

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN EVAPORATOR PADA SISTEM ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) MENGGUNAKAN FLUIDA KERJA R-134a UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK KAPASITAS 1 KW

Dwi Yani Okvitasari¹, Awaludin Martin²

Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau,
Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru, 28293, Indonesia

¹dwi.yani@student.unri.ac.id, ²awaludinmartin01@gmail.com

ABSTRACT

Waste heat from industries such as steam power plants can be utilized to meet the world's electricity need. However, it cannot be converted efficiently to electric power by using conventional power generation methods, a technology for converting it is called Organic Rankine Cycle (ORC). ORC is one of the power plant systems that is a modification of Rankine Cycle using organic working fluid. R-134a was used as working fluid. The selection of working fluid was assisted by using Cycle Tempo and REFPROP software which has function to simulation of power plant and determine the thermodynamic properties, respectively. ORC system consisting of four key components: evaporator, turbine, condenser, and pump. In this study, we designed a shell and tube type evaporator, where it is designed from a large cylindrical tube called a shell assembled with a parallel pipe. Flow arrangement of evaporator is parallel-flow. Design of evaporator was 400mm shell length, 360mm shell diameter, 9.525mm OD tube, 8.407mm ID tube, tube length 10.57m, 250mm helical tube diameter, 300mm helical tube height and 13.5 the revolution of tube.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Design, Manufacturing, R-134a

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi sumber daya alam panas bumi yang besar, namun sebahagian dari sumber daya alam tersebut telah digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi [1].

Pada umumnya pemenuhan kebutuhan energi selama ini masih terpusat pada penggunaan sumber energi yang tidak dapat diperbaharui atau yang berasal dari fosil, seperti halnya minyak bumi, batubara dan gas bumi yang saat ini berada pada kondisi kritis dengan jumlah cadangan terbatas serta diketahui memiliki pengaruh negatif terhadap lingkungan seperti terjadinya *global warming*, merusak lapisan ozon dan hujan asam. Oleh karena itu perlu adanya usaha untuk menemukan sumber energi alternatif yang dapat mengalihkan konsumsi energi dari energi fosil tersebut yang lebih efisien dan ramah terhadap lingkungan [2].

Pemanfaatan sumber energi yang dapat diperbaharui seperti energi angin, biomassa, *geothermal* dan panas buang merupakan cara untuk mengatasi permasalahan diatas. Dalam beberapa tahun terakhir telah banyak dilakukan penelitian yang intensif tentang teknologi pengkonversi panas bertemperatur dan bertekanan rendah untuk menghasilkan energi. Sumber panas itu sendiri dapat diperoleh dari berbagai proses thermal salah satunya adalah *waste heat recovery* [3].

Teknologi pengembalian panas buang (*waste heat recovery*) dari industri seperti PLTU sangat berpotensi dalam mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan energi fosil serta untuk

memenuhi kebutuhan listrik di dunia. Namun temperatur panas dari sumber tersebut tidak dapat dikonversi secara efisien menjadi listrik jika menggunakan metode pembangkit listrik konvensional, maka pada penelitian ini teknologi pengkonversi panas tersebut dapat diwujudkan dalam sebuah sistem *Organic Rankine Cycle* [4].

Sumber panas dengan temperatur dan tekanan yang rendah tersebut bisa dimanfaatkan secara tidak langsung yakni untuk menguapkan fluida kerja (*refrigerant* atau *hidrokarbon*) melalui mekanisme pertukaran panas dengan menggunakan *Organic Rankine Cycle* (ORC) [5].

Organic Rankine Cycle (ORC) adalah salah satu sistem pembangkit listrik yang merupakan modifikasi dari *Rankine Cycle* dimana fluida kerja yang digunakan adalah fluida kerja organik (*refrigerant* dan *Hidrokarbon*). Pembangkit listrik dengan sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) memiliki keuntungan antara lain tidak membutuhkan sumber panas yang tinggi seperti pada pembangkit listrik tenaga uap dan tidak menghasilkan polusi hasil pembakaran (CO, CO₂, NO_x, SO_x) sehingga ramah terhadap lingkungan [6].

Organic Rankine Cycle (ORC) memiliki empat komponen utama yaitu evaporator, turbin, kondensor, dan pompa. Fluida kerja dalam fasa cair dipompa menuju evaporator untuk dipanaskan sehingga berubah fasa menjadi 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 [1].

Berdasarkan jurnal “Working fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) exhaust heat recovery of an internal combustion engine power plant”, terdapat berbagai macam fluida kerja organik yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangannya. Dari ke-10 kandidat fluida kerja yang dipilih berdasarkan kriteria *thermodynamical, environmental and safety*, serta ketersediaannya di Indonesia khususnya Pekanbaru, maka fluida kerja yang terpilih adalah R-134a.

Secara umum, fluida kerja diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu fluida basah (*wet fluids*), fluida isentropi (*isentropic fluids*) dan fluida kering (*dry fluids*). Klasifikasi tersebut berdasarkan nilai E yang merupakan lawan dari kemiringan kurva saturasi uap. Fluida yang memiliki nilai $E > 0$ diklasifikasikan sebagai fluida basah (*wet fluids*). Fluida yang memiliki nilai $E < 0$ diklasifikasikan sebagai fluida kering (*dry fluids*). Fluida yang memiliki nilai $E \approx 0$ diklasifikasikan sebagai fluida isentropi (*isentropic fluids*) [7].

$$E = \frac{c_p}{T_H} - \frac{\frac{nT_{rH}}{1-T_{rH}} + 1}{T_H^2} \Delta H_{vap} \quad (1)$$

Dimana:

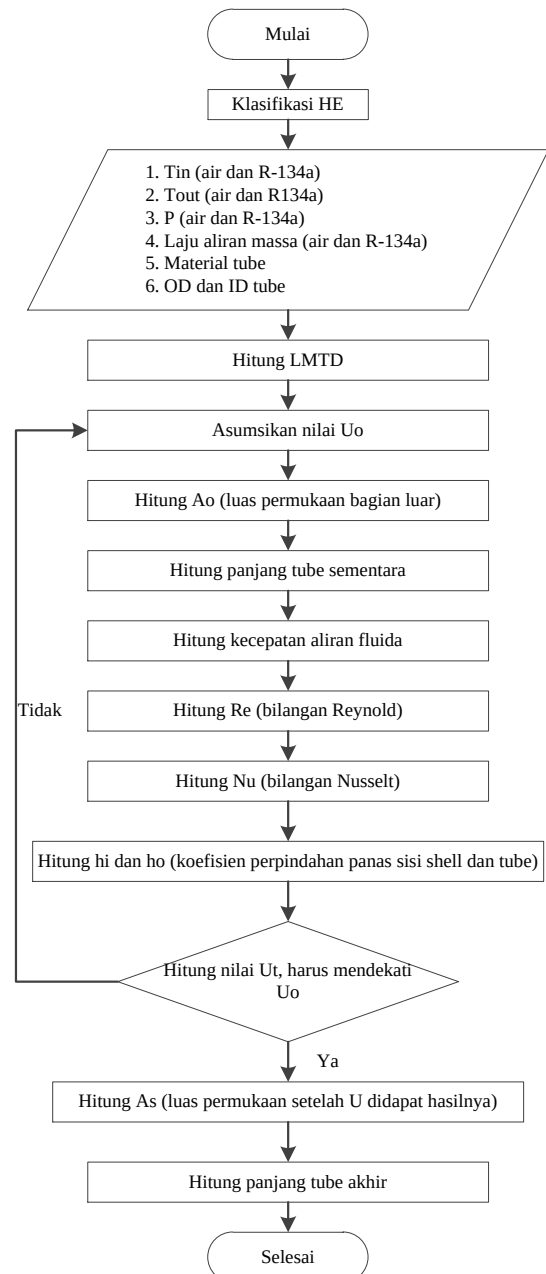
- E : ds/Dt
 C_p : panas spesifik fluida
 T_H : temperatur evaporasi fluida
 n : 0.375 atau 0.385
 T_{rH} : penurunan temperatur evaporasi
 ΔH_{vap} : panas laten evaporasi.

Selain itu, klasifikasi fluida kerja berdasarkan keamanan terhadap lingkungan adalah sebagai berikut:

- Berdasarkan *Ozone Depleting Potential* (ODP)
 - Medium, ODP < 0.1
 - High, ODP > 0.1
- Berdasarkan *Global Warming Potential* (GWP)
 - Low, GWP < 150
 - Medium, GWP antara 150 – 2500
 - High, GWP > 2500
- Berdasarkan *Safety ASHRAE 34*
 - A, tidak beracun
 - B, beracun
 - 1, tidak mudah terbakar
 - 2, berpotensi untuk terbakar
 - 3, mudah terbakar
 - L, mudah terbakar

2. Metodologi Perancangan

Pada penelitian ini, jenis alat penukar kalor yang dirancang adalah *shell and tube*. Dimana evaporator dirancang dari tabung silinder yang dipasang dalam ukuran besar yang disebut cangkang (*shell*) dengan susunan pipa parallel yang sejajar dengan cangkang tersebut. Diagram alir perancangan evaporator dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram alir perancangan HE

2.1 Parameter Perhitungan

Berdasarkan [8], maka perancangan *heat exchanger* (evaporator) akan dihitung menggunakan persamaan-persamaan di bawah ini:

Untuk mencari nilai Q_h dan Q_c , persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Q_h = Q_c = m \cdot \Delta h \quad (2)$$

Setelah itu langkah selanjutnya adalah menghitung nilai *Logarithmic Mean Temperature Difference* (LMTD) atau dilambangkan dengan ΔT_{lm} .

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3)$$

Nilai Q dan ΔT_{lm} berguna sebagai parameter perhitungan untuk menghitung nilai *Surface Area* (A_s) dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$A_s = \frac{Q}{U \Delta T_{lm}} \quad (4)$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai kecepatan aliran fluida menggunakan persamaan:

$$V = \frac{\dot{m}_h}{\rho \cdot A} \quad (5)$$

Dimana V kecepatan fluida akan digunakan untuk menghitung nilai bilangan Reynold sehingga dapat mengetahui jenis aliran dari fluida tersebut. Persamaan yang digunakan adalah:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (6)$$

Setelah menghitung bilangan Reynold, maka selanjutnya adalah menghitung nilai Bilangan Nusselt. Bilangan Nusselt ditentukan berdasarkan

jenis aliran fluida tersebut, laminar atau turbulen serta jenis gaya konveksi aliran apakah *internal forced convection* atau *external forced convection*. Biasanya pada *heat exchanger shell and tube*, *internal forced convection* adalah fluida yang berada di bagian dalam tube, sedangkan *external forced convection* yang berada di luar tube.

Persamaan Nusselt number untuk *internal dan external forced convection* untuk aliran laminar dan turbulen adalah sebagai berikut:

Internal forced :

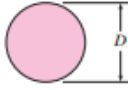
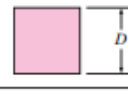
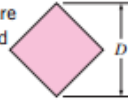
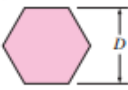
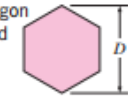
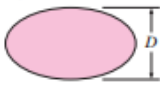
$$\text{Laminar} \quad Nu = 3,66 + \frac{0,065 \left(\frac{D}{L}\right) Re Pr}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{D}{L}\right) Re Pr\right]^{1/3}} \quad (7)$$

$$\text{Turbulen} \quad Nu = 0.023 \times Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (8)$$

External forced

Sedangkan persamaan untuk mencari bilangan Nu untuk *external forced* dapat dilihat dari Tabel 1.

Tabel 1 Nusselt Number [8]

Cross-section of the cylinder	Fluid	Range of Re	Nusselt number
Circle 	Gas or liquid	0.4–4 4–40 40–4000 4000–40,000 40,000–400,000	$Nu = 0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027 Re^{0.805} Pr^{1/3}$
Square 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.102 Re^{0.675} Pr^{1/3}$
Square (tilted 45°) 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.246 Re^{0.588} Pr^{1/3}$
Hexagon 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.153 Re^{0.638} Pr^{1/3}$
Hexagon (tilted 45°) 	Gas	5000–19,500 19,500–100,000	$Nu = 0.160 Re^{0.638} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.0385 Re^{0.782} Pr^{1/3}$
Vertical plate 	Gas	4000–15,000	$Nu = 0.228 Re^{0.731} Pr^{1/3}$
Ellipse 	Gas	2500–15,000	$Nu = 0.248 Re^{0.612} Pr^{1/3}$

Setelah bilangan Nusselt diketahui maka menghitung laju perpindahan panas menggunakan persamaan:

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad (9)$$

untuk menghitung nilai *total thermal resistance* (R) menggunakan persamaan:

$$R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (10)$$

Selanjutnya adalah menghitung nilai *overall heat coefficient*, U dengan cara iterasi, sehingga nilai U yang diinputkan sama/hampir sama dengan nilai

outputnya atau hasil akhirnya. Untuk menghitung nilai U menggunakan persamaan:

$$U = \frac{1}{R} \quad (11)$$

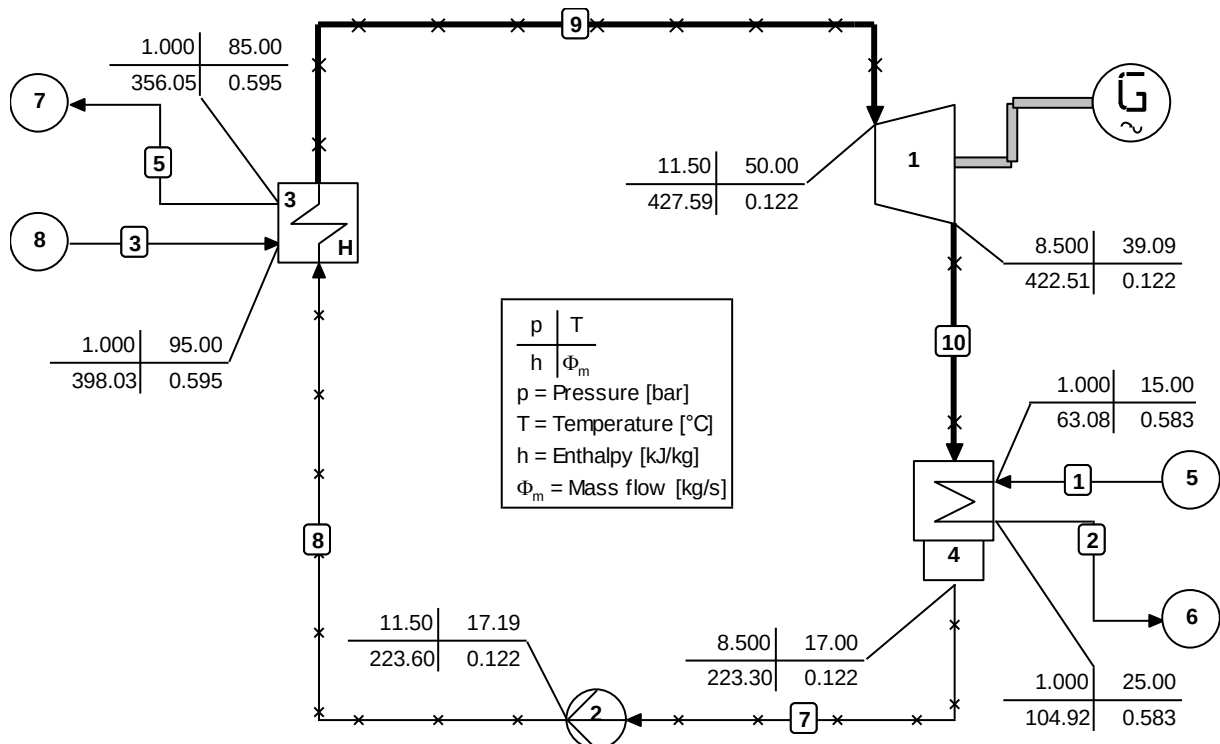
Langkah terakhir adalah menghitung nilai luas total (A) dan panjang total evaporator (L) menggunakan persamaan:

$$A_{total} = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{lm}} \quad (12)$$

$$L_{total} = \frac{A}{\pi D}$$

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini, sistem *Organic Rankine Cycle* dianalisa dengan bantuan perangkat lunak *Cycle Tempo* sebagai simulasi pembangkit listrik dan REFPROP untuk membantu menentukan *properties* dari fluida yang digunakan. Hasil dari perancangan menggunakan *Cycle Tempo* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Hasil simulasi menggunakan software *Cycle Tempo*

Berdasarkan gambar diatas, maka dilakukan perhitungan untuk merancang evaporator menggunakan persamaan-persamaan yang sudah

dijelaskan pada bagian 2.1, sehingga diperoleh hasil seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Data Masukan

Hot Fluid (air)	Cold Fluid (R-134a)
$T_{in} = 95^{\circ}\text{C}$	$T_{in} = 17,19^{\circ}\text{C}$
$T_{out} = 85^{\circ}\text{C}$	$T_{out} = 50^{\circ}\text{C}$
$P = 1 \text{ bar}$	$P = 11,5 \text{ bar}$
$\dot{m} = 0,595 \text{ kg/s}$	$\dot{m} = 0,122 \text{ kg/s}$
$Q = 24,98 \text{ kW}$	$Q = 24,89 \text{ kW}$
$T_{ave} = 90^{\circ}\text{C}$	$T_{ave} = 33,6^{\circ}\text{C}$

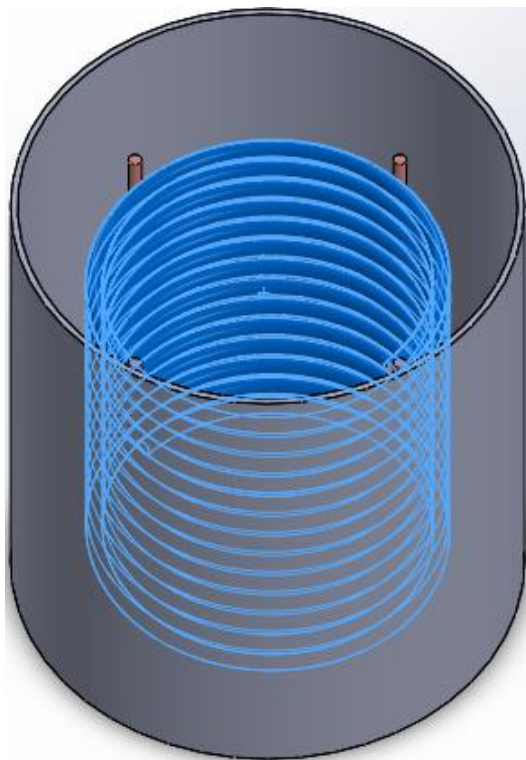
Didapatkan Properties fluida dari REFPROP 8	
$\rho = 965,3 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 607,68 \text{ kg/m}^3$
$\mu = 0,000315 \text{ kg/ms}$	$\mu = 0,00009674 \text{ kg/ms}$
$k = 0,675 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$	$k = 0,04722 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$
$Pr = 1,96$	$Pr = 2,1310$
$R_f = 0,0004 \text{ m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/W}$	$R_f = 0,0002 \text{ m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/W}$
Material Tube : Tembaga, $k = 385 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$	
$D_{o,tube} = 9,525 \text{ mm}$ & $D_{i,tube} = 8,407 \text{ mm}$	
Arah Perpindahan Panas : <i>Parallel flow</i>	

Dengan bantuan *Ms. Office Excel 2013*, maka data parameter perancangan yang telah didapatkan akan dihitung sesuai dengan rumus/persamaan untuk merancang evaporator, dan hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Perancangan Evaporator

Panjang Tube	10,57 m
Diameter Shell	360 mm
Panjang/Tinggi Shell	400 mm
Diameter helical tube	250 mm
Tinggi helical tube	300 mm
Pitch	22,2 mm
Revolution (jumlah gulungan)	13,5

Setelah perancangan menggunakan bantuan *Cycle Tempo* dan *Ms. Office Excel 2013*, maka selanjutnya pembuatan gambar teknik menggunakan software *Solidworks 2016*. Dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Shell and tube evaporator

4. Simpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah telah berhasil dilakukan perancangan dan pembuatan evaporator tipe *shell and tube* pada sistem *Organic Rankine Cycle* menggunakan fluida kerja R-134a untuk pembangkit listrik 1 kW. Desain evaporator pada penelitian didapatkan panjang/tinggi *shell* 400 mm, diameter *shell* 360 mm, OD *tube* 9,525 mm, ID *tube* 8,407 mm, panjang *tube* 10,57 m, diameter *helical tube* 250 mm, tinggi *helical tube* 300 mm dan jumlah gulungan *tube* adalah 13,5 gulungan.

Daftar Pustaka

- [1] O. Nurhilal, C. Mulyana, and N. Suhendi, "Disain Pembangkit Listrik Tenaga Uap Siklus Rankine Organik 100 kW dengan Fluida Kerja R-123," no. April, pp. 136–139, 2014.
- [2] R. I. Pramana and A. J. Purwanto, "Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Energi , Perancangan Sistem Siklus Rankine Organik Dengan Sumber Kalor Bertemperatur 70-90 ° C Dan Fluida Kerja R245fa," no. September, 2013.
- [3] M. A. Siddiqi and B. Atakan, "Investigation of the Criteria for Fluid Selection in Rankine Cycles for Waste Heat Recovery *," vol. 14, no. 3, pp. 117–123, 2011.
- [4] K. S. Rao and C. L. Sindhuja, "Working fluids for Organic Rankine Cycle – A Review," vol. 3, no. 8, pp. 447–451, 2017.
- [5] U. Muhammad, M. Imran, D. H. Lee, and B. S. Park, "Design and experimental investigation of a 1kW organic Rankine cycle system using R245fa as working fluid for low-grade waste heat recovery from steam," *Energy Convers. Manag.*, vol. 103, no. October, pp. 1089–1100, 2015.
- [6] aria H. Pamungkas and A. B. K. Putra, "Studi Variasi Flowrate Refrigerant pada Sistem Organic Rankine Cycle dengan Fluida Kerja R-123," *Tek. Pomtis*, vol. 2, no. 2, pp. 2–6, 2013.
- [7] S. Douvartzides and I. Karmalis, "Working fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) exhaust heat recovery of an internal combustion engine power plant," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 161, no. 1, 2016.
- [8] Y. A. Cengel and M. Boles, *Thermodynamics An Engineering Aproach*, 5th Intern. McGraw-Hill, 2006.