

## PENGARUH REKUPERATOR TERHADAP PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK SIKLUS BINER

NAUFAL NANDALIARSYAD<sup>†</sup>, MOCH. ARIL INDRA PERMANA, CUKUP MULYANA

*Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran*

*Jl. Raya Bandung-Sumedang Km.21 Jatinangor 45363, Sumedang, Jawa Barat, Telp. 022-7796014*

**Abstrak.** Pembangkit listrik siklus biner yang menggunakan pemanas fluida *geothermal* memiliki prospek yang baik untuk dikembangkan di Indonesia. Performa dari pembangkit tersebut ditinjau dari panas yang digunakan (*heat rate*) dan daya yang dihasilkan. Dalam penelitian ini dilakukan kajian hubungan antara *heat rate* dan daya yang dihasilkan dengan menggunakan rekuperator dan tanpa menggunakan rekuperator. Rekuperator adalah alat penukar panas yang memanfaatkan panas tersisa dari fluida kerja untuk memanaskan fluida kerja itu sendiri. Penelitian ini dilakukan untuk membuktikan pengaruh rekuperator terhadap hubungan *heat rate* dan daya yang dihasilkan secara simulasi melalui permodelan. Parameter laju aliran massa fluida pemanas atau *brine* diatur sebesar 400 ton/jam, dengan temperatur divariasikan dengan rentang antara 90-160°C untuk melihat perubahan daya yang dihasilkan dibandingkan dengan siklus biner tanpa rekuperator. Selain itu, parameter daya yang dihasilkan akan dibuat tetap (*fixed*) untuk melihat laju aliran massa fluida pemanas yang digunakan. Penelitian dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak HYSYS v7.3. Dari simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan rekuperator terjadi peningkatan daya sebesar 71kW atau sekitar 2,303%. Sementara jumlah aliran massa *brine* berkurang rata rata sebesar 16,3 ton/jam atau sekitar 4,082%.

**Kata kunci:** *geothermal*, siklus biner, performa, rekuperator, HYSYS v7.3

**Abstract.** Binary cycle power plants that use hot geothermal fluid (geo-fluid) have good prospects for development in Indonesia. The performance of the plant is viewed in terms of heat used (heat rate) and the generated power. In this research, the relationship between the heat rate and power generated by using recuperator and without using recuperator was studied. Recuperator are heat exchangers that utilize the remaining heat from the working fluid to heat the working fluid itself. This study was conducted to prove the influence of the recuperator. Heating fluid mass flow rate parameter was adjusted to 400 tons / hour, with the temperature varied in the range between 90-160°C to observe the change of power produced compared with binary cycle without recuperator. Parameters generated power is fixed to observe the used mass flow rate of geofluid. The study was conducted using the software HYSYS v7.3.. From the simulation, it is obvious that recuperator can increase the power produced by 71 kW or about 2.303% and decrease the brine utilization by 16.3 tons/hour or about 4.082%.

**Keywords:** geothermal, binary cycle, performance, recuperator, HYSYS v7.3

### 1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga panas bumi memiliki prospek yang sangat baik di Indonesia karena tingginya potensi panas bumi yang ada di Indonesia dan didukung oleh UU No.27/2002 dan UU No.20/2003 yang berisi tentang pola tetap pengembangan dan pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia, juga target pengembangan panas bumi sebesar 6000 MW untuk tenaga listrik pada tahun 2020 [1]. Potensi panas bumi di Indonesia adalah 40% dari potensi panas bumi di dunia yaitu sebesar 28 GW. Sistem panas bumi di Indonesia umumnya merupakan sistem hidrotermal yang mempunyai temperatur tinggi (>225°C) dan hanya beberapa di antaranya yang mempunyai temperatur sedang (150°-225°C) [2]. Pembangkit listrik tenaga panas bumi memanfaatkan fluida

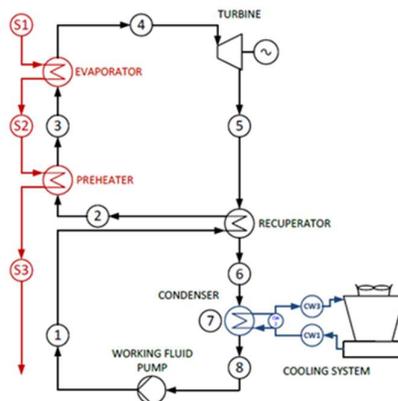
---

<sup>†</sup> email: naufaln28@gmail.com

yang berada di dalam tanah yang telah dipanaskan secara alami di dalam bumi, baik dimanfaatkan langsung maupun dijadikan pemanas fluida kerja. Fluida pemanas ini selanjutnya disebut sebagai brine.

Untuk meningkatkan performa dari pembangkit listrik tenaga panas bumi, para peneliti sekarang mengembangkan teknologi yang dapat memanfaatkan panas lebih optimal dari sumur-sumur panas bumi yang tersedia, diantaranya adalah dengan melakukan *flashing* kedua pada pembangkit listrik tenaga panas bumi sistem *flash* atau dengan menambahkan siklus biner pada pembangkit listrik tersebut. Siklus biner merupakan sebuah teknologi pembangkit yang menggunakan dua siklus fluida, yaitu fluida kerja pemutar turbin dan fluida pemanas. Di Indonesia, penelitian mengenai siklus biner ini sudah dilakukan oleh Mawardi et al, 2015. Pada penelitian tersebut disebutkan bahwa peningkatan daya yang dihasilkan oleh siklus biner dapat mencapai 30% dengan syarat fluida kerja yang digunakan adalah iso-butane [3].

Lebih lanjut, untuk menambah peningkatan daya dari siklus biner dapat digunakan rekuperator. Rekuperator merupakan sebuah *heat exchanger* tambahan pada pembangkit listrik siklus biner yang dapat memanfaatkan panas tersisa pada fluida kerja dan digunakan kembali untuk memanaskan fluida kerja itu sendiri. Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, rekuperator dapat meningkatkan temperatur fluida kerja pada sisi masukan *pre-heater* atau titik 2 dan menyebabkan temperatur pada titik S3 atau temperatur reinjeksi meningkat dengan mengambil panas dari titik 5 atau fluida pada sisi keluar turbin [4].



Gambar 1. Skema pembangkit listrik siklus biner menggunakan rekuperator.

## 2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian dengan menggunakan simulasi menggunakan perangkat lunak HYSYS v7.3. Terdapat dua pokok pengujian yang dilakukan. Pertama, melihat perbandingan antara daya keluaran siklus biner yang menggunakan rekuperator dengan daya keluaran siklus biner tanpa menggunakan rekuperator. Kedua, membandingkan jumlah fluida pemanas yang diperlukan untuk menghasilkan nilai daya yang sama.

Untuk melihat perbandingan daya keluaran, dilakukan simulasi dengan menetapkan nilai aliran massa *brine*. Temperatur *brine* divariasikan dalam rentang 100°C-160°C dengan aliran massa *brine* sebesar 400 ton/jam. Sementara untuk melihat pengaruh rekuperator terhadap jumlah massa *brine* atau aliran massa *brine* yang diperlukan dapat dilakukan dengan mengatur nilai daya

keluaran turbin dengan nilai yang sama antara siklus biner yang menggunakan rekuperator dengan siklus biner tanpa rekuperator.

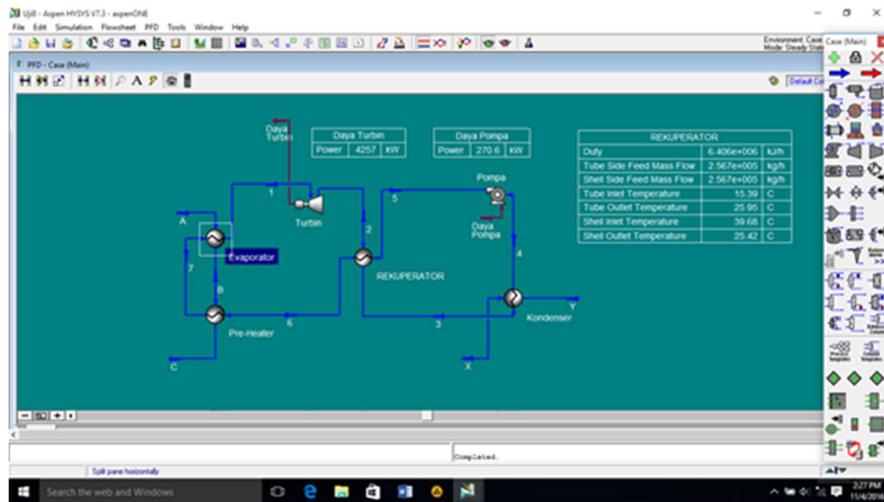
Hubungan antara temperatur, yang pada persamaan ini diwakili oleh nilai entalpi, aliran massa *brine* maupun massa fluida, juga nilai daya yang akan dihasilkan oleh turbin dapat dilihat pada Persamaan (1) dan (2).

$$\dot{m}_b(h_A - h_C) = \dot{m}_f(h_1 - h_6) \quad (1)$$

$$\dot{W} = \dot{m}_f(h_1 - h_2) \quad (2)$$

Persamaan (1) menggambarkan kejadian perpindahan energi pada *heat exchanger*  $\dot{m}_b$  merupakan massa per satuan waktu dari *brine* sementara  $\dot{m}_f$  merupakan massa per satuan waktu dari fluida kerja yang digunakan pada siklus biner ini. Nilai entalpi pada titik-titik tertentu dalam siklus biner diwakili oleh simbol  $h$ . Persamaan (2) menggambarkan pengaruh massa per satuan waktu dari fluida kerja dan nilai entalpinya berpengaruh pada daya keluaran turbin yang diwakili oleh simbol  $\dot{W}$ .

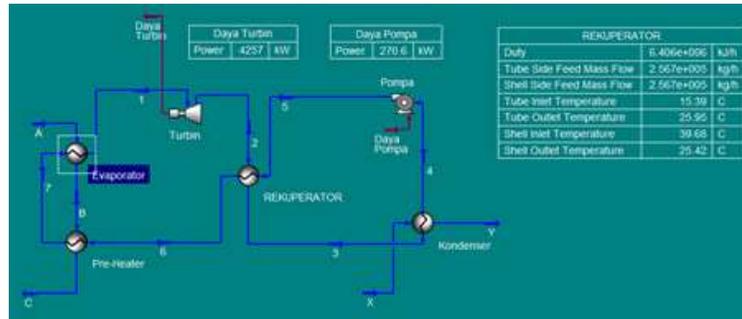
Skema pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner dibuat dalam perangkat lunak HYSYS v7.3 seperti ditunjukkan pada Gambar 2 pada tampilan *Simulation Environment* pada HYSYS v7.3. Pada Gambar 2 juga ditunjukkan kumpulan komponen – komponen yang dapat digunakan untuk membuat sebuah model pembangkit (ditunjukkan dengan panah berwarna merah). Sebelum memilih komponen yang akan digunakan, fluida kerja yang akan digunakan dipilih terlebih dahulu. Pada percobaan ini dipilih fluida kerja isobutan sebagai fluida kerja dan air (H<sub>2</sub>O) sebagai *brine*.



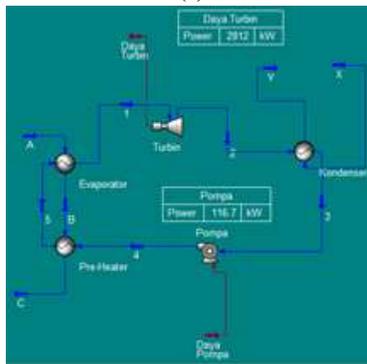
**Gambar 2.** Tampilan simulation environment pada HYSYS v7.3 beserta model siklus biner dengan menggunakan rekuperator

Setelah menggabungkan beberapa komponen seperti *heat exchanger*, turbin, kondenser, pompa dan ditambah dengan rekuperator seperti ditunjukkan pada Gambar 3 (a) dan (b) maka barulah simulasi dapat dijalankan. Setelah model dari siklus biner baik yang menggunakan rekuperator

maupun tanpa rekuperator sudah selesai dibuat, selanjutnya adalah memasukkan parameter-parameter pada jendela parameter untuk masing masing parameter. Contoh tampilan jendela parameter *evaporator* dan *pre-heater* ditunjukkan oleh Gambar 4 dan Gambar 5.



(a)



(b)

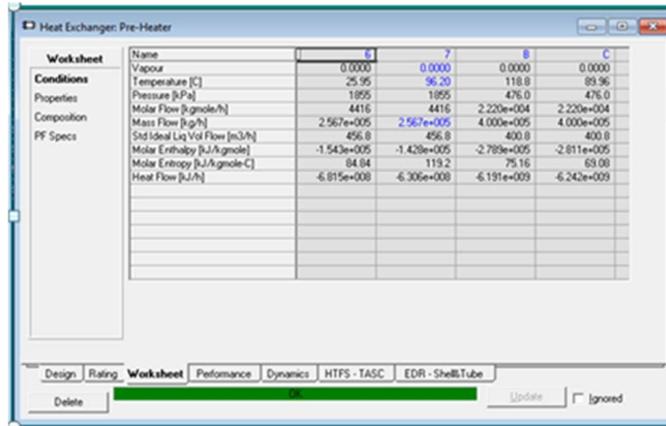
**Gambar 3.** Skema pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner dalam perangkat lunak HYSYS v7.3 dengan rekuperator (a), dan tanpa rekuperator (b).

Name	7	1	A	8
Vapour	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
Temperature [C]	96.20	96.20	150.0	118.8
Pressure [kPa]	1855	1855	476.0	476.0
Molar Flow [kgmole/h]	4416	4416	2.220e+004	2.220e+004
Mass Flow [kg/h]	2.567e+005	2.567e+005	4.000e+005	4.000e+005
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	456.8	456.8	400.8	400.8
Molar Enthalpy [kJ/kgmole C]	-1.428e+005	-1.301e+005	-2.763e+005	-2.789e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole C]	119.2	153.7	81.37	75.16
Heat Flow [kJ/h]	6.306e+009	-5.744e+009	6.135e+009	-6.191e+009

**Gambar 4.** Tampilan jendela *heat exchanger : evaporator*

Pada gambar terlihat beberapa parameter-parameter yang dapat terlihat untuk masing masing komponen yang diantaranya adalah temperatur, tekanan, aliran massa (*mass flow*), dan fasa dari

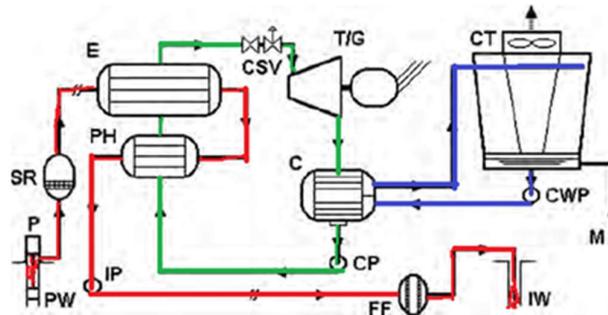
zat yang melalui komponen tersebut. Parameter yang nilainya berwarna biru merupakan parameter yang nilainya dimasukkan oleh pengguna, sementara yang berwarna hitam dihasilkan dari hasil simulasi.



Name	6	7	8	C
Vapour	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature [C]	25.95	96.20	118.0	89.96
Pressure [Pa]	1955	1955	476.0	476.0
Molar Flow [kgmole/h]	4416	4416	2.220e-004	2.220e-004
Mass Flow [kg/h]	2.567e+005	2.567e+005	4.000e-005	4.000e-005
Std Ideal Lin Vol Flow [m <sup>3</sup> /h]	456.8	456.8	400.0	400.0
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1.543e+005	-1.428e+005	-2.789e+005	-2.811e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	84.84	119.2	75.16	69.08
Heat Flow [kJ/h]	-6.815e+008	-6.306e+008	-6.191e+009	-6.242e+009

Gambar 5. Tampilan tendela *heat exchanger : pre heater*

Bagian yang sangat diperhatikan pada penelitian ini adalah rekuperator yang mana secara teknis merupakan *heat exchanger* atau alat penukar panas. *Heat exchanger* ini merupakan komponen utama pada pembangkit listrik *geothermal* siklus biner. Pembangkit listrik *geothermal* sistem siklus biner memiliki prinsip termodinamika yang dekat dengan pembangkit listrik konvensional yang berasal dari energi fosil maupun dengan pembangkit listrik tenaga nuklir karena menggunakan suatu fluida kerja yang menjalankan suatu siklus tertutup. Pada siklus biner, panas yang berasal dari dalam bumi (fluida pemanas atau *brine*) digunakan sebagai sumber pemanas, yang mana akan memanaskan fluida kerja dan merubahnya menjadi uap yang akan memutar turbin [5]. Pada peristiwa itulah alat penukar panas yaitu *heat exchanger* berperan. Sementara rekuperator yang digunakan disini adalah alat penukar panas yang memanfaatkan panas tersisa yang berasal dari fluida kerja yang sudah melalui turbin untuk kemudian diberikan kepada fluida kerja sebelum memasuki *heat exchanger* yang menggunakan *brine*. Sehingga dapat dikatakan bahwa rekuperator ini adalah tahap pemanasan awal, tapi tidak menggunakan fluida pemanas atau *brine* sebagai pemanasnya, melainkan memanfaatkan panas tersisa dari fluida kerja yang sudah melewati turbin.



Gambar 6. Skema Pembangkit Listrik *Geothermal* Siklus Biner

Dari Gambar 6 dapat kita lihat skema secara umum dari pembangkit listrik *geothermal* dengan sistem siklus biner. Siklus dari fluida kerja digambarkan dengan garis berwarna hijau, sementara

fluida pemanasnya atau *brine* digambarkan dengan garis berwarna merah. Sementara garis yang berwarna biru merupakan siklus dari air pendingin yang digunakan untuk merubah fasa fluida kerja dari fasa uap ke fasa cair. Siklus biner terdiri dari 2 siklus utama yaitu siklus pemanas dan siklus fluida kerja. Komponen – komponen utama pada siklus pemanas antara lain adalah PW atau *Production Well*, kemudian *heat exchanger* yang dipecah menjadi 2 bagian berdasarkan fungsinya yaitu E (*Evaporator*) dan PH (*Pre-Heater*), lalu ada IW atau *Injection Well*. Komponen – komponen utama pada siklus fluida kerja antara lain adalah T/G atau Turbin yang terkopel dengan generator, lalu ada CSV (*Control and Stop Valve*), C (*Condenser*) dan CP (*Condensate Pump*)[5].

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari penelitian ini membuktikan pengaruh rekuperator terhadap peningkatan performa pada pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner ditinjau dari peningkatan daya yang dihasilkan oleh turbin, dan mengurangi jumlah *brine* yang dibutuhkan.

Tabel 1 memperlihatkan data parameter yang diperoleh pada penelitian ini, data tersebut menunjukkan bahwa ketika rekuperator ditambahkan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner daya yang dihasilkan oleh turbin menjadi lebih tinggi, hal ini dikarenakan temperatur fluida kerja pada sisi masukan turbin menjadi lebih tinggi yang berarti entalpi dari fluida kerja tersebut pun menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan siklus biner tanpa menggunakan rekuperator. Besar selisih daya tertinggi adalah pada saat temperatur *brine* mencapai 120°C dengan selisih 110 kW, sementara besar selisih daya terendah adalah pada saat temperatur *brine* sebesar 90°C dengan selisih 17 kW. Sementara rata-rata peningkatan daya untuk masing masing temperatur *brine* adalah sebesar 71 kW

**Tabel 1.** Perbandingan daya turbin pada siklus biner dengan rekuperator dan siklus biner tanpa rekuperator

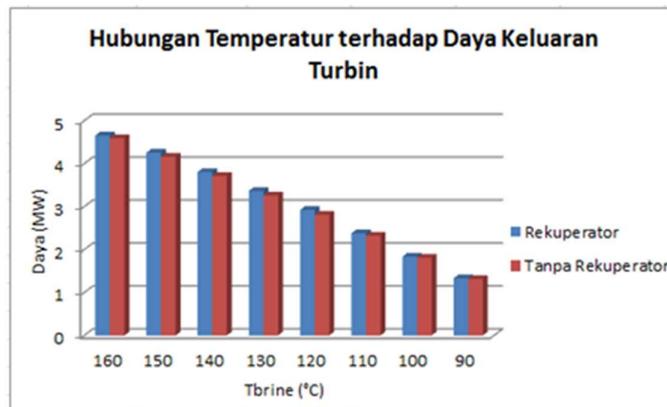
$T_{brine}$ (°C)	Daya (MW) Dengan Rekuperator	Daya (MW) Tanpa Rekuperator	Selisih Daya	Peningkatan Daya (%)
160	4,656	4,590	0,066	1,44
150	4,257	4,161	0,096	2,31
140	3,807	3,714	0,093	2,50
130	3,366	3,257	0,109	3,35
120	2,922	2,812	0,110	3,91
110	2,378	2,322	0,056	2,41
100	1,837	1,815	0,022	1,21
90	1,331	1,314	0,017	1,29
Rata – rata			0,071	2,30

Tabel 2 memperlihatkan data parameter untuk membandingkan jumlah massa *brine* yang digunakan oleh sebuah pembangkit siklus biner untuk mencapai suatu nilai daya keluaran tertentu. Pada tabel tersebut terlihat ketika digunakan rekuperator pada siklus biner, maka massa *brine* yang digunakan akan lebih sedikit dibandingkan dengan penggunaan massa *brine* pada siklus biner tanpa menggunakan rekuperator. Dari tabel ini terlihat bahwa selisih penggunaan massa *brine* terbesar adalah ketika temperatur masukan *brine* sebesar 160°C yaitu sebesar 41,4 ton per jam, dan selisih terendah adalah pada temperatur 110°C yaitu sebesar 3,5 ton/jam. Sementara rata – rata selisih penggunaan massa *brine* adalah sebesar 16,3 ton/jam.

**Tabel 2.** Perbandingan massa *brine* yang diperlukan untuk menghasilkan nilai daya tertentu pada siklus biner dengan rekuperator dan siklus biner tanpa rekuperator.

$\dot{m}_f$ (ton/h)	Tbrine (°C)	Daya (MW)	$\dot{m}_b$ (ton/h) - rekuperator	$\dot{m}_b$ (ton/h) – tanpa rekuperator	$\Delta \dot{m}_b$ (ton/h)
256,7	160	4,583	360,0	401,4	41,4
	150	4,161	380,2	397,5	17,3
	140	3,714	373,1	398,9	25,8
	130	3,257	379,8	397,5	17,7
	120	2,812	390,7	401,6	10,9
	110	2,322	395,5	399,1	3,6
	100	1,815	390,0	396,3	6,3
	90	1,314	389,7	397,1	7,4
				Rata - rata	16,3

Berdasarkan persamaan (1) dan persamaan (2) dapat terlihat bahwa apabila nilai  $h_6$  menjadi lebih besar akibat penggunaan rekuperator, maka apabila nilai ruas kiri dibuat tetap dan nilai  $\dot{m}_f$  juga tetap, nilai  $h_1$  akan menjadi lebih besar juga. Semakin besarnya nilai  $h_1$  berakibat pada semakin besarnya nilai daya ( $\dot{W}$ ) yang dihasilkan. Namun, semakin kecil temperatur dari *brine* maka selisih dari daya keluaran turbin antara siklus biner menggunakan rekuperator dengan yang tanpa menggunakan rekuperator akan semakin kecil, hal ini dapat terlihat pada Gambar 7.

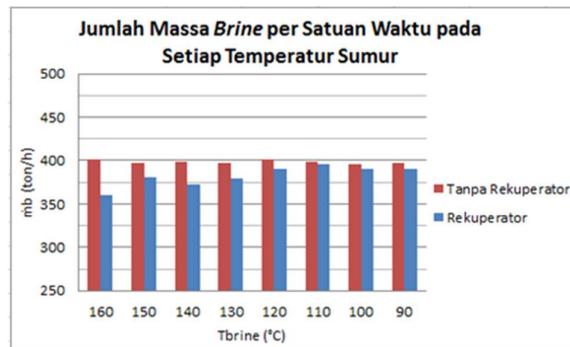


**Gambar 7.** Hubungan temperatur terhadap daya keluaran turbin pada pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner dengan rekuperator dan tanpa rekuperator

Selain melihat pengaruh dari penggunaan rekuperator terhadap daya keluaran turbin pada pembangkit listrik siklus biner, pada penelitian ini pun dilihat pengaruh rekuperator tersebut terhadap penggunaan *brine* yang akan terlihat pada Tabel 2 dan Gambar 8 yaitu penurunan nilai massa per satuan waktu dari *brine* ketika siklus biner dipasang rekuperator.

Dengan ditambahkan rekuperator pada skema siklus biner tersebut maka nilai entalpi pada titik masukan *pre-heater* akan lebih tinggi dibandingkan dengan siklus biner tanpa menggunakan rekuperator, dan menyebabkan selisih entalpi pada fluida kerja di *heat exchanger* berkurang. Menurut hukum kekekalan massa yang dituliskan pada persamaan (1), apabila nilai pada ruas

kanan berkurang akan mengakibatkan nilai pada ruas kiri ikut berkurang . Apabila nilai selisih entalpi pada ruas kiri diatur sedemikian rupa supaya tetap maka konsekuensinya adalah adanya penurunan massa per satuan waktu dari *brine* ( $\dot{m}_b$ ). Hal tersebutlah yang membuktikan bahwa penggunaan rekuperator dapat mengurangi pemakaian *brine*.



Gambar 8. Jumlah massa *brine* per satuan waktu pada setiap temperatur sumur.

## 5. Kesimpulan

Penggunaan rekuperator pada pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner dapat meningkatkan performa dari pembangkit tersebut ditinjau dari aspek peningkatan daya dan penurunan jumlah massa *brine* per satuan waktu. Rata-rata peningkatan daya pada penelitian ini adalah 0,071 MW atau 71 kW dengan rata-rata presentase peningkatan daya relatifnya adalah sebesar 2,303 %, serta rata-rata penurunan penggunaan *brine* sebesar 16,3 ton/jam atau sekitar 4,082% lebih rendah dibandingkan *brine* yang dibutuhkan ketika siklus biner tidak menggunakan rekuperator.

## Ucapan terima kasih

Terimakasih kami ucapkan kepada Program Studi Fisika Universitas Padjadjaran yang telah mendukung penelitian ini. Serta kepada Muhamad Ridwan Hamdani yang telah mengajari penulis dalam membuat skema pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner pada perangkat lunak HYSYS v7.3.

## Daftar Pustaka

- [1] Hadi A. U., "Potensi Dan Wilayah Kerja Pertambangan Panas Bumi Di Indonesia," J. Ilm., vol. 1, no. 2, 2008, pp. 1–9.
- [2] N. Saptadji, "Energi Panas Bumi (*Geothermal Energy*) Energi Panas Bumi di Indonesia," 1979.
- [3] M. Agani, S. Patangke, D. B. Hartanto, and M. Silaban, "Opportunity and Barriers to Develop a Bottoming Unit by Utilizing Separated Hot Brine in Ulubelu, Indonesia," World Geotherm. Congr. 2015, no. April 2015, p. 11.
- [4] A. Fernando, M. Parada, and L. S. A. D. C. V., "Geothermal Binary Cycle Power Plant Principles, Operation and Maintenance," no. 20, 2013.
- [5] R. Dipippo, *Geothermal Power Plants, Principles Applications, Case Studies, and Environmental Impact*, 2nd Editio. Massachusetts, 2007.