

ANALISA EFISIENSI PADA FLUIDA KERJA BERDASARKAN VARIASI TEMPERATUR MASUK TURBIN PADA PENGEMBANGAN *ORGANIC RANKINE CYCLE*

Oleh:

Mulya Juarsa, Muhamad Yulianto, Yogi Sirodz Gaos, dan Edi Marzuki
Dosen Fakultas Teknik Universitas Ibn Khaldun Bogor

Abstrak

Makalah ini menjelaskan perbandingan kondisi pada inlet turbin untuk R134a sebagai fluida kerja yang digunakan dalam pengembangan Organic Rankine cycle. Variasi temperature yang digunakan: 80°C, 85°C and 90°C. Analisis efisiensi pada pengembangan ORC dilakukan berdasarkan analisis termodinamika. Metodologi dalam menganalisis fluida kerja dalam tulisan ini menggunakan Software Cycle tempo dan untuk sifat-sifat fisik fluida kerjanya menggunakan Refprof. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan fluida kerja R134a memiliki efisiensi 7,94%, 8,11% dan 8,25% secara berturut-turut untuk temperature inlet turbine 80°C, 85°C and 90°C. Berdasarkan hasil tersebut ditunjukkan bahwa hasil terbaik untuk efisiensi 8,25% pada temperature inlet turbin 90°C.

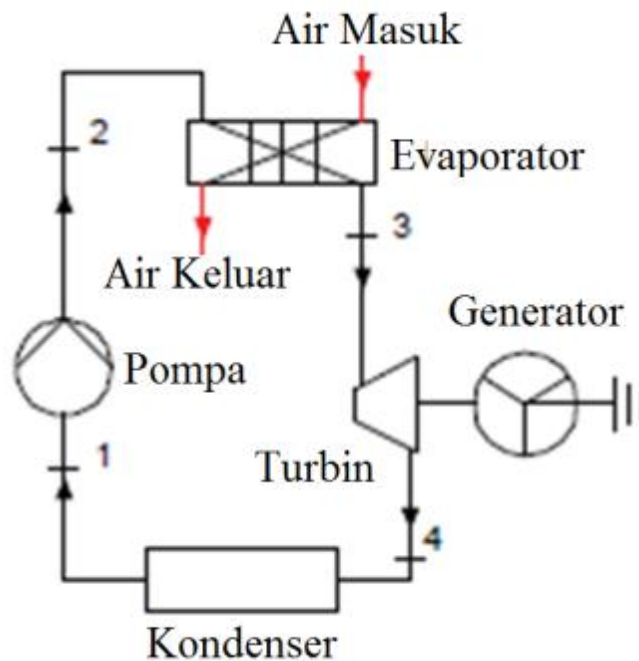
Kata Kunci: ORC, Fluida Kerja, Turbin, Temperature, Efisiensi

A. Pendahuluan

Dewasa ini banyak diteliti, dikembangkan dan diaplikasikan tentang sistem pembangkit yang lebih efisien dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga uap konvensional yang menggunakan fluida kerja air yang diuapkan untuk menggerakkan turbin. Pada pembangkit listrik tenaga uap konvensional dibutuhkan tekanan sebesar 100 bar dan temperatur 450°C [1] sehingga menyebabkan resiko keselamatan tinggi. Selain itu juga biasanya pembangkit listrik tenaga uap konvensional menggunakan bahan bakar fosil sehingga berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan diantaranya polusi udara pemanasan global, kebocoran lapisan ozon dan juga hujan asam [1]. Salah satu pengembangan teknologi untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan *Organic Rankine Cycle* (ORC).

Pada dasarnya *Organic Rankine Cycle* (ORC) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan fluida kerja dari bahan organik (misalnya refrigeran) yang dapat menguap pada temperatur rendah. Definisi-definisi lain tentang ORC juga sudah

dikemukakan, diantaranya adalah merupakan energi mekanik berskala kecil yang mempunyai potensi menguntungkan dengan memanfaatkan panas temperatur rendah untuk menggantikan siklus listrik tenaga uap konvensional [2], selain itu juga definisi ORC dikemukakan oleh peneliti lain sebagai teknologi konversi energi yang membutuhkan instalasi temperatur rendah [3, 4, 5]. Secara umum komponen-komponen utama dalam ORC seperti yang terlihat pada gambar 1 terdiri dari : Pompa, Evaporator, Turbin, Generator dan Kondenser [6]



Gambar 1. Komponen-komponen utama sistem ORC [6]

Perkembangan-perkembangan penelitian tentang ORC berkuat diseputar fluida kerja yang digunakan, sumber panas yang digunakan yang dilakukan baik simulasi maupun eksperimen. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam memilih fluida kerja ORC adalah [7]:

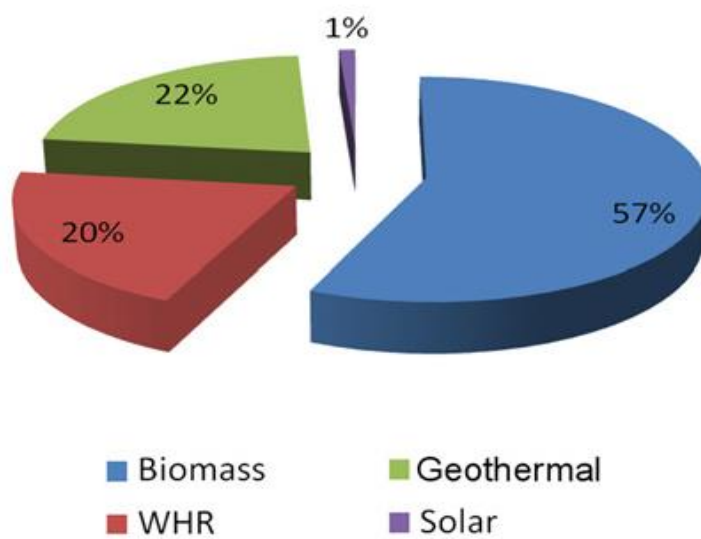
1. Unjuk kerja thermodinamika : efisiensi atau daya keluar harus setinggi mungkin untuk pemberian sumber panas maupun heat sink. Unjuk kerja ini berdasarkan pada jumlah sifat thermodinamika dari fluida kerja seperti : titik kritis, faktor acentric, panas jenis, densiti dan lainnya.
2. Mempunyai kurva saturasi isentropik uap positif. Jika kura tersebut negatif, maka memungkinkan adanya fluida dalam bentuk cari yang masuk kedalam turbin dan akan menyebabkan kerusakan pada urbin

3. Densitas uap yang tinggi : parameter ini merupakan hal yang penting terutama untuk fluida dengan tekanan kondensasi rendah.
4. Viskositas rendah. Viskositas rendah pada kedua fase baik cair maupun uap menyebabkan koefisien perpindahan panas tinggi dan meminimalisasi gesekan pada alat pindah panas
5. Konduktivitas tinggi
6. Tekanan Evaporasi yang dalam batas diterima. Tekanan evaporasi yang tinggi menyebabkan investasi dan tingkat kesulitan yang kompleks
7. Tekanan kondensasi positif
8. Kestabilan temperatur tinggi
9. Titik lebur harus lebih rendah dari temperatur lingkungan
10. Rendah dalam resiko kebocoran ozon
11. Rendah dalam resiko pemanasan global
12. Mudah didapat dan murah

Penelitian untuk menunjukan urutan efisiensi fluida kerja dari yang paling besar sampai yang paling kecil yang bisa digunakan untuk ORC adalah HFE7000, HFE7100, PF5050, R123, n-pentane, R245fa, R134a, Isobuthane [1]. Penelitian ORC dengan menggunakan fluida kerja R245fa, R123, Isobutane, R234a sedangkan pemanas yang digunakan adalah panel surya plat datar yang menghasilkan bahwa unjuk kerja R245 dan R123 lebih baik dibandingkan dengan Isobutane dan R234a [3]. Susunan fluida kerja yang lain juga sudah dikemukakan dengan urutan sebagai berikut : : n-buthane, R245fa, R123, n-pentane, HFE7000, SES 36, R134a, R1234yf [8]. Penelitian dengan membandingkan antara Kalina dengan ORC menggunakan fluida kerja Hexa methylsiloxane dan pemanas dari panas buang diesel menghasilkan performansi dengan menggunakan siklus kalina lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan siklus ORC [9]. Penelitian dengan menggunakan fluida kerja R245a dengan pemanas dari panas matahari yang menghasilkan daya maksimum 2250 W dengan temperatur 60°C [6]. Penelitian dengan pemanas menggunakan dari gas panas buang diesel dengan fluida kerja R245fa menghasilkan daya ORC sebesar 15.5 kW, 14.5 kW, dan 13.7 kW dengan efisiensi 9.1%, 9.2% dan 9.4% [10]. Penelitian dengan menggunakan fluida kerja R245fa dengan pemanas dari recovery panas buang yang menghasilkan bahwa temperatur masuk turbin mempengaruhi efisiensi dari sistem ORC

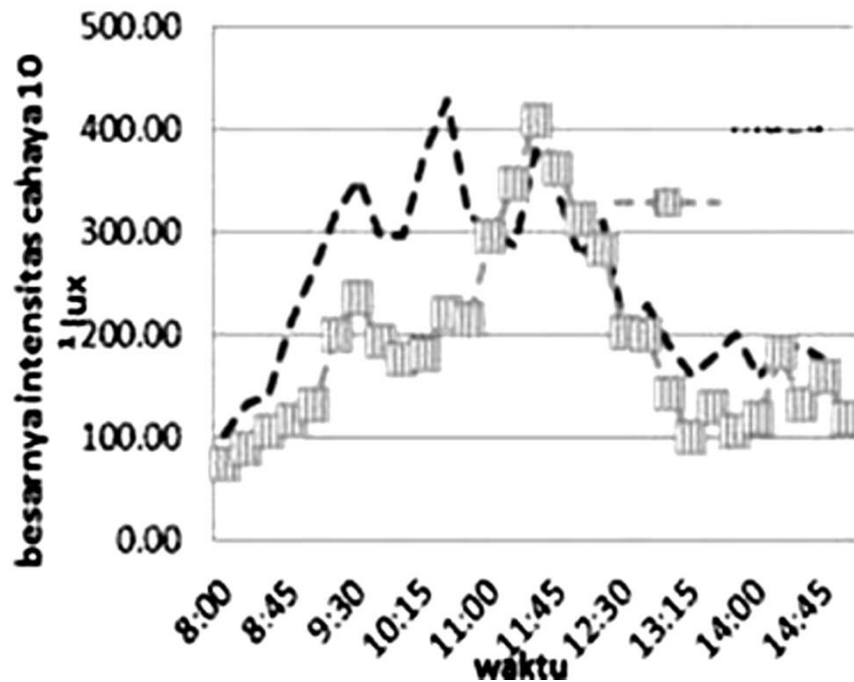
dengan fluida kerja 245fa [11] Penelitian lainnya mengungkapkan dengan fluida kerja R227 ea dengan pemanas air pada temperatur 66,8°C 111°C dan turbcharger hermetic menghasilkan efisiensi 4,88% [12].

Sementara itu, semakin meningkatnya aplikasi penggunaan ORC dengan energi yang digunakan sebagai pemanas dapat diperoleh dari beberapa sumber, diantaranya biomassa, panas bumi, Tenaga surya dan panas buang (WHR). Namun penggunaan Tenaga surya sebagai sumber panas masih sangat minim hanya 1% seperti yang terlihat pada gambar 2 [7].



Gambar 2. Aplikasi Sumber panas pada ORC [7]

Hal ini bagi Indonesia yang merupakan negara tropik khususnya kota Bogor yang kaya akan intensitas cahaya matahari seperti yang ditunjukkan pada gambar 3 [13] merupakan peluang untuk dapat digunakan sebagai sumber pemanas pada sistem ORC.



Gambar 3. Intensitas matahari daerah Bogor [13]

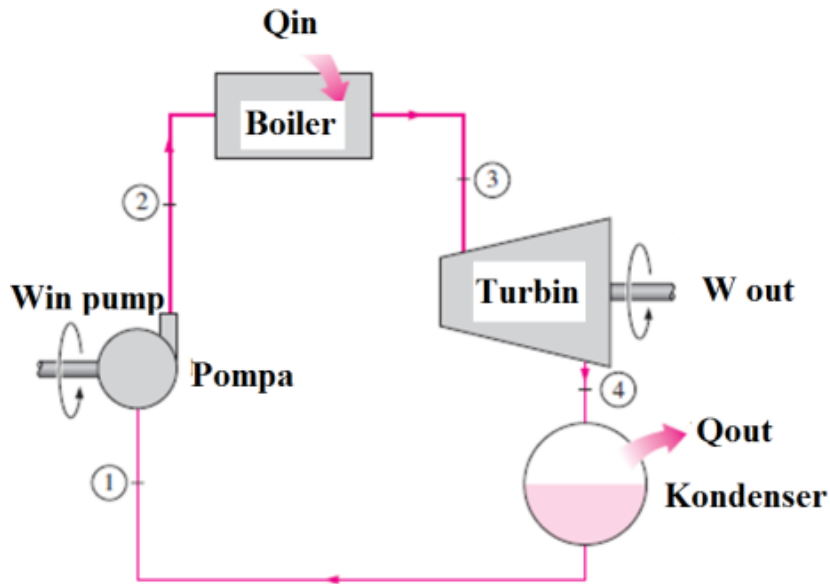
Berdasarkan pemaparan-pemaparan diatas maka terbuka peluang untuk melakukan penelitian ORC dengan fluida kerja dari R134a dengan panas dari sinar matahari. Pada penelitian ini merupakan simulasi untuk mendapatkan efisiensi maksimum dengan memvariasikan temperatur masuk turbin yang bisa dijadikan dasar dalam pembuatan alat eksperimen untuk dilakukan pengambilan data. Dengan data simulasi ini memungkinkan mempermudah dalam penginstalan dan penentuan komponen-komponen yang akan digunakan dalam pembuatan pembangkit listrik Organic Rankine Cycle (ORC)

B. Metode Penelitian

Pada artikel ini analisis efisiensi menggunakan suatu software cycle tempo dengan terlebih dahulu menentukan sifat termodinamika menggunakan Refprop. Assumsi-asumsi yang digunakan berdasarkan teori Rankine Cycle seperti gambar 4 : [14]

1. Proses 1 ke 2 : Kompresi Isentropik pada pompa
2. Proses 2 ke 3 : Tekanan Tetap adanya penambahan panas
3. Proses 3 – 4 : Ekspansi Isentropik pada turbin
4. Proses 4 – 1 : Tekanan Tetap adanya pembuangan panas
5. Sistem dalam kondisi steady state
6. Penurunan tekanan pada tiap-tiap komponen diabaikan

7. Fluida kerja pada keluaran kondenser sudah sepenuhnya dalam bentuk liquid
8. Fluida kerja pada saat masuk turbin seluruhnya dalam bentuk uap
9. Effisiensi turbin dan pompa sudah merupakan kondisi yang sudah akan terinstal



Gambar 4. Siklus Rankine [14]

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk melakukan analisis diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Persamaan kesetimbangan panas dan massa [14]

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

$$\dot{Q} - \dot{w} = \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) - \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right)$$

2. Persamaan efisiensi pompa [3]

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

3. Persamaan Efisiensi Turbin [3]

$$\eta_T = \frac{h_4 - h_3}{h_4 - h_{4s}}$$

4. Persamaan Q_{in} [3]

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

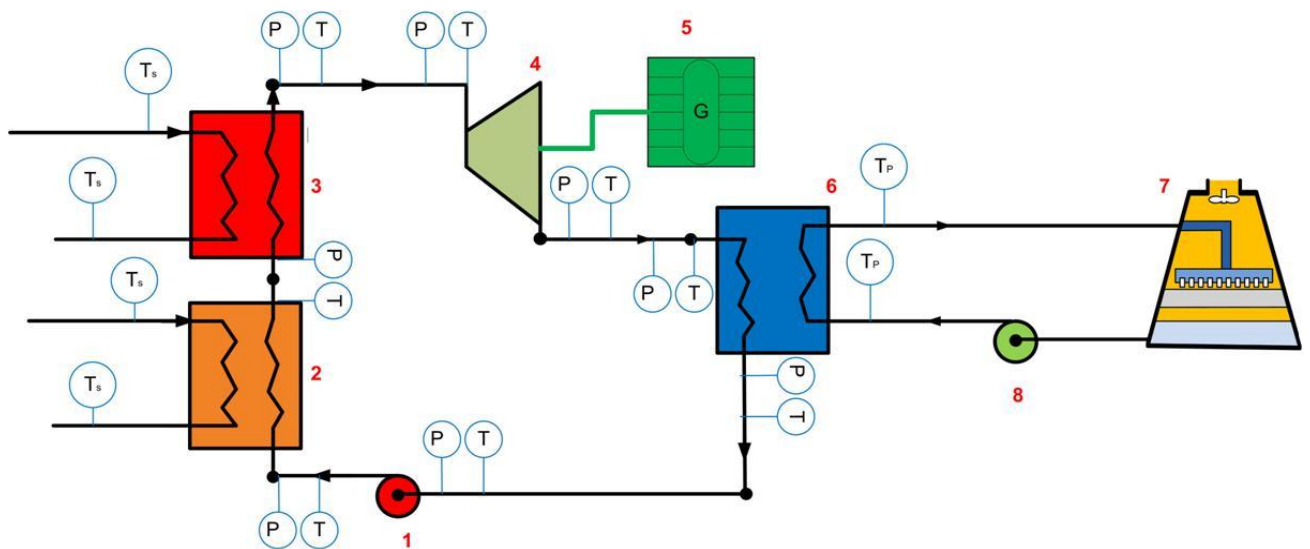
5. Persamaan Q_{out} [3]

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}(h_4 - h_3)$$

6. Persamaan BWR (Back Work Ratio) [7]

$$BWR = \frac{W_p / \dot{m}}{W_T / \dot{m}}$$

Pada tabel 1 merupakan kondisi input masuk turbin yang simulasikan. Apabila diaplikasikan ke eksperimen untuk menjaga keadaan tersebut maka secara skematik dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Schematik ORC untuk penerapan Eksperimen

Tabel 1. Tabel kondisi yang akan disimulasikan

No	Temperatur (°C)	Tekanan (bar)	Refrigeran
1	90	25	R134a
2	85	25	R134a
3	80	25	R134a

C. Hasil dan Pembahasan

1. Kualitas, densitas, panas jenis dan konduktifitas thermal

Langkah awal yang dilakukan pada penelitian ini adalah memastikan bahwa pada kondisi yang ada ditabel 1 tersebut pada kondisi uap panas lanjut (superheated) dan sifat-sifat lainnya dibandingkan dengan air yang merupakan fluida kerja pembangkit listrik tenaga uap konvensional seperti yang ditunjukkan pada tabel 2 dan 3 dengan menggunakan software cycle tempo. Dari tabel 2 dan 3 dapat dilihat walaupun R134a mempunyai nilai massa jenis (ρ), panas jenis (C_p) dan konduktifitas thermal lebih kecil dari pada air, namun kualitas pada tekanan dan temperatur tersebut R134a sudah dalam kualitas uap panas lanjut (superheated) dibandingkan dengan air yang masih dalam kondisi subcooled yang tidak memungkinkan masuk turbin.

Tabel 1. Kondisi dari R134a

Kondisi	Kualitas	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kg.K]	K [W/m.K]
1	Superheated	122,75	1,4362	0,0216
2	Superheated	129,62	1,5437	0,0218
3	Superheated	138,54	1,7309	0,0223

Tabel 2. Kondisi dari air

Kondisi	Kualitas	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kg.K]	K [W/m.K]
1	Subcooled	966,40	4,1999	0,67653
2	Subcooled	969,69	4,1955	0,67407
3	Subcooled	972,86	4,1915	0,67123

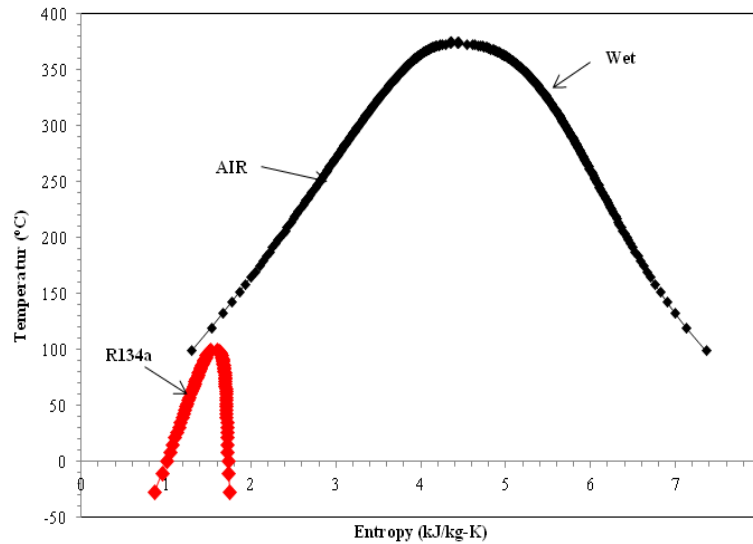
2. Penggambaran kurva T-S

Pada bagian ini akan dibahas penggambaran kurva T-S dengan nilai tifat termodinamika dari software Refprop. Tujuan dari penggambaran diagram T-S adalah untuk mengetahui kurva saturasi dan juga untuk mengetahui apakah fluida kerja yang digunakan dalam kondisi “wet, isentropic, dry” yang dalam paper ini dibandingkan antara air dengan R134a. Pada gambar 6 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan antara air dan R134a, diantaranya adalah :

- Kemiringan kurva saturasi uap untuk air mempunyai nilai dT/ds negatif sehingga masuk dalam kategori fluida kerja “wet” sedangkan untuk R134a mempunyai nilai

dT/ds mendekati 0 sehingga masuk dalam kategori fluida kerja “isentropic”. Fluida kerja dalam kategori “wet” sebelum masuk turbin harus benar-benar dalam keadaan superheated, sedangkan fluida kerja dalam kategori “isentropic” tidak harus dalam keadaan superheated.

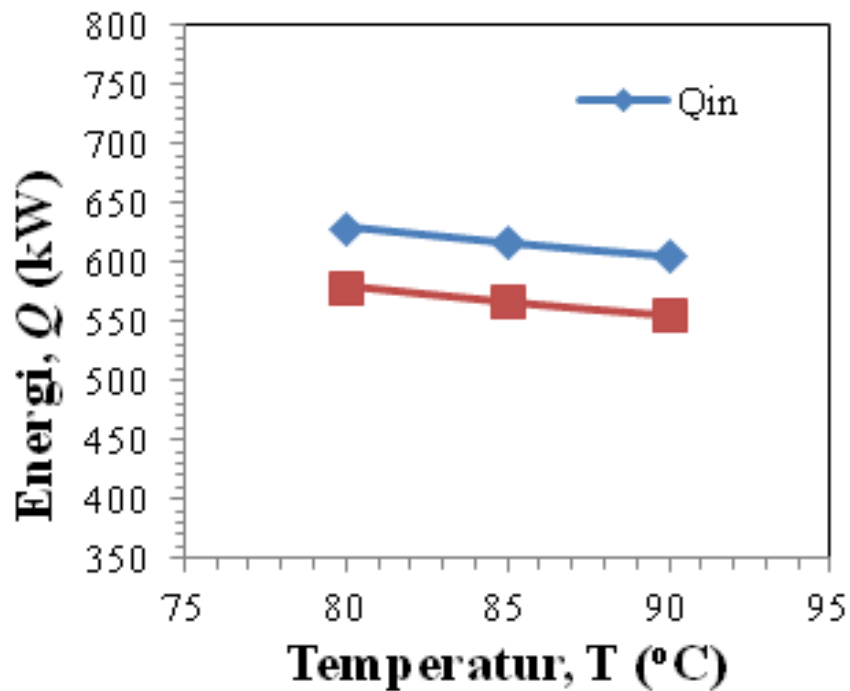
- b. Perbedaan entropi antara saturasi cair dan saturasi uap lebih kecil terjadi pada R134a dibandingkan dengan air sehingga menyebabkan kalor laten penguapan juga kecil



Gambar 6. Kurva T-S Diagram air dan R134a

- 3. Perbandingan energi masuk evaporator dan keluar turbin dan kondenser

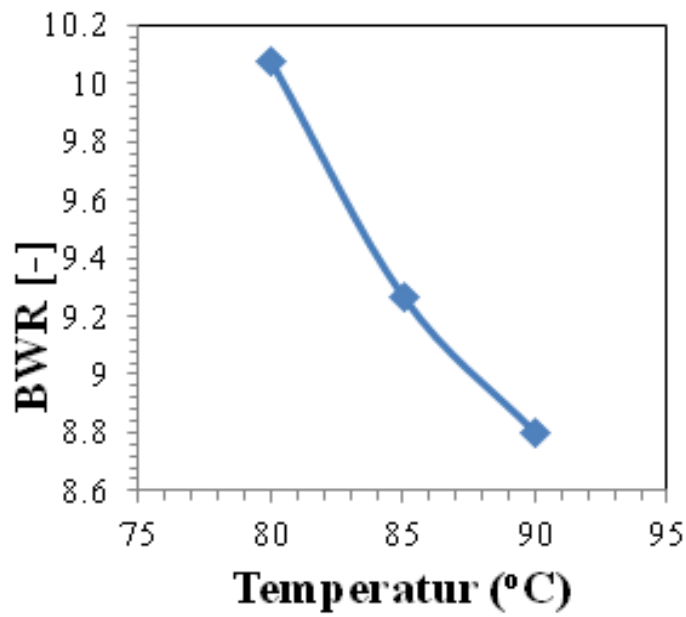
Pada gambar 7 dapat dilihat perbandingan energi panas yang masuk evaporator dan keluar turbin dan kondenser. Kenaikan temperatur dapat menyebabkan penurunan energi panas yang dibutuhkan oleh evaporator untuk menguapkan R134a dan berbanding lurus dengan penurunan energi panas yang keluar turbin dan kondenser yang berarti berpotensi untuk menaikkan efisiensi dari ORC.



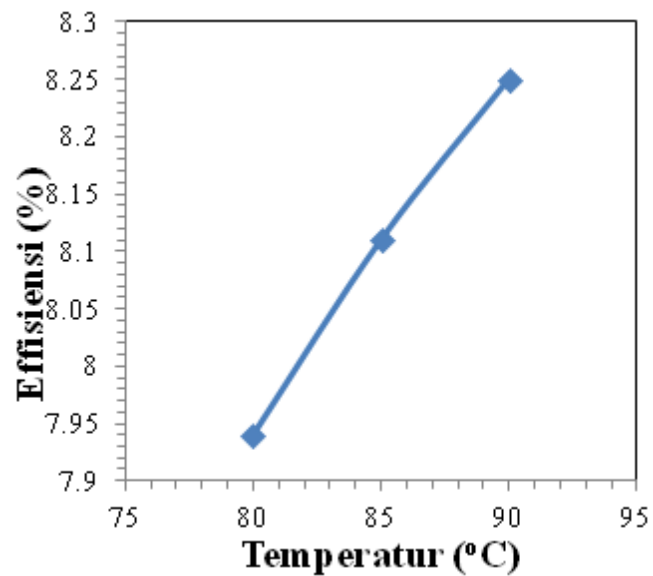
Gambar 7. Perbandingan Q_{in} dan Q_{out}

4. Back Work Ratio dan Efisiensi ORC

Pada gambar 8 merupakan grafik BWR (Back Work Ratio). BWR merupakan salah satu pertimbangan dalam menentukan keberhasilan sistem ORC. BWR merupakan perbandingan antara konsumsi energi listrik pada pompa dan daya yang dihasilkan oleh turbin. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur masuk turbin menyebabkan penurunan nilai BWR dan berbanding terbalik dengan effisiensinya yang semakin naik seperti yang terlihat pada gambar 9. Hal ini sebagai pertimbangan bahwa effisiensi pompa merupakan komponen krusial, semakin rendah daya pompa yang dibutuhkan dengan daya turbin tetap maka akan menurunkan nilai BWR yang berakibat naiknya effisiensi sistem ORC



Gambar 8. Nilai BWR akibat variasi temperatur



Gambar 9. Efisiensi sistem ORC

D. Kesimpulan

Pada analisa dengan simulasi ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Dalam menentukan fluida kerja perlu diperhatikan unsur “wet, isentropic dan dry”
2. Nilai dT/ds untuk fluida kerja harus mendekati 0 atau positif

3. Kenaikan temperatur masuk turbin berakibat pada penurunan energi yang dibutuhkan untuk mengevaporasi fluida kerja dan energi yang keluar dari turbin dan kondenser
4. Kenaikan temperatur dapat menurun nilai BWP yang berakibat pada kenaikan nilai efisiensi, dimana pada percobaan ini dengan menggunakan fluida kerja R134a diperoleh nilai BWP terendah adalah 8,8 dan efisiensi 8,25% pada temperatur masuk turbin 90°C

E. Daftar Pustaka

- Qiu. Guoquan. *Journal of Renewable Energy* 48 (2012) 565 – 570
- Torres. Agustin M. Delgado, Lourdes Garcia-Rodriguez. *Journal of Energy Conversion and Management* 51 (2010) 2846 – 2856
- Wang. Man, Jiangfeng. Wang, Yuzhu. Zhao, Pan. Zhao, Yiping. Dai. *Journal of Applied Thermal Engineering* 50 (2010) 816 – 825
- H. Chen, D. Y. Goswami, E. Stefanos. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 14 (2010) 3059 – 3067
- B. F. Tchanche, Gr. Lambrinos, A. Frangoudakis, G. Papadakis. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 15 (2011) 3963 – 3979
- Ksayer. E. Bou. Lawz. *Journal of Energy Procedia* 6 (2011) 389 – 395.
- Quoilin. Sylvain, Martijn. Van. Den. Broek, Sebantian. Declay. Pierre. Dewallef, Vincent. Lemort. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013) 168 – 186
- Quoilin, S. Declay. S, Tchanche.B.F, Lemort. V. *Journal of Therm Eng* 31 (2011) 2885 – 2895
- Bombarda. Paola, Costante. M. Invernizzi, Claudio. Pietra. *Journal of Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 212-219.
- Yu. Guepeng, Gequn. Shu, Hua. Tian, Haiqiao. Wei, Lina. Liu. *Journal of Energy* 51 (2013) 281 – 290
- Bracco. Roberto, Stefano. Clemente, Diego. Micheli, Mauro. Reini. *Journal of Energy* xxx (2013) 1 – 10
- Gozdur. Aleksandra Borsukiewicz. *Journal of Applied thermal Engineering* 56 (2013) 126 – 133
- Wijayanto, Nurheni. Nurunnajah. *Jurnal Silviculture Tropika* 03 (2012) 8 – 13.
- Cengel. Yunus.A, Boles., Michael, 2006, "Thermodynamics An Engineering Approach", 5th Ed, Mcgraw-Hill, International Edition.