

Analisa Efisiensi Thermal Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lahendong Unit 5 Dan 6 Di Tompaso

Gerry A. Kusuma, Glanny Mangindaan, Marthinus Pakiding

Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi Manado, Jl. Kampus Bahu-Unsrat Manado, 95115

Email: grykusuma@gmail.com, glanny_m@unsrat.ac.id, marthinus.pakiding@gmail.com

Abstract— A geothermal power plant (PLTP) is a plant that uses vapor in the earth as the main energy. Vapor which in the earth is supplied from production well through steam transmission system which then passing steam receiving header. When there is excessive pressure in the steam receiver, then the steam will be dump away to Vent Structure. Steam then get flowed to the Separator which serves to separate the vapor with water. The separation water is called brine. Brine from separator is streamed to the settling basin. Then vapor comes in to the Scrubber, which serves to separate moisture that contained in vapor, so then the vapor is expected clean and dry, which will be include in the steam turbine. A geothermal power plant (PLTP) especially PLTP 5 and 6 Lahendong are the new built geothermal power plant as part of the 35.000 MW program from the government. Therefore need to know how much the thermal efficiency that contain in the power plant and how to increase its efficiency. This research will discuss thermal efficiency analysis of PLTP 5 and 6 Lahendong through state level analysis with a thermodynamic approach and analysis in each process of the plant.

Keywords: Geothermal Plant, Thermal Efficiency, Thermodynamic, Vapor.

Abstrak— Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) adalah pembangkit yang menggunakan energi panas dari dalam bumi. Uap panas dari dalam perut bumi di suplai dari sumur produksi melalui sistem transmisi uap yang kemudian melewati steam receiving header. Bila terjadi tekanan berlebih di dalam steam receiver maka uap akan dibuang melalui Vent Structure. Dari Steam Header uap kemudian dialirkan ke separator yang berfungsi untuk memisahkan uap dengan air. Air hasil pemisahan tersebut disebut brine. Brine dari separator tersebut kemudian dialirkan menuju ke kolam pengendapan atau Settling Basin. Kemudian uap masuk ke Scrubber, yang berfungsi untuk memisahkan moisture yang terkandung dalam uap, sehingga diharapkan uap bersih dan kering yang akan masuk ke dalam Turbin uap. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) khususnya PLTP 5 dan 6 Lahendong merupakan unit pembangkit yang baru dibangun sebagai bagian dari program 35.000 MW dari pemerintah. Sebab itu perlu diketahui berapa besar efisiensi thermal yang terdapat di pembangkit tersebut dan cara peningkatan efisiensinya. Penelitian ini akan membahas analisa efisiensi thermal dari PLTP 5 dan 6 Lahendong melalui analisa tingkat keadaan

dengan pendekatan termodinamika dan analisa di tiap proses pembangkit tersebut.

Kata Kunci : Efisiensi Thermal, PLTP, Termodinamika, Uap Panas

I. PENDAHULUAN

Sebagai pembangkit listrik yang menyuplai kebutuhan daya listrik, pembangkit listrik tenaga panas bumi yang menggunakan uap panas dari dalam bumi sebagai media untuk menggerakkan turbin, uap panas dari dalam bumi dipisahkan dengan separator sehingga di dapat uap kering untuk digunakan untuk membangkitkan listrik, sedangkan air panas atau brine hasil pemisahan dari separator di buang ke dalam perut bumi. Padahal di dalam brine tersebut masih memiliki kandungan energi yang bisa dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi unit pembangkit tersebut. [Christoper, 1973]

Salah satu cara yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi dari pembangkit listrik tenaga panas bumi adalah menerapkan teknologi siklus biner. Ada metode lain yang bisa dipakai, yaitu dengan *double flash*.

Sistem yang digunakan pada PLTP Lahendong unit 5 dan 6 di Tompaso yang terpasang saat ini menggunakan sistem *Single Flash*, dimana brine hasil pemisahan dari separator unit pembangkit tersebut masih memiliki kandungan energi yang cukup besar dan bisa dimanfaatkan dengan menerapkan siklus biner.

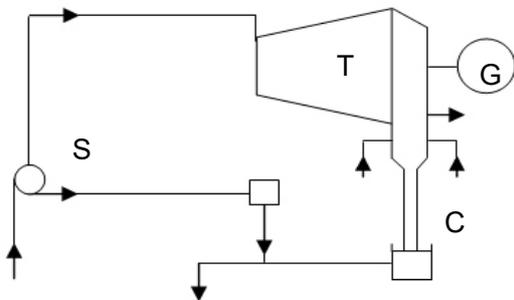
Pada PLTP Lahendong unit 5 dan 6 di Tompaso perlu diketahui efisiensi thermal dari pembangkit tersebut dan perlu dilakukan analisa peningkatan efisiensinya. Maka dari itu, saya mengangkat tugas akhir dengan menganalisa efisiensi dan cara peningkatannya dengan siklus biner, dengan judul “Analisa Efisiensi Thermal PLTP Lahendong Unit 5 dan 6 di tompaso”. Dalam tugas akhir ini dilakukan analisa efisiensi thermal PLTP dengan pendekatan hukum termodinamika, hukum kekekalan massa, dan hukum kekekalan energi, serta analisa peningkatan efisiensi thermal pembangkit tersebut dengan menerapkan teknologi siklus biner.

1) *Single Flash Steam System*

Fluida pada kepala sumur merupakan campuran dua fase cair dan uap di dalam separator. Tekanan diturunkan, kandungan air dipisahkan sedangkan uap digunakan untuk memutar turbin, skematiknya dapat dilihat pada Gambar 1. Pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan tipe *Flashed Steam System* lebih sulit dalam beberapa hal, yaitu jumlah massa fluida kerja yang diperlukan banyak, kedalaman sumur yang lebih dalam, kandungan mineral yang lebih banyak sehingga diperlukan desain khusus peralatan pipa-pipa, pompa-pompa, separator dan lain-lain.[Paiman,2012]

Pada PLTP Lahendong unit 5 dan 6 di Tompaso menerapkan sistem *Single Flash*. Terdapat 5 sumur produksi yang digunakan untuk unit pembangkit tersebut dengan tipe sumur *Water Dominated* dan karakteristik sumur yang berbeda-beda.

Prinsip kerja *Single Flash System* pada PLTP Lahendong Unit 5 dan 6 di Tompaso yaitu uap dari dalam sumur di pompa menuju separator untuk dipisahkan kandungan uap dan air sehingga di dapat uap yang kering. Air hasil pemisahan dari separator kemudian dialirkan menuju *settling basin* atau kolam pengendapan untuk di injeksikan lagi ke dalam perut bumi. Uap kering dari separator kemudian dialirkan menuju ke *Scrubber*. Di dalam *Scrubber* uap tersebut di saring lagi untuk membuang kondensat yang terbentuk sebelum masuk ke dalam turbin sehingga uap yang digunakan diharapkan uap yang betul-betul kering dan bersih. Setelah itu uap masuk ke dalam turbin yang sudah dikopel dengan generator untuk melakukan kerja dan membangkitkan listrik. Uap yang keluar dari turbin kemudian dikondensasikan ke dalam kondenser untuk menjadi cair kembali dan dialirkan menuju ke *Cooling Tower* atau menara pendingin. Di dalam menara pendingin air hasil kondensasi tersebut didinginkan hingga suhu tertentu kemudian air tersebut dialirkan menuju kolam pengendapan sebelum diinjeksikan kembali ke dalam perut bumi.[DiPippo,2008]



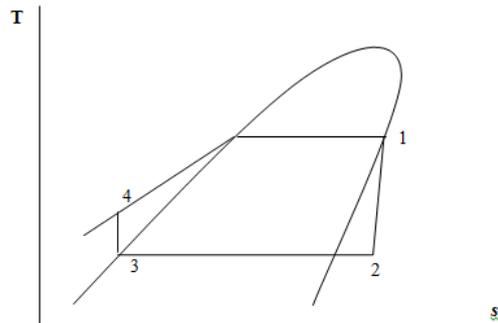
Gambar 1. Skematik Single Flash System

2) *Binary Cycle System*

Binary Cycle System atau sistem siklus biner merupakan sistem yang akan dipakai untuk meningkatkan efisiensi thermal PLTP Lahendong Unit 5 dan 6. Untuk peningkatan efisiensi, air dari dalam tanah digunakan sebagai sumber air panas pada siklus tertutup untuk memanaskan fluida organik dan dipompakan kembali ke dalam ke dalam tanah atau reinjeksi. Di dalam penukar kalor terjadi pertukaran kalor antara fluida panas bumi dengan fluida organik, sehingga diperoleh uap yang kering untuk menggerakkan turbin dengan siklus Rankine tertutup dan selanjutnya dikondensasikan di dalam *surface condenser* dan kondensat dipompakan kembali ke *heat exchanger*. Diagram T-s siklus biner dapat dilihat pada Gambar 2.

1) *Turbin*

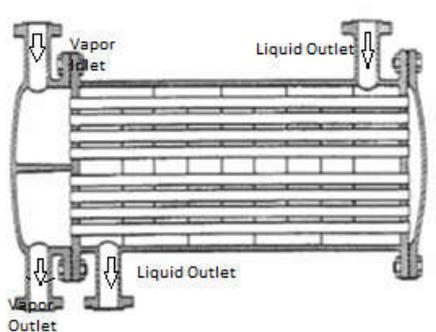
Turbin merupakan perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi panas fluida kerja menjadi energi mekanik dilihat pada Gambar 3. Turbin mengalami perkembangan desainnya. Ekspansi uap fluida kerja terjadi di dalam nosel dari tekanan awal yang tinggi ke tekanan akhir yang lebih rendah. Adanya penurunan tekanan dan entalpi akan menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan fluida kerja yang keluar dari nosel. Uap kemudian masuk ke dalam sudu gerak yang kemudian mengalami perubahan momentum sehingga dibangkitkan gaya atau torsi yang memutar poros.[yogisworo,2010]



Gambar 2. Diagram T-s PLTP Siklus Biner



Gambar 3. Turbin Hidrokarbon Satu Tingkat



Gambar 4. Penukar panas jenis cangkang dan buluh

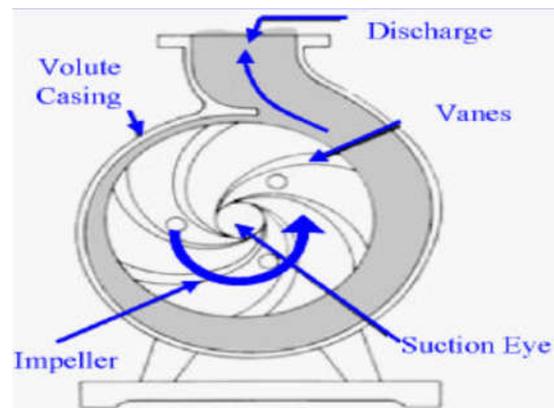
2) Penukar Panas

Alat penukar panas adalah komponen utama di dalam sistem pembangkit listrik siklus biner yang membedakan pembangkit ini dari pembangkit konvensional sistem *flashing* atau *direct steam*. Alat penukar panas ini berfungsi sebagai *interface* perpindahan kalor dari fluida panas bumi ke fluida kerja. Adanya alat penukar panas ini sepertinya menunjukkan bahwa pada pembangkit siklus biner diperlukan biaya tambahan pada sisi pembangkit. Akan tetapi, pembangkit siklus biner pada umumnya memerlukan konsumsi fluida panas bumi yang lebih kecil untuk setiap daya yang dibangkitkan, sehingga hal ini bisa mengurangi biaya sumur jika pembangkit ini dibangun secara *total project* dari hulu (pengembangan lapangan) sampai hilir (pembangkit listrik).

Alat penukar panas yang digunakan pada pembangkit siklus biner mempunyai berbagai fungsi, seperti misalnya *preheater*, *evaporator*, dan kondenser. *Preheater* berfungsi memanaskan fluida kerja sampai dengan temperatur tertentu. *Evaporator* berfungsi untuk memanaskan fluida kerja lebih lanjut sehingga uap menjadi panas lanjut dan siap memutar turbin. Kondenser berfungsi mendinginkan uap yang keluar dari turbin sehingga terkondensasi menjadi cair kembali.

Alat penukar panas yang dipakai untuk penerapan siklus biner di PLTP Lahendong unit 5 dan 6 adalah tipe penukar panas *shell and tube heat exchanger* (cangkang dan buluh). Alat penukar panas ini biasanya digunakan pada pembangkit siklus biner yang memanfaatkan *brine* sebagai sumber panas bumi. Pada alat penukar panas jenis *shell and tube*, fluida panas bumi biasanya dialirkan ke dalam bagian tube sehingga memudahkan dalam pembersihan pengendapan.

Unjuk kerja *heat transfer* di sebuah alat penukar panas sangat dipengaruhi oleh *scaling* atau pengendapan unsur kimia yang terdapat pada fluida panas bumi. Jalur aliran uap dan fluida kerja dari *heat exchanger* ini kita dapat lihat pada Gambar 4 untuk tipe cangkang dan buluh. [Yogisworo.2010]



Gambar 5. Lintasan aliran cairan pompa sentrifugal

3) Pompa

Pompa yang digunakan pada PLTP siklus biner adalah pompa dinamik sentrifugal. Pompa dinamik adalah pompa yang berputar mengubah energi kinetik menjadi tekanan atau kecepatan yang diperlukan untuk memompa fluida. Pada Gambar 5 memperlihatkan bagaimana pompa jenis ini beroperasi. [Shadev,2008]

Cairan dipaksa menuju sebuah impeler oleh tekanan atmosfer, atau dalam hal ini *jet pump* oleh tekanan buatan. Baling-baling impeler meneruskan energi kinetik ke cairan, sehingga cairan akan berputar. Impeler dikelilingi oleh *volute casing* atau dalam hal ini pompa turbin digunakan cincin *diffuser* stasioner mengubah energi kinetik menjadi energi tekanan.

3) Kriteria Pemilihan Fluida Kerja

Fluida kerja adalah fluida yang memiliki energi untuk melakukan kerja pada peralatan mekanik. Pada PLTP siklus biner, fluida kerja yang digunakan untuk menggerakkan turbin bukan dari sumber utama, tapi fluida lain. Alasan penggunaan fluida kerja pada PLTP siklus biner dikarenakan fluida *brine* tidak bisa digunakan langsung untuk menggerakkan turbin. Hal tersebut bisa disebabkan oleh fluida *brine* mengandung senyawa-senyawa yang dapat merusak turbin ataupun karena kondisi *brine* tidak cukup tinggi untuk memutar turbin konvensional.

Beberapa kriteria yang harus dipenuhi diantaranya yaitu properti termodinamik yang cocok, tidak mengotori, tidak korosif, tidak beracun, tidak mudah terbakar, mudah didapatkan, dan harga terjangkau. Dan untuk penerapan pada PLTP Lahendong 5 dan 6 ditentukan penggunaan fluida kerja jenis propana karena pada tabel I senyawa tersebut cocok dengan kondisi tekanan dan temperatur *brine* pada unit pembangkit tersebut dengan kondisi tekanan dan temperatur yang relatif rendah. [J.M. Moran, 2006]

TABEL I
KARAKTERISTIK SENYAWA YANG MEMILIKI POTENSI FLUIDA KERJA YANG IDEAL

Fluida kerja	Rumus	Berat Molekul	T _{kritis}	P _{kritis}	Toksistasitas	Flam
Propane	C ₃ H ₈	44,1	96,7	41,9	Low	High
Iso Butane	C ₄ H ₁₀	58,1	134,7	35,9	Low	High
n-Butane	C ₄ H ₁₀	59,1	152,0	37,5	Low	High
Iso-Pentane	C ₅ H ₁₂	72,2	187,8	33,5	Low	High
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72,2	196,6	33,3	Low	High
R-123	C ₂ HCl ₂ F ₃	152,9	183,8	36,1	High	Non
R-134a	C ₂ H ₂ F ₄	102	101,1	40,1	Low	Non
R-245fa	C ₃ H ₃ F ₅	134	154,1	43,7	Med	Low
Amonia	NH ₃	17	132,3	111,9	High	Non
Water	H ₂ O	18	373,9	217,7	Non	Non

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Data yang dibutuhkan untuk penelitian ini dilakukan selama 19 hari. Penelitian dimulai dari tanggal 7 November 2017 sampai dengan 25 November 2017. Tempat penelitian dilakukan di PLTP Lahendong unit 5 dan 6 di Tompaso. Perhitungan dan analisa penelitian di rumah tinggal penulis dan di Laboratorium Tenaga Listrik Fakultas Teknik jurusan Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi Manado.

B. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan terdiri dari:

- 1) Mencari dan mengumpulkan referensi data (informasi) yang berkaitan dengan analisa.
- 2) Meninjau *plant* dan menentukan *state* pada kedua unit pembangkit.
- 3) Melakukan analisa *state* serta analisa energi di tiap peralatan pada kedua unit pembangkit.
- 4) Melakukan analisa efisiensi thermal pada kedua unit pembangkit.
- 5) Melakukan analisa *state* serta analisa energi pada tiap peralatan untuk penerapan siklus biner.
- 6) Melakukan analisa total efisiensi thermal pada PLTP Lahendong 5 dan 6 dan penerapan siklus binernya.
- 7) Membuat laporan penelitian.

C. Tinjauan Plant

Tinjauan *plant* dan pengambilan data dari penelitian efisiensi thermal ini dilakukan langsung di lokasi

pembangkit. Dalam peninjauan *plant*, hal yang dilakukan yaitu menentukan jenis dari PLTP Lahendong unit 5 dan 6. Kemudian meninjau Proses Flow Diagram (PFD) dari pembangkit tersebut.

Setelah meninjau dari PFD maka jenis PLTP di PLTP Lahendong unit 5 dan 6 di Tompaso adalah jenis *single flash*. Kemudian untuk menentukan data yang akan diambil, dilakukan penentuan *state* yang digunakan untuk menghitung energi dan efisiensi thermal. Data yang diperlukan yaitu data temperatur, tekanan, dan laju aliran pada setiap *state* dan dapat dilihat pada Gambar 6.

D. Perhitungan State dan Analisa Energi pada Plant

Yang pertama adalah tingkat keadaan 1. Tingkat ini adalah keadaan ketika fluida kerja dari sumur produksi berada pada fase campuran uap air. Entalpi dan entropi dapat dihitung berdasarkan fraksi uap fluida yang masuk berdasarkan tabel termodinamika. Persamaannya menjadi persamaan (1) dan (2) : [Balmer,2011]

$$s_1 = s_f + x s_{fg} \quad (1)$$

$$h_1 = h_f + x h_{fg} \quad (2)$$

Dimana :

s_1 = entropi spesifik keadaan 1 (Joule.K/kg)

s_f = entropi cair jenuh (joule.K/kg)

x = kualitas campuran

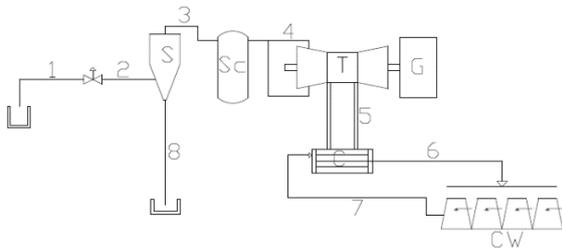
s_{fg} = selisih entropi uap jenuh dan cair jenuh (Joule.K/kg)

h_1 = entalpi spesifik keadaan 1 (Joule/kg)

h_f = entalpi cair jenuh (Joule/kg)

h_{fg} = selisih entalpi uap jenuh dan cair jenuh

Kemudian di tingkat keadaan 2 adalah saat fluida masuk kedalam separator. Data dari keadaan ini dapat diperoleh dari turbin karena tekanan pada separator pada saat melakukan *flashing* disesuaikan dengan tekanan yang dibutuhkan turbin yaitu 8,00 Bar.



Gambar 6. Kerangka Model PLTP Lahendong 5 dan 6

Dengan menyesuaikan dengan tabel termodinamika A-5 maka tingkat keadaan dilihat pada persamaan (3) :

$$h_1 = h_2 \quad (3)$$

Untuk menghitung entropi perlu diketahui kualitas uap dalam separator, maka pada persamaan (4):

$$x_2 = \frac{(h-h_f)}{h_{fg}} \quad (4)$$

Setelah didapat maka persamaannya menjadi seperti berikut pada persamaan (5) :

$$s_2 = s_f + x s_{fg} \quad (5)$$

Kemudian di tingkat keadaan 3 adalah keadaan dimana saat uap dari keluaran separator menuju scrubber untuk menghilangkan kondensat dari uap untuk memastikan bahwa uap kering. Pada scrubber terjadi *pressure drop* sebesar 0,1 bar dan terjadi penurunan massa laju aliran sebesar 0,01.[Balqis,2012]

$$m_{3a} = 0,01 \times m_3 \quad (6)$$

Dimana pada persamaan (6) diatas :

m_{3a} = massa laju aliran scrubber (kg/s)

m_3 = massa laju aliran keluaran dari separator (kg/s)

Selanjutnya pada tingkat keadaan 4 saat fluida kerja masuk ke dalam turbin untuk melakukan kerja. Tekanan dan temperatur pada keadaan ini sama dengan keadaan 2.

Pada tingkat keadaan 5 dan 5s adalah pada saat fluida masuk ke dalam kondenser. Uap mengalami ekspansi isentropik mencapai keadaan ideal 5s pada turbin sehingga entropi tetap. Sedangkan pada keadaan aktual terjadi pada tingkat keadaan 5 dan data teknis diambil dari kondenser dengan tekanan yang masuk kondenser 0,108 Bar pada unit 5 dan 0,087 Bar pada unit 6.

Untuk mengetahui nilai entalpi keadaan 5s perlu mengetahui kualitas campuran pada persamaan (7) :

$$x_{5s} = \frac{(s-s_f)}{s_{fg}} \quad (7)$$

Maka nilai entalpi dihitung dengan persamaan (8) :

$$h_{5s} = h_f + x h_{fg} \quad (8)$$

Untuk nilai entalpi keadaan 5 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan efisiensi isentropik turbin dengan asumsi nilai efisiensi turbin sebesar 85%, yaitu :

$$\eta_t = \frac{(h_4-h_5)}{(h_4-h_{5s})} \quad (9)$$

Untuk nilai entropi perlu diketahui lebih dahulu fraksi uap keadaan 5 pada persamaan (10) :

$$x_5 = \frac{(h-h_f)}{h_{fg}} \quad (10)$$

Dengan mengetahui fraksi uap, maka nilai entropi dihitung dengan persamaan (11) :

$$s_5 = s_f + x s_{fg} \quad (11)$$

Selanjutnya pada tingkat keadaan 7 merupakan keadaan dimana fluida keluar melalui cooling tower menuju ke kondenser. Data yang diperlukan sama dengan data pada kondenser dan bernilai konstan.

Kemudian pada tingkat keadaan 8 merupakan tingkat keadaan dimana *brine* hasil pemisahan di separator dialirkan dan ditampung ke dalam kolam pengendapan untuk di injeksikan kembali ke dalam perut bumi melalui sumur injeksi.

1) Proses Pada Turbin

Pada turbin fluida kerja masuk dengan tingkat keadaan fase 4. Selanjutnya fluida akan diekspansi menjadi kerja oleh turbin. Kita dapat menghitung laju kerja turbin dengan persamaan (12) :

$$\dot{W}_T = \dot{m}_s \eta_t (h_4 - h_{5s}) \quad (12)$$

Dimana :

\dot{W}_T = Laju kerja turbin (Watt)

η_t = Efisiensi turbin (%)

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

h_4 = Entalpi keadaan 4 (Joule/kg)

h_5 = Entalpi keadaan 5 (Joule/kg)

2) Proses Pada Kondenser

Pada kondenser berlangsung proses kondensasi agar fluida kerja pada tingkat keadaan 5 yang berupa campuran dua fase mencapai keadaan 6 yang berupa fase cair. Dengan memperhatikan entalpi fluida kerja pada keadaan 5 dan keadaan 6 kita dapat menganalisa

TABEL III
PROSES TERMODINAMIKA TINGKAT KEADAAN PLTP LAHENDONG 5

T K	Laju massa (kg/s)	Tempera tur (°C)	Tekana n (bar)	Entropi (kJ/kg. K)	Entalpi (kJ/kg)	Ket
1	99,97	211,85	19,39	4,002	1661,3	Sumur
2	99,97	170,41	8,00	4,1490	1661,3	
3	40,72	170,41	7,41	6,704	2772,3	
4	39,99	170,41	8,00	6,6616	2768,3	
5s	39,99	47,32	0,108	6,6616	2118,3	Ideal
5	39,99	47,32	0,108	6,959	2183,3	Aktual
6	39,99	47,32	0,108	0,669	198,13	
7	39,99	47,32	0,108	8,122	2586,5	
8	59,98	170,41	8,00	2,0457	720,87	Brine

TABEL III
PROSES TERMODINAMIKA TINGKAT KEADAAN PLTP LAHENDONG 6

TK	Laju massa (kg/s)	Temperatur (°C)	Tekanan (bar)	Entropi (kJ/kg.K)	Entalpi (kJ/kg)	Ket
1	100,12	163,65	16,92	3,8736	1796,58	Sumur
2	100,12	170,41	8,00	4,4460	1796,58	
3	52,06	170,41	8,00	6,6616	2768,3	
4	40,05	170,41	8,00	6,6616	2768,3	
5s	40,05	43,11	0,087	6,6616	2092,18	Ideal
5	40,05	43,11	0,087	6,976	2159,8	Aktual
6	40,05	43,11	0,087	0,614	180,53	
7	40,05	43,11	0,087	8,198	2579,09	
8	60,07	170,41	8,00	2,0457	720,87	Brine

energi kalor yang keluar dari fluida kerja saat pada dalam kondenser dengan persamaan (13) :

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_s(h_5 - h_6) \quad (13)$$

Dimana :

\dot{Q}_{out} = Laju kalor keluar (Watt)

\dot{m}_s = Laju massa uap (kg/s)

h_5 = Entalpi keadaan 5 (Joule/kg)

h_6 = Entalpi keadaan 6 (Joule/kg)

3) Proses Pada Sumur Produksi

Setelah proses kondensasi selesai uap yang telah terkondensasi akan diinjeksikan kembali ke dalam perut bumi. Kemudian akan diambil kembali dengan tekanan dan temperatur besar yang akan kembali pada tingkat keadaan 1, sehingga siklus boleh terus berlanjut. Besarnya kesetimbangan laju massa dan energi proses ini memenuhi persamaan (14):

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}(h_1 - h_3) \quad (14)$$

Dimana :

\dot{Q}_{in} = Laju kalor masuk (Watt)

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

h_1 = Entalpi keadaan 1 (Joule/kg)

h_3 = Entalpit keadaan 3 (Joule/kg)

4) Efisiensi

Selanjutnya untuk mengukur kinerja sistem harus dihitung efisiensi thermal sistem. Efisiensi thermal mengukur seberapa banyak energi yang masuk ke dalam fluida kerja yang dikonversikan menjadi keluaran netto. Efisiensi thermal dari siklus tenaga adalah pada persamaan (15) :

$$\eta = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{hp}}{\dot{Q}_{in}} \quad (15)$$

Dimana :

η = Efisiensi thermal

\dot{W}_T = Laju kerja turbin (Watt)

\dot{W}_{hp} = Laju kerja pompa utama (Watt)

\dot{Q}_{in} = Laju kalor masuk (Watt)

III. HASIL DAN ANALISA

A. Hasil Analisa Tingkat Keadaan Unit 5 dan 6

Analisa tingkat keadaan pada PLTP Lahendong unit 5 dan 6 menggunakan metode yang sudah dijelaskan . Tabel II dan tabel III adalah hasil analisa tingkat keadaan PLTP Lahendong 5 dan 6:

B. Analisa Energi Ditiap Proses PLTP Lahendong 5 dan 6

Dengan mengetahui tingkat keadaan pada Tabel II dan Tabel III dari fluida kerja, kita dapat menghitung besarnya kerja, besarnya energi panas yang masuk dan keluar sistem, pada komponen-komponen yang dilewati fluida kerja sehingga efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi juga dapat diketahui.

1) Analisa Proses Pada Turbin

Pada turbin fluida kerja masuk dengan tingkat keadaan 4 fase *superheated*. Sekanjutnya fluida akan diekspansi menjadi kerja oleh turbin sehingga fluida akan berada pada kondisi aktual, yang merupakan campuran dua fase dan dengan mengasumsikan efisiensi turbin sebesar 90%, kita dapat menghitung besarnya laju kerja turbin pada kondisi aktual dengan persamaan :

$$\dot{W}_T = \dot{m}_s \eta_t (h_4 - h_{5s})$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

Unit 5 :

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= 39,99 \text{ kg/s} \\ h_4 &= 2768,3 \text{ kJ/kg} \\ h_{5s} &= 2118,37 \text{ kJ/kg} \\ \eta_t &= 90 \% \end{aligned}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{W}_T &= 39,99 \cdot 0,90(2768,3 - 2118,37) \\ W_T &= 23391,63 \end{aligned}$$

Maka pada keadaan ideal laju kerja turbin unit 5 adalah 23,3 MW

Unit 6:

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= 40,05 \text{ kg/s} \\ h_4 &= 2768,3 \text{ kJ/kg} \\ h_{5s} &= 2092,18 \text{ kJ/kg} \\ \eta_t &= 90 \% \end{aligned}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{W}_T &= 40,05 \cdot 0,90(2768,3 - 2092,18) \\ W_T &= 24370,74 \end{aligned}$$

Maka pada keadaan ideal laju kerja turbin unit 6 adalah 24,3 MW

2) Analisa Proses Pada Kondenser

Pada Kondenser berlangsung proses kondensasi agar fluida kerja pada tingkat keadaan 5 yang berupa campuran dua fase mencapai keadaan 6 yang berupa fase cair. Kita dapat menganalisa besarnya energi kalor yang keluar dari fluida kerja saat berproses dalam kondenser dengan persamaan :

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_s (h_5 - h_6)$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

Unit 5 :

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= 39,99 \text{ kg/s} \\ H_5 &= 2183,37 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$H_6 = \text{entalpi air jenuh } (h_f) = 198,13 \text{ kJ/kg}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{out} &= 39,99(2183,37 - 198,13) \\ Q_{out} &= 79.389,74 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

Jadi besarnya energi kalor yang keluar adalah 79.389,74 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 79,3 MW.

Unit 6:

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= 40,05 \text{ kg/s} \\ H_5 &= 2159,8 \text{ kJ/kg} \\ H_6 &= \text{entalpi air jenuh } (h_f) = 180,53 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{out} &= 40,05(2159,8 - 180,53) \\ Q_{out} &= 79.269,76 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

Jadi besarnya energi kalor yang keluar adalah 79.269,76 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 79,2 MW.

3) Analisa Proses Pada Sumus Produksi

Pada sumur produksi tekanan dan temperatur dapat dilihat pada tingkat keadaan 1, yaitu temperatur sekitar 211,85 °C pada unit 5 dan 163,65 °C pada unit 6. Kalor yang masuk pada fluida kerja dapat dihitung dengan persamaan :

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} h_1$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

Unit 5 :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 99,45 \text{ kg/s} \\ h_1 &= 1661,30 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} &= 99,97 (1661,30) \\ Q_{in} &= 166.080,16 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

Jadi besarnya laju energi kalor yang masuk ke dalam fluida kerja adalah 166.080,16 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 166,08 MW.

Unit 6:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 100,12 \text{ kg/s} \\ h_1 &= 1796,58 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} &= 100,12 (1796,58) \\ Q_{in} &= 179.873,58 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

Jadi besarnya laju energi kalor yang masuk ke dalam fluida kerja adalah 179.873, 58 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 179,87 MW

4) Analisa Laju Energi Brine

Air panas sisa separasi akan mencapai keadaan 8 pada separator. Tentu saja *brine* ini memiliki kandungan energi kalor yang kemudian akan didinginkan pada kolam penendapan hingga diinjeksikan kembali ke dalam perut bumi. Laju energi kalor keluar pada *brine* dinyatakan dengan :

$$\dot{Q}_b = \dot{m}_b (h_8)$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :
Unit 5 :

$$\begin{aligned}\dot{m}_b &= 59,98 \text{ kg/s} \\ H_8 &= 720,87 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\dot{Q}_b = 59,98 (720,87)$$

$$\dot{Q}_b = 43.302,66 \text{ kJ/s}$$

Jadi besarnya laju energi kalor yang keluar pada *brine* adalah 43.302,66 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 43,3 MW.

C. Efisiensi Thermal PLTP Lahendong 5 dan 6

Untuk menentukan efisiensi thermal sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi adalah dengan membandingkan besarnya kerja yang dilakukan turbin dikurangi kerja pompa utama dengan besarnya laju energi kalor yang masuk ke dalam sistem atau ke dalam turbin:

$$\eta = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{hp}}{\dot{Q}_{in}}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :
Unit 5:

$$\begin{aligned}\text{Laju kerja turbin} &= 23,3 \text{ MW} \\ \text{Laju kerja pompa utama} &= 0,25 \text{ MW} \\ \text{Laju kalor masuk} &= 166,08 \text{ MW}\end{aligned}$$

$$\eta = \frac{23,3 - 0,25}{166,08}$$

$$\eta = 0,1387 = 13,87 \%$$

Jadi besarnya efisiensi thermal keseluruhan proses pembangkitan pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 5 saat ini 13,87%.

Unit 6:

$$\begin{aligned}\text{Laju kerja turbin} &= 24,3 \text{ MW} \\ \text{Laju kerja pompa utama} &= 0,25 \\ \text{Laju kalor masuk} &= 179,8 \text{ MW}\end{aligned}$$

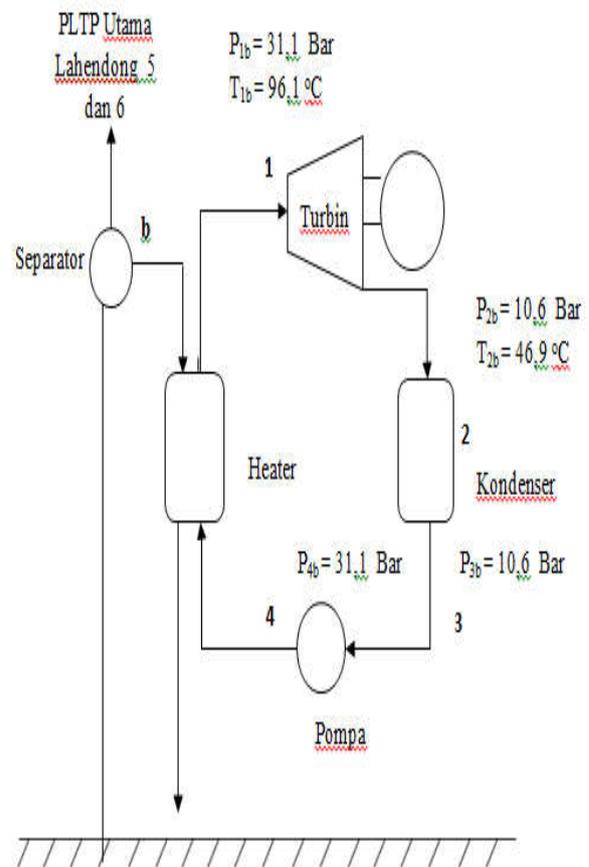
$$\eta = \frac{24,3 - 0,25}{179,8}$$

$$\eta = 0,1337 = 13,37 \%$$

Jadi besarnya efisiensi thermal keseluruhan proses pembangkitan pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 6 saat ini 13,37%.

1) Pemodelan Siklus Biner PLTP Lahendong 5 dan 6

Dengan memperhatikan data-data yang di dapat dengan menggunakan fluida kerja hidrokarbon propana, kita dapat menganalisa setiap tingkat keadaan atau proses di tiap komponen utama PLTP siklus biner dengan bantuan tabel IV termodinamika. Berikut adalah kerangka model siklus biner PLTP Lahendong 5 dan 6.



Gambar 7. Kerangka Model Siklus Biner PLTP Lahendong 5 dan 6

TABEL IV
PROSES TERMODINAMIKA TINGKAT KEADAAN PADA SIKLUS BINER

T K	Laju massa (kg/s)	Tempe ratur (°C)	Teka nan (bar)	Entropi (kJ/kg.K)	Entalp i (kJ/kg)	Ket
1	43,115	96,1	33,1	1,788	557,3	Turbin
2	43,115	46,9	10,6	1,788	524,6	Kondens er
3	43,115	26,95	10,6	0,618	166,1	Pompa
4	43,115	26,95	33,1	0,618	170,7	Heat Exc

1) Hasil Analisa Tingkat Keadaan Siklus Biner

Analisa tingkat keadaan pada siklus biner terdiri dari 4 fase. Berikut adalah tabel hasil analisa siklus biner PLTP Lahendong 5 dan 6 diperlihatkan pada Tabel IV.

a. Analisa Tingkat Keadaan 1b Siklus Biner

Tingkat keadaan 1b adalah tingkat keadaan dimana fluida kerja masuk turbin setelah mendapat kalor dari *heater* untuk melakukan kerja. Pada keadaan ini fluida dalam fase gas *superheated*, dengan keadaan:

$$p_{1b} = 33,1 \text{ bar}$$

$$T_{1b} = 96,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Sedangkan untuk nilai entropi dan entalpi dari keadaan ini dapat dilihat pada tabel A-18 termodinamika (sifat propana lanjut), untuk nilai entalpi dan entropi di diasumsikan pada tekanan 35 bar dan temperatur 100 °C.

$$\text{Entropi keadaan 1b } (s_{1b}) = 1,788 \text{ kJ.K/kg}$$

$$\text{Entalpi keadaan 1b } (h_{1b}) = 577,3 \text{ kJ/kg}$$

b. Analisa Tingkat Keadaan 2b Siklus Biner

Tingkat keadaan 2b adalah saat fluida kerja masuk kondenser, atau keluar dari turbin setelah melakukan kerja. Fluida kerja mengalami ekspansi isentropik mencapai keadaan ideal 2b pada turbin sehingga entropi tetap. Pada keadaan 2b fluida masih dalam keadaan gas *superheated* karena karakteristik dari propana, untuk nilai tingkat keadaan dapat diambil dari data keluaran turbin.

$$\text{Tekanan keadaan 2b } (p_{2b}) = 10,6 \text{ Bar}$$

$$\text{Temperatur keadaan } (T_{2b}) = 46,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Untuk nilai entalpi di asumsikan pada tekanan 10 Bar dan temperatur 40 °C

$$\text{Entalpi keadaan 2b } (h_{2b}) = 524,67 \text{ kJ/kg}$$

c. Analisa Tingkat Keadaan 3b Siklus Biner

Tingkat keadaan 3b adalah saat fluida selesai dikondensasi pada kondenser, fluida kerja sudah mencapai fase cair jenuh atau fase cair. Karena pada proses kondensasi berlangsung pada tekanan tetap maka tingkat keadaan untuk tekanan sama dengan pada keadaan 2b yaitu:

$$\text{Tekanan keadaan 3b } (p_{3b}) = 10,6 \text{ Bar}$$

Untuk menyesuaikan dengan tabel termodinamika A-17 (sifat propana jenuh:tabel tekanan) dan tekanan yang diasumsikan pada keadaan 2b, maka tekanan keadaan 3b diasumsikan pada tekanan 10 Bar. Untuk nilai temperatur terjadi penurunan karena terjadi perubahan antar fase dari gas *superheated* menjadi cair atau cair jenuh, yaitu mencapai temperatur cair jenuh.

$$\text{Temperatur keadaan 3b } (T_{3b}) = 26,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Sedangkan untuk nilai entropi dan entalpi adalah sama dengan nilai entropi dan entalpi cair jenuh pada tekanan 10 Bar tersebut, yaitu:

$$\text{Entropi keadaan 3b } (s_{3b}) = \text{entalpi air jenuh } (s_f) = 0,618 \text{ kJ.K/kg}$$

$$\text{Entalpi keadaan 3b } (h_{3b}) = \text{entalpi air jenuh } (h_f) = 166,1 \text{ kJ/kg}$$

d. Analisa Tingkat Keadaan 4b Siklus Biner

Tingkat keadaan 4b adalah saat fluida selesai dikompresi pada pompa hingga mencapai tekanan yang besar sesuai kebutuhan turbin. Pada keadaan ini fluida kerja dalam fase cair. Karena pada proses kompresi berlangsung pada suhu yang tetap maka nilai temperatur keadaan 4b adalah sama dengan keadaan 3b.

$$\text{Tekanan keadaan 4b } (p_{4b}) = 33,1 \text{ Bar}$$

$$\text{Temperatur keadaan 4b } (T_{4b}) = \text{temperatur keadaan 3b } (T_{3b}) = 26,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Sedangkan untuk nilai entropi adalah sama dengan nilai entropi pada keadaan 3b karena proses kompresi isentropik pada pompa.

Untuk nilai entalpi dapat dihitung dengan persamaan kerja pompa. Dengan mensubstitusi persamaan $\dot{W}_p/\dot{m}_{wf} = v_{3b}(p_{4b} - p_{3b})$ ke persamaan tersebut. Maka :

$$\text{Entalpi keadaan 4b } (h_{4b}) = 170,7 \text{ kJ/kg}$$

D. Analisa Energi Pada Siklus Biner PLTP Lahendong 5 dan 6

Dengan Mengetahui tingkat keadaan dari fluida kerja propana pada siklus biner, kita dapat menghitung

besarnya energi panas yang masuk dan yang keluar sistem, pada komponen-komponen yang dilewati fluida kerja.

1) Analisa Proses Pada Turbin Siklus Biner

Pada turbin siklus biner fluida kerja masuk dengan tingkat keadaan 1b fase *superheated*. Selanjutnya fluida akan diekspansi menjadi kerja sehingga fluida akan mencapai tingkat keadaan 2b pada kondisi aktual. Kita dapat menghitung besarnya besarnya laju kerja turbin pada kondisi ideal dengan persamaan :

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{wf}(h_{1b} - h_{2b})$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

$$\dot{m}_{wf} = 43,154 \text{ kg/s}$$

$$h_{1b} = 577,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2b} = 524,6 \text{ kJ/kg}$$

maka persamaan tersebut menjadi :

$$\dot{W}_t = 43,154 (577,3 - 524,6)$$

$$\dot{W}_t = 2274,21$$

Maka keadaannya laju kerja turbin adalah 2274,21 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 2,3 MW

2) Analisa Proses Pada Kondenser Siklus Biner

Pada kondenser berlangsung proses kondensasi agar fluida kerja pada tingkat keadaan 2b yang masih berupa gas *superheated* mencapai keadaan 3b yang berupa fase cair. Kita dapat menganalisa besarnya energi kalor yang keluar dari fluida kerja saat berproses dalam kondenser dengan persamaan :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{wf}(h_{2b} - h_{3b})$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

$$\dot{m}_{wf} = 43,154 \text{ kg/s}$$

$$h_{2b} = 524,6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{3b} = 166,1 \text{ kJ/kg}$$

maka persamaan tersebut menjadi :

$$\dot{Q}_c = 43,154(524,6 - 166,1)$$

$$\dot{Q}_c = 15470,7 \text{ kJ/s}$$

Jadi besarnya laju energi kalor yang keluar adalah 15.470,7 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 15,5 MW.

3) Proses Pada Pompa Siklus Biner

Fluida yang masuk pada pompa dalam fase cair pada tingkat keadaan 3b kemudian dikompresi hingga mencapai tekanan yang dibutuhkan turbin pada tingkat

keadaan 4b, untuk besarnya laju pompa dapat dihitung dengan persamaan :

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{wf}(h_{4b} - h_{3b})$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

$$\dot{m}_{wf} = 43,154 \text{ kg/s}$$

$$h_{4b} = 170,7 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{3b} = 166, \text{ kJ/kg}$$

maka persamaan tersebut menjadi :

$$\dot{W}_p = 43,154 (170,7 - 166,1)$$

$$\dot{W}_p = 198,5 \text{ kJ/s}$$

Jadi besarnya laju kerja pompa yang bekerja pada fluida kerja adalah 198,5 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 0,2 MW

4) Analisa Proses Pada Heat Exchanger Siklus Biner

Fluida yang masuk pada *heat exchanger* dalam fase cair pada tingkat keadaan 4b memiliki tekanan yang tinggi seperti yang dibutuhkan turbin kemudian pada *heater* fluida kerja akan menerima kalor sehingga mencapai fase gas *superheated* yang baik dalam menggerakkan turbin. Perhitungan kalor masuk pada *heat exchanger* adalah :

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_{wf}(h_{1b} - h_{4b})$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

$$\dot{m}_{wf} = 43,154 \text{ kg/s}$$

$$h_{1b} = 577,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{4b} = 170,7 \text{ kJ/kg}$$

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\dot{Q}_h = 43,154 (577,3 - 170,7)$$

$$\dot{Q}_h = 17530,56 \text{ kJ/s}$$

Jadi besarnya laju energi kalor yang masuk ke dalam fluida kerja adalah 17546,41 kJ/s atau dapat dibulatkan menjadi 17,5 MW.

E. Efisiensi Siklus Biner PLTP Lahendong unit 5 dan 6

Untuk menentukan efisiensi thermal sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner pada PLTP Lahendong unit 5 dan 6 adalah dengan membandingkan besarnya kerja yang dilakukan turbin dikurangi kerja pompa utama dengan besarnya laju energi kalor yang masuk ke dalam sistem atau ke dalam turbin sebagai keluaran netto energi thermal tersebut.

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_{in}}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :

Laju kerja turbin = 2,3 MW
Laju kerja pompa = 0,2 MW
Laju kalor masuk = 17,5 MW

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\eta = \frac{2,3 - 0,2}{17,5}$$

$$\eta = 0,12 = 12 \%$$

Jadi besarnya efisiensi proses pembangkitan pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner pada PLTP Lahendong unit 5 dan 6 adalah sebesar 12%.

F. Efisiensi Total Pembangkit

Efisiensi keseluruhan sistem PLTP Lahendong unit 5 dan 6 dengan penggunaan siklus biner pada *brine* adalah perbandingan besarnya seluruh daya yang dihasilkan secara keseluruhan dengan besarnya potensi energi yang tersedia pada sumur produksi dapat dihitung dengan persamaan :

$$\eta = \frac{\dot{W}_T + \dot{W}_t - (\dot{W}_{hp} + \dot{W}_p)}{\dot{Q}_{in}}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai perhitungan :
Unit 5 :

Laju kerja turbin = 23,3 MW
Laju kerja pompa utama = 0,25 MW
Laju kalor masuk = 166,08 MW

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\eta = \frac{23,3 + 2,3 - (0,25 + 0,2)}{166,08}$$

$$\eta = 0,1514$$

Jadi besarnya efisiensi keseluruhan proses pembangkitan pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 5 dengan penggunaan siklus biner pada *brine* adalah sebesar 15,14%.

Unit 6 :

Laju kerja turbin = 24,3 MW
Laju kerja pompa utama = 0,25 MW
Laju kalor masuk = 179,8 MW

Maka persamaan tersebut menjadi :

$$\eta = \frac{24,3 + 2,3 - (0,25 + 0,2)}{179,8}$$

$$\eta = 0,1454$$

Jadi besarnya efisiensi keseluruhan proses pembangkitan listrik tenaga panas bumi Lahendong unit

6 dengan penggunaan siklus biner pada *brine* adalah sebesar 14,54 %.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah melakukan analisa dari data yang didapatkan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 5 berdasarkan hasil analisa adalah sebesar 13,87%.
- 2) Efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 6 berdasarkan hasil analisa adalah sebesar 13,37%.
- 3) Dengan menggunakan siklus biner pada PLTP Lahendong unit 5 yang memanfaatkan *brine* dari separator, efisiensi thermal pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 6 meningkat menjadi sebesar 15,14%.
- 4) Dengan menggunakan siklus biner pada PLTP Lahendong unit 6 yang memanfaatkan *brine* dari separator, efisiensi thermal pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 6 meningkat menjadi sebesar 14,54%.

B. Saran

Untuk penelitian serupa dapat menerapkan siklus PLTP yang lainnya untuk perhitungan peningkatan efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi, dan untuk penerapan PLTP siklus biner di Indonesia harus lebih banyak dilakukan penelitian supaya pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia bisa lebih meningkat.

V. KUTIPAN

- [1.] C. H. Armstead, *Geothermal Energi*. E & FN SPON, 1973.
- [2.] R. T. Balmer. *Modern Engineering Thermodynamics*. Elsevier Inc. 2011.
- [3.] Balqis. *Optimasi Daya Listrik Pada PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang, Jawa Barat*. *Jurnal Teknik Pomits*. Vol. 1, No. 1, 1-6.2012.
- [4.] R. DiPippo. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Elsevier Ltd. 2008.
- [5.] M. J. Moran, H.N. Shapiro., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5th edition., John Wiley and Sons, Inc., 2006.

- [6.] R. S. Paiman. *Analisa Peningkatan Efisiensi Thermal PLTP Lahendong Unit II*. Universitas Sam Ratulangi. 2012.
- [7.] Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2017-2026 PT PLN (Persero).2017.
- [8.] M. Shadev. (2008). *Centrifugal Pumps: Basic Concepts Of Operation, Maintenance and Troubleshooting, Part I*. Presented at The Chemical Engineers' [online] tersedia di: www.cheresource.com.
- [9.] D. Yogisworo. *Pengembangan Turbin Hidrokarbon Tipe Radial Flow Untuk PLTP Siklus Biner Oleh Industri Lokal Dalam Negeri*. Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi. 2010.



Gerry Angling Kusuma lahir 13 November 1994, pada tahun 2013 memulai Pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado di Jurusan Teknik Elektro, dengan mengambil konsentrasi minat Teknik Tenaga Listrik pada tahun 2015. Dalam menempuh Pendidikan penulis juga pernah melaksanakan Kerja Praktek yang bertempat di PLTP Lahendong Unit 5 dan

6 di Tompaso pada tanggal 26 Juni 2016 dan selesai melaksanakan Pendidikan di Fakultas Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi Manado tahun 2018, minat penelitiannya adalah tentang Analisa Efisiensi Thermal PLTP Lahendong Unit 5 dan 6 di Tompaso.