

Studi Variasi *Flowrate Refrigerant* pada Sistem *Organic Rankine Cycle* dengan Fluida Kerja R-123

Aria Halim Pamungkas dan Ary Bachtiar Khrisna Putra

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: arybach@me.its.ac.id

Abstrak—Saat ini kelangkaan sumber energi fosil telah menjadi isu utama di seluruh dunia. Hal tersebut memberikan dampak yang signifikan di setiap aspek kehidupan dan salah satunya adalah di bidang pembangkit listrik. Salah satu sistem pembangkit listrik yang tidak menggunakan energi fosil adalah *Organic rankine cycle* (ORC). Pada penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental pada suatu sistem *Organic rankine cycle* yang telah dibangun. Penelitian ini yang divariasikan adalah *flowrate* dari fluida kerja dalam hal ini R-123. Variasi *flowrate* yang digunakan yaitu 3-1 GPM (Galon per menit) dengan penurunan 0,5 GPM setiap pengambilan data. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini berupa grafik-grafik daya pada turbin, kondensor, pompa dan evaporator, efisiensi siklus dan back work ratio fungsi *flowrate* fluida kerja. Efisiensi siklus tertinggi adalah 5,86% yang terjadi pada *flowrate* 3 GPM dan efisiensi siklus terendah adalah 4,32% yang terjadi pada *flowrate* 1 GPM.

Kata kunci—Cooling tower, efisiensi siklus, ORC, back work ratio, *flowrate*, R-123.

I. PENDAHULUAN

DEWASA ini kelangkaan sumber energi fosil telah menjadi isu utama di seluruh dunia. Hal tersebut memberikan dampak yang signifikan di setiap aspek kehidupan dan salah satunya adalah di bidang pembangkit listrik. Sistem pembangkit listrik masih sangat tergantung pada sumber energi fosil. Oleh karena itu diperlukan sumber energi alternatif guna memenuhi kebutuhan listrik di masa yang akan datang. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan adalah panas bumi (*geothermal*). Hal tersebut didukung oleh adanya potensi panas bumi yang cukup besar di Indonesia. Dengan adanya potensi tersebut, diperlukan adanya inovasi suatu sistem pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi yang panas bumi. *Organic rankine cycle* (ORC) adalah salah satu sistem pembangkit listrik yang merupakan modifikasi dari *Rankine Cycle* dimana fluida kerja yang digunakan adalah *refrigerant*. *Organic rankine cycle* memiliki empat komponen utama yaitu evaporator, turbin, kondensor, dan pompa. Fluida kerja dipompa menuju evaporator untuk dipanaskan sehingga membangkitkan uap. Uap tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap, hasil putaran turbin akan digunakan untuk memutar generator dan akan menghasilkan sumber listrik. Uap hasil ekspansi turbin

dikondensasi dan dialirkan oleh pompa kembali ke evaporator. Demikian sistem ini terjadi secara terus menerus. Sistem ini mampu memanfaatkan sumber energi yang memiliki temperatur dan tekanan rendah untuk membangkitkan uap fluida.

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang dikaji pada penelitian ini antara lain karakteristik aktual hasil perancangan sistem *Organic rankine cycle* dengan fluida kerja R-123, pengaruh variasi *mass flowrate refrigerant* R-123 terhadap performa *Organic rankine cycle* dan pengaruh *mass flowrate refrigerant* terhadap efisiensi siklus *Organic rankine cycle*.

II. URAIAN PENELITIAN

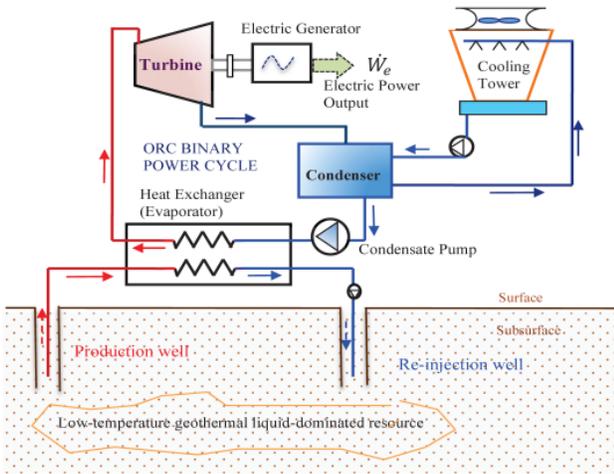
A. *Organic rankine cycle*

Organic rankine cycle (ORC) adalah modifikasi siklus Rankine. Pada *Rankine Cycle* biasanya menggunakan air bertekanan dan bertemperatur tinggi sebagai fluida kerja. Sedangkan pada ORC, titik didih dari siklus ini lebih rendah sehingga air tidak cocok digunakan sebagai fluida kerja. Oleh karena itu digunakan *silicone oil*, *hydrocarbon*, dan *fluorocarbon* yang mempunyai titik didih rendah sebagai fluida kerja pengganti air. Siklus dasar ORC ditunjukkan pada Gambar 1.

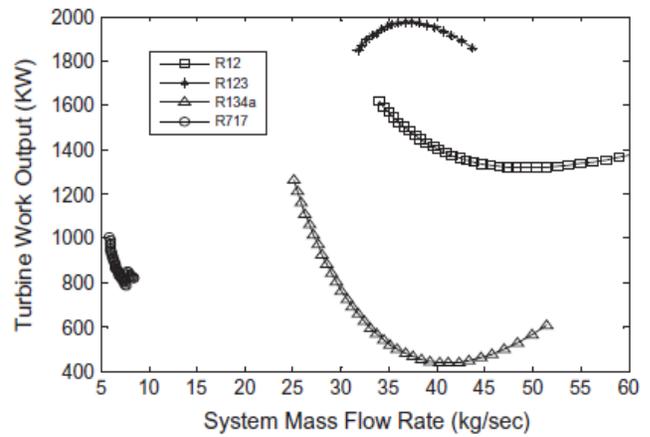
Berbeda dengan siklus Rankine, Siklus ORC merupakan suatu siklus uap dimana siklus ini menggunakan fluida kerja organik (*refrigerant*). Selain dalam penggunaan fluida kerjanya, perbedaan siklus Rankine dan ORC terletak pada alat penambah panasnya. Jika siklus Rankine menggunakan boiler sebagai tempat penambahan panas sedangkan pada ORC menggunakan evaporator sebagai tempat penyerapan panas. Sehingga pada siklus ini, kita tidak menggunakan tempat atau alat untuk proses pembakaran sehingga tidak akan terbentuk emisi gas buang penyebab polusi udara akibat proses pembakaran.

B. Penelitian Terdahulu

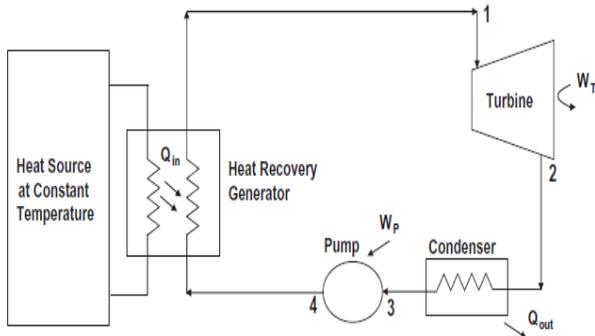
Penelitian tentang “*Performance analysis of an Organic rankine cycle with superheating under different heat source temperature conditions*” telah dilakukan oleh [1]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan unjuk kerja sistem dengan memvariasikan fluida kerja. Fluida kerja yang dibandingkan adalah R-12, R-123, R-134a, R-717. Skema sistem ORC yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.



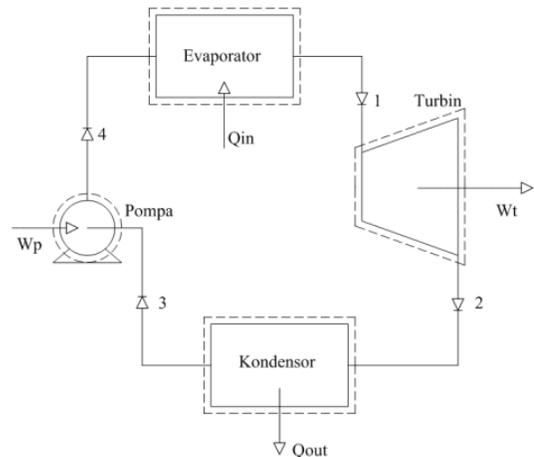
Gambar 1. Organic rankine cycle [2].



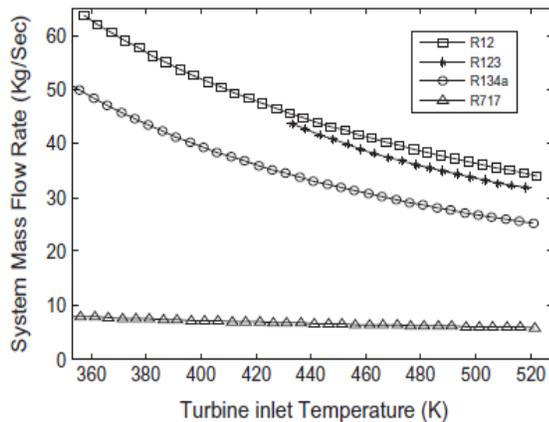
Gambar 4. Kerja turbin fungsi laju aliran massa [3].



Gambar 2. Komponen dasar ORC [3].



Gambar 5. Analisa sistem ORC.



Gambar 3. Laju aliran massa fungsi temperatur inlet turbin [3].

Penelitian ini juga ditampilkan bahwa pada sistem ORC yang menggunakan fluida kerja R-123, semakin besar laju aliran massa pada sistem maka temperatur masuk turbin akan semakin rendah saat tekanan konstan yaitu pada tekanan masuk turbin 2,5 MPa. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.

Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa pada fluida penggunaan fluida kerja R-123, kerja turbin meningkat seiring dengan meningkatnya laju aliran massa. Akan tetapi pada laju aliran massa tertentu, kerja turbin akan mencapai kerja maksimum sehingga jika laju aliran massa ditingkatkan lagi maka kerja turbin akan turun.

Pada penelitian yang telah dilakukan ini disimpulkan bahwa efisiensi maksimum dan kerja turbin maksimum diperoleh dengan menggunakan fluida kerja R-123.

C. Perhitungan Organic rankine cycle

Dalam perhitungan sistem ORC secara aktual dilakukan analisa volume atur seperti pada Gambar 5.

Untuk proses 1 – 2 terjadi pada turbin dimana kerja turbin dapat ditentukan dengan persamaan 1.

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_1 - h_2)\eta_t \tag{1}$$

Dimana \dot{W}_T merupakan kerja turbin, \dot{m} adalah laju aliran massa, h_1 dan h_2 merupakan entalpi dari fluida kerja yang masuk dan meninggalkan turbin sedangkan η_t adalah efisiensi turbin.

Untuk proses 2 – 3 terjadi pada kondensor, panas yang hilang pada kondensor dapat ditentukan dengan persamaan 2.

$$\dot{Q}_C = \dot{m}(h_2 - h_3) \tag{2}$$

Dimana \dot{Q}_C merupakan laju perpindahan panas kondensor, h_2 dan h_3 merupakan entalpi dari fluida kerja yang masuk dan keluar kondensor.

Untuk proses 3 – 4 terjadi pada pompa, dimana kerja dari pompa secara aktual dapat ditentukan dengan persamaan 3.

$$\dot{W}_p = \dot{V}(p_4 - p_3)\eta_{op} \tag{3}$$

Dimana \dot{W}_p adalah kerja pompa, \dot{V} adalah kapasitas pompa yang digunakan, h_3 dan h_4 merupakan entalpi fluida kerja masuk dan keluar pompa.

Untuk proses 4 – 1 terjadi pada evaporator dimana terjadi proses evaporasi untuk mengubah liquid menjadi uap, dimana panas rata – rata yang diberikan evaporator ke fluida kerja dapat ditentukan dengan persamaan 4.

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \tag{4}$$

Dimana h_1 dan h_4 merupakan entalpi dari fluida kerja yang keluar dan masuk evaporator.

Untuk efisiensi dari siklus dapat dinyatakan sebagai rasio antara kerja bersih dari siklus dibagi dengan panas yang diberikan evaporator. Hal tersebut dapat dirumuskan seperti pada persamaan 5.

$$\eta_{Cycle} = \frac{W_T - W_P}{\dot{Q}_E} \tag{5}$$

Efisiensi thermal untuk siklus dasar ORC dapat dituliskan seperti persamaan 6.

$$\eta_{Cycle} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \tag{6}$$

Untuk kerja *back work ratio* dihitung dengan persamaan 7.

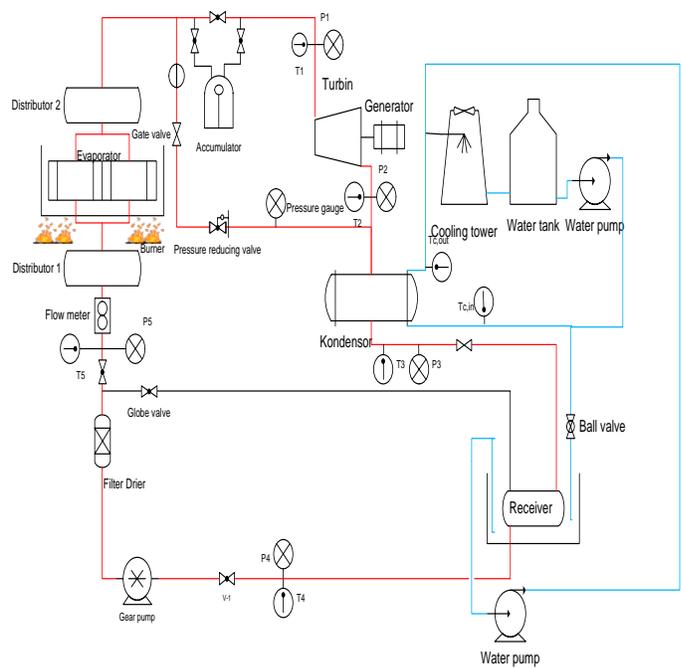
$$bwr = \frac{W_P / \dot{m}}{W_T / \dot{m}} \tag{7}$$

D. Tahapan Penelitian

Dimulai dengan studi literatur tentang *Organic rankine cycle*, melakukan pengecekan pada komponen ORC yang sudah ada sebelumnya, menambahkan komponen penunjang yaitu *cooling tower* yang bertujuan untuk mengoptimalkan pendinginan pada kondensor, setelah itu menentukan variable penelitian. Pada tahap selanjutnya adalah tahap pengujian aktual yang dilakukan pada model fisik dari Sistem *Organic rankine cycle* dengan Fluida kerja R-123, di mana pada tahap ini dilakukan pengambilan data pada setiap komponen di sistem *Organic rankine cycle*. Pada tahap terakhir dilakukan perhitungan pada setiap komponen *Organic rankine cycle* melalui data-data yang didapat yang kemudian hasil perhitungannya dijadikan kedalam bentuk grafik – grafik, setelah itu grafik yang diperoleh dianalisa berdasarkan teori dan fenomena yang terjadi.

Skema sistem *Organic rankine cycle* yang digunakan dapat di lihat pada Gambar 6.

Proses pengambilan data dimulai dengan memastikan alat ukur terpasang dan berfungsi dengan baik, seperti thermocouple, laser thermometer dan pressure gauge. Selanjutnya menyalakan burner pemanas bak air pemanaskemudian suhu ditunggu hingga mencapai sekitar $\pm 94^\circ\text{C}$. Setelah suhu tercapai pompa air pendingin kondensor dinyalakan begitu juga dengan pompa fluida kerja dinyalakan. Kemudian katup by-pass pada receiver dibuka agar terjadi sirkulasi fluida kerja dari pompa kembali ke receiver Selanjutnya katup aliran ke PRV dibuka secara penuh. Kemudian flowrate diatur sampai dengan 3 GPM dengan membuka katup aliran fluida kerja secara perlahan.



Gambar. 6. Skema sistem *organic rankine cycle*.

Suhu dan tekanan inlet turbin ditunggu sampai konstantkemudian membuka katup turbin secara perlahan sampai terbuka penuh seiring dengan menutup katup PRV agar aliran fluida kerja seluruhnya mengalir melewati turbin. Setelah putaran dan temperatur konstan generator diberi beban sebesar 1000 watt. Ketika sistem telah berkerja pada kondisi tunak, dilakukan pengambilan data yang berupa pencatatan debit pada flowmeter, $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$, putaran turbin, voltage dan arus keluaran generator, serta suhu air pemanas evaporator dan suhu air pendingin kondensor ($T_{c in}$ dan $T_{c out}$). Proses pengambilan data diulangi pada debit 2,5 GPM, 2 GPM, 1,5 GPM dan 1 GPM.

III. HASIL DAN DISKUSI

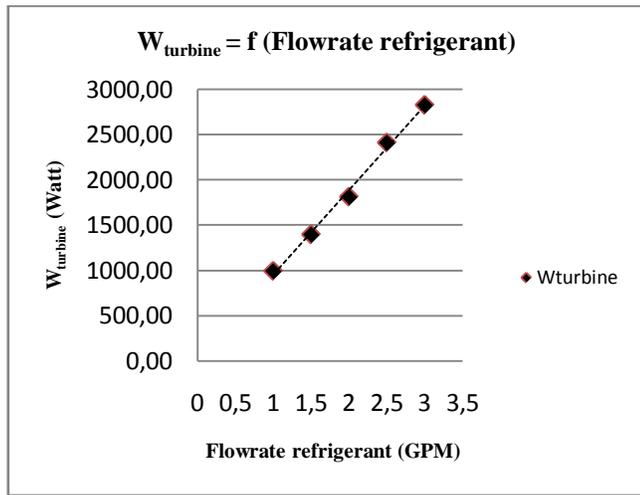
A. Kerja Turbin

Dari data hasil pengukuran yang didapatkan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai dari kerja turbin pada setiap debit aliran fluida kerja. Hasil tersebut kemudian diplotkan ke dalam grafik kerja turbin fungsi *flowrate refrigerant*.

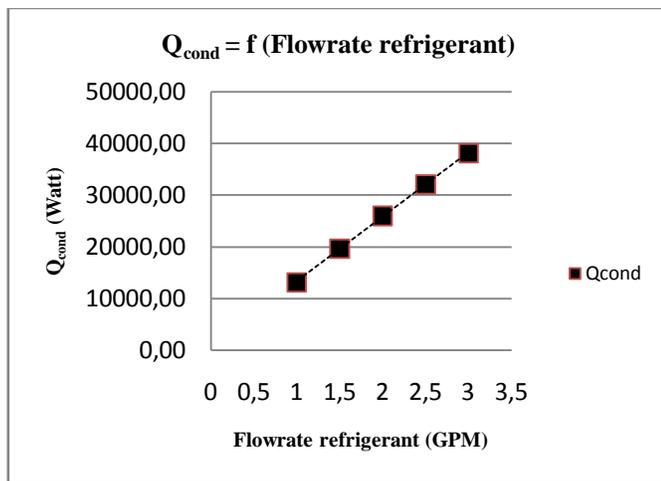
Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa daya turbin secara keseluruhan memiliki trend yang cenderung naik seiring dengan meningkatnya *flowrate refrigerant*. Hal ini terjadi karena adanya peningkatan laju aliran massa yang menyebabkan momentum pada sudu turbin semakin besar sehingga putaran turbin semaki besar.

B. Laju Perpindahan Panas Kondensor

Untuk komponen kondensor dilakukan juga plot grafik laju perpindahan panas pada kondensor fungsi dari *flowrate refrigerant*.



Gambar. 7. Grafik daya turbin fungsi *flowrate refrigerant*.

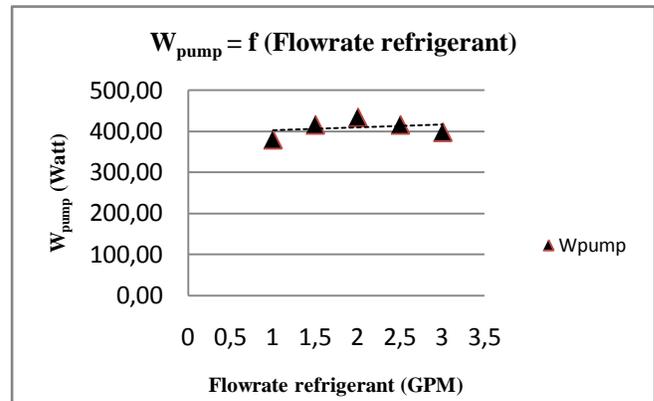


Gambar. 8. Grafik laju perpindahan panas kondensor fungsi *flowrate refrigerant*.

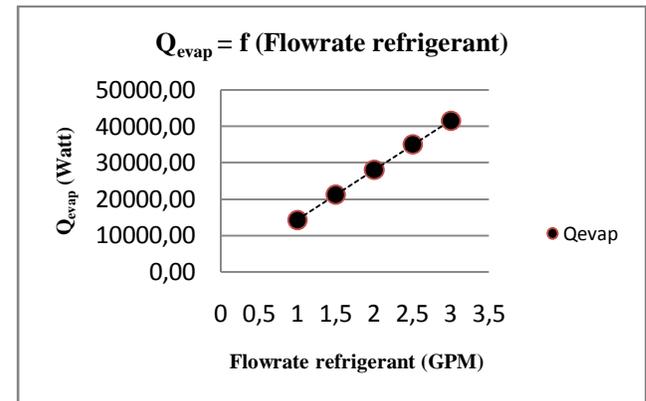
Pada Gambar 8 dapat dilihat di mana trendline yang dihasilkan mengalami kenaikan seiring meningkatnya *flowrate refrigerant*. Laju perpindahan panas pada kondensor akan semakin meningkat apabila laju aliran massa dan perbedaan enthalpi masuk dan keluar kondensor mengalami kenaikan. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan persamaan 2 di mana \dot{m} adalah laju aliran massa dan (h_2-h_3) adalah perbedaan enthalpi antara masukan dan keluaran kondensor. Tetapi pada umumnya nilai (h_2-h_3) akan semakin menurun. Hal tersebut dikarenakan pada *flowrate refrigerant* yang semakin meningkat, panas yang melalui kondensor sudah keluar terlebih dahulu sebelum diserap oleh air pendingin sehingga temperatur keluaran kondensor masih tinggi. Dari data hasil perhitungan yang didapatkan, nilai (h_2-h_3) mengalami penurunan tetapi tidak signifikan sedangkan laju aliran massa meningkat secara signifikan. Hal tersebut mengakibatkan laju perpindahan panas pada kondensor meningkat secara signifikan.

C. Kerja Pompa

Untuk hasil dari perhitungan daya pompa dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar. 9. Grafik daya pompa fungsi *flowrate refrigerant*.



Gambar. 10. Grafik laju perpindahan panas evaporator fungsi *flowrate refrigerant*.

Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa trend cenderung konstan. Hal ini terjadi karena kapasitas pompa yang digunakan sama. Kerja pompa dalam hal ini juga dipengaruhi oleh tekanan *suction* dan *discharge* dari pompa. Sedangkan perbedaan tekanan *suction* dan *discharge* pada perubahan variasi *flowrate refrigerant* relatif konstan.

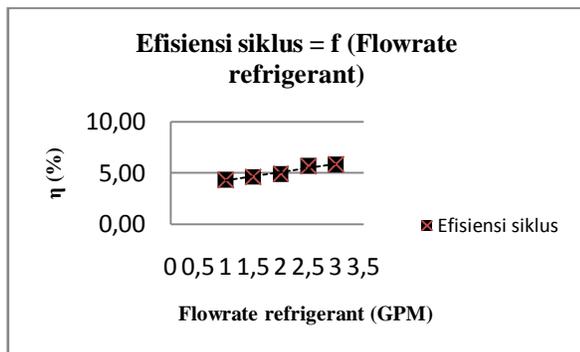
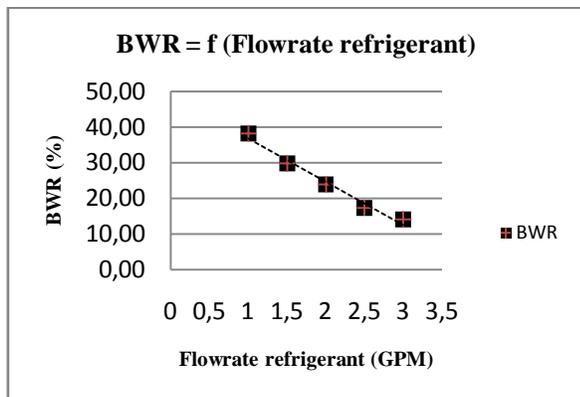
D. Laju Perpindahan Panas Evaporator

Hasil plot grafik laju perpindahan panas dapat dilihat pada Gambar 10.

Laju perpindahan panas yang terjadi pada evaporator ditunjukkan pada Gambar 10. Di mana dapat dilihat bahwa trendline yang dihasilkan mengalami kenaikan seiring meningkatnya *flowrate refrigerant*. Dengan panas yang diberikan pada evaporator adalah konstan maka nilai \dot{Q}_{in} seharusnya bernilai konstan. Seandainya ada perubahan itu pun tidak signifikan. Hal tersebut dikarenakan dengan laju aliran massa yang meningkat maka kalor yang diserap oleh evaporator akan berkurang sehingga nilai (h_1-h_5) akan menurun. Tetapi pada penelitian ini perubahan nilai (h_1-h_5) menurun dengan tidak signifikan sehingga laju perpindahan panas evaporator semakin meningkat dikarenakan laju aliran massa refrigerant meningkat.

E. Efisiensi Thermal Siklus

Hasil plot grafik efisiensi thermal siklus dapat dilihat pada Gambar 11.

Gambar. 11. Grafik efisiensi thermal siklus fungsi *flowrate refrigerant*Gambar. 12. Grafik back work ratio fungsi *flowrate refrigerant*.

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa trend grafik cenderung meningkat pada setiap variasi *flowrate refrigerant*. Efisiensi thermal siklus dipengaruhi oleh kerja turbin, kerja pompa dan laju perpindahan panas pada evaporator. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan 5 di mana \dot{W}_t adalah kerja turbin, \dot{W}_p adalah kerja pompa dan \dot{Q}_{in} adalah laju perpindahan panas pada evaporator. Dengan panas yang diberikan pada evaporator dan kerja pompa yang relatif konstan serta kerja turbin yang semakin meningkat seiring dengan meningkatnya *flowrate refrigerant* maka efisiensi akan semakin meningkat. Pada Gambar 11 terlihat bahwa efisiensi meningkat seiring meningkatnya *flowrate refrigerant*. Hal tersebut dikarenakan kerja turbin mengalami peningkatan sedangkan pompa bekerja relatif konstan.

F. Back Work Ratio

Hasil plot grafik dari back work ratio dapat dilihat pada Gambar 12. *Back work ratio* ditunjukkan pada Gambar 12, di mana trendline grafik tersebut mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya *flowrate refrigerant*. *Back work ratio* dipengaruhi oleh kerja turbin dan kerja pompa. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan 7 di mana \dot{W}_t adalah kerja turbin dan \dot{W}_p adalah kerja pompa. Dengan meningkatnya *flowrate refrigerant* maka kerja pompa yang dibutuhkan akan semakin besar. Kerja pompa yang semakin besar akan mengakibatkan *back work ratio* semakin besar. Dari Gambar 12 terlihat bahwa *back work ratio* mengalami penurunan. Hal tersebut terjadi karena peningkatan kerja turbin lebih signifikan dibandingkan dengan peningkatan kerja pompa.

G. Hasil Diskusi

Dengan adanya penambahan *cooling tower* pada penelitian ini sebagai alat penunjang sistem pendinginan kondensor, sistem *Organic rankine cycle* dapat bekerja secara kontinu. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Rony Putra Napitupulu (2012), di mana sistem akan dihentikan ketika temperatur air pendingin yang masuk kondensor tinggi. Hal tersebut dikarenakan air pendingin yang keluar dari kondensor dialirkan ke *receiver* dan kemudian langsung digunakan kembali untuk pendinginan kondensor tanpa melalui proses pendinginan. Pada penelitian ini, kerja yang dihasilkan turbin sangat kecil sehingga efisiensi turbin pun sangat kecil. Hal ini dikarenakan oleh efek penggunaan *mechanical seal* pada turbin. Pegas yang terdapat pada *mechanical seal* menghambat putaran poros turbin.

IV. KESIMPULAN

Dari data hasil penelitian yang diperoleh dapat ditarik kesimpulan *flowrate refrigerant* berpengaruh pada output kerja dari sistem *Organic rankine cycle*, di mana kerja turbin meningkat seiring dengan meningkatnya *flowrate refrigerant* dan kerja turbin tertinggi diperoleh pada saat *flowrate refrigerant* 3 GPM di mana kerja turbin sebesar 2830,52 Watt. Laju perpindahan panas pada kondensor tertinggi adalah 38123,61 Watt yang terjadi pada *flowrate refrigerant* 3 GPM. Kerja pompa mengalami kenaikan yang tidak begitu signifikan atau cenderung konstan. Kerja pompa tertinggi terjadi pada *flowrate refrigerant* 2 GPM di mana kerja pompanya sebesar 434,82 Watt. Laju perpindahan panas pada evaporator tertinggi terjadi pada *flowrate refrigerant* 3 GPM di mana panas yang diserap evaporator sebesar 41533,51 Watt. *Back work ratio* (BWR) mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya *flowrate refrigerant* dikarenakan kerja turbin meningkat sedangkan kerja pompa relatif konstan. BWR tertinggi terjadi pada *flowrate* 1 GPM yaitu sebesar 38,20%. *Flowrate refrigerant* berpengaruh terhadap efisiensi termal siklus di mana efisiensi akan meningkat seiring dengan meningkatnya *flowrate refrigerant*. Efisiensi termal siklus tertinggi terjadi pada *flowrate* 3 GPM yaitu 5,86%.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashok, Misra, 2006, *Parametric optimization and performance analysis of a regenerative Organic rankine cycle using R-123 for waste heat recovery*, Departement of Mechanical Engineering, Birla Institute Of Technology, Mesra, Ranchi, India.
- [2] Ismail, B. I., 2013, *ORC Based Geothermal Power Generation and CO2 Based EGS for Combined Green Power Generation and CO2 Sequestration*, Department of Mechanical Engineering, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Kanada.
- [3] Kasbani, 2010, *Penataan Kebijakan Pengelolaan dan Pengembangan Potensi Panas Bumi*, Badan Geologi, Jakarta, Indonesia.
- [4] Moran, M. J. dan Shapiro, H. N., 1996, *Fundamental of Engineering Thermodynamics*, Fifth Edition, John Willey and Sons inc, New York.
- [5] Napitupulu, Ronny Putra, 2012, *Studi Eksperimen Karakteristik Siklus Dari Sistem Organic rankine cycle Dengan Fluida Kerja R-123*, Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- [6] Roy, J. P., 2011, *Performance Analysis of An Organic rankine cycle with Superheating Under Different Heat Source Temperature Conditions*, Departement of Mechanical Engineering Birla Institute Of Technology, Mesra, Ranchi, India.