

## Analisis Kinerja Kondensator *Direct Contact* Tipe *Jetspray* Berdasarkan Efektivitas dan Efisiensi *Thermal* PT *Geothermal Energy* Ulubelu

Elli Prastyo

Teknik Kimia, Akamigas Balongan, Indramayu, Indonesia

[elli.prastyo@gmail.com](mailto:elli.prastyo@gmail.com)

### Abstrak

PT Pertamina *Geothermal Energy* (PGE) Ulubelu menggunakan kondensator tipe *jetspray* dengan tugas mengubah fase vapour dari turbin (*steam tubin*) menjadi *liquid*. Fluida input kondensator merupakan output dari turbin (*steam* dan *non condensable gas*), yang beroperasi pada tekanan konstan 0,08 bar dan temperatur rata-rata 28°C. Evaluasi kinerja kondensator dilakukan berdasarkan temperatur dan laju alir (fluida masuk kondensator dan laju alir *cooled water*) terhadap nilai efisiensi thermal dan efektivitas. Nilai efektivitas tertinggi sebesar 79,4% terjadi pada saat nilai  $Q_{\text{aktual}}$  sebesar 10,891°C, sedangkan nilai efektivitas terendah sebesar 78,2% terjadi pada saat nilai  $Q_{\text{aktual}}$  sebesar 10,306°C. Efisiensi thermal kondensator tertinggi terjadi pada minggu ke 4 sebesar 52,3% dengan  $Q_{\text{air}}$  441.149.944,2 kJ/h. Nilai  $Q_{\text{air}}$  417.424.072,6 kJ/h menghasilkan Efisiensi thermal kondensator sebesar 49,5% pada minggu pertama. Hasil perhitungan kemudian divisualisasi menggunakan grafik menunjukkan ketika  $Q$  dinaikkan dari  $4,17 \cdot 10^8$  kJ/kg ke  $4,4 \cdot 10^8$  kJ/kg efisiensi kondensator meningkat sebesar 0,6%.

Kata kunci: efektivitas, efisiensi, kondensator, laju alir, temperatur

### Abstract

PT Pertamina geothermal energy (PGE) Ulubelu uses jetspray-type condensers with the task of changing the vapour phase from turbine (*steam tubin*) to liquid. Condenser input fluid is the output of turbines (*steam* and *non condensable gas*), operating at a constant pressure of 0,08 bar and an average temperature of 28°C. Evaluation of condenser performance is based on the temperature and flow rate (condenser entry fluid and cooled water flow rate) against the value of thermal efficiency and effectiveness. The highest effectiveness value of 79,4% occurred when the  $Q_{\text{aktual}}$  value was 10,891°C, while the lowest effectiveness value of 78,2% occurred when the  $Q_{\text{aktual}}$  value was 10,306°C. The highest condenser thermal efficiency occurred in week 4 at 52,3% with  $Q_{\text{air}}$  441,149,944.2 kJ/h.  $Q_{\text{air}}$  value of 417.424.072,6 kJ/h resulted in a condenser thermal efficiency of 49,5% in the first week. The calculation results were then visualized using a graph showing when  $Q$  was raised from  $4,17 \cdot 10^8$  kJ/kg to  $4,4 \cdot 10^8$  kJ/kg condenser efficiency increased by 0,6%.

Keywords: effectiveness, efficiency, condenser, flow rate, temperature

### 1. Pendahuluan

Energi panas bumi atau bisa disebut *energy geothermal* merupakan energi yang terbentuk dari fluida panas di dalam perut bumi karena adanya aktivitas tetonik dan memiliki nilai kalor untuk dalam dimanfaatkan menjadi energi panas bumi untuk menggerakkan turbin. *Reservoir* yang mengandung uap panas kemudian di alirkan sampai menembus reservoir melalui sumur produksi sampai menuju ke permukaan untuk kemudian dimanfaatkan (Neny, 2018). PT Pertamina *Geothermal Energy* Area Ulubelu Lampung terdapat 54 sumur produksi dan ada 3 sumur yang sedang uji coba produksi. Uap yang di gunakan untuk suplai listrik melalui beberapa proses salah satunya *exhaust steam* atau uap sisa yang diproses menggunakan kondensator (Wahyuningsih, 2005).

Kondensator pada sistem turbin uap di PT Pertamina *Geothermal Energy* Area Ulubelu merupakan alat proses yang penting untuk mendapatkan nilai efisiensi sistem yang tinggi. Kondensator yang digunakan memiliki fungsi mengubah fase *vapour* menjadi *liquid*. Perpindahan panas yang baik merupakan salah satu parameter yang dapat mempengaruhi kinerja kondensator. Perhitungan variable-variable terikat khususnya perubahan tekanan, temperatur, dan laju alir diperlukan untuk mendapatkan nilai efisiensi kondensator sesuai standart.

Tekanan vakum kondensator merupakan parameter yang sangat mempengaruhi dari nilai efisiensi turbin uap ketika bekerja pada *low pressure*, sehingga menjadi hal yang penting untuk menjaga level tekanan tetap berada pada kondisi *vacuum*. Kondensator yang memiliki nilai tekanan *vacuum* semakin rendah berdampak terhadap munculnya fenomena kembalinya tekanan menuju *low pressure* turbin. Fenomena kembalinya tekanan menuju *low pressure* pada turbin

#### Info Makalah:

Dikirim : 03-31-21;

Revisi 1 : 05-25-21;

Revisi 2 : 06-10-21;

Diterima : 06-22-21.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +6282331855757

e-mail : [elli.prastyo@gmail.com](mailto:elli.prastyo@gmail.com)

berdampak terhadap penurunan nilai efisiensi turbin uap karena rusaknya sudu-sudu turbin. Nilai efisiensi *low pressure* turbin dapat meningkat karena faktor nilai tekanan *vacuum* yang semakin tinggi.

Tekanan uap merupakan nilai yang berkorelasi terhadap nilai tekanan dan temperatur ketika suatu alat beroperasi, khususnya pada kondisi *vacuum*, dimana nilai tekanan dan temperatur merupakan suatu besaran yang saling berkorelasi. Tekanan dan suhu kondensator perlu dijaga serendah mungkin

sehingga menghasilkan daya turbin yang besar. Tekanan vakum dapat meningkatkan efisiensi termal, dimana perubahan tekanan pada kondensor mempengaruhi efisiensi dan kemampuan proses kondensasi (Gokcen, 2008). Pemakaian suatu kondensor memungkinkan suatu fluida kerja yang berasal dari air hasil pemurnian karena proses recycle yang berkesinambungan.

*Water Jet Ejector* merupakan sistem yang berfungsi untuk mempertahankan keadaan vacuum pada kondensor. *Water Jet Ejector System* memanfaatkan sistem air yang bersirkulasi secara tertutup (*Closed System*). Cara kerja dari *Water Jet* adalah dengan memanfaatkan air yang dipompakan oleh *water jet pump*. Air yang dipompakan ke *Ejector* melewati Line pipa yang terhubung dengan ruangan kondensor yang *vacuum*. Ketika air melewati pipa yang terhubung dengan ruangan kondensor, air yang bersirkulasi dalam sistem ini memberikan tarikan udara pada ruangan *vacuum* di kondensor, sehingga kevacuman di kondensor tetap terjaga.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan menjadi rujukan dalam penelitian ini diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Fadly HI. Abbas mengenai “Pengaruh Sistem *Cooling Water Ejector* terhadap Stabilitas Vacuum Kondensor PLTU Tidore” tahun 2020. Peneliti menyatakan bahwa saat kondensor beroperasi pada siang hari terjadi penurunan tekanan *vacuum* pada kondensor, dan kondisi vacuum mengalami kenaikan pada malam hari. Berdasarkan data menyebutkan bahwa kondisi *vacuum* kondensor pada malam hari lebih baik daripada kondisi vacuum pada siang hari. Hal ini karena malam hari system cooling bekerja dengan optimal dengan memanfaatkan udara malam yang dingin, daripada saat kondisi siang hari yang memanfaatkan udara panas untuk proses *cooling* / pendinginan. Data menunjukkan nilai temperatur *water ejector* berkorelasi terhadap nilai tekanan *vacuum* pada kondensor. Nilai temperatur yang lebih rendah meningkatkan kinerja kondensor karena tekanan vacuum dapat dijaga serendah mungkin. Dari evaluasi yang dilakukan, temperatur air dalam tanki sangat berpengaruh terhadap kinerja *water ejector system*. Hal ini dibuktikan dengan data riwayat temperatur air tanki yang tinggi dapat menyebabkan *pressure ejector* menurun yang kemudian dapat mempengaruhi tekanan *vacuum condenser*. Dari data dapat disimpulkan dengan temperature air *water jet tank* < 50 °C maka kinerja *water jet system* lebih maksimal sehingga vacuum condenser lebih terjaga di *pressure* – 0,09 Mpa.

Asrorin Safira Zata Lini tahun 2016 melakukan penelitian mengenai efektivitas dan efisiensi dari kondensor turbin. Peneliti menyatakan suatu pembangkit listrik memiliki nilai efisiensi yang baik jika efektivitas kondensor tinggi. Hasil analisis menyatakan nilai tekanan *vacuum* bukan merupakan parameter utama penyebab dari nilai efektivitas kondensor. Proses perubahan fase dari *vapour steam* menjadi liquid merupakan salah satu faktor dari naik atau turunnya tekanan pada kondensor. Perbedaan nilai densitas antara *condensate water* dan *steam* menjadi penyebab munculnya *vacuum condensate* yang terjadi pada kondensor. Nilai tekanan vakum akan meningkat seiring dengan semakin cepatnya kondensor melakukan proses kondensasi *vapour steam* yang berasal dari *low pressure* turbin menjadi *condensate water*. Kondensor 2 atau kondensor 1 memiliki nilai perhitungan efektivitas yang tidak berbeda secara signifikan dilihat dari data secara actual dengan data kondensor saat terjadi *commissioning* dengan selisih nilai sebesar 0,08%. Nilai efektivitas yang tidak berbeda jauh atau sama ketika kondensor beroperasi dalam waktu tertentu dengan kondensor ketika *commissioning* menjadi indikator kinerja kondensor dikatakan baik. Kondensor unit 5 memiliki kinerja yang baik berdasarkan evaluasi yang dilakukan jika ditinjau dari nilai efektivitas. Hal ini dikarenakan nilai efektivitas kondensor ketika *commissioning* dan aktual tidak berbeda jauh. Nilai efektivitas data aktual pada kondensor dua sebesar 0,262 dan ketika *commissioning* diperoleh nilai efektivitas sebesar 0,323. Nilai efektivitas data actual dari kondensor satu sebesar 0,234 dan dari data *commissioning* dihasilkan efektivitas sebesar 0,345

Nilai tingkat kevacuman dari kondensor dapat menurun karena adanya *non condensable gases*. *Non condensable gases* merupakan gas yang berasal dari luar dan masuk pada bagian *air leakage* kondensor sehingga menyebabkan turunnya tingkat kevacuman karena tidak dapat terkondensasi. Udara masuk ke dalam kondensor karena desain dari kondensor berada pada tekanan dibawah atmosfer, sehingga udara dari lingkungan dapat dengan mudah masuk ke dalam kondensor jika terjadi *air leakage*. Nilai kecepatan transfer panas yang terjadi antara *steam* sebagai *hot fluid* dengan *water* sebagai *cold fluid* menjadi berkurang. Berkurangnya kecepatan transfer panas ini dikarenakan *non condensable gases* menyelimuti permukaan luar pada tube–tube kondensor. Penurunan kecepatan transfer panas ini berdampak terhadap kenaikan tekanan pada kondensor dan turunnya efisiensi ketika turbin uap dioperasikan. Kadar oksigen yang terdapat pada kondensor juga dapat mengakibatkan terjadinya korosi pada line–line kondensor. Salah satu cara agar komponen yang terdapat pada kondensor bertahan lama, maka kondensor di dalam oksigen yang masuk melalui *air leakage* dibuang keluar. *Air removal equipment* atau bisa disebut *vacuum prime* merupakan salah satu metode untuk menghilangkan *non condensable gases* ataupun oksigen yang terdapat di kondensor. Gas–gas penghambat yang masuk ke dalam kondensor tadi kemudian dibuang menggunakan pompa yang disebut *vacuum prime*. Maulana F pada tahun 2014 melakukan penelitian yang membahas kinerja kondensor terhadap perubahan nilai tekanan *vacuum*. Metode NTU–*effectiveness* digunakan untuk menentukan nilai efisiensi kondensor terhadap perubahan nilai tekanan *vacuum*. *Output* dari metode ini merupakan nilai efektivitas sebagai nilai efisiensi kondensor karena kualitas dari perpindahan panas yang terjadi.

Data analisis nilai temperatur air pendingin terhadap tekanan vakum terhadap menyatakan temperature *cooled water* yang semakin tinggi menyebabkan nilai efisiensi kondensor menurun karena tekanan juga semakin naik.

Temperatur air pendingin pada 35,03°C menghasilkan tekanan *vacuum* tertinggi yaitu sebesar -711,74 mmHg, sedangkan pada temperature *cooled water* 49,02 °C menghasilkan tekanan *vacuum* terendah sebesar -605,75 mmHg.

Data hubungan tekanan vakum kondensor terhadap efektivitas pada kondensor menyatakan dimana semakin besar tekanan di dalam kondensor atau semakin kecil vakum pada kondensor, maka semakin kecil pula efektivitas kondensor yang dihasilkan. Efektivitas kondensor terbesar dihasilkan pada tekanan vakum kondensor 711,74 mmHg yaitu 93,14 %. Sedangkan efektivitas kondensor terkecil dihasilkan pada tekanan vakum kondensor -610,50 mmHg yaitu 75,42 %.

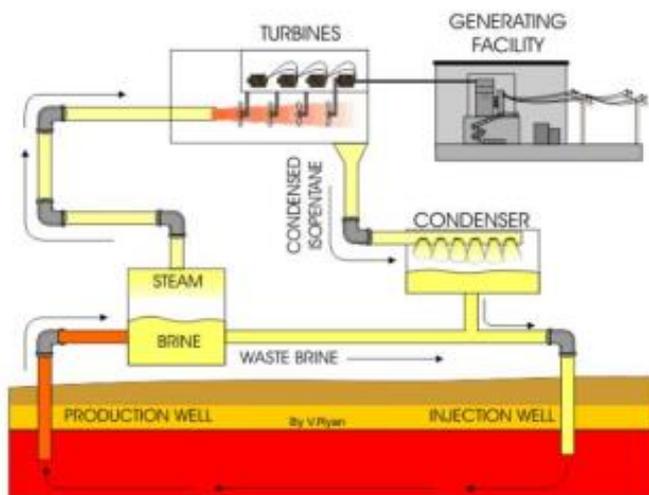
Hasil evaluasi dan analisis menunjukkan nilai tekanan *vacuum* -711,74 mmHg memberikan efisiensi tertinggi pada kondensor sebesar 93,14%. Nilai tekanan *vacuum* sebesar -610,50 mmHg memberikan nilai efisiensi terendah sebesar 75,42%. Nilai efisiensi meningkat seiring dengan nilai tekanan yang dijaga tingkat kevacumannya.

Kondensor mengalami beberapa permasalahan salah satunya adalah fenomena *Vacuum Condensor Drop* yang disebabkan oleh kinerja *Water Jet Ejector* kurang maksimal, hal ini dipengaruhi oleh temperature *cooled water* yang digunakan oleh sistem *Water Jet Ejector* lebih. Studi analisa merupakan salah satu tujuan dari penelitian yang dilakukan untuk mengetahui kondisi operasi kondensor terhadap kinerja kondensor dilihat dari nilai efisiensi termal dan efektivitas.

## 2. Metode

### 2.1. Rangkaian alat PLTP Ulubelu

Sistem *flash steam* merupakan sistem yang diterapkan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi di Ulubelu. Sumur uap yang menghasilkan uap basah dapat mengaplikasikan siklus *flash steam*. Fluida kering dan basah yang dihasilkan dari sumur uap dan masih bercampur dipisahkan menggunakan separator. Pembangkit energi listrik dihasilkan dari uap kering yang digunakan untuk memutar turbin yang dikopel dengan generator.

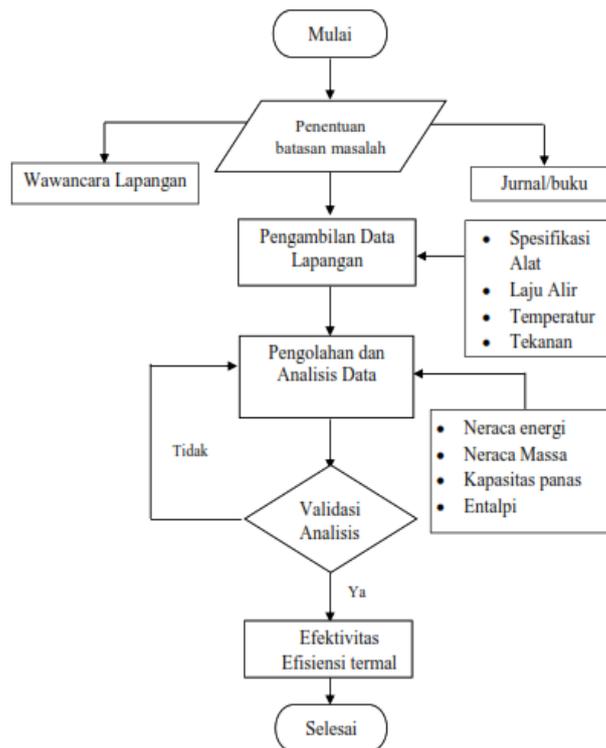


Gambar 1. Rangkaian alat PLTP Ulubelu

Sistem dua fasa dominasi air (*water dominated system*) merupakan sistem yang terdapat pada PT Pertamina Geothermal Energy Area Ulubelu dengan jenis fluida produksi dan kandungan utama fluida *hydro thermal* nya. Campuran *liquid – vapour* merupakan sistem dominasi air yang dihasilkan dari panas bumi.

PT Pertamina Geothermal Energy Area Ulubelu menggunakan sistem *separated steam* untuk memisahkan fase *vapour* terhadap fase *liquid*. Proses pemisahan fluida dilakukan jika fluida panas bumi keluar dari kepala sumur sebagai campuran fluida dua fasa, yaitu fasa uap dan fasa cair yang kemudian disebut sebagai *separated steam system*. Separator digunakan untuk memisahkan antara fasa uap dan fasa cair sebelum digunakan sebagai pemutar turbin. Uap kering bebas kandungan air dialirkan menuju ke turbin. Energi listrik dihasilkan dari putaran generator akibat kerja turbin yang mengubah energy panas bumi menjadi energi kinetik.

Analisis pada penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan. Mengacu pada pengolahan data secara kuantitatif dan kualitatif, hasil eksperimen dilakukan analisis kemudian ditarik kesimpulan. Terdapat dua parameter utama yang dilakukan analisis yaitu efektivitas dan efisiensi thermal kondensor. Berikut ditampilkan diagram alir penelitian yang membahas analisis kinerja kondensor *direct contact* tipe *jetspray*.



Gambar 2. Flowchart Analisis Kinerja Kondensor

Data penelitian didapat dari sektor pembangkitan PT Geothermal Energy Ulubelu. Data yang diperoleh antara lain berupa spesifikasi kondensor, laju alir, temperatur *inlet* dan *outlet* fluida kerja. Analisis dilakukan berdasarkan trend yang terjadi dalam grafik sebagai akibat dari hasil pengolahan data. Variabel apa saja yang mempengaruhi nilai efisiensi dan efektivitas kondensor dapat diketahui dari analisa tersebut.

## 2.2. Kondisi Operasi

Kondensor *direct contact* dengan jenis *jetspray* digunakan oleh PT Pertamina *Geothermal Energy* Ulubelu. Siklus terbuka merupakan prinsip kerja dari kondensor tipe *direct contact* dengan sistem *jetspray*. *Cooled water* yang keluar dari *nozzle* dilakukan kontak secara langsung dengan fluida panas sehingga terjadi perpindahan panas tanpa ada pembatas antara fluida panas dan dingin. *Cooled water* diambil dari sebagian hasil bawah kondensor dan sisa dari air kondensat yang tidak dimanfaatkan dialirkan menuju *cooling tower*. Berikut ditampilkan spesifikasi kondensor *direct contact* yang digunakan PT Pertamina *Geothermal Energy* Ulubelu.

Tabel 1. Kondisi Operasi Kondensor

No	Keterangan	Satuan	Nilai
1	<i>Flow rate</i>	kg/jam	367710
2	Tekanan	Bar	0,08
3	<i>Cooled water</i>	m <sup>3</sup> /jam	16500
4	Temperatur <i>cooled water</i>	°C	28
5	Temperatur <i>exhaust steam</i>	°C	41

## 2.3. Efektivitas Kondensor

Laju perpindahan panas actual dibanding dengan laju perpindahan panas maksimal pada kondensor merupakan variable hitung yang digunakan untuk menentukan nilai efektivitas. Efektivitas digunakan untuk mengetahui kinerja kondensor dengan laju masa input berupa air pendingin dan exhaust steam turbin dengan output berupa kondensat dengan temperatur tertentu untuk masing – masing bagian. Efektivitas kondensor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Suanardwipa, 2017).

$$\varepsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{maximal}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{co}-T_{ci}}{T_{hi}-T_{ci}} \quad (2)$$

## 2.4. Efisiensi Kondensor

Efisiensi termal menunjukkan kinerja suatu alat termal atau alat penukar kalor dengan ukuran tanpa dimensi. Efisiensi termal kondensor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Suarnadwipa, 2017)

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{kond}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{m \cdot cp \cdot (T_{co} - T_{ci})}{m \cdot (h_1 - h_2)} \quad (4)$$

Terdapat beberapa parameter dalam rumus yang digunakan diantaranya adalah  $\eta$  yang menyatakan Efisiensi termal kondensor (%);  $Q_{air}$  yang menyatakan panas sensible air pendingin,  $m$  yang menyatakan masa dari air pendingin yang digunakan (kg/jam); kapasitas kalor air pendingin pada tekanan konstan ( $cp$ ) dengan satuan kJ/kg; dan  $h_1 - h_2$  yang merupakan entalpi penguapan (kJ/kg).

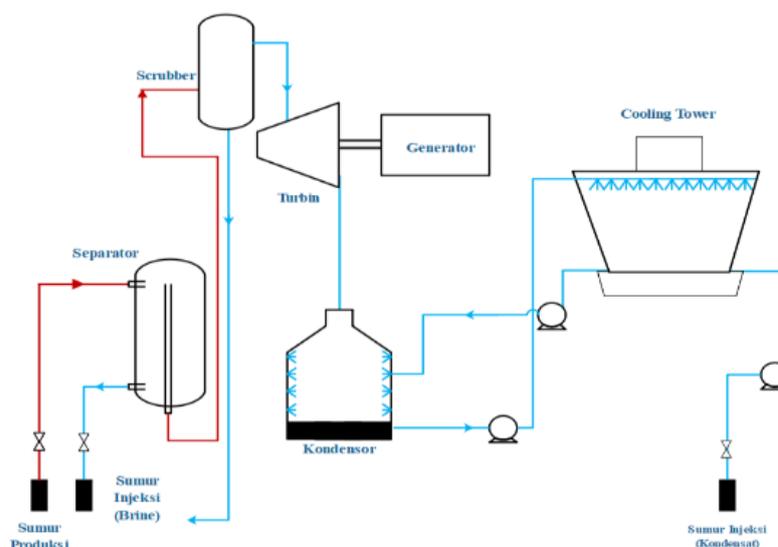
## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Siklus Kondensor Pertamina Ulubelu

PLTP Ulubelu menggunakan uap yang diperoleh dari *reservoir*. *Steam receiving header* menerima suplai uap yang diperoleh dari sumur produksi melalui sistem transmisi uap. *Stabilizer vapour pressure* digunakan untuk mencegah terjadinya kondisi *over pressure* yang membuang sebagian uap menuju *rock muffler*. *Separator* digunakan untuk memisahkan uap kering dan basah sebelum masuk menuju turbin, sehingga turbin hanya menerima uap kering. *Output* dari separator berupa uap kering diproses lebih lanjut oleh *scrubber* guna menghilangkan *impurities* seperti gas Metana ( $CH_4$ ), Argon (Ar), Nitrogen ( $N_2$ ), Hidrogen (H), Karbon Dioksida ( $CO_2$ ), Amonia ( $NH_3$ ), dan Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ ). Uap kering dan bebas kandungan *impurities* kemudian dialirkan menuju turbin untuk diproses menjadi energi listrik. Proses pre-treatment yang dilakukan bertujuan untuk menghindari kerusakan pada sudu sudu turbin akibat masih adanya kandungan uap air dan *impurities* lainnya.

Generator kemudian mengubah energi kinetik yang dihasilkan dari turbin menjadi energi listrik. Energi kinetik dihasilkan karena memanfaatkan energi panas dan tekanan yang terdapat pada uap kering untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. *Cooling tower* berfungsi untuk mensuplai air pendingin kepada kondensor *jetspray* untuk memproses *exhaust steam* yang dihasilkan dari turbin.

*Ejector* digunakan pada komponen kondensor untuk menghilangkan *non condensable gases*. *Non condensable gases* yang dihisap oleh *ejector* kemudian dialirkan menuju *intercondensor* sebagai media pendingin dan penjerap *non condensable gases*. *Fan cooling tower* digunakan untuk membuang *non condensable gases* menuju atmosfer. Media pendingin yang digunakan pada kondensor disuplai dari *cooling tower*. Sistem *reinjeksi* digunakan melalui *overflow* dari basin *cooling tower* yang ditampung menuju *pond*.



Gambar 3. Siklus PGE Pertamina Ulubelu

PLTP Ulubelu menggunakan kondensor vertikal dimana sistem pendinginan dijalankan secara *cross flow* pada kondisi tekanan vakum. Sistem kondensor menggunakan *ejector* yang berfungsi untuk menjaga tingkat kevacuman kondensor dengan membuang udara atau gas lainnya menuju atmosfer.

Kondisi vakum dari kondensor terjadi secara termodinamika bukan secara mekanik karena adanya proses perpindahan panas. Hal ini dimungkinkan karena setelah fluida keluar dari turbin yang masih berupa uap terjadi kontak dengan air pendingin mengalami perpindahan panas hingga mencapai kesetimbangan masa dan energi. Penyusutan volume uap mengakibatkan kondisi ruangan dalam kondensor menjadi vakum. Derajat kevakuman tergantung pada nilai *fouling factor*, temperatur, dan kandungan gas yang tidak dapat terkondensasi (NCG).

Steam dan air merupakan fase yang terdapat pada *exhaust steam* masuk menuju kondensor. Steam atau gas yang tidak dapat terkondensasi pada kondensor disebut *Non Condensable Gases* (NCG) dengan nilai laju alir rata-rata sebesar 155,035 kmol/jam. Kondisi vacuum kondensor dijaga dengan mengeluarkan *non condensable gases* ke lingkungan menggunakan *cooling tower*. *Non condensable gases* terdiri dari beberapa komposisi penyusun yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Kandungan *Non Condensable Gases* (NCG)

No	Keterangan	Nilai
1	Karbon dioksida (CO <sub>2</sub> )	90%
2	Hidrogen Sulfida (H <sub>2</sub> )	5%
3	Ammonia (NH <sub>3</sub> )	0,14%
4	Nitrogen (N <sub>2</sub> )	4,86%

### 3.2. Analisis Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Efektivitas Kondensor

Metode penentuan efisiensi *thermal* dan efektivitas kondensor *direct contact* tipe *jetspray* didasarkan pada fenomena perpindahan panas secara konveksi menggunakan persamaan empiris. Pengolahan data menggunakan data yang diperoleh dari lapangan berupa laju alir fluida masuk dan keluar kondensor, temperatur *cooled water*, temperatur *hot* fluida, dan tekanan yang terdapat pada kondensor. Data fluida *cooled water* diambil dari data desain kondensor pada suhu 28°C. Data – data yang diambil setiap hari selama satu bulan tersebut kemudian dirata – rata dan ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Data Operasi Kondensor

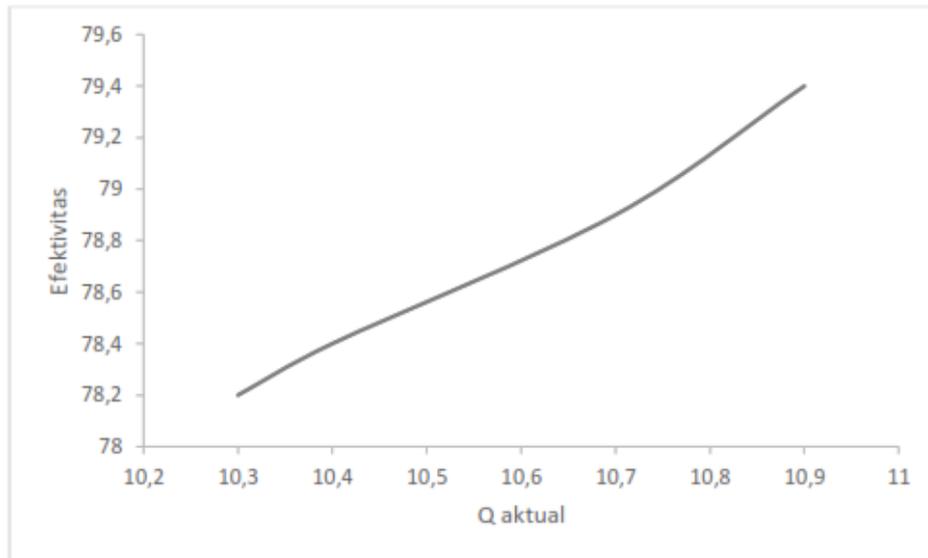
Waktu	Laju Alir exhaust steam (kg/jam)	Temperatur masuk (°C)	Laju alir cooled water (kg/jam)	Temperatur keluar (°C)
Minggu 1	349.779	41,17	9.643.575	38,30
Minggu 2	351.131	41,26	9.640.540	38,40
Minggu 3	353.953	41,55	9.634.310	38,70
Minggu 4	350.032	41,71	9.644.266	38,90

Efektivitas kondensor ditentukan berdasarkan persamaan yang terdapat pada bab metodologi menggunakan data kondisi operasi yang ada. Berikut disajikan data hitung nilai efektivitas kondensor *direct contact* tipe *jetspray*.

Tabel 4. Nilai Efektivitas Kondensor

Waktu	Temperatur masuk (°C)	Temperatur keluar (°C)	Efektivitas (%)
Minggu 1	41,17	38,30	78,2
Minggu 2	41,26	38,40	78,4
Minggu 3	41,55	38,70	78,9
Minggu 4	41,71	38,90	79,4

Hasil perhitungan efektivitas kondensor kemudian dilakukan analisis berdasarkan kondisi operasi yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 4. Perbandingan Efektivitas terhadap Q aktual Kondensor

Efektivitas kondensor digunakan untuk mengetahui kinerja kondensor berdasarkan laju masa input berupa *cooled water* dan *exhaust steam* dengan laju masa keluar berupa kondensat (*water brine*). Gambar 3 menunjukkan terjadi kenaikan nilai efektivitas pada setiap minggu diikuti dengan kenaikan nilai Q aktual. Hal ini dikarenakan kondisi operasi kondensor dijaga pada tekanan vakum (0,08 bar) sehingga berpengaruh terhadap nilai entalpi yang rendah dan selisih nilai temperatur keluar - masuk *cooled water* semakin tinggi. Nilai efektivitas dengan trend kenaikan setiap minggu ini berkorelasi dengan nilai temperatur *exhaust steam* yang cenderung meningkat setiap minggu yang dapat dilihat pada tabel 4.

Nilai efektivitas tertinggi kondensor sebesar 79,4% tercapai pada saat nilai Q aktual 10,891°C terjadi pada minggu ke empat. Nilai efektivitas terendah kondensor sebesar 78,2% tercapai pada saat nilai Q aktual sebesar 10,306°C terjadi pada minggu pertama. Nilai laju alir *cooled water* maupun *exhaust steam* berkorelasi secara tidak langsung terhadap nilai efektivitas. Laju alir fluida yang semakin kecil dapat meningkatkan temperatur kondensat, begitu juga sebaliknya (Lekic, 1980). Keefektifan merupakan rasio antara laju perpindahan panas yang terjadi dalam kondensor dengan laju perpindahan panas maksimum yang terjadi pada kondensor tersebut. (Clinton, 2020). Nilai selisih temperatur *cooled water* terhadap temperatur *water brine* yang semakin tinggi menunjukkan proses perpindahan panas dapat berjalan semakin maksimal.

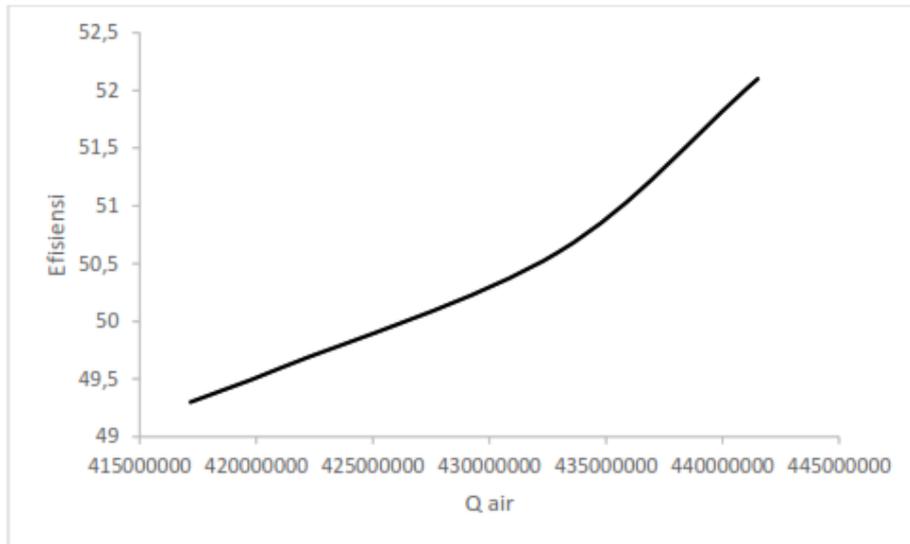
### 3.3. Analisis Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Efisiensi Termal Kondensor

Energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan kondensor harus dievaluasi untuk melakukan penghematan biaya melalui analisis tingkat efisiensi. Nilai efisiensi kondensor yang diketahui dapat digunakan untuk mengoptimalkan kinerja dari kondensor atau dapat digunakan untuk menentukan apakah alat harus dilakukan proses *maintenance*. Efisiensi kondensor dapat dicari dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada metodologi berdasarkan variable – variable terkait. Berikut disajikan nilai hasil hitung efisiensi kondensor.

Tabel 5. Nilai Efisiensi Kondensor

Waktu	Laju Alir exhaust steam (kg/jam)	Laju alir cooled water (kg/jam)	Efisiensi (%)
Minggu 1	349.779	9.643.575	49,3
Minggu 2	351.131	9.640.540	49,6
Minggu 3	353.953	9.634.310	50,6
Minggu 4	350.032	9.644.266	52,1

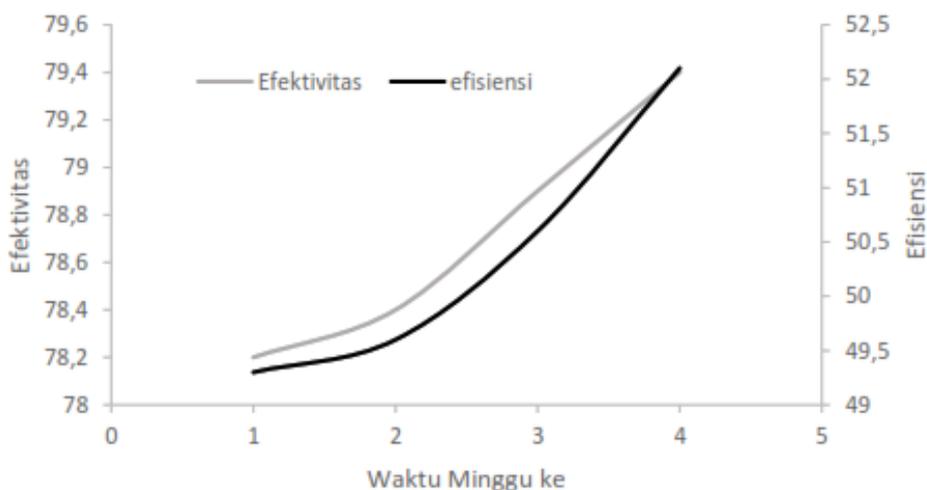
Hasil perhitungan efisiensi kondensor kemudian dilakukan analisis berdasarkan laju alir dan temperatur yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 5. Perbandingan Efisiensi terhadap Q<sub>air</sub> Kondensator

Gambar 4 menunjukkan hubungan nilai efisiensi terhadap laju alir dan temperatur yang diwakili oleh Q air berbanding lurus. Nilai efisiensi termal kondensator menunjukkan trend peningkatan setiap minggu. Hal ini berkorelasi dengan nilai laju alir *cooled water* yang secara keseluruhan cenderung meningkat setiap minggu yang dapat dilihat pada tabel 3. Nilai Q air sebesar 441.149.944,2 kJ/h menghasilkan efisiensi termal kondensator 52,1% yang terjadi pada minggu ke 4. Nilai Q air sebesar 417.424.072,5 kJ/h menghasilkan efisiensi termal kondensator 49,3% yang terjadi pada minggu pertama. Hal ini membuktikan bahwa semakin tinggi nilai Q air yang dihasilkan saat kondensator beroperasi dapat meningkatkan nilai efisiensi kondensator.

Nilai laju alir *cooled water* dan perbedaan temperatur masuk dan keluar kondensator yang semakin tinggi berpengaruh nyata terhadap nilai efisiensi termal kondensator. Aliran kalor terjadi dari fluida dengan temperature lebih tinggi ke temperatur lebih rendah dengan atau melalui perantara. Jumlah nilai dari Q<sub>lepas</sub> berkorelasi dengan nilai Q<sub>terima</sub> pada alat penukar kalor. Hal ini disebabkan karena nilai Q<sub>kond</sub> sebagai pelepas panas dapat melepaskan panasnya kepada Q<sub>air</sub> sebagai penyerap panas. Efisiensi kondensator semakin besar ketika nilai Q air dan Q kondensator memiliki selisih semakin kecil. Hal ini menandakan bahwa proses perpindahan panas dapat terjadi secara maksimal dengan diserapnya kalor yang terdapat pada Q air menuju ke Q kondensator. Nilai efisiensi terhadap efektivitas kemudian dilakukan analisis yang ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 6. Perbandingan Nilai Efisiensi dan Efektivitas Kondensator

Gambar 5 menunjukkan nilai efisiensi termal berbanding lurus terhadap nilai efektivitas kondensator. Efisiensi termal kondensator menunjukkan nilai lebih rendah dibanding efektivitas jika ditinjau dari hubungan keduanya dari grafik diatas. Hal ini dikarenakan kondensator pada PT PGE Ulubelu beroperasi pada tekanan vakum sehingga berpengaruh terhadap nilai entalpi pengembunan. Nilai entalpi pengembunan semakin tinggi ketika kondensator

beroperasi pada temperatur rendah yang berimplikasi terhadap nilai  $Q$  kondensor. Nilai efisiensi kondensor rendah akibat dari nilai  $Q_{\text{kondensor}}$  lebih tinggi sebagai fluida pelepas kalor dibanding dengan  $Q_{\text{air}}$  sebagai fluida penyerap kalor. Hal ini dikarenakan terjadinya kenaikan tekanan pada kondensor sehingga mempengaruhi tingkat kevacuman pada kondensor. Nilai kevacuman yang menurun akan berdampak terhadap kecepatan perpindahan panas antara  $Q_{\text{air}}$  dan  $Q_{\text{kondensor}}$  sehingga akan menurunkan nilai efisiensi termal kondensor. Penurunan temperatur *steam* merupakan akibat dari nilai efektivitas yang meningkat jika ditinjau dari persamaan matematis yang digunakan. Nilai efektivitas tertinggi kondensor sebesar 79,4% dicapai pada minggu ke empat berdasarkan hasil pengolahan data dan perhitungan yang digunakan. Nilai efektivitas kondensor sebesar 78,2% merupakan nilai terendah jika dilihat dari data hitung ketika kondensor beroperasi selama satu bulan. Nilai efektivitas tertinggi dicapai ketika kondensor menerima laju alir *exhaust steam* 350.032 kg/jam dengan laju alir *cooled water* 9.644.266 kg/jam.

Nilai efisiensi termal sebesar 52,1% merupakan yang tertinggi dibanding dengan yang lain tercapai pada minggu ke 4 ketika kondensor menerima *exhaust steam* pada temperatur 41,71°C dan temperature kondensat sebesar 38,90°C. Hal ini membuktikan bahwa ketika selisih antara fluida dingin dan fluida panas semakin tinggi, maka kecepatan perpindahan kalor semakin meningkat yang berdampak terhadap nilai efisiensi termal.

### Kesimpulan

Nilai temperatur air pendingin ( $T_{ci}$ ) terhadap temperatur *water brine* ( $T_{co}$ ) pada perhitungan  $Q_{\text{aktual}}$  sangat berpengaruh terhadap nilai efektivitas. Temperatur *cooled water* yang semakin rendah berdampak terhadap peningkatan nilai efektivitas kondensor. Nilai laju alir dan temperatur berpengaruh nyata terhadap nilai efisiensi termal kondensor. Nilai  $Q_{\text{air}}$  yang semakin tinggi berkorelasi terhadap nilai efisiensi termal kondensor. Hubungan antara efektivitas dan efisiensi berkorelasi berbanding lurus yang ditunjukkan dengan nilai efektivitas lebih tinggi dibandingkan efisiensi.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas Akamigas Balongan atas dukungan baik secara moril maupun finansialnya pada penelitian ini dan mahasiswa Akamigas Balongan dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada PT Pertamina Ulubelu yang bersedia menyediakan waktu dan tempat.

### Daftar Notasi

$\epsilon$	: efektivitas kondensor (%)
$T_{co}$	: Temperatur output cooled water [°C]
$T_{ci}$	: Temperatur input cooled water [°C]
$T_{hi}$	: Temperatur exhaust steam input [°C]
$T_{ho}$	: Temperatur exhaust steam output [°C]
$\eta$	: efisiensi termal kondensor [%]
$m$	: laju alir masa cooled water [kg/h]
$cp$	: kapasitas panas cooled water [kJ/kg]
$h_1$ - $h_2$	: entalpi penguapan exhaust steam [kJ/kg]

### Daftar Pustaka

- Apriyanti, V. (2015). Perancangan Perangkat Eksperimen Kondensasi Kontak Langsung dengan Keberadaan Non Condensable Gas. Banjarmasin: Fakultas Teknik Mesin Dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung. *Proceeding seminar Nasional Tahun Tahunan Teknik Mesin Xiv (snttm Xiv)*: 62.
- Celata, G. P., Cumo, M., D'Annibale, F., Farello, G. E. (1991). Direct Contact Condensation of Steam on Droplets. *International Journal Multiphase Flow*, 191-211
- Dipippo, R. (2012). Geothermal Power Plant: Principle, Application and Case Study, Elsevier Science, Oxford, UK.
- Gokcen, G., Yildirim, N. (2008). Effect of Non-condensable Gases on Geothermal Power Case Study: Kizildere Geothermal Power Plant-Turkey. *International Journal of Exergy*, 684-695
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P. (2005). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5<sup>th</sup> ed, John Wiley & Son Pte. Ltd. Singapore.
- Lee, H., Kim, M., Park, S. (2001). The Effect of Non-Condensable Gas on Direct Contact Condensation of Steam/Air Mixture. *Journal of the Korean Nuclear Society*, 585-595.
- Lekic, A., Ford, J. D. (1980). Direct Contact Condensation of Vapour on A Spray of Subcooled Liquid Droplets. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1531-1537.
- Neny, M.S. (2018). Teknik Geotermal: Institut Teknologi Bandung
- Clinton, S. (2020). Analisa Efisiensi Termal Turbin, Kondensor dan Menara Pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi: Politeknik Energi dan Mineral Akamigas.

- Idawati, S. (2016). Pengaruh Suhu Terhadap Perpindahan Panas Pada Material Yang Berbeda. Pogram Studi Fisika, Fakultas Sains. Universitas Cokroaminoto Palopo
- Erich, H. (2006). Wahyuningsih, R., Sitorus, K. (2005). Pengawasan Eksplorasi dan Eksploitasi Lapangan Panas Bumi yang Telah Beroperasi. Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Zarrouk, J. S. (2012). Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review, Department of Engineering Sciences, University of Auckland, New Zealand.