



# SIMULASI PENGARUH ALIRAN MASSA UAP TERHADAP DAYA TURBIN PADA PLTP SARULLA UNIT 1 MENGGUNAKAN *CYCLETEMPO 5.1*

Melvin Emil Simanjuntak<sup>a\*</sup>, Ghabe Pratama Haloho<sup>a</sup>, Janter P. Simanjuntak<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia

<sup>b</sup>Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Medan, Deliserdang, 20221, Indonesia

\*Corresponding authors at: [melvinsimanjuntak@polmed.ac.id](mailto:melvinsimanjuntak@polmed.ac.id) (M. E. Simanjuntak)

## INFO ARTIKEL

### Riwayat artikel:

Diajukan pada 10 Maret 2025

Direvisi pada 19 Juni 2025

Disetujui pada 9 Juli 2025

Tersedia daring pada 18 Agustus 2025

### Kata kunci:

Turbin uap, laju aliran massa uap, daya

### Keywords:

Steam turbine, mass flow rate, power

## ABSTRAK

Indonesia memiliki potensi panas bumi sekitar 23.000 MW, dengan suhu uap berkisar antara 150 – 225°C. Kisaran temperatur ini sesuai untuk digunakan pada pembangkit listrik sistem biner. PLTP *Sarulla Operation Ltd* di Tapanuli Utara, Sumatera Utara, memiliki kapasitas terpasang  $3 \times 110$  MW dan menggunakan pentana sebagai fluida kerja sekunder. Setiap unit terdiri dari *STG*, *OEC brine*, dan *OEC bottoming turbine*. Laju aliran massa uap bervariasi akibat perubahan beban dan tekanan dari sumur, yang memengaruhi daya turbin. Analisis dilakukan melalui observasi, perhitungan literatur, dan simulasi menggunakan *CycleTempo 5.1*. Hasil menunjukkan bahwa pada *STG turbine*, laju aliran massa uap 190 kg/s menghasilkan daya 67 MW, sedangkan 200 kg/s menghasilkan 72 MW. Pada *OEC brine turbine*, laju aliran 115 kg/s menghasilkan daya 11,7 MW, sedangkan 135 kg/s menghasilkan 13,7 MW. Pada *OEC bottoming turbine*, laju aliran 85 kg/s menghasilkan 6,7 MW, sedangkan 105 kg/s menghasilkan 7,8 MW. Daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan laju aliran massa uap. Semakin kecil laju aliran, semakin kecil daya yang dihasilkan. Secara keseluruhan, total daya maksimum yang dihasilkan di PLTP Sarulla Unit 1 mencapai sekitar 110 MW.

## ABSTRACT

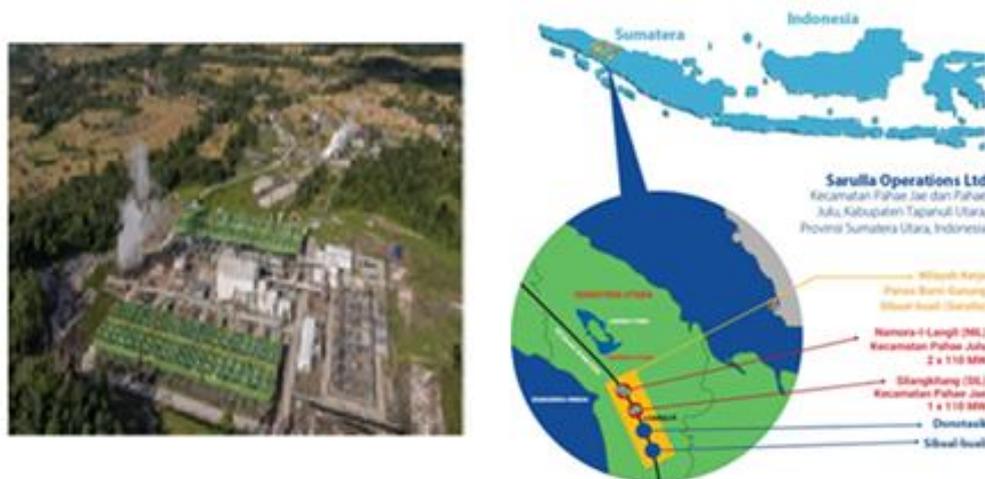
Indonesia has a geothermal potential of approximately 23,000 MW, with a steam temperature ranging from 150 to 225°C. This temperature range is suitable for use in binary system power plants. The *Sarulla Geothermal Power Plant*, operated by *Sarulla Operation Ltd*. in North Tapanuli, North Sumatra, has an installed capacity of  $3 \times 110$  MW and uses pentane as the secondary working fluid. Each unit consists of an *STG*, an *OEC brine turbine*, and an *OEC bottoming turbine*. The steam mass flow rate varies due to changes in loading and well pressure, affecting the turbine's power output. Analysis was conducted through observation, literature-based calculations, and simulations using *CycleTempo* software. The results showed that for the *STG turbine*, a steam mass flow rate of 190 and 200 kg/s generated a power output of 67 and 72 MW, respectively. In the *OEC brine turbine*, a flow rate of 115 and 135 kg/s produced a power output of 11.7 and 13.7 MW, respectively. In the *OEC bottoming turbine*, a flow rate of 85 and 105 kg/s generated a power output of 6.7 and 7.8 MW, respectively. The power output was directly proportional to the steam mass flow rate. The lower the steam mass flow rate, the lower the power output. Overall, the maximum total power output at the *Sarulla Unit 1 Geothermal Power Plant* reached approximately 110 MW.

## 1. PENGANTAR

Potensi panas bumi di Indonesia adalah sebesar 23.766 MW yang mencakup 35 – 40% dari total potensi panas bumi dunia (Ministry of Energy and Mineral Resources Republic Indonesia, 2021). Namun, hingga saat ini, pemanfaatannya untuk pembangkitan listrik baru mencapai 2.286 MW atau sekitar 9,6% dari total potensi yang tersedia. Panas bumi yang ada di Indonesia secara umum menghasilkan uap dengan temperatur 150 – 225 °C, yang termasuk dalam kategori panas menengah. Temperatur ini masih memungkinkan untuk digunakan dalam pembangkitan listrik melalui sistem konversi energi yang sesuai, seperti siklus biner.

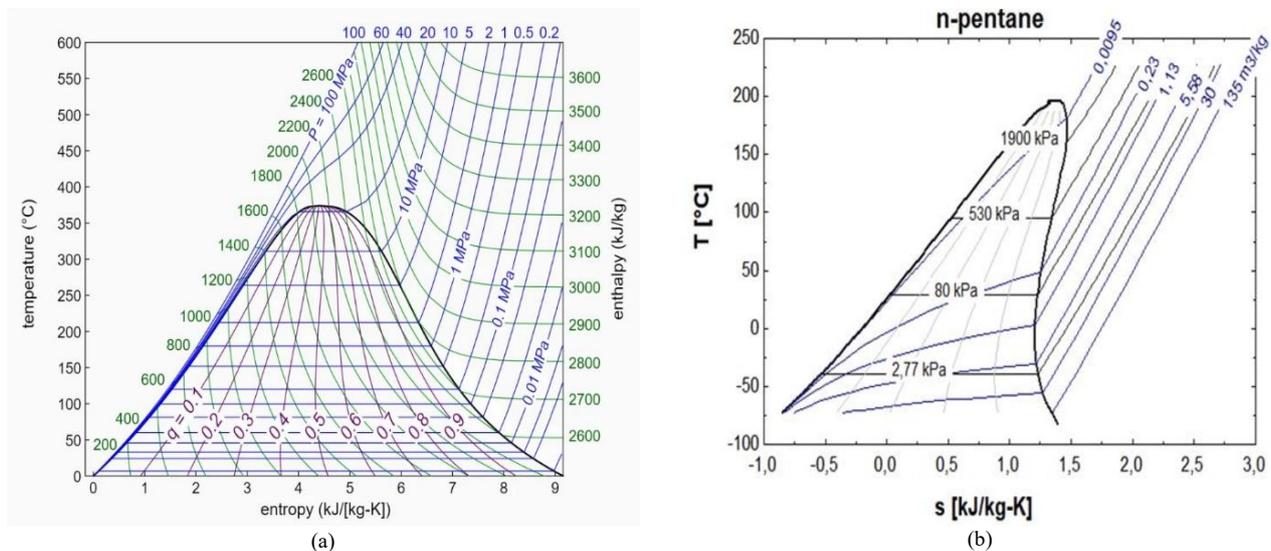
Pada sistem panas bumi, fluida yang dihasilkan dari sumur berupa campuran air panas, uap air, serta gas-gas *non-kondensable* (NCG) dan mineral. Kandungan gas-gas ini, seperti karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), dan nitrogen ( $\text{N}_2$ ), dapat bervariasi antar sumur dan berpengaruh terhadap efisiensi serta performa pembangkit listrik panas bumi (Lontoh dkk., 2022; Sitompul, dkk., 2022). Keberadaan gas *non-kondensable* dalam jumlah tinggi dapat mengurangi efisiensi kondensasi uap dan meningkatkan beban sistem pendinginan, sehingga memerlukan optimasi dalam perancangan sistem konversi energi.

Salah satu contoh pemanfaatan panas bumi di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Sarulla yang berlokasi di Kabupaten Tapanuli Utara, Sumatera Utara. PLTP Sarulla terdiri dari tiga unit dengan masing-masing kapasitas 110 MW, sehingga total kapasitas terpasang mencapai 330 MW. PLTP ini menggunakan teknologi siklus biner yang dipatenkan oleh Ormat Technologies, yang memungkinkan pemanfaatan energi panas bumi secara lebih efisien dibandingkan dengan sistem uap kering konvensional. Lokasi geografis PLTP Sarulla yang memiliki sumber panas bumi dengan temperatur menengah menjadikannya ideal untuk penerapan siklus biner dengan fluida kerja organik. Lokasi PLTP Sarulla Operation Ltd. ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: PLTP Sarulla Operation Ltd.

Daya listrik yang dihasilkan oleh sistem pembangkitan panas bumi sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi, seperti tekanan dan temperatur uap, laju aliran massa fluida kerja, desain turbin, serta kondisi lingkungan. Pada temperatur yang tidak terlalu tinggi, siklus biner dengan fluida organik sering kali digunakan untuk meningkatkan efisiensi termal. Siklus biner merupakan pengembangan siklus Rankine dengan menggunakan 2 fluida untuk memaksimalkan pemanfaatan panas. Siklus ini memiliki fungsi yang sama dengan siklus Rankine untuk mengekstrak panas dari fluida kerja organik (Siddiqui dkk, 2023). Keduanya akan dipisah di separator. Uap air akan disalurkan ke turbin uap pertama sedangkan air panas (*brine*) akan digunakan untuk memanaskan fluida yang kedua yang biasanya berupa fluida organik. Fluida organik yang pertama ini akan digunakan untuk memutar turbin kedua yang biasanya disebut turbin *brine*. Uap air yang keluar dari turbin pertama masih memiliki temperatur yang cukup tinggi sehingga masih digunakan untuk memanaskan fluida ketiga yang juga berupa fluida organik. Setelah menjadi uap fluida organik ini digunakan untuk memutar turbin yang ketiga untuk menghasilkan daya listrik. Teknologi ini telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi pembangkitan energi untuk sumber daya panas bumi dengan temperatur menengah hingga rendah. Salah satu tantangan dalam sistem siklus biner adalah pemilihan fluida kerja yang optimal untuk kondisi operasi tertentu. Studi oleh Babatunde & Sunday menunjukkan bahwa hidrokarbon seperti pentana ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) memiliki titik didih yang rendah dan efisiensi termodinamika yang tinggi, menjadikannya pilihan yang sesuai untuk siklus biner (Babatunde & Sunday, 2018). Namun, karena sifatnya yang mudah terbakar, diperlukan penanganan khusus untuk mengurangi risiko kebakaran atau ledakan.



Gambar 2: Diagram T-S (a) uap air dan (b) pentana

Siklus biner yang diterapkan di PLTP Sarulla menggunakan dua jenis fluida kerja utama, yaitu uap air dan pentana. Pada tahap awal, fluida panas bumi yang terdiri dari campuran uap dan air panas (*brine*) dipisahkan di separator. Uap air dialirkan ke turbin pertama *Steam Turbine Generator* (STG), sementara air panas digunakan untuk memanaskan pentana dalam *heat exchanger*. Pentana yang telah

dipanaskan akan menggerakkan turbin kedua yang disebut *Organic Rankine Cycle (OEC) brine*. Selain itu, uap keluaran dari turbin STG yang masih memiliki energi panas digunakan untuk memanaskan fluida organik tambahan, yang kemudian menggerakkan turbin ketiga *OEC bottoming*. Proses ini memungkinkan pemanfaatan energi panas secara lebih optimal, sehingga meningkatkan efisiensi sistem. Diagram T-S dari siklus uap dan siklus biner ditunjukkan pada Gambar 2, yang memperlihatkan perbedaan titik didih antara air dan pentana serta efisiensi perpindahan panas dalam sistem. Sifat sifat pentana ditunjukkan pada Tabel 1.

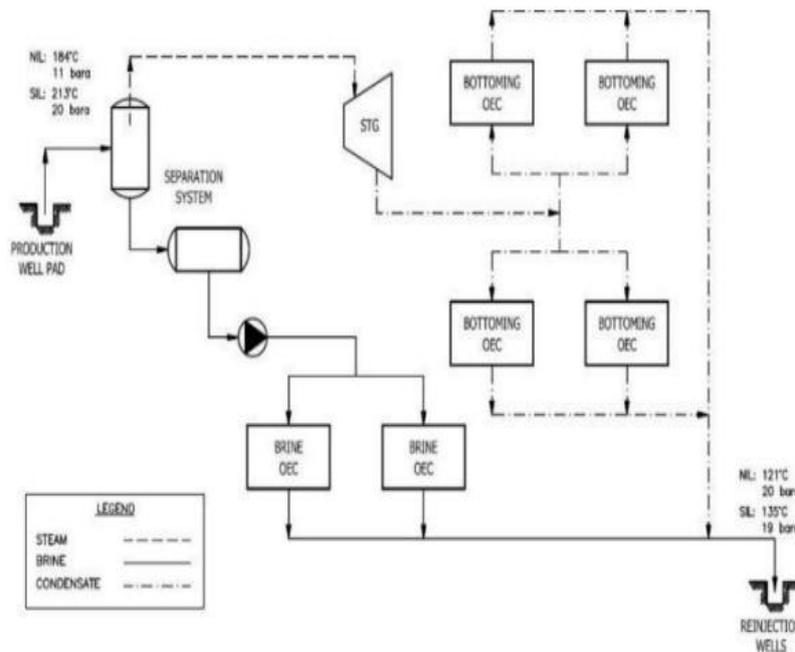
Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai optimasi sistem panas bumi semakin berkembang, terutama dalam konteks simulasi sistem pembangkitan listrik menggunakan perangkat lunak *CycleTempo*. Djabal dkk. melakukan analisis sensitivitas perubahan beban terhadap efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Anggrek 2 × 50 MW menggunakan *CycleTempo* (Djabal dkk., 2023). Arisandi & Putra meneliti pengaruh rasio *co-firing* batubara dan biomassa terhadap performa PLTU (Arisandi & Putra, 2023). Namun, kajian mengenai simulasi sistem pembangkitan listrik panas bumi dengan perangkat lunak ini masih relatif jarang dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh laju aliran massa uap terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin *STG, OEC bottoming, dan OEC brine* di PLTP Sarulla dengan menggunakan simulasi *CycleTempo* berdasarkan data lapangan.

**Tabel 1:** Sifat sifat pentana (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>)

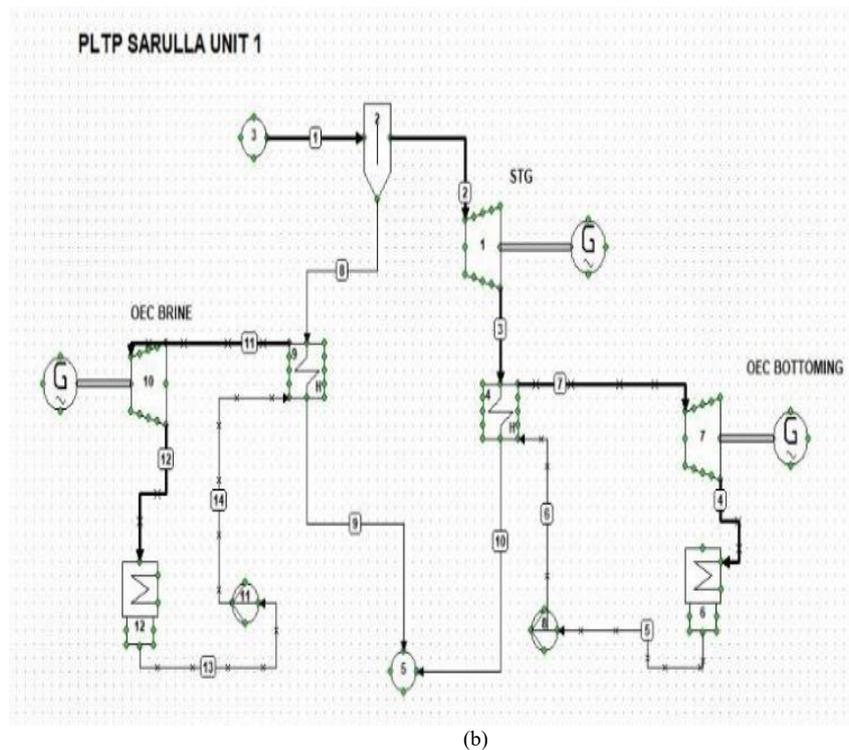
Sifat-sifat	Nilai
Massa jenis (pada 0 °C), kg/m <sup>3</sup>	620,9
Titik didih, °C (pada 1 atm)	36,07
Kapasitas panas (kJ/kg.K), C <sub>p</sub>	1,66
Kapasitas panas (kJ/kg.K), C <sub>v</sub>	2,33
Entalpi penguapan, (kJ/kg)	366
Volume jenis (m <sup>3</sup> /kg)	0,0016106
Sifat mudah terbakar	ya

Sumber: Data dari Engineeringtoolbox.com

Hubungan antara laju aliran massa uap dengan daya yang dihasilkan oleh sistem, serta memberikan gambaran pemanfaatan teknologi ORC untuk meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik pada PLTP. Dengan adanya kajian ini, daya yang dihasilkan pada pembangkit listrik panas bumi dapat lebih ditingkatkan untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi, sejalan dengan upaya dekarbonisasi sektor energi global.



(a)



Gambar 3: Diagram alir proses (a) aktual dan (b) simulasi

## 2. METODE

Penelitian ini dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu pengamatan lapangan, kajian literatur, dan simulasi menggunakan perangkat lunak *CycleTempo* versi 5.1. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh aliran massa uap terhadap daya turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Sarulla Unit 1 dengan pendekatan berbasis simulasi dan validasi data. Data lapangan dikumpulkan selama periode 16 Januari – 16 April 2023 di lokasi PLTP Sarulla, Tapanuli Utara. Data diambil per jam untuk hari tertentu. Pengambilan data dilakukan melalui observasi langsung dan pencatatan data operasional dari sistem pembangkitan. Data yang dikumpulkan mencakup:

1. Laju aliran massa uap pada berbagai titik sistem (sumur produksi, separator, turbin STG, turbin OEC brine, dan turbin OEC bottoming).
2. Tekanan dan temperatur uap di setiap komponen utama.
3. Karakteristik fluida kerja pada siklus utama, termasuk penggunaan pentana ( $C_5H_{12}$ ) sebagai media kerja pada siklus *Organic Rankine Cycle* (ORC) di sistem *bottoming*.

Data yang diperoleh merupakan nilai rata-rata yang diperoleh dari pengukuran berkala. Untuk mengurangi kesalahan pengukuran, setiap data diverifikasi dengan membandingkan hasil pengukuran dengan data historis dari sistem kontrol pembangkit.

Untuk memperkuat analisis, perhitungan daya turbin dilakukan berdasarkan prinsip isentropik menggunakan persamaan 1 sebagai berikut:

$$W_{ts} = \frac{\dot{m} \times (h_{in} - h_{out})}{1000} \quad (1)$$

dimana:

$W_{ts}$  = daya isentropik turbin (MW)

$\dot{m}$  = laju aliran massa uap (kg/s)

$h_{in}$  = entalpi uap masuk turbin (kJ/kg)

$h_{out}$  = entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)

Perhitungan ini dilakukan untuk masing-masing turbin (*STG*, *OEC brine*, dan *OEC bottoming*) dengan menggunakan data operasional dari Tabel 2 dan Tabel 3.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *CycleTempo* 5.1 dengan tujuan untuk mendapatkan prediksi performa turbin berdasarkan kondisi operasi nyata. Simulasi yang menggunakan *CycleTempo* telah terbukti dapat memodelkan dan mengevaluasi sistem pembangkitan berbasis panas bumi secara akurat. Simulasi dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. **Input Data:** Data yang diperoleh dari lapangan dimasukkan ke dalam perangkat lunak, mencakup laju aliran massa uap, tekanan, temperatur, dan parameter lain sesuai dengan komponen sistem.
2. **Pembangunan Model:**  
 Simulasi Turbin *STG* (Gambar 4a): Uap dan air dari sumur produksi dipisahkan dalam separator, kemudian uap kering masuk ke turbin *STG* 10 sebelum menuju *sink* dan digunakan untuk memanaskan pentana. Turbin *STG* adalah turbin konvensional yang memanfaatkan uap utama hasil separator.  
 Simulasi Turbin *OEC brine* (Gambar 4b): Uap pentana dari *heat exchanger* dialirkan ke turbin *OEC brine*, kemudian menuju kondensator sebelum disirkulasikan kembali. Sedangkan *brine* sebagai pemanas pentana akan diinjeksikan kembali ke perut bumi. Turbin *OEC Brine* adalah turbin yang memanfaatkan *brine* dari separator dan masih memiliki temperatur yang tinggi menggunakan sistem biner (ORC).

4. Simulasi Turbin OEC *bottoming* (Gambar 4c): Uap keluaran dari turbin STG digunakan untuk menguapkan pentana yang masuk ke turbin OEC *bottoming*. Uap pentana dikondensasikan dan disirkulasikan kembali. Turbin OEC *Bottoming* adalah turbin yang memanfaatkan panas keluaran turbin STG dan menggunakan sitem biner (ORC)
5. Eksekusi Simulasi: Data dijalankan pada perangkat lunak untuk memperoleh hasil berupa daya turbin pada masing-masing skenario operasi.

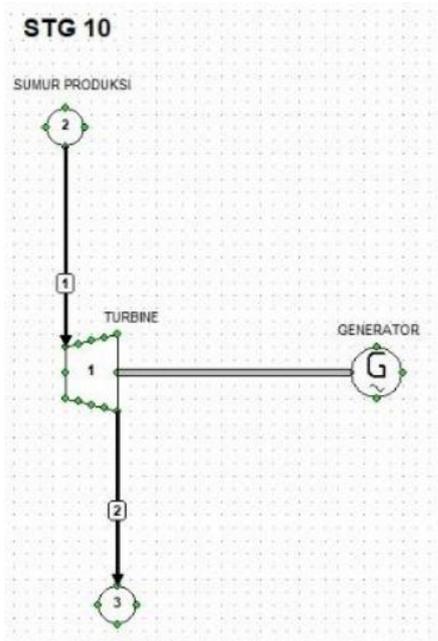
**Tabel 2:** Data properti uap pada sumur produksi dan separator

Aparatus	Parameter	Input	Output	
			Air	Uap
Sumur Produksi	Laju aliran massa (ton/h)	-	2894	
	Tekanan (bar)	-	11,8	
	Temperatur (°C)	-	188	
Separator	Laju aliran massa (ton/h)	2894	720	2174
	Tekanan (bar)	11,8	11,8	11,8
	Temperatur (°C)	188	188	188

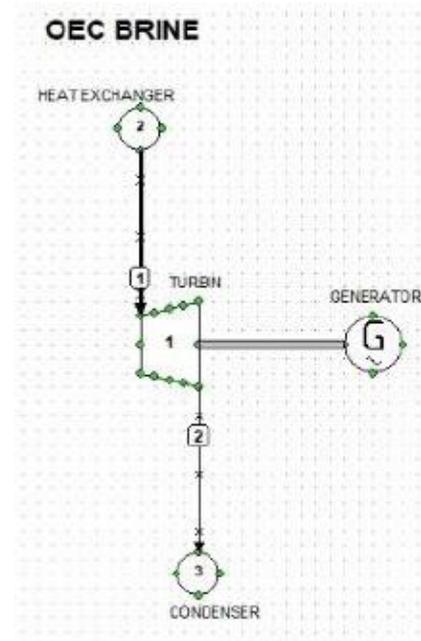
Sumber: Data dari Engineeringtoolbox.com

**Tabel 3:** Data hasil pengamatan pada turbin STG, OEC *brine* dan OEC *bottoming*

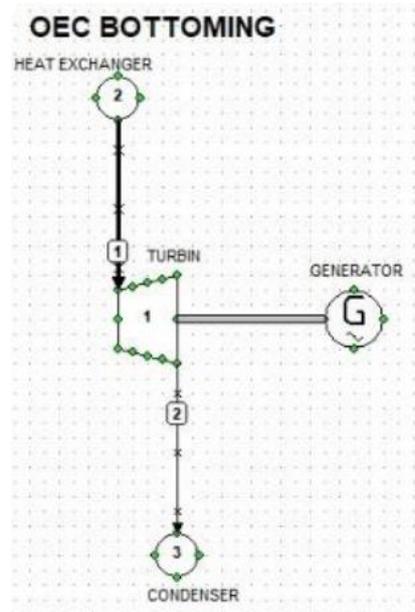
Turbin STG						Tubin OEC <i>brine</i>						Turbin OEC <i>bottoming</i>					
m (kg/s)	P <sub>in</sub> (bar)	T <sub>in</sub> (°C)	P <sub>out</sub> (bar)	T <sub>out</sub> (°C)	Daya (MW)	m (kg/s)	P <sub>in</sub> (bar)	T <sub>in</sub> (°C)	P <sub>out</sub> (bar)	T <sub>out</sub> (°C)	Daya (MW)	m (kg/s)	P <sub>in</sub> (bar)	T <sub>in</sub> (°C)	P <sub>out</sub> (bar)	T <sub>out</sub> (°C)	Daya (MW)
190,28	10,5	183	1,3	99	67	115	7	128	2,8	72	10,1	85	4,5	93	1,3	47	5,3
191,67	10,5	181	1,3	98	67	120	7	128	2,8	72	10,5	90	4,5	93	1,3	47	5,6
192,5	10,5	180	1,3	99	68	125	7	128	2,8	72	11,0	95	4,5	93	1,3	47	5,8
193,88	10,5	182	1,3	99	68	130	7	128	2,8	72	11,4	100	4,5	93	1,3	47	6,1
195,83	10,5	180	1,3	99	69	135	7	128	2,8	72	11,6	105	4,5	93	1,3	47	6,3
197,22	10,5	182	1,3	98	70												
198,88	10,5	180	1,3	99	71												
200,00	10,5	183	1,3	99	72												



(a)



(b)



(c)

Gambar 4: Perancangan simulasi (a) STG, (b) OEC brine, dan (c) OEC bottoming

Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan data perhitungan manual serta hasil observasi langsung di lapangan. Analisis dilakukan melalui beberapa pendekatan, termasuk membandingkan daya keluaran turbin yang diperoleh dari simulasi dengan hasil perhitungan teoritis menggunakan persamaan-persamaan termodinamika. Model numerik berbasis analisis termodinamika dapat memberikan gambaran akurat terkait performa turbin uap, sehingga metode yang digunakan dalam penelitian ini dapat divalidasi secara teori. Selain itu, hasil simulasi dipresentasikan dalam bentuk grafik untuk mengevaluasi hubungan antara laju aliran massa uap terhadap daya turbin. Efisiensi sistem ORC sangat bergantung pada pemilihan fluida kerja, sehingga evaluasi lebih lanjut dilakukan terkait karakteristik pentana sebagai fluida organik dalam sistem ini. Analisis deviasi antara data lapangan, hasil simulasi, dan teori guna dilakukan bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab perbedaan yang terjadi. Selain itu, analisis sensitivitas dilakukan dengan menerapkan variasi parameter masukan, seperti perubahan tekanan dan temperatur, untuk mengamati bagaimana perubahan kecil dalam kondisi operasi dapat mempengaruhi daya yang dihasilkan oleh turbin.

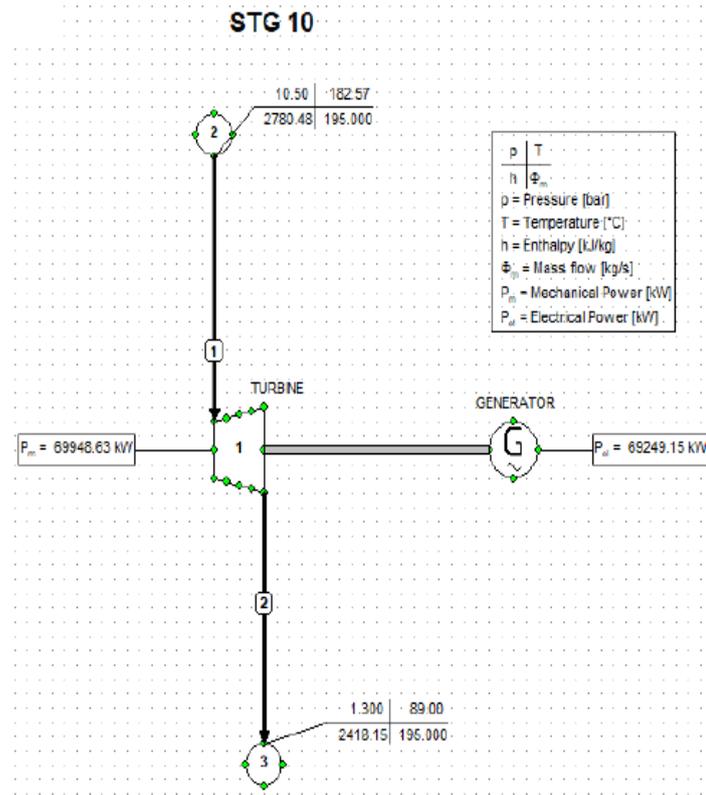
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan/pencatatan dari data operasi pada turbin *STG*, *OEC brine* dan *OEC bottoming* ditunjukkan pada Tabel 3. Data menunjukkan daya turbin yang meningkat seiring bertambahnya laju aliran massa uap. Khusus untuk simulasi dengan *CycleTempo*, ditunjukkan pada Gambar 5. Data data hasil pengamatan operasi yang diinput ke *software CycleTempo* kemudian program di running sesuai dengan jumlah data yang ada. Tampilan hasil simulasi pada *software* ditunjukkan pada Gambar 6 a, b dan c untuk masing masing turbin *STG*, *OEC brine* dan *OEC bottoming*. Semua hasil simulasi diplot pada Gambar 6 bersamaan dengan pencatatan dan dari kajian literatur. Pada sisi lain juga dilakukan perhitungan daya turbin dengan mengacu pada persamaan 1 di atas. Hasil pengamatan, hasil perhitungan dan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5 (a), (b) dan (c) masing-masing untuk turbin *STG*, *OEC brine* dan *OEC bottoming*.

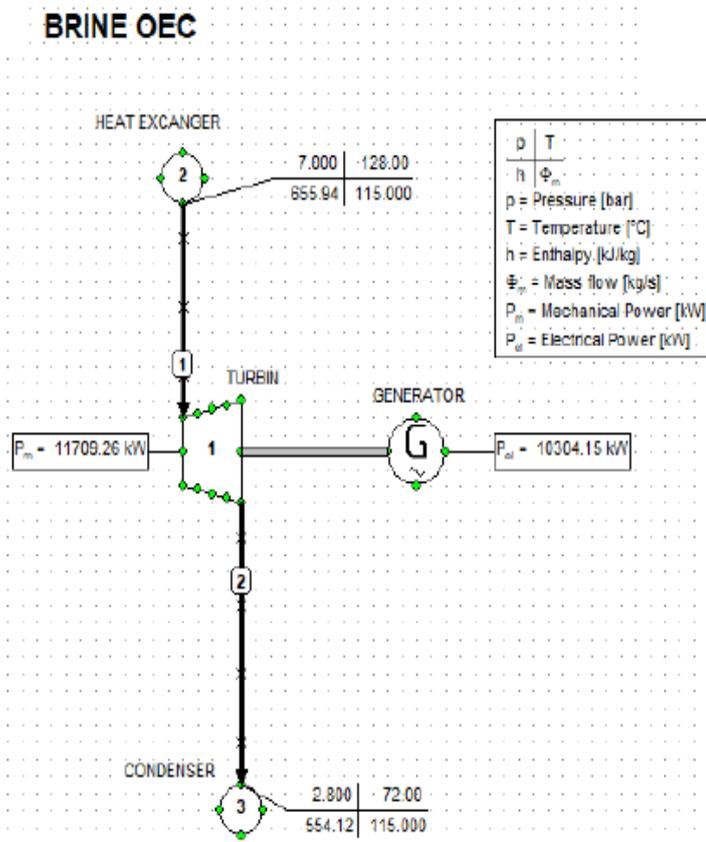
Gambar 6(a) menunjukkan hubungan antara laju aliran massa uap dengan daya pada turbin *STG*. Dari grafik terlihat bahwa daya turbin *STG* mencapai nilai tertinggi sebesar 72 MW pada laju massa uap 200 kg/s dan nilai terendah sebesar 58 MW pada laju aliran massa uap sebesar 190 kg/s. Namun, daya aktual yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan hasil simulasi dan perhitungan manual. Deviasi ini dapat disebabkan oleh faktor-faktor seperti kerugian tekanan akibat gesekan, kebocoran uap, serta efisiensi aktual turbin yang lebih rendah akibat keausan komponen. Performa turbin uap sering kali mengalami penurunan akibat perubahan tekanan dan temperatur yang tidak dapat dikontrol secara ideal dalam kondisi operasional.

Gambar 6(b) menampilkan hasil untuk turbin *OEC bottoming*. Daya tertinggi yang dihasilkan adalah 7,8 MW pada laju massa uap 105 kg/s, sedangkan daya terendah sebesar 5,3 MW terjadi pada laju massa uap 85 kg/s. Perbedaan daya antara hasil simulasi dan data aktual juga diamati, dengan penyebab utama kemungkinan berasal dari faktor ketidaksempurnaan sistem, seperti kehilangan panas yang tidak terukur, ketidaksempurnaan dalam pemodelan efisiensi turbin, serta kemungkinan penurunan temperatur yang lebih signifikan dalam operasi aktual dibandingkan dengan asumsi pada simulasi. Efisiensi turbin dalam siklus ORC sangat dipengaruhi oleh pemilihan fluida kerja serta kondisi operasi yang mengalami fluktuasi dalam tekanan dan temperatur.

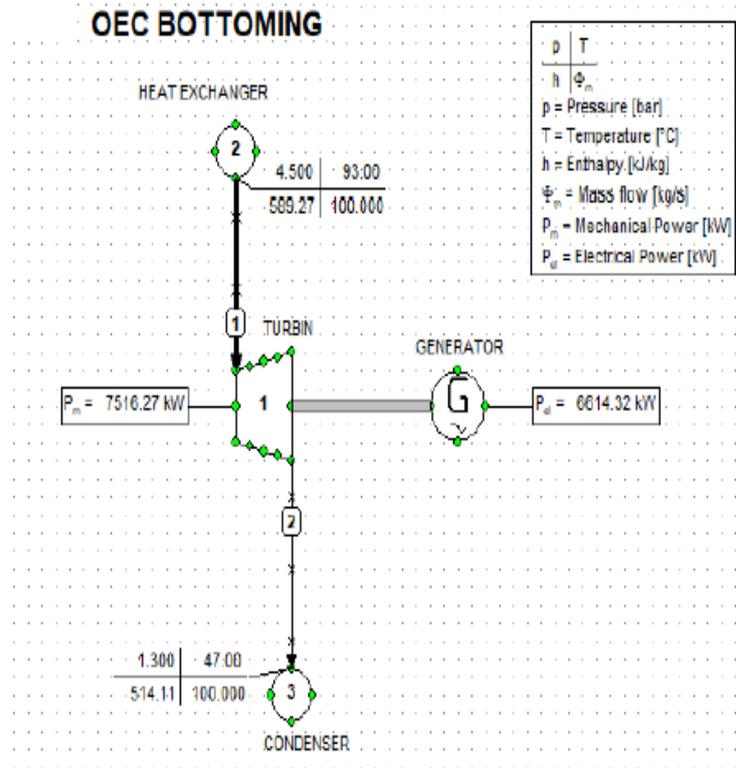
Gambar 6(c) menunjukkan hubungan antara laju aliran massa uap dan daya yang dihasilkan oleh turbin *OEC brine*. Daya tertinggi yang dicapai adalah 13,8 MW pada laju massa uap 135 kg/s, sedangkan daya terendah sebesar 10,1 MW terjadi pada laju massa uap 105 kg/s. Sama seperti dua turbin lainnya, daya aktual yang diperoleh lebih rendah dibandingkan hasil simulasi. Faktor-faktor seperti kebocoran uap, deposisi silika dalam jalur aliran fluida, serta variasi tekanan dan temperatur selama operasi nyata kemungkinan besar berkontribusi pada perbedaan ini. Efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) menunjukkan bahwa penurunan efisiensi sering kali berkaitan dengan perubahan tekanan dan temperatur yang tidak optimal, terutama akibat *fouling* dan degradasi material turbin. Hal yang sama mengenai peningkatan daya karena peningkatan laju aliran massa uap juga ditemukan oleh Yeng, dkk pada penelitian pembangkit *geothermal* yang menggunakan *downhole heat exchanger* (DHE) untuk meningkatkan tekanan dan suhu fluida kerja sebelum memasuki turbin (Yeng, dkk 2022). Hal yang sama juga diperoleh Warsa, dkk ketika meneliti pengaruh laju aliran massa terhadap performa turbin uap (Warsa, dkk 2025).



(a)



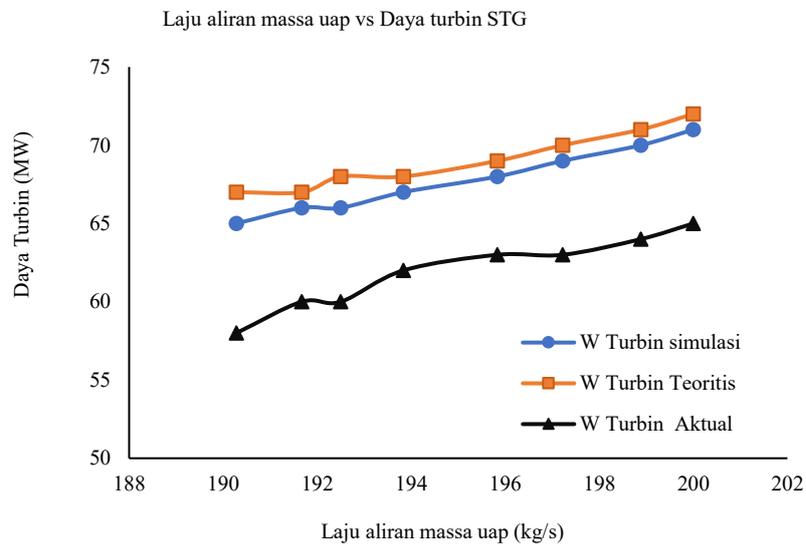
(b)



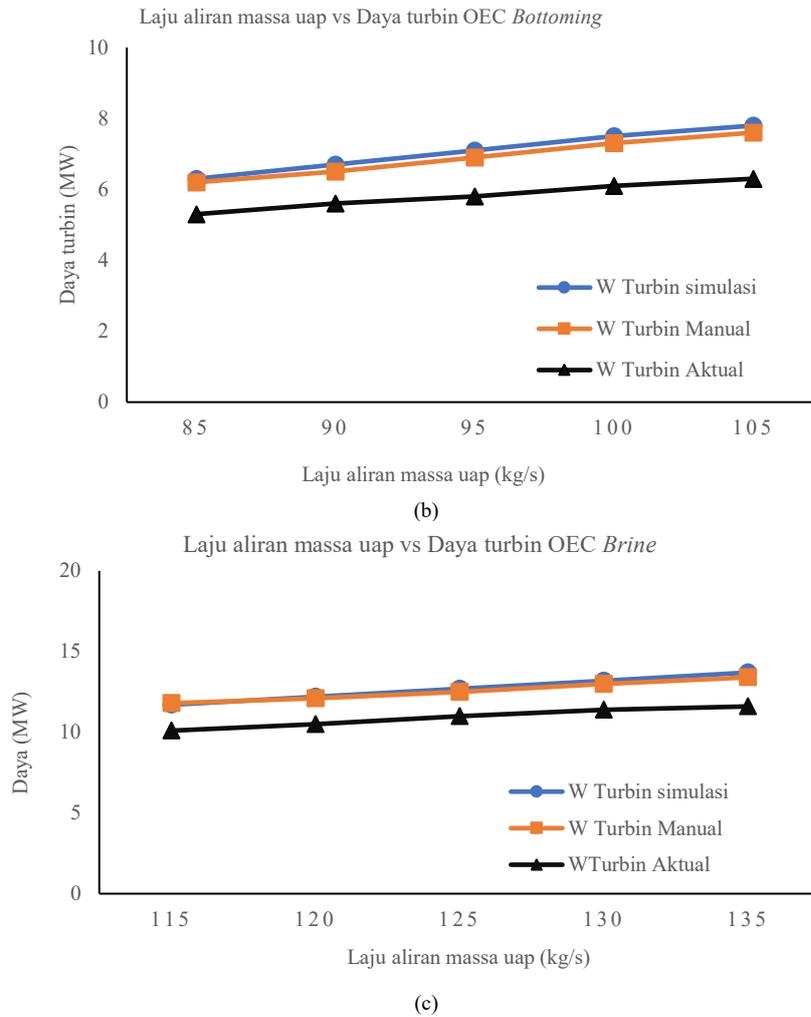
(c)

Gambar 5: Hasil simulasi pada turbin (a) STG, (b) OEC brine dan (c) OEC bottoming

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran massa uap ke turbin berkontribusi pada peningkatan daya keluaran, namun dengan batas tertentu sebelum terjadi kejenuhan akibat keterbatasan efisiensi termodinamika.



(a)



Gambar 6: Pengaruh laju aliran uap terhadap daya pada turbin (a) STG, (b) OEC brine (c) OEC bottoming

PLTP Sarulla Unit 1 tidak hanya mengandalkan turbin uap utama (STG), tetapi juga menerapkan sistem konversi panas sisa (*waste heat recovery*) melalui dua sistem berbasis *Organic Rankine Cycle* (ORC), yaitu OEC Brine dan OEC Bottoming. Keduanya dirancang untuk memanfaatkan energi termal yang tersisa dalam brine dan uap kondensat, yang jika tidak dimanfaatkan akan langsung dibuang ke sumur injeksi.

Turbin pada OEC brine menggunakan brine panas dari separator dengan temperatur ±128 °C untuk memanaskan fluida kerja (pentana) dan menggerakkan turbin kedua. Sedangkan turbin pada OEC bottoming menggunakan sisa panas dari kondensat STG untuk menggerakkan turbin ketiga. Dengan strategi ini, PLTP Sarulla secara signifikan meningkatkan total daya listrik tanpa menambah konsumsi sumber daya panas bumi baru. Tabel 4 menunjukkan penambahan daya rata-rata yang diperoleh dengan memanfaatkan sistem *Organic Rankine Cycle* adalah sebesar 24,26%. Peningkatan efisiensi sebesar ini sejalan dengan yang telah diinformasikan oleh (Siddiqui dkk, 2023).

Tabel 4: Penambahan Daya ORC

Daya Turbin STG (MW)	Daya Turbin OEC Brine (MW)	Daya Turbin OEC Bottoming (MW)	Total Daya (MW)	Penambahan Daya (%)
67	10,1	5,3	15,4	22,99
67	10,5	5,6	16,1	24,03
68	11	5,8	16,8	24,71
68	11,4	6,1	17,5	25,74
69	11,6	6,3	17,9	25,94
67	10,1	5,3	15,4	22,99

#### 4. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh turbin STG, turbin OEC bottoming, dan turbin OEC brine meningkat seiring dengan bertambahnya laju aliran massa uap. Namun, daya aktual yang diperoleh di lapangan cenderung lebih rendah dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak *CycleTempo* maupun perhitungan berdasarkan literatur. Pada turbin STG, daya maksimum sebesar 72 MW tercapai pada laju aliran uap 200 kg/s, sedangkan daya minimum sebesar 58 MW terjadi pada 190 kg/s. Ketidaksiharian ini diduga disebabkan oleh degradasi komponen turbin, kebocoran uap, dan ekspansi uap yang tidak sempurna. Untuk turbin OEC bottoming, daya tertinggi sebesar 7,8 MW tercatat pada laju massa uap 105 kg/s, sedangkan nilai terendah sebesar 5,3 MW terjadi pada 85 kg/s. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh penurunan temperatur, efisiensi turbin aktual yang tidak dimodelkan secara penuh dalam simulasi, serta potensi kebocoran uap pada sistem perpipaan. Turbin OEC brine menunjukkan pola serupa, dengan

daya maksimum 13,8 MW pada laju massa uap 135 kg/s dan minimum 10,1 MW pada 105 kg/s. Faktor-faktor seperti akumulasi silika, fluktuasi tekanan dan temperatur, serta kebocoran uap turut memengaruhi deviasi hasil. Secara keseluruhan, penambahan daya melalui sistem ORC di PLTP Sarulla Unit 1 memberikan kontribusi peningkatan daya sebesar 24,26%. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan laju massa uap berkontribusi langsung terhadap peningkatan daya turbin, namun faktor teknis dan operasional menyebabkan terjadinya deviasi antara simulasi dan kondisi aktual. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk optimasi operasi turbin dan menekankan pentingnya pemantauan serta perawatan berkala guna meningkatkan efisiensi pembangkitan energi. Studi lanjutan direkomendasikan untuk mengevaluasi lebih lanjut faktor-faktor yang mempengaruhi performa turbin secara menyeluruh.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Medan atas terselenggaranya penelitian ini, serta kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, baik dalam bentuk fasilitas. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan peneliti dan teknisi/supervisor di PT. *Sarulla Operation Ltd* yang turut membantu dalam proses pengumpulan data dan analisis hasil penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arisandi, G.F. & Putra, A. B. K. (2023). Simulasi Cycle Tempo 5.0 Dampak Variasi Rasio Co-Firing Batubara Dan Biomassa Jenis Tongkol Jagung Terhadap Performa PLTU 400 MW. *Jurnal Teknik ITS*, 12(2), B131-B137.
- Ata, S., Kahraman, A., dan Sahin, R. 2019. Thermal efficiency evaluation of an organic Rankine cycle with n-pentane as working fluid. *International Journal of Energy Applications and Technologies*. 6(2). 31-38.
- Babatunde, F. & Sunday, O.O. (2018). A Review of Working Fluids for Organic Rankine Cycle (ORC) Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 413, 012019.
- Djabal, H., Djafar, R., Djamalu, Y. & Liputo, B. (2023). Simulasi Sistem PLTU Anggrek 2 X 25 MW Menggunakan Software Cycle Tempo Dengan Variasi Beban Turbin 25%, 50%, 75% dan 100%. *Journal Of Renewable Energy Engineering*, 1(1), 2-24.
- Diagram T-S Air. Diakses Juni, 2025 dari <https://demonstrations.wolfram.com/TemperatureEntropyDiagramForWater/>
- Lokasi proyek. Diakses Februari, 2025 dari <https://sarullaoperations.com/id/our-business/project-location>
- Lontoh, T., Taunamang, H. & Polii, J. (2022). Analisis Karakteristik Fluida dan Estimasi Temperatur Reservoir menggunakan Geoindikator Na-K-Mg di Kecamatan Tompaso Baru. *Jurnal FisTa: Fisika dan Terapannya*, 3(2), 80-86.
- Ministry of Energy and Mineral Resources Republic Indonesia, (2021). Handbook of Energy & Economic Statistic of Indonesia, Jakarta.
- Pentane - Thermophysical Properties, Diakses Maret 2025 dari [https://www.engineeringtoolbox.com/pentane-properties-d\\_2048.html](https://www.engineeringtoolbox.com/pentane-properties-d_2048.html),
- Sarulla Operation Ltd. (2023). *Operation and Supervisor Unit 1 & 2 Sarulla Operation Ltd*. Indonesia: NIL Operation Manual Book.
- Siddiqui, M. E., Almatrafi, E. & Saeed, U. (2023). Performance Analysis of Organic Rankine Cycle with Internal Heat Regeneration: Comparative Study of Binary Mixtures and Pure Constituents in Warm Regions. *Processes*, 11(8).
- Sitompul, A., Sianturi, R.I., & Fahmi, F. (2022). Analisis performance backpressure turbin sebelum dan sesudah turbin washing pada pembangkit listrik tenaga panas bumi Sarulla Unit Silangkitang. *Sinerji Polmed* 3(2), 1-9. <https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v3i2.730>
- Warsa, I. K., Rhomadan, S., & Megawati, E. (2025). Optimasi Kinerja Steam Turbine Generator 4 Pada Power Plant 2 dengan Peningkatan Aliran Uap Masuk (Studi Kasus PT. X). *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 9(1), 8-13.
- Yeng, C., Lu, X., Yu, H., Zhang, W., Zhang, J., & Wang, J. (2022). Theoretical Study of a Novel Power Cycle for Enhanced Geothermal Systems. *Processes* 2022, 10(3), 516.