pada flash tank pertama yang masih memiliki cukup tekanan untuk dimanfaatkan pada turbin tekanan rendah, dialirkan menuju flash tank kedua untuk dipisahkan kandungan air yang terbawa pada uap, sehingga uap yang akan masuk kedalam turbin tekanan rendah sudah benar-benar uap kering.

### 2.3.4. Binary Cycle Power Plants (BCPP)

BCPP menggunakan teknologi yang berbeda dengan teknologi sebelumnya yaitu *dry steam*, *Single flash steam* dan *Double flash System GPP*. Pada BCPP air panas atau uap panas yang berasal dari sumur produksi (*production well*) tidak pernah menyentuh turbin. Air panas bumi

digunakan untuk memanaskan apa yang disebut dengan *working fluid* pada *heat exchanger*. *Working fluid* kemudian menjadi panas dan menghasilkan uap berupa *flash*. Uap yang dihasilkan di *heat exchanger* tadi lalu dialirkan untuk memutar turbin dan selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan sumber daya listrik. Uap panas yang dihasilkan di *heat exchanger* inilah yang disebut sebagai *secondary (binary) fluid*. *Binary Cycle Power Plants* ini sebetulnya merupakan sistem tertutup. Jadi tidak ada yang dilepas ke atmosfer. Keunggulan dari BCPP ialah dapat dioperasikan pada suhu rendah yaitu 90-175°C. Contoh penerapan teknologi tipe BCPP ini ada di Mammoth Pacific Binary Geo-thermal Power Plants di Casa Diablo geothermal field, USA. Indonesia sendiri mempunyai PLTP Binary Cycle di Tomohon Sulawesi Utara 500 kW milik PT Pertamina Geothermal Energy Tbk., dan Sarulla milik PT Sarulla Sumatera Utara.



Gambar 2. 7. *Binary Cycle power Plant* (Yusupov & Almaktar, 2021)

#### 2.4. Kondisi Eksisting Pembangunan PLTP XYZ Unit-X4

PLTP PT XYZ merupakan PLTP tertua di Indonesia dengan kapasitas terpasang 230 MW, oleh karena itu penulis tertarik untuk menganalisa apakah telah terjadi penurunan kapasitas atau tidak sampai sekarang, Penelitian tersebut penulis batasi pada PLTP Unit-X4 yang merupakan total project pertama kali PT XYZ. PLTP XYZ Unit-X4 komersial pada tahun 2008 dengan pasokan uap memakai delapan sumur produksi dan mampu membangkitkan di 60,854 MW Netto. Yang listriknya di jual single buyer ke PLN melalui kontrak Perjanjian Jual Beli Listrik (PJBL).

Tahun 2000 PT XYZ melakukan pemboran untuk sumur make up K-3X untuk menyuplai PLTP Unit-X4 dan tahun 2015 melakukan pemboran kembali untuk sumur make up K-2X & 1X dan menambah supply uap dari K 9X dan 8X untuk mempertahankan produksinya.

Sifat alamiah geothermal adalah terjadinya penurunan baik tekanan, temperatur ataupun flow uap, dimana penurunan tekanan, temperatur dan flow uap berdasarkan waktu dapat dilihat pada Tabel 2.1 selama periode operasi tahun 2008 sampai dengan tahun 2023, kondisi pengoperasian PLTP Unit-X4 pada awal *commisioning* dapat dilihat pada tabel berikut ini;

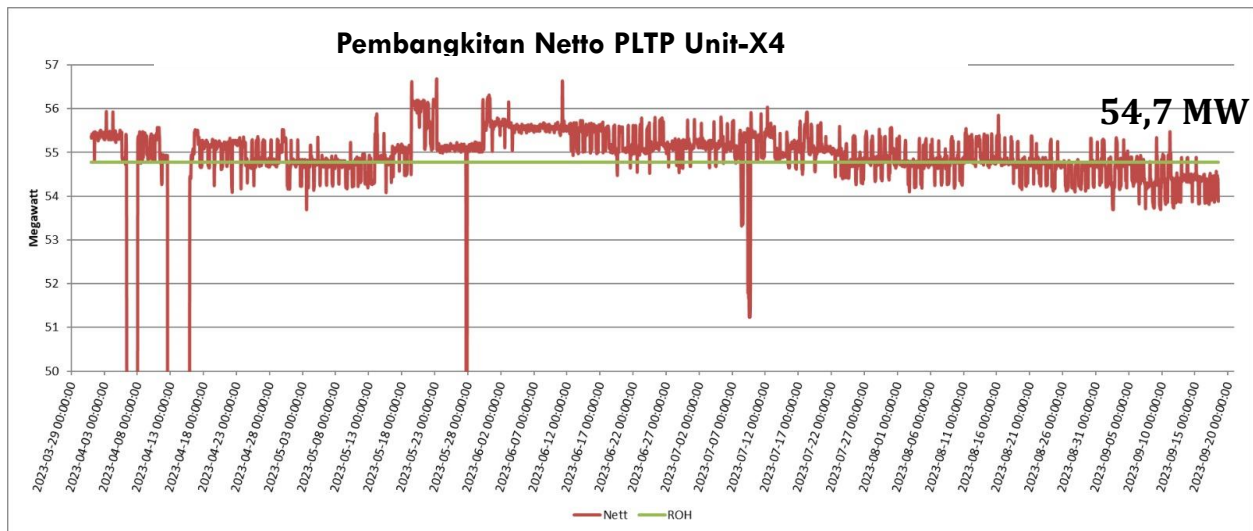
Tabel 2. 1 kondisi operasi tahun 2008

| SGS    |        |                                   | PIPE HEADER         |        |        |                                                         |                                            |        |                                                                                              |
|--------|--------|-----------------------------------|---------------------|--------|--------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| TKS    | P Line | Delta Pressure<br>TKS VS<br>PLine | Upstream PCV Header |        |        | Delta Pressure<br>Upstream<br>PCV<br>Header VS<br>PLine | Downstream<br>PCV Header<br>After Scrubber |        | Delta Pressure<br>Upstream<br>PCV Header<br>VS<br>Downstream<br>PCV Header<br>After Scrubber |
|        |        |                                   | Flow<br>FI151       | PU151  | TT151  |                                                         |                                            |        |                                                                                              |
| (Barg) | (Barg) | (Barg)                            | (m3/hr)             | (Barg) | (°C)   | (Barg)                                                  | (Barg)                                     | (°C)   |                                                                                              |
| 18,05  | 13,33  | 3,43                              | 428,13              | 11,81  | 193,02 | 1,52                                                    | 9,96                                       | 186,23 | 1,85                                                                                         |

Tabel 2. 2 kondisi operasi tahun 2023

| SGS    |        |                                   | PIPE HEADER         |        |        |                                                         |                                            |        |                                                                                              |
|--------|--------|-----------------------------------|---------------------|--------|--------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| TKS    | P Line | Delta Pressure<br>TKS VS<br>PLine | Upstream PCV Header |        |        | Delta Pressure<br>Upstream<br>PCV<br>Header VS<br>PLine | Downstream<br>PCV Header<br>After Scrubber |        | Delta Pressure<br>Upstream<br>PCV Header<br>VS<br>Downstream<br>PCV Header<br>After Scrubber |
|        |        |                                   | Flow<br>FI151       | PU151  | TT151  |                                                         |                                            |        |                                                                                              |
| (Barg) | (Barg) | (Barg)                            | (m3/hr)             | (Barg) | (°C)   | (Barg)                                                  | (Barg)                                     | (°C)   |                                                                                              |
| 13,34  | 12,73  | 0,62                              | 402,75              | 10,77  | 185,69 | 1,97                                                    | 10,24                                      | 183,74 | 0,63                                                                                         |

Dari hasil pengamatan penulis berdasarkan data harian terdapat penurunan pasokan uap untuk pembangkit PLTP Unit-X4 yang bisa dilihat Pembangkitan Netto mencapai beban minimum 54,7 MW sesuai Rencana Operasi Harian (ROH) dari PLN bisa dilihat pada grafik kondisi operasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 9 Grafik kondisi operasi tahun 2023

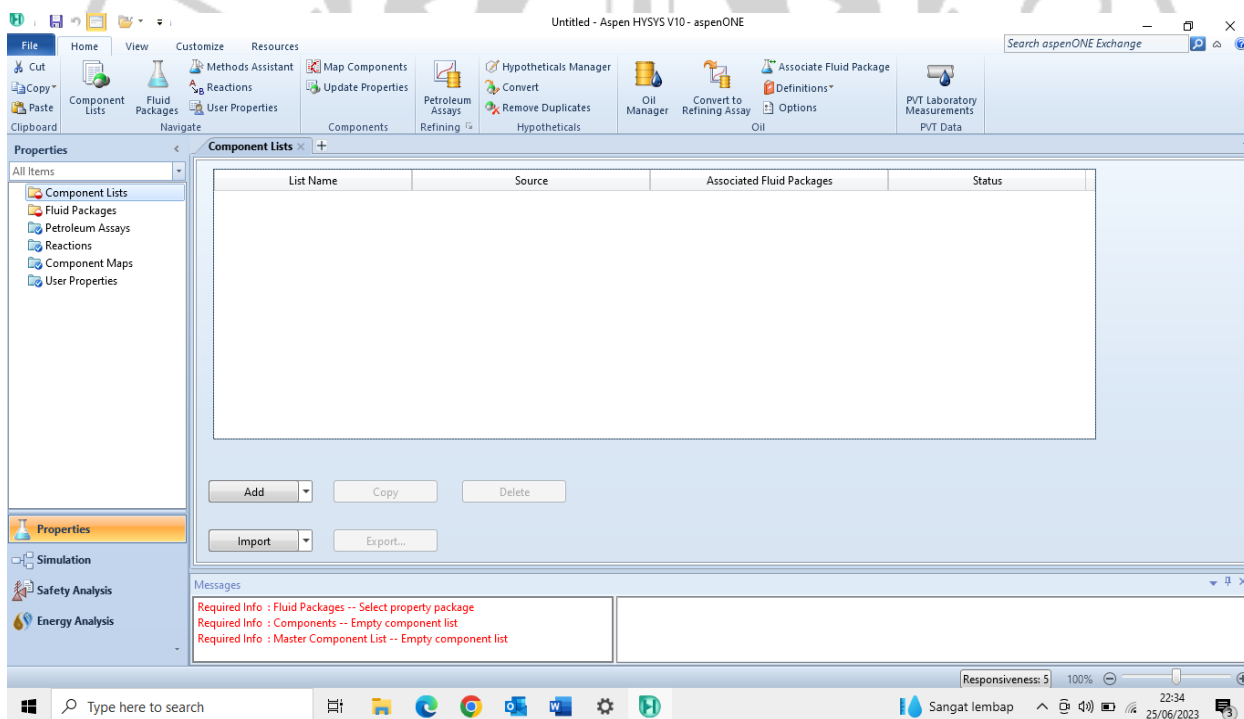
## 2.5. Perangkat Lunak Aspen Hysys

HYSYS merupakan perangkat lunak buatan Aspen Technologies Inc. yang sangat berguna dalam process sizing dan simulasi. HYSYS mampu memodelkan suatu sistem proses secara detail. Berbeda dengan MATLAB, HYSYS telah menyediakan objek sistem industri yang telah dilengkapi dengan fungsi transfer masing-masing objek. Pengguna dapat menggunakan obek pada palet objek dengan menentukan parameter spesifikasi objek dan beberapa variabel proses. Apabila objek yang diinginkan tidak tersedia pada *toolbox*, pengguna dapat menggunakan blok fungsi transfer untuk merepresentasikan objek tersebut (Soputra et al., 2015).

Aspen Hysys merupakan software simulasi proses atau Process Simulator. Perangkat lunak ini direkomendasikan untuk digunakan pada bidang *Refinery, Hydrocarbon, Oil & Gas* (Joao & Silva, 2016). Pada dasarnya, perangkat lunak ini digunakan untuk membantu menganalisa proses termodinamika, khususnya untuk mencari keseimbangan energi dan massa. Kondisi yang digunakan pada perangkat ini terdiri dari dua yaitu *Steady State & Dynamic*. Aspen Hysys dapat digunakan untuk merancang beberapa peralatan pada pabrik yang baru akan didirikan (*sizing*) atau mengevaluasi kinerja suatu peralatan pada pabrik yang sudah ada (*rating*). Pada penelitian ini, Aspen Hysys digunakan untuk melakukan modeling simulasi untuk mendirikan suatu system baru yaitu *tie-in* pemipaan sumur produksi K-21X ke PL-X05. Simulasi proses pada software Hysys

dapat mengembangkan, menganalisis dan optimisasi pada teknikal proses yang merupakan tiruan dari sistem aktual.

Simulasi ini memiliki beberapa *property package* yang digunakan sesuai dengan kandungan jenis fluida pada simulasi. *Property package* adalah kumpulan metode khusus untuk menghitung sifat-sifat komponen dan nilai-nilai parameter. Beberapa jenis *property package* di Hysis adalah asme steam, peng robinson dll. Dengan adanya simulasi pada Hysis membantu sebuah sistem yang pada aktualnya belum dapat dioperasikan karena masih tahap perancangan ataupun untuk mengecek dari sisi keamanan suatu sistem (Dimawarnita et al., 2021). Beberapa input yang diperlukan untuk simulasi ini adalah jenis fluida beserta kandungannya, tekanan, temperatur, laju alir, panjang pipa dan ukuran pipa. Gambar 2.9 menunjukkan tampilan awal pada perangkat lunak Hysis.



Gambar 2. 10 Tampilan awal pada Hysis

## 2.6.Pemodelan & Simulasi

Model simulasi adalah model tiruan dari suatu sistem tertentu dan memiliki karakteristik yang sama dengan sistem. Model simulasi harus merefleksikan sifat-sifat penting sistem nyata.

Tujuan dari model simulasi, antara lain: Mempelajari suatu sistem yang sulit untuk dilakukan secara langsung.

Pemodelan dan simulasi PL-X05 ini menggunakan dua kali pemodelan, dimana model yang pertama memodelkan kondisi *existing* dan yang kedua memodelkan kondisi setelah penambahan uap dari K-21X, untuk pemodelan yang kedua ini menggunakan beberapa kali Perhitungan dilakukan sebanyak 4 kali pemodelan, dimana di kondisikan dari kondisi 25%, 50%, 75% dan 100% from *Wellhead*.

Konservasi energi adalah upaya yang dilakukan untuk dapat meningkatkan efisiensi energi. Hukum termodinamika 1 merupakan sumber dari perhitungan efisiensi energi tanpa mempertimbangkan kualitas dari energi (Intang, 2015). Hukum ini berbunyi: “Kalor dan kerja mekanik adalah bisa saling tukar”. Sesuai dengan hukum ini, maka sejumlah kerja mekanik dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah kalor, dan sebaliknya. Hukum ini bisa juga dinyatakan sebagai: “Energi tidak bisa dibuat atau dimusnahkan, namun bisa dirubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya”. Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh kalor mesti sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur (Shapiro, 2006). Persamaan yang digunakan untuk termodinamika dan kesetimbangan energi dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan 2.2.

$$E_{in} = E_{out} \quad (2.1)$$

$$Q_{in} + W_{in} + \sum m_{in}(h_{in}) = Q_{out} + W_{out} + \sum m_{out}(h_{out}) \quad (2.2)$$

Keterangan:

Q : kalor yang dipindahkan

W : kerja yang dilakukan dalam satuan kalor

$\dot{m}$  : lajur aliran massa

h : entalpi

## 2.7. Pemodelan & Simulasi Kondisi setelah Penambahan Uap dari K-21X

Perhitungan *heat mass balance* dilakukan sebelum melakukan simulasi. Perhitungan *heat mass balance* dapat memastikan bahwa jumlah energi yang masuk ke sistem sama dengan jumlah energi yang keluar, sehingga tidak terjadi kehilangan energi yang signifikan sepanjang proses. Selain itu, perhitungan *heat mass balance* dilakukan untuk mendapatkan diameter pipa yang optimal dalam melakukan simulasi.

## 2.8.Perhitungan Manual

Perhitungan manual bertujuan untuk mencari *sizing* pipa yang paling optimal untuk pemodelan dan simulasi dan sebagai parameter tambahan untuk melengkapi design proses pemipaan sebagai basic design.

### 2.8.1 Heat Mass Balance Basic Data

Perhitungan *heat mass balance* (HMB) dilakukan sebelum melakukan simulasi. Perhitungan heat mass balance dapat memastikan bahwa jumlah energi yang masuk ke sistem sama dengan jumlah energi yang keluar, sehingga tidak terjadi kehilangan energi yang signifikan sepanjang proses. Selain itu, perhitungan *heat mass balance* dilakukan untuk mendapatkan diameter pipa yang optimal dalam melakukan simulasi.

Perhitungan HMB dilakukan untuk mengetahui aliran massa dengan menyimulasikan pembagian aliran ke aliran *existing* (line menuju PL-X01) dan aliran baru (line menuju PL-X05). Kurva memberikan informasi bahwa semakin besar tekanan maka semakin kecil *flowrate*. Begitu pula ketika semakin kecil tekanan, akan memberikan *flowrate* yang semakin besar. Tekanan memenuhi syarat dimana tekanan harus lebih besar dari 11.8 bara ketika masuk ke aliran PL-X05. Perhitungan tekanan akan mempertimbangkan *pressure drop* perpipaan. Asumsi awal perhitungan HMB, *well head* akan beroperasi pada tekanan 17 bara. Simulasi dilakukan untuk pemilihan ukuran pipa yang dibatasi dengan *velocity* 20 - 55 m/s (Spirax Sarco, 2024). Diagram Neraca massa menggunakan *Process Flow diagram*. Proses yang terjadi ketika *throtling* di MOV diasumsikan adalah proses *isoenthalpy*. Diagram *flow process* merupakan representasi dari aliran uap yang dihasilkan dari sumur produksi menuju turbin.

### 2.8.2 Steam Velocity

Kecepatan uap (*steam velocity*) memiliki hubungan erat dengan prinsip keseimbangan massa dan energi dalam sistem termodinamika. Dalam sistem ini, dengan mempertimbangkan lima kondisi *heat mass balance*, kecepatan uap dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3 dan 2.4.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (2.4)$$

Dimana:

Q : *Flowrate* (m<sup>3</sup>/h)

A : Luas penampang (m<sup>2</sup>)

d : diameter (m)

Prinsip ini menjadi bagian integral dari analisis keseimbangan massa dan energi, terutama dalam sistem perpipaan, turbin, dan kondensor. Heat mass balance memastikan bahwa semua energi termal dan massa yang masuk ke sistem setara dengan energi dan massa yang keluar, memungkinkan pengaturan kecepatan uap untuk mencapai efisiensi optimal (Çengel dan Boles, 2015).

Keseimbangan massa berfokus pada jumlah total massa uap yang bergerak melalui sistem. Dalam sistem uap, massa aliran. kita dapat menghubungkan kecepatan uap dengan massa aliran dan karakteristik termodinamika uap. Dalam konteks *heat mass balance*, parameter-parameter ini digunakan untuk memastikan bahwa energi dalam aliran massa uap (seperti entalpi) sesuai dengan kebutuhan panas sistem. Setelah menentukan *velocity steam*, kemudian dilakukan pemilihan ukuran dimensi pipa berdasarkan kecepatan alir yang di inginkan.

### 2.8.3 Line Sizing

*Line sizing* dilakukan untuk mendapatkan spesifikasi ukuran diameter pipa tempat transportasi fluida (*steam*). Berikut beberapa acuan yang digunakan untuk perhitungan *line sizing*:

- Untuk memberikan spare ruang yang cukup terhadap fluktuasi laju *steam* dari sumur (K-21X). *Sizing* dilakukan untuk beberapa flow berbeda dan ukuran pipa berbeda untuk melihat apakah memenuhi kriteria kecepatan linear.
- Velocity criteria* perancangan pipa steam adalah 20 – 55 m/s. (Spirax Sarco, 2024)
- Perhitungan line sizing pada aliran *bypass* dilakukan pada flow 100% aliran dari aliran utama. Asumsi bahwa jika terjadi kegagalan aliran utama Motor Operating Valve (MOV), maka seluruh aliran bisa melewati aliran *bypass*.

Perancangan pipa dilakukan melalui tahapan-tahapan, sebagai berikut:

#### 1) Kondisi Fluida

Fluida : *Steam from well*

Laju alir massa : 79200 kg/jam (100% aliran *well head*)

Densitas : 8,57 kg/m<sup>3</sup>  
Temperatur Operasi (T<sub>op</sub>) : 204,31 °C  
Tekanan Operasi (P<sub>op</sub>) : 17,00 bara

2) Penentuan kecepatan linear (v)

Kecepatan linear yang digunakan adalah pada rentang 20 – 55 m/s. (Spirax Sarco, 2024).

3) Laju alir volumetrik (Q)

Laju alir volumetrik aliran fluida diambil dari data laju mass dari dibagi dengan densitasnya (Supriyono, 2019). Contoh perhitungan laju alir volumetrik sebagai berikut:

$$Q = \frac{F}{\rho} \quad (2.5)$$

4) Luas Penampang Pipa (A)

Luas penampang pipa (A) dihitung dari beberapa diameter yang berbeda yaitu 10", 12", 14" dan 20" (Yani et al., 2021). Contoh perhitungan luas penampang pipa dengan untuk 10 inch (0,247 m) sebagai berikut:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.6)$$

Keterangan:

A : Luas penampang (m<sup>2</sup>)  
d : diameter (m)

5) Kecepatan linear (v)

Pengecekan *velocity* dilakukan untuk beberapa ukuran pipa berbeda lalu kemudian dievaluasi dan dipilih ukuran pipa yang memenuhi *velocity criteria* paling banyak. (*velocity criteria* 20 – 55 m/s) (Munadhir, n.d.). Contoh perhitungan kecepatan linear sebagai berikut:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.7)$$

Keterangan:

Q : Flowrate (m<sup>3</sup>/h)  
V : kecepatan linear (m/s)  
A : Luas penampang (m<sup>2</sup>)

#### 2.8.4 Pressure Drop

*Pressure drop* dihitung untuk mengkonfirmasi apakah tekanan dari *well head* sudah mencukupi untuk aliran memasuki tie in aliran PL-405. Asumsi tekanan *well head* awal adalah 17 bara.

##### 1) Pipe dan Fittings

Formula *pressure drop* pada pipa panjang dihitung menggunakan formula berikut (Norberg, 2020):

$$\Delta p = \frac{\mu \cdot l \cdot v^2 \cdot \rho}{2d} \quad (2.8)$$

Keterangan:

$\Delta p$  = Pressure loss (Pa)

$\mu$  = Coefficient of friction = 0,016

$l$  = length/ panjang pipa (m)

$v$  = velocity (m/s)

$d$  = Inner diameter (m)

$\rho$  = Density (kg/m<sup>3</sup>)

##### 2) Expander

Expander terdiri dari 2 unit, terdapat pada posisi setelah tapping dari pipa wellhead dari pipa 10" ke 12", dan satu unit lagi terdapat di ujung pipa ketika masuk ke tie in, dari pipa 12" menuju pipa 14". Pressure drop expander dihitung menggunakan formula sebagai berikut

$$\Delta P = N_e \frac{V}{12} \left( \frac{G}{10^5} \right)^2 \quad (2.9)$$

Keterangan:

$N_e$  = Enlargement Loss factor (from curve)

$V$  = specific volume (ft<sup>3</sup>/lb) = 1,8688 ft<sup>3</sup>/lb

$G$  = Mass flux (lb/h.ft<sup>2</sup>) = 231.876 lb/h.ft<sup>2</sup>

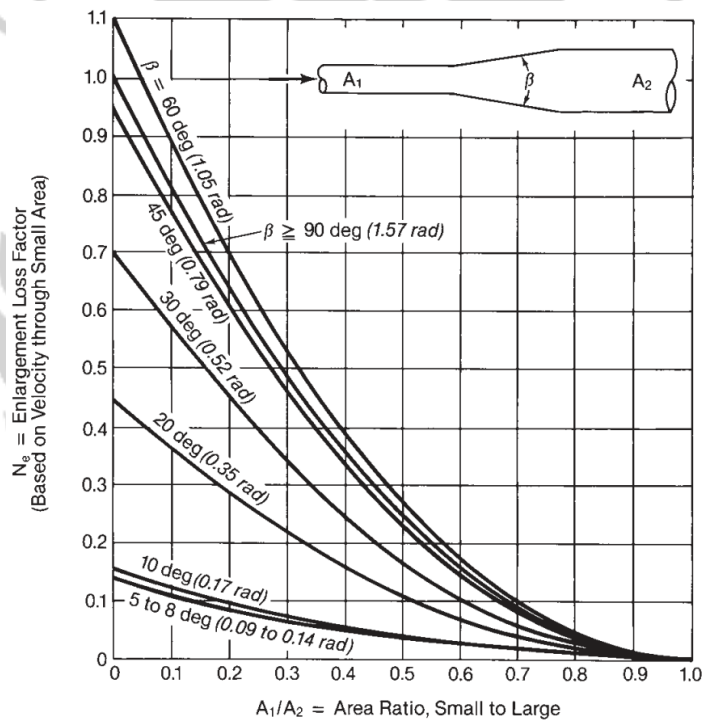
$$\text{Expander 1} \rightarrow A1 = \frac{\pi 10^2}{d} \quad A2 = \frac{\pi 12^2}{d}$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{\pi 10^2}{d}}{\frac{\pi 12^2}{d}} = 0,69$$

Expander 2 →  $A_1 = \frac{\pi 12^2}{d}$        $A_2 = \frac{\pi 14^2}{d}$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{\pi 12^2}{d}}{\frac{\pi 14^2}{d}} = 0,73$$

$N_e$  didapat dari plotting menggunakan kurva gambar 2.10.



Gambar 2. 2 Enlargement Loss Curve

### 2.8.5 Perhitungan Bukaannya Valve

Model operasinya, pengaturan aliran pada tiap aliran ditentukan dengan bukaannya control valve. Dengan demikian, dilakukan perhitungan sizing untuk menentukan control valve yang digunakan dan menghitung seberapa besar bukaannya valve.

- 1) CV (Valve Flow Coefficient)

*Valve flow coefficient* adalah koefisien yang merepresentasikan kapasitas fluida yang dapat melewati valve dengan mempertimbangkan juga *pressure* dan temperatur fluida, untuk menghitung CV pada sebuah aliran digunakan formula sebagai berikut (Valmet Neles, 2022) :

$$CV = m / (27,3 Y \sqrt{x \cdot p_1 (\cdot \rho)_1}) \quad (2.10)$$

$$Y = 1 - \frac{x}{1,23 \cdot F_k} \quad (2.11)$$

$$x = \frac{p_1 - p_2}{p_1} \quad (2.12)$$

$$F_k = \frac{k}{1,40} \quad (2.13)$$

$$k = \frac{C_p}{C_b} \quad (2.14)$$

#### Keterangan

CV : *Valve Flow Coefficient*

m : Laju alir massa (kg/h)

Y : Faktor Ekspansi

x : rasio penurunan tekanan terhadap tekanan awal

p<sub>1</sub> : Tekanan sebelum valve (barA)

p<sub>2</sub> : Tekanan setelah valve (barA)

ρ<sub>1</sub> : Densitas fluida (kondisi sebelum valve) (kg/m<sup>3</sup>)

F<sub>k</sub> : *Specific heat of ratio factor*

k : rasio *heat capacity* isobarik terhadap isokhorik

C<sub>p</sub> : Koefisien panas (isobarik) (kJ/kg°C)

C<sub>b</sub> : Koefisien panas (isokhorik) (kJ/kg°C)

Berikut data yang digunakan untuk perhitungan *valve flow coefficient*:

p<sub>1</sub> = 17 barA

ρ<sub>1</sub> = 8,57 kg/m<sup>3</sup>

C<sub>p</sub> = 3,057 kJ/kg°C

C<sub>b</sub> = 2,009 kJ/kg°C

Dimana,  $P_2$  didapat dari angka *pressure drop* pada control valve dengan asumsi bahwa  $\Delta P$  adalah 1 bar.

## 2) Penentuan Buka-an Valve

Angka CV diplotkan ke grafik valve terhadap bukaan valve pada valve vendor untuk mendapatkan kisaran bukaan valve saat dioperasikan. Valve yang disimulasikan adalah MOV Butterfly Valmet Valve Neles L6 Series #300 pada beberapa ukuran berbeda: 8", 10", 12", 14. Grafik dibuat berdasarkan data vendor Valmet Neles (Lampiran A)

### 2.8.6 Perhitungan Laju Kondensat

*Steam trap* adalah unit yang berfungsi untuk memisahkan kondensat dari aliran *steam*. Kondensat ini perlu dipisahkan dari aliran steam untuk mencegah terbentuknya aliran 2 fasa dan terjadinya *water hammer* yang dapat merusak pipa. *Steam trap* dipasang sebelum sistem perpipaan MOV dan sebelum *expansion loops*. Parameter yang diketahui atau ditentukan sebagai basis perhitungan kondensat disajikan dalam tabel 2.4.

Tabel 2. 3 Desain Basis Perhitungan Laju Kondensat

| <b>General</b>                      |                  |                               |
|-------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Steam trap-1 placements             | 13,49            | m (from tapping point TP-001) |
| Steam trap-1A placements            | 67,35            | M (from Steam trap 1)         |
| Steam trap-2 placements             | 46,06            | m (from Steam trap-1A)        |
| Steam trap-3 placements             | 78,88            | m (from Steam trap-2)         |
| Steam trap-4 placements             | 120,27           | m (from Steam trap-3)         |
| Inside Diameter (D1)                | 298.45           | mm                            |
| Outside Diameter (D2)               | 323.9            | mm                            |
| Allowable surface temperature (Max) | 40               | °C                            |
| Wind Speed                          | 2.00             | m/s                           |
| <b>Insulation</b>                   |                  |                               |
| Type                                | Calcium Silicate |                               |

|                      |                          |    |
|----------------------|--------------------------|----|
| Surface Emmisivity   | 0.9                      |    |
| Thickness            | 60                       | mm |
| <b>Jacketed Pipe</b> |                          |    |
| Type                 | Alumunium Alloy 3003 H14 |    |
| Thickness            | 0.8                      | mm |

Tipe yang dipilih adalah *Thermodynamic Disc Trap*. Mekanisme kerja *steam trap* jenis ini menggunakan prinsip piringan (*disc*) yang terangkat untuk mengeluarkan kondensat selama beberapa detik, lalu kemudian kembali menutup untuk menjaga agar steam tidak keluar.

Gerakan membuka dan menutup *Thermodynamic Disc Trap* disebabkan oleh perbedaan tekanan dan gaya yang bekerja pada dua sisi *disc*. Perbedaan tekanan dan gaya ini pada dasarnya didasarkan pada variasi energi kinetik, tekanan fluida, dan kandungan fluid itu sendiri seperti mungkin mengandung udara, kondensat, atau steam. Saat proses pengeluaran kondensat, cairan kondensat akan mendorong *disc valve* memberikan tekanan pada bagian bawah katup, sehingga *disc valve* akan naik dan terbuka. Dengan terbukanya *disc valve*, memungkinkan kondensat untuk mengalir keluar.

Proses penutupan *disc valve* Kembali menggunakan sistem bernoulli. Gaya yang mempengaruhi proses ini adalah *steam* di kedua sisi, yaitu bagian bawah *disc valve* dan bagian atas *disc valve*. Ketika *steam* datang pada bagian bawah *disc valve*, *steam* datang dengan kecepatan tinggi. Kecepatan tinggi dari *steam* akan mengakibatkan *pressure drop* yang menyebabkan tekanan di bawah *disc valve* menjadi rendah. Tekanan di bawah *disc* yang lebih rendah daripada di atas *disc* mengakibatkan *disc valve* terdorong ke bawah dan Kembali menutup. Kelebihan tipe *thermodynamic disc trap* yaitu mudah untuk dipasang karena memiliki desain yang *compact* dan bisa dipasang secara *vertical* maupun *horizontal*, memiliki rentang pilihan tekanan yang luas dan *cost* yang murah karena desainnya serta konstruksinya *relative simple*. Desain steam trap dihitung berdasarkan persamaan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 4 Data desain steam trap

|                                               |                            |
|-----------------------------------------------|----------------------------|
| <i>Pressure inlet</i>                         | $P_0$                      |
| <i>Back pressure from the condensate line</i> | $P_b$                      |
| <i>Differential Pressure</i>                  | $\Delta P = P_0 - P_b$     |
| <i>Safety factor</i>                          | s, dipilih safety factor 3 |
| <i>Condensate inlet</i>                       | $m_0$                      |
| <i>Condensate amount</i>                      | $m = m_0 \times s$         |

Data laju kondensat dan perbedaan tekanan ini kemudian diplotkan pada grafik *sizing steam trap tipe thermodynamic disc valve*. Parameter yang dihitung:

1. Panas yang hilang per meter pipa
2. Laju kondensat

Langkah perhitungan:

1. Hitung *heat transfer coefficient* dari radiasi (*h radiation*)

$$h_{radiation} = \sigma \varepsilon \frac{t_{surface}^4 - t_{ambient}^4}{t_{surface} - t_{ambient}} \quad (2.15)$$

2. Hitung *heat transfer coefficient* dari konveksi (*h convection*)

$$h_{forced\ convection} = Nu_{forced} \times k_{ai} / D_3 \quad (2.16)$$

$$h_{free\ convection} = Nu_{free} \times k_{air} / D_3 \quad (2.17)$$

$$Nu_{combined} = (Nu_{forced}^4 + Nu_{free}^4) \times 0.25 \quad (2.18)$$

$$h_{convection} = Nu_{combined} \times k_{air} / D_3 \quad (2.19)$$

3. Hitung *pipe resistance* (*r pipe*)

$$r_{pipe} = \frac{D_3 \times \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2 \times k_{pipe}} \quad (2.20)$$

4. Hitung *insulation resistance* (*r insulation*)

$$r_{insulation} = \frac{D_3 \times \ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)}{2 \times k_{insulation}} \quad (2.20)$$

5. Hitung *overall heat transfer coefficient*

$$R_{overall} = r_{pipe} + r_{insulation} + 1/h_{air} \quad (2.21)$$

6. Hitung panas (Q) yang mengalir pada insulasi pipa

$$Q = \frac{t_{operating} - t_{ambient}}{r_{overall}} \quad (2.22)$$

7. Hitung panas yang hilang (*heat loss*)

$$\text{Heat loss} = \pi D_3 Q \quad (2.23)$$

8. Hitung laju kondensat

$$\text{Condensate flow} = \frac{\text{pipe length} \times \text{heat loss} \times 3.6}{H \text{ vaporization}} \quad (2.24)$$

## 2.9. Analisis Keekonomian

Analisis keekonomian adalah kegiatan yang memperhitungkan parameter yang terkait dengan teknologi terhadap aspek ekonomi yang terjadi. Analisis ekonomi pada sistem energi berperan untuk menyelidiki lebih lanjut terkait rasio biaya manfaat, waktu pengembalian, biaya pemeliharaan, dan operasi serta biaya listrik yang diratakan (Abu-Rayash and Dincer, 2019). Teknologi panas bumi memiliki efek ekonomi yang signifikan karena memiliki kemampuan untuk mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil dan menciptakan peluang ekonomi lokal baru. Studi oleh Hackstein dan Madlener (2021) menunjukkan bahwa pengoperasian pembangkit listrik panas bumi yang berkelanjutan tidak hanya memberikan pasokan energi yang stabil tetapi juga mendorong pertumbuhan ekonomi di sekitarnya dengan menambah infrastruktur dan menciptakan lapangan kerja baru. Selain itu, teknologi panas bumi menarik bagi investasi jangka panjang karena memiliki biaya listrik yang kompetitif dibandingkan dengan jenis energi terbarukan lainnya.

Pengumpulan data keekonomian untuk mendapatkan *payback period* dilakukan dalam cakupan biaya investasi, asumsi biaya perawatan dan nilai penghematan biaya tagihan listrik. Semua biaya administrasi dan detilnya tidak masuk dalam jangkauan analisis. Data biaya listrik menggunakan harga terbaru yang diperoleh dari Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (PJBL) PT XYZ untuk PLTP Unit-X4 dengan PLN, data biaya investasi didapatkan dari perhitungan *Owner Estimate* (OE) PT XYZ. Menurut Giatman (2011) dalam Inka (2021) secara umum pada suatu investasi, *cash flow* ( arus kas) akan terdiri dari empat komponen utama, yaitu: investasi, perawatan, operasional (*cost*) dan manfaat (*benefit*)(Avinda et al., 2021).

Arus kas merupakan susunan aliran uang masuk dan keluar setiap periode waktu tertentu. Arus kas terdiri dari pendapatan yang pada contoh kasus penelitian ini diperoleh dari potensi penambahan uap yang menjadi tambahan ekspor tenaga listrik ke jaringan utama (*grid*), sedangkan *cost* adalah asumsi besaran biaya perawatan yang dikeluarkan untuk pemeliharaan proyek *tie-in* dari sumur K-21X ke PLTP Unit-X4. Besar biaya pemeliharaan per tahun dihitung melalui Persamaan 2.25.

$$M=1\% \times I \quad (2.25)$$

Keterangan:

M = Biaya Pemeliharaan (*maintenance*)

I = Biaya Investasi (*investment*)

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan parameter biaya investasi pemasangan dan biaya perawatan proyek *tie-in* dari sumur K-21X ke PLTP Unit-X4, serta potensi penambahan uap yang menjadi tambahan ekspor tenaga listrik ke jaringan utama (*grid*). Analisis menggunakan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel 2016. Setelah didapatkan perbandingan energi yang dihasilkan melalui simulasi pada saat perancangan dengan energi yang dihasilkan secara riil, pada saat analisis pemanfaatan, analisis dilanjutkan dengan membandingkan besaran biaya tagihan listrik sebelum dan sesudah pembangunan *tie-in* digunakan.

Perhitungan *Net Present Value*, *Benefit Cost Ratio* dan *Pay Back Period* dilakukan dalam rangka memberikan gambaran kelayakan keekonomian dari Instalasi *tie in* pemipaan dari sumur K-21X, Perhitungan *Net Present Value* (NPV) dipergunakan Persamaan 2.26.

$$NPV = PWB - PWC \quad (2.26)$$

Keterangan:

NPV = *Net Present Value*

PWB = *Present Worth Benefit*

PWC = *Present Worth Cost*

(Kacaribu et al., 2022)

Sedangkan untuk perhitungan BCR digunakan persamaan rumus perhitungan sebagai berikut (Kacaribu, 2022):

$$BCR = \frac{PWB}{PWC} \quad (2.27)$$

Keterangan:

PWB = *Present Worth Benefit*

PWC = *Present Worth Cost*

Persamaan untuk menghitung PBP menggunakan persamaan menurut dirumuskan sebagai berikut (Kossi, 2018):

$$PBP = YBR + \frac{Investment\ Cost}{Kumulatif\ NPV} \quad (2.28)$$

Keterangan:

*Year before recovery* (YBR) = Jumlah tahun sebelum tahun pengembalian final

*Investment Cost* = Biaya investasi awal.

NPV Kumulatif = Jumlah kas bersih.

Adapun data-data tersebut akan ditampilkan pada tabel 2.6.

Tabel 2. 5 Tabel pengukuran Parameter aspek keekonomian instalasi *tie-in* K-21X

| No.                                                                                            | Data                               | Unit         | Nominal |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------|---------|
| 1                                                                                              | Biaya Investasi                    | Rupiah       |         |
| 2                                                                                              | Biaya Perawatan                    | Rupiah/tahun |         |
| 3                                                                                              | Harga Listrik                      | Rupiah/Kwh   |         |
| 4                                                                                              | Penambahan <i>Revenue Growth</i> * | Rupiah/tahun |         |
| 5                                                                                              | <i>Payback Period</i>              | Tahun        |         |
| * Penambahan Revenue Growth dihitung berdasarkan manfaat produksi listrik dikali harga listrik |                                    |              |         |

### BAB III

