

KAJI EKSPERIMEN SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE* MENGGUNAKAN FLUIDA KERJA R-134a BERKAPASITAS 1 KW

Adam Maulana Ibra¹, Awaludin Martin²

Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau

Kampus Bina Widya Km.12,5 Simpang Baru Pekanbaru 28293

¹adamaulanaibra11@gmail.com, ²awaludinmartin01@gmail.com

ABSTRACT

Energy demand is increasing due to population growth and technological advances. Fossil energy of coal as fuel for Steam Power Plant (PLTU) is still widely used in various countries around the world because it provides human needs in large numbers. Coal burned in steam power plant produces a number of harmful pollutants such as NO_x and SO₃ which are the main causes of acid rain and particle pollution in the air. Organic Rankine Cycle (ORC) is technology to convert low temperature heat into the form of mechanical energy which can then be utilized to generate electrical energy without using fossil fuels. Heat exchangers used in ORC are evaporators and condensers. Refrigerant R134a used as working fluids. Experiments were performed to determine the performance of the ORC system with the temperature heat source of 95 °C. Data collected in the form of temperature, pressure and volume flow rate. Experimental results obtained a maximum power of 279.58 Watt and maximum efficiency of 3.33 % at turbine inlet pressure 1.25 MPa and turbine inlet temperature of 67.76 °C.

Keywords: Organic Rankine Cycle, R134, Performance Analysis.

1. Pendahuluan

Penggunaan energi saat ini terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk serta kemajuan teknologi, berdampak pada kebutuhan energi yang juga semakin meningkat. Secara umum sumber energi terbagi atas dua, yaitu sumber energi yang habis pakai dan sumber energi yang dapat diperbaharui. Sejauh ini, pemenuhan kebutuhan energi manusia masih didominasi oleh penggunaan sumber energi habis pakai yang energi yang berasal dari fosil yang persediaannya semakin menipis. Penipisan sumber energi fosil serta dampaknya terhadap lingkungan, menjadi tantangan bagi para peneliti di seluruh dunia untuk dapat menghilangkan ketergantungan terhadap sumber energi fosil dengan mengembangkan sumber energi terbarukan dan mengoptimalkan sumber energi ramah lingkungan yang tersedia saat ini [1].

Penggunaan energi fosil batu bara sebagai bahan bakar untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih banyak dipakai di berbagai negara di dunia karena kemudahan dalam mendapatkannya serta dapat memenuhi kebutuhan manusia dalam jumlah besar. Saat ini batu bara masih menjadi kebutuhan dasar yang banyak digunakan pada industri PLTU. Sekitar 40% dari listrik yang dihasilkan di dunia saat ini berasal dari pembangkit listrik dengan bahan bakar batu bara. Batu bara dimanfaatkan untuk menghasilkan panas melalui proses pembakaran pada *boiler*. Panas yang dihasilkan dari proses tersebut akan digunakan pada sistem *boiler* yang telah dialiri dengan fluida air sehingga terjadi proses perpindahan panas dapat berubah fase menjadi uap yang memiliki tekanan

dan temperatur yang tinggi. Pembangkit listrik dengan kapasitas produksi yang semakin besar membutuhkan pasokan batu bara yang juga besar, sedangkan persediaan batu bara saat ini di seluruh dunia semakin menipis akibat penggunaannya lebih banyak daripada penemuan sumber baru.

Berdasarkan data dari Badan Energi Internasional (IEA) pada tahun 2014 mengungkapkan penggunaan bahan bakar fosil batu bara menyumbang 44% dari total emisi CO₂ di seluruh dunia. Pembakaran batu bara adalah sumber terbesar emisi gas GHG (*green house gas*) yang dapat memicu perubahan iklim. Batu bara yang dibakar di PLTU menghasilkan sejumlah polutan berbahaya seperti NO_x dan SO₃ yang menjadi penyebab utama pembentukan hujan asam dan polusi partikel halus di udara. Selain itu, PLTU batu bara juga menghasilkan bahan kimia yang berbahaya bagi kesehatan seperti merkuri dan *arsen*.

Untuk mengurangi dampak buruk dari pemakaian bahan bakar batu bara, saat ini di seluruh dunia tengah dikembangkan *konsep Clean Power Plant* (CPP). Konsep ini pertama kali dicetuskan oleh Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (EPA) pada 2014 dan kemudian didukung oleh seluruh negara di dunia dengan disepakatinya *Paris Agreement* pada tahun 2015. Konsep CCP bertujuan untuk mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan oleh pembangkit listrik sebesar 32% pada tahun 2030 dengan difokuskan pada pengurangan emisi dari PLTU batu bara serta mendorong peningkatan penggunaan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan.

Penelitian terdahulu tentang penggunaan sumber daya alternatif untuk pembangkit listrik telah banyak dilakukan. Saat ini terus mengembangkan konsep CCP dengan memanfaatkan energi terbarukan (misalnya energi surya, angin, air dan panas bumi) atau pemanfaatan panas sisa dari industri yang menggunakan mesin-mesin kalor. Salah satu topik penelitian yang masih terus dikembangkan adalah pembangkit listrik dengan sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC). Teknologi ini merupakan pengembangan dari siklus uap Rankine yang tidak membutuhkan panas tinggi dari hasil pembakaran dari bahan bakar fosil.

Sistem pembangkit listrik ORC secara keseluruhan memiliki kesamaan dengan sistem pembangkit listrik dengan siklus uap Rankine konvensional. Perbedaan mendasar dari kedua siklus ini adalah penggunaan fluida kerja. Selain itu juga ukuran komponen yang digunakan dapat lebih kecil. Pada sistem ORC menggunakan fluida kerja organik yang berasal dari sintesis hasil penyulingan minyak bumi sehingga memiliki titik didih yang jauh lebih rendah dari air. Pemilihan fluida kerja adalah pertama yang dilakukan karena masing-masing fluida memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Penerapan fluida kerja organik yang tepat dapat memaksimalkan penyerapan energi dari sumber panas bertemperatur rendah untuk menghasilkan efisiensi sistem ORC yang lebih baik daripada sistem tenaga uap konvensional [2].

Sumber panas bertemperatur rendah yang dimanfaatkan untuk pembuatan sistem ORC dapat berasal dari panas buang mesin-mesin industri, panas bumi, sinar matahari, biomassa dan lain-lain. Masing-masing sumber panas tersebut memiliki perbedaan pada temperatur yang dihasilkan. Sehingga dengan demikian penggunaan batu bara dihentikan karena memiliki dampak yang buruk bagi lingkungan dan kesehatan manusia dan dapat digantikan dengan sumber panas bertemperatur lebih rendah (<150 °C) [3].

Pemanfaatan teknologi ORC ini juga dapat mengurangi polusi lingkungan dan bahaya kesehatan yang disebabkan oleh emisi dari PLTU konvensional karena tidak menggunakan boiler sehingga tidak akan terbentuk emisi gas buang dari hasil pembakaran batu bara dan digantikan dengan penggunaan evaporator [4].

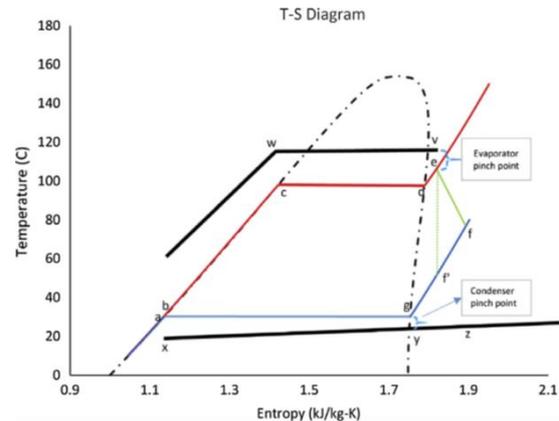
Pemilihan fluida kerja yang akan digunakan pada sistem ORC merupakan hal yang penting untuk diperhatikan karena berpengaruh pada performa sistem yang dirancang. Pemilihan fluida kerja pada sistem ORC lebih rumit karena beberapa alasan mendasar sebagai berikut [5]:

1. Kondisi kerja dan sumber panas yang dapat digunakan pada sistem ORC memiliki variasi yang luas. Temperatur sumber panas yang dapat digunakan mulai dari yang paling rendah 80 °C seperti panas bumi dan penyerapan panas matahari hingga sumber panas dengan

temperatur mencapai 500 °C seperti contohnya panas yang dapat dihasilkan oleh biomassa.

2. Jumlah fluida organik yang berpotensi untuk dapat digunakan pada sistem ORC mencapai ratusan. Jenis fluida organik tersebut antara lain dapat berupa *hydrocarbons*, CFCs, HCFCs, PFCs, eter dan lainnya.

Diagram T-s dari sistem ORC dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram T-s Sistem *Organic Rankine Cycle* [1]

Keterangan:

- Proses a-b : kompresi fluida cair pada pompa
- Proses c-e : penambahan panas secara *isobar* pada evaporator
- Proses e-f : ekspansi uap pada turbin
- Proses f-a : pembuangan panas secara *isobar* pada kondensor
- Proses w-v : perpindahan panas untuk proses evaporasi
- Proses x-z : perpindahan panas untuk proses kondensasi

Berbagai penelitian mengenai penerapan dari sistem ORC telah banyak dikaji sebelumnya dengan variasi sumber energi panas bertemperatur rendah yang dipakai salah satunya adalah energi panas bumi. Di Indonesia sendiri potensi energi panas bumi merupakan yang terbesar di seluruh dunia, yaitu sebesar 40% dari keseluruhan yang ada di dunia. Namun pemanfaatannya untuk pembangkit listrik hingga saat ini hanya 4,1% dari total potensi yang ada.

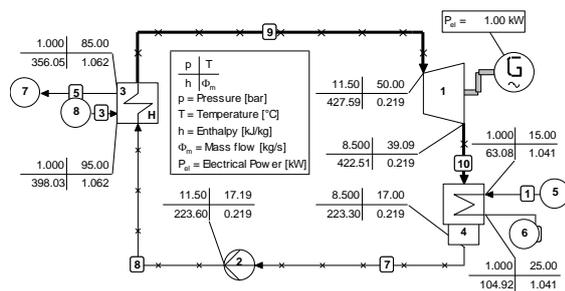
Pikra dkk (2014) melakukan penelitian mengenai kemungkinan pemanfaatan energi panas bumi untuk sistem ORC dengan membandingkan potensi daya listrik yang dapat dihasilkan dari beberapa sumber mata air panas dengan temperatur 70-80 °C di seluruh Indonesia menggunakan refrigeran R227ea sebagai fluida kerja. Dari penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa nilai laju aliran massa dari mata air panas berpengaruh signifikan terhadap energi listrik yang

dihasilkan. Mata air panas Lompio-1 di Sulawesi Tengah yang memiliki temperatur 78 °C dengan laju aliran massa terbesar yaitu 3000 l/menit mampu menghasilkan potensi daya turbin sebesar 130,13 kW. Usman dkk (2015) melakukan perancangan dan kaji eksperimen untuk aplikasi sistem ORC berkapasitas 1 kW dengan pemanfaatan panas uap sisa bertemperatur 120 °C menggunakan R245fa sebagai fluida kerja. Dari penelitian ini, sistem ORC mampu menghasilkan energi listrik sebesar 1,02 kW dan efisiensi termal 5,64%. Khartik dkk (2015) melakukan penelitian tentang *thermo-fluidic* dan kerugian mekanikal pada turbin tipe *scroll expander* untuk sistem ORC dengan menggunakan fluida kerja R134a. Variasi temperatur fluida kerja pada sisi masuk turbin adalah 100 C° - 150 °C. Pada penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa pemilihan geometri yang tepat dapat meminimalisir kerugian *thermo-fluidic* dan kerugian mekanikal pada turbin.

Dari berbagai hasil penelitian tersebut terlihat bahwa sistem pembangkit listrik ORC menunjukkan performa yang menjanjikan untuk pembangkit listrik skala kecil dengan pemanfaatan sumber panas bertemperatur rendah. Oleh karena itu, penulis memilih penelitian tentang unjuk kerja dari sistem pembangkit listrik ORC menggunakan fluida kerja R134a berkapasitas 1 kW.

2. Metode

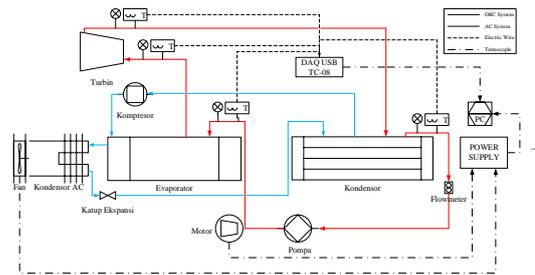
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*) yaitu proses perencanaan untuk mencari data sebab akibat dalam suatu proses melalui eksperimen. Sistem ORC yang akan diuji memiliki daya generator 1 kW dengan menggunakan fluida kerja R-134a. Perancangan alat ORC dilakukan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak pembantu Cycle Tempo 5.0 seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Desain Simulasi Sistem ORC Menggunakan Cycle Tempo 5.0

Pada pengujian unjuk kerja sistem pembangkit listrik ORC, sumber panas yang digunakan berasal dari air yang dipanaskan dengan *heater* sampai temperatur 95 °C pada evaporator. Sedangkan pada kondensator menggunakan sistem *air conditioning* - (AC) untuk menjaga temperatur air pendingin tetap

pada temperatur 10 °C. Skematik sistem ORC dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3 Skematik Pembangkit Listrik Sistem ORC

Untuk menjaga temperatur air tetap konstan pada evaporator dan kondensator, digunakan *temperature controller* merek Autonic. Pengukuran temperatur menggunakan termokopel tipe K yang terhubung ke *data logger* USB TC-08. Pengukuran tekanan menggunakan *pressure gauge* khusus untuk R134a yang dibaca secara manual, sedangkan untuk mengetahui laju aliran volume menggunakan *flowmeter*. Pengambilan data temperatur (T), tekanan (P) dan debit fluida (Q) dilakukan pada empat titik pengujian, yaitu:

1. Titik uji 1, terletak diantara sisi keluar kondensator dan sisi masuk pompa.
2. Titik uji 2, terletak diantara sisi keluar pompa dan sisi masuk evaporator.
3. Titik uji 3, terletak diantara sisi keluar evaporator dan sisi masuk turbin.
4. Titik uji 4, terletak diantara sisi keluar turbin dan sisi masuk kondensator.

Sedangkan pengukuran debit fluida dilakukan dengan memasang *flowmeter* diantara sisi keluar pompa dan sisi masuk evaporator.

Turbin yang digunakan adalah kompresor AC mobil tipe *scroll* untuk fluida kerja R134a. Pompa yang digunakan adalah jenis pompa gir eksternal. Alat penukar panas (evaporator dan kondensator) serta sistem perpipaan terbuat dari tube dengan material tembaga karena memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga dapat dengan mudah menyerap dan melepas panas. Alat ORC yang telah selesai dirancang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4 Pembangkit Listrik Sistem ORC

Adapun prosedur pengujian sistem pembangkit listrik ORC dilakukan dengan mengikuti prosedur sebagai berikut:

1. Persiapan alat uji.
2. Panaskan air dengan heater hingga temperatur 95 °C dan hidupkan *temperature controller* untuk evaporator.
3. Hidupkan sistem AC dan *temperature controller* untuk kondensor.
4. Masukkan refrigeran ke dalam sistem hingga tekanan 5 bar.
5. *Install* USB TC-08 ke laptop hingga indikator lampu menyala dan atur waktu perekaman data selama 20 menit.
6. Jalankan pengujian selama 20 menit dengan menghidupkan pompa.
7. Catat tekanan dan debit setiap 30 detik.
8. Setelah pengujian selesai, matikan pompa, sistem AC dan *temperatur controller*.

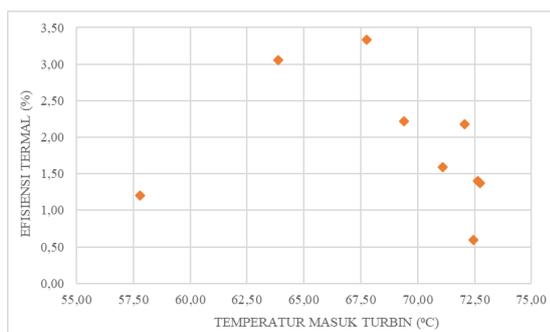
3. Hasil

Pengujian dilakukan pada alat ORC yang telah dirancang dengan kapasitas generator 1 kW bertempat di Laboratorium Konversi Energi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Riau dengan mengondisikan temperatur sumber panas 85 °C dan temperatur pendingin dijaga konstan 10 °C. Data yang didapat setelah melakukan pengujian adalah berupa temperatur, tekanan, dan debit aliran fluida. Hasil pengujian selanjutnya dapat ditampilkan dalam bentuk grafik.

Selanjutnya dilakukan pengecekan kualitas fluida menggunakan REFPROP 9.0. Data yang dapat diterima untuk selanjutnya bisa diolah harus memenuhi kondisi teoretis pada saat pencatatan data setiap 30 detik, yaitu:

1. Kualitas fluida pada titik uji 1 adalah *subcooled*.
2. Kualitas fluida pada titik uji 2 adalah *subcooled*.
3. Kualitas fluida pada titik uji 3 adalah *superheated*.
4. Kualitas fluida pada titik uji 4 adalah *superheated*.

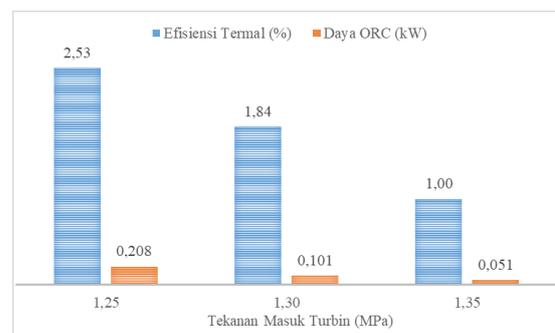
Data pengujian selanjutnya dilakukan perhitungan kemudian hasilnya ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 5 Hubungan Temperatur Masuk Turbin dan Efisiensi

Menurut Cengel (2006), salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi siklus Rankine adalah dengan meningkatkan temperatur uap fluida kerja. Berdasarkan data hasil pengujian, efisiensi termal tertinggi adalah sebesar 3,33 %. Nilai efisiensi tertinggi tidak terjadi pada temperatur masuk turbin maksimum. Apabila diperhatikan grafik pada Gambar 6, terlihat pada awal pengujian efisiensi mengalami peningkatan, tertinggi pada temperatur masuk turbin 67,77 °C. Akan tetapi setelah itu, efisiensi turbin mengalami penurunan secara signifikan. Hal ini disebabkan peningkatan temperatur pada sisi masuk turbin memang merupakan hal yang baik untuk menghasilkan uap kering bertemperatur dan bertekanan tinggi, akan tetapi hal tersebut juga harus diimbangi dengan turbin yang dapat menurunkan tekanan setelah melakukan kerja sehingga tekanan masuk kondensor menjadi berkurang dan kerja kondensor untuk membuang panas menjadi lebih optimal. Apabila kerja kondensor tidak maksimal, hal ini berarti uap yang mengalir keluar memiliki temperatur yang meningkat, sehingga apabila sistem tetap berjalan, maka semakin lama temperatur fluida akan meningkat dengan sendirinya. Hal ini menjadi kerugian terutama pada masuk pompa yang membutuhkan daya semakin besar untuk memompa fluida uap bertemperatur tinggi. Karena pada dasarnya pompa hanya digunakan untuk menaikkan tekanan fluida yang *compressible* seperti fluida cair.

Efisiensi dan daya yang dihasilkan pada pengujian aktual dikelompokkan berdasarkan tekanan masuk turbin yang sama, seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 6 Hubungan Tekanan Masuk Turbin dengan Efisiensi dan Daya ORC

Dari hasil pengujian secara aktual, daya bersih maksimum yang mampu dihasilkan adalah sebesar 0,208 kW atau 208 Watt dan efisiensi tertinggi adalah sebesar 2,53 % pada tekanan masuk turbin 1,25 MPa. Daya bersih yang dihasilkan oleh pembangkit listrik ORC merupakan selisih antara daya yang dihasilkan oleh turbin dikurangi dengan daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan pompa. Sehingga meskipun tekanan masuk dan temperatur turbin pada pembangkit listrik ORC lebih besar daripada tekanan masuk turbin pada rancangan, hal

tersebut tidak langsung membuat daya yang dihasilkan ORC menjadi lebih besar.

Turbin yang digunakan pada pembangkit listrik ORC ini merupakan turbin modifikasi sehingga efisiensinya tidak diketahui. Agar dapat dilakukan pengolahan data maka diasumsikan bahwa turbin pada pembangkit listrik ORC memiliki nilai efisiensi yang sama dengan turbin pada perancangan yaitu sebesar 80%. Selain itu pada pompa juga harus menyesuaikan, yaitu diasumsikan memiliki efisiensi yang sama dengan perancangan. Dari hasil pengujian diketahui bahwa temperatur air pemanas dan air pendingin cenderung berubah ke temperatur kesetimbangan. Akibatnya, kualitas fluida yang mengalir semakin lama akan berubah fase menjadi uap keseluruhan sehingga tidak semua data pengujian dapat diolah. Berdasarkan hasil pengujian pada temperatur sumber air panas 95 °C, setelah dirata-ratakan diperoleh daya bersih yang dapat dihasilkan pembangkit listrik sistem ORC yaitu 125,44 Watt.

4. Kesimpulan

Penelitian tentang pembangkit listrik sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) menggunakan R134a sebagai fluida kerja. telah dilakukan dengan mengondisikan temperatur sumber panas sebesar 95 °C dan temperatur air pendingin 10 °C. dari hasil pengujian, sistem ORC mampu menghasilkan unjuk kerja yang diinginkan dengan karakteristik fluida fluida kerja sesuai kondisi ideal. Penelitian yang dilakukan menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 2,53 % dan daya turbin tertinggi sebesar 208 Watt pada tekanan masuk turbin 1,25 MPa.

5. Daftar Pustaka

- [1] Usman, Muhammad dkk. 2015. *Design and Experimental Investigation of a 1 kW Organic Rankine Cycle System using R245fa as Working Fluid for low-grade Waste Heat Recovery*. Energy Conversion and Management. 103(2015) 1089-1100.
- [2] Wu, Xiao. Shen, Jiong. Li, Yiguo. Lee, Y Kwang. 2015. *Steam Power Plant Configuration Design, and Control*. Wires Energi Environ.
- [3] Pasek. A D and M Arifin. 2015. *Design of radial turbo-expanders for small organic Rankine cycle system*. Proc. IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 88 (2015) 012031
- [4] Roy, J P. Mishra, M K. Misra, Ashok. 2011. *Performance Analysis of an ORC with Superheating Under Different Heat Source Temperature Conditions*. Applied Energy 88 (2011) 2995-3004.
- [5] Pikra, Ghalya. Rohmah, Nur. Praman, Rakhmad Indra. Purwanto, Andru Joko. 2016. *Energi and Exergy Assesment of Organic Rankine Cycle Electricity Generation With*

Hot Spring as The Heat Source In Aceh, Indonesia. International Conference on Sustainable Energi Engineering And Application (ICSEEA).

- [6] Karthik G.M. Garg, Pardeep. Srinivasan, Vinod. Kumar, Pramod. 2015. *Thermo-Fluidic And Mechanical Losses In A Scroll Expander For An R134a Organic Rankine Cycle*. 3rd International Seminar on ORC Power Systems, October 12-14, 2015, Brussels, Belgium.
- [7] Bao J, Zhao L. 2013. *A Review of Working Fluid and Expander Selections for Organic Rankine Cycle*. Renewable and Sustainable Energi Reviews 24 (2013); 325-342
- [8] Cengel, Yunus A dan Boles, Michael A. 2006. *An Approach of Engineering Thermodynamic*. New-York: McGraw-Hill