

Desain Model Siklus Rankine Organik Dengan *Recuperator*

Abdullah Noor Salim¹, Alvera Apridianti Melkias²

^{1,2}Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

¹E-mail : abdullah.noor.tpt17@polban.ac.id

²E-mail : alveramelkias@polban.ac.id

ABSTRAK

Ketersediaan energi listrik menjadi meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk serta perkembangan teknologi. Indonesia yang berada pada wilayah tumbukan lempeng tektonik dan garis khatulistiwa memiliki cadangan energi yang besar. Potensi sumber daya geotermal yang dimiliki oleh Indonesia sebesar 11.073 Megawatt listrik (MWe) dengan jumlah cadangan sumber energi sebesar 17.506 MWe. Sumber panas dari panas bumi memiliki kualitas yang rendah untuk menghasilkan listrik dengan *Organic Rankine Cycle* (ORC). Fluida organik memiliki titik didih yang rendah sehingga siklus ini dapat digunakan sebagai sumber panas. Pemanfaatan ORC sebagai *Waste Heat Recovery* merupakan peningkatan penggunaan energi terbarukan di Indonesia. Tujuan penelitian adalah untuk merancang model sistem pembangkit siklus Rankine Organik pada PLTP Ulubelu menggunakan *software* simulasi serta menganalisa performa terhadap sistem siklus Rankine Organik yang sudah dirancang berdasarkan fluida kerja organik n-pentane, n-butane, dan R123. Penelitian ini menggunakan temperatur sumber panas 169,932°C yang berasal dari brine PLTP Ulubelu yang menghasilkan efisiensi tertinggi 13.41% untuk fluida kerja n-pentane.

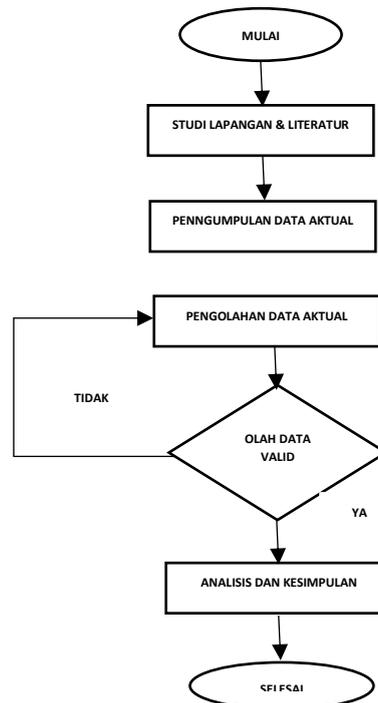
Kata Kunci

brine, ORC, fluida kerja, simulasi.

I. PENDAHULUAN

Ketersediaan energi listrik menjadi meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk serta perkembangan teknologi. Indonesia yang berada pada wilayah tumbukan lempeng tektonik dan garis khatulistiwa memiliki cadangan energi yang besar serta memiliki cadangan energi fosil dan juga non fosil. Penggunaan energi fosil dapat merusak lingkungan serta jumlah yang terus berkurang, penggunaan energi ini dapat diganti dengan sumber energi lain misalnya energi panas bumi. Potensi sumber daya geotermal yang dimiliki oleh Indonesia sebesar 11.073 Megawatt listrik (MWe) dengan jumlah cadangan sumber energi sebesar 17.506 MWe.

Sumber panas dari panas bumi memiliki kualitas yang rendah untuk menghasilkan listrik dengan *Organic Rankine Cycle* (ORC). Fluida organik memiliki titik didih yang rendah sehingga siklus ini dapat digunakan sebagai sumber panas. Pada saat ini sumber potensi dari brine sistem PLTP yang berasal dari sumur berkualitas rendah masih belum dimanfaatkan secara maksimal. Pemanfaatan ORC sebagai *Waste Heat Recovery* merupakan peningkatan penggunaan energi terbarukan di Indonesia. Siklus ini memiliki komponen yaitu pompa, evaporator, turbin dan kondensor.



Gambar 1 Diagram Alur Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk merancang model sistem pembangkit siklus Rankine Organik menggunakan *software* simulasi serta menganalisa performa terhadap sistem siklus Rankine Organik yang sudah dirancang berdasarkan fluida kerja organik n-pentane, n-butane, dan R123. Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu pemanfaatan *brine* berkualitas rendah yang tidak

dimanfaatkan sehingga dilakukan perancangan sistem pembangkit siklus Rankine Organik. Batasan masalah pada penelitian ini yaitu Fluida kerja yang digunakan adalah n-pentane, n-butane, dan R123. Sumber panas yang digunakan adalah *brine* yang tidak terpakai, perancangan ini tidak termasuk dengan sistem kontrol, kelistrikan, perawatan dan aspek ekonomi.

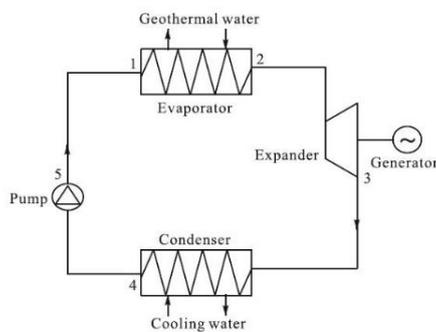
Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu pemanfaatan *brine* berkualitas rendah yang tidak dimanfaatkan sehingga dilakukan perancangan sistem pembangkit siklus Rankine Organik.

Metodologi penelitian yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1 yaitu pada diagram alur penelitian.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Organik rankine cycle (ORC)

Sistem *Organik rankine cycle (ORC)* merupakan suatu siklus Rankine konvensional yang dimodifikasi dengan menggunakan fluida kerja dari jenis fluida organik menggantikan air yang digunakan pada siklus Rankine konvensional. Fluida organik ini mempunyai sifat fisik yang menguap pada temperatur yang cukup rendah sehingga tidak membutuhkan sumber panas yang tinggi untuk merubah fasanya menjadi uap panas lanjut (*superheated*) [1]. Pada Gambar 2 memperlihatkan skema diagram dari sistem ORC. Air panas bumi yang berasal dari sumur produksi (*production well*) digunakan untuk memanaskan fluida kerja organik yang bertemperatur rendah pada evaporator. Fluida kerja kemudian menjadi panas dan menghasilkan uap berupa *flash*. Uap tersebut lalu dialirkan untuk memutar turbin dan selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Lalu fluida kerja yang sudah melewati proses ekspansi pada turbin, akan dikondensasikan oleh kondensor hingga fluida kerja kembali ke fase cair. Setelah itu, fluida kerja akan dialirkan oleh pompa menuju evaporator. Air panas bumi yang telah melewati proses pertukaran panas pada evaporator, akan dialirkan kembali menuju sumur reinjeksi (*reinjection well*). Sistem ORC ini merupakan sistem tertutup. [2]

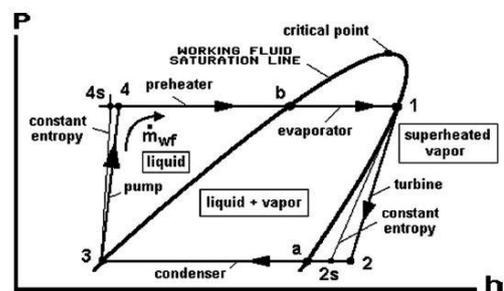


Gambar 2 Skematik Diagram Sistem ORC

2.2 Siklus Termodinamika pada Sistem Pembangkit ORC

Siklus Rankine organik pada dasarnya terbagi menjadi tiga subsistem teknis, diantaranya yaitu fluida panas bumi atau *brine*, siklus konversi daya dan sistem pendinginan untuk menghilangkan panas [3]. Dalam desain yang baik, ketiga subsistem harus berinteraksi secara andal, efisien dan ekonomis. Dasar pada sistem ORC ini adalah pemilihan fluida kerja organik untuk sifat termodinamika yang sesuai diumpankan ke *heat exchanger* yang menerima panas dari fluida panas bumi, lalu proses ekspansi pada turbin, proses kondensasi dan kemudian diumpankan kembali ke *heat exchanger* dengan pompa.

Gambar 3 menunjukkan proses termodinamika untuk sistem ORC pada diagram tekanan (P) terhadap entalpi (h).



Gambar 3 Diagram P-h Sistem ORC

2.3 Komponen – komponen Sistem ORC

Komponen – komponen utama sistem ORC diantaranya adalah turbin uap, kondensor, pompa, dan *heat exchanger*.

2.3.1 Turbin Uap

Turbin merupakan suatu mesin penggerak mula yang mengubah energi uap menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Analisis termodinamika turbin pada sistem ORC dapat dilihat dengan jelas pada gambar 3, sehingga daya pada turbin dapat ditentukan dengan rumus:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{wf}\eta_t(h_1 - h_{2s}) \quad (1)$$

Dimana η_t merupakan efisiensi turbin dalam keadaan isentropik, h_1 merupakan entalpi uap pada inlet turbin, h_2 merupakan entalpi uap aktual pada outlet turbin, dan h_{2s} merupakan entalpi uap pada outlet turbin yang diasumsikan dalam keadaan isentropik. Keluaran daya turbin yang diinginkan selanjutnya akan menentukan laju aliran massa fluida kerja yang dibutuhkan.

2.3.2 Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar panas yang berfungsi untuk mengkondensasikan uap air yang berasal dari turbin uap sehingga berubah fase menjadi cair kembali. Panas

yang harus dibuang dari fluida kerja ke media pendingin seperti air ataupun udara, dapat ditentukan dengan rumus:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_3) \quad (2)$$

Analisis termodinamika hubungan antara laju aliran fluida kerja dan air pendingin pada gambar 3 dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\dot{m}_{cw}(h_y - h_x) = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_3) \quad (3)$$

Atau

$$\dot{m}_{cw}\bar{c}(T_y - T_x) = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_3) \quad (4)$$

II.3.3 Pompa

Pompa adalah alat untuk memindahkan fluida dari tempat satu ketempat lainnya yang bekerja atas dasar mengkonversikan energi mekanik menjadi energi kinetik. Daya yang dihasilkan oleh pompa berdasarkan analisis termodinamika pada gambar 3 dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{wf}(h_4 - h_3) = m_{wf}(h_{4s} - h_3)/\eta_p \quad (5)$$

Dimana η_p adalah efisiensi pompa isentropic.

II.3.4 Heat Exchanger

Heat exchanger atau alat penukar panas merupakan perangkat yang berfungsi untuk menukarkan panas antara dua fluida yang berada pada suhu berbeda dan dipisahkan oleh dinding [4].

Pada sistem siklus Rankine organik, perangkat yang menggunakan prinsip kerja *heat exchanger* adalah evaporator dan preheater. Walaupun dari segi nama berbeda, tapi kedua alat tersebut memiliki prinsip kerja yang sama seperti *heat exchanger*. *Brine* akan masuk dan keluar melalui *tube* sementara *working fluid* akan masuk dan keluar melalui *shell*. Arah aliran dari kedua fluida ini berlawanan atau *counterflow*.

Berdasarkan gambar 3, jika dilihat dari satu sistem termodinamika yang terdiri dari evaporator dan preheater maka diperoleh persamaan:

$$\dot{m}_b(h_a - h_c) = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_4) \quad (6)$$

Jika *brine* memiliki gas dan padatan terlarut yang rendah, bagian kiri dari persamaan digantikan dengan rata – rata panas spesifik dari *brine* \bar{c}_b dikalikan dengan drop temperatur:

$$\dot{m}_b\bar{c}_b(T_a - T_c) = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_4) \quad (7)$$

Sehingga diperoleh persamaan untuk menentukan laju aliran *brine* yang dibutuhkan sebagai parameter perancangan siklus:

$$\dot{m}_b = \dot{m}_{wf} \frac{(h_1 - h_4)}{\bar{c}_b(T_a - T_c)} \quad (8)$$

2.4 Efisiensi Energi ORC

Untuk mengevaluasi kinerja pembangkit listrik ORC, energi dan efisiensi energi dari siklus ini adalah poin utama dari analisis. Efisiensi energi dari siklus ORC dapat diperoleh dengan rumus:

$$\text{Efisiensi Energi} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_p}{\dot{Q}_{in}} \quad (9)$$

Dimana W adalah daya dan Qin adalah kalor masuk. T dan P masing-masing menunjukkan turbin dan pompa.

2.5 Aspen Plus®

Aspen Plus® merupakan sebuah perangkat lunak berbayar yang digunakan untuk melakukan berbagai simulasi yang berhubungan dengan dunia termodinamika, kimia dan biokimia, serta industri polimer. Tampilan awal Aspen Plus® V11.0 dapat dilihat pada Gambar 2.6. Perangkat lunak ini didesain untuk dapat menganalisa berbagai karakteristik termodinamika setiap material yang diinginkan. Selain itu Aspen Plus® juga dilengkapi dengan proses modeling dan kontrol sesuai dengan pemilihan solusi yang diperlukan.



Gambar 4 Aspen Plus® V11.0

Aspen Plus® menyediakan pengaturan yang luas guna mengoptimalkan model dan sistem proses. Selain itu Aspen Plus® juga dibekali dengan kemampuan kompleks dalam menangani berbagai jenis material baik itu material padat, cair, gas, maupun elektrolit.

3. DATA PENELITIAN

3.1 Simulasi Sistem ORC Dengan Recuperator

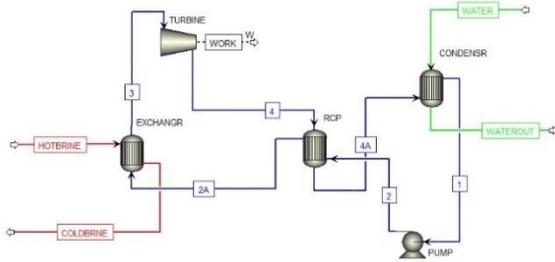
Pembuatan simulasi dilakukan dengan mengolah data sumber panas *brine* pada PLTP yang akan dijadikan sebagai parameter awal untuk membuat simulasi. Pada *software* Aspen Plus dengan nilai temperatur *brine* 169.93°C dan tekanan 6.99 bar.

Pemilihan fluida kerja yang baik juga diperlukan agar pemanfaat *brine* ini bisa lebih maksimal. Pemilihan fluida kerja dapat dilakukan dengan melihat aspek keamanan,

kesehatan dan keramahan lingkungan. Hasil dari kajian yang telah ditentukan menghasilkan 3 fluida kerja yang menjadi pilihan untuk sistem ORC ini diantaranya n-pentane, n-butane, dan R123.

Desain model sistem ORC dengan sumber panas *brine* dari PLTP ini akan dibuat dengan *software* Aspen Plus. Sistem ini akan terdiri dari 5 komponen utama yaitu Pompa, *Heat Exchanger*, Turbin, *Recuperator* dan Kondensor. Digunakan 5 variasi tekanan umpan ke HE untuk melihat grafik yang terjadi pada model desain. Gambar 5 menunjukkan sistem ORC dengan *Recuperator* yang telah dibuat dalam Aspen Plus.

Siklus Rankine Organik dengan *Recuperator* memiliki sedikit perbedaan pada prosesnya dengan Siklus Rankine Organik biasa. Fluida kerja keluaran turbin pada Siklus Rankine Organik biasa akan langsung diteruskan menuju kondensor untuk proses kondensasi, sedangkan pada sistem dengan penambahan *Recuperator* ini, fluida kerja akan mengalir menuju *Recuperator* terlebih dahulu lalu dilanjutkan ke kondensor. Setelah fluida kerja mengalami proses pada pompa maka tidak langsung dialirkan menuju *Heat Exchanger*, terlebih dulu dialirkan ke *Recuperator*.



Gambar 5 Siklus Rankine Organik Dengan *Recuperator*

3.2 Fluida Kerja Organik n-pentane

Tabel 1 Hasil Simulasi Fluida Kerja n-pentane

N o.	Laju Alir Massa	Q_{evap}	W_{turbin}	Q_{kond}	W_{pompa}	$Efisiensi$
	\dot{m}					
	kg/s	kJ/s	kW	kJ/s	kW	%
1	13.89	671 7.24	838. 11	590 5.80	26.67	12.0 8
2	13.89	682 6.49	882. 26	597 4.22	30.00	12.4 8
3	13.89	692 5.89	922. 30	603 6.93	33.33	12.8 4
4	13.89	701 6.76	958. 85	609 4.58	36.67	13.1 4
5	13.89	710 0.11	992. 41	614 7.70	40.00	13.4 1

3.3 Fluida Kerja Organik n-butane

Tabel 2 Hasil Simulasi Fluida Kerja n-butane

N o.	Laju Alir Massa	Q_{eva}	W_{turbin}	Q_{kon}	W_{pompa}	$Efisiensi$
	\dot{m}					
	kg/s	kJ/s	kW	kJ/s	kW	%
1	13.89	530 3.71	335. 52	498 6.36	18.1 7	5.98
2	13.89	538 7.41	379. 77	502 9.44	21.8 0	6.64
3	13.89	546 3.13	419. 79	506 8.77	25.4 3	7.22
4	13.89	553 1.95	456. 26	510 4.76	29.0 7	7.72
5	13.89	559 4.73	489. 69	513 7.73	32.7 0	8.17

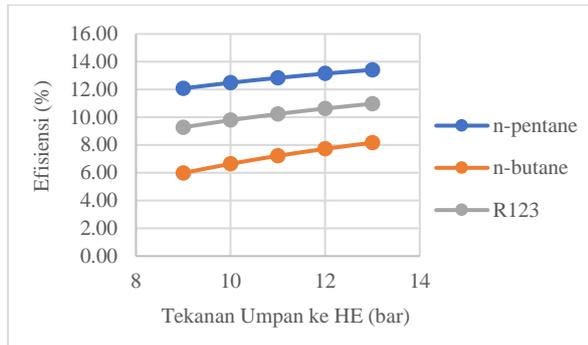
3.4 Fluida Kerja Organik R123

Tabel 3 Hasil Simulasi Fluida Kerja R123

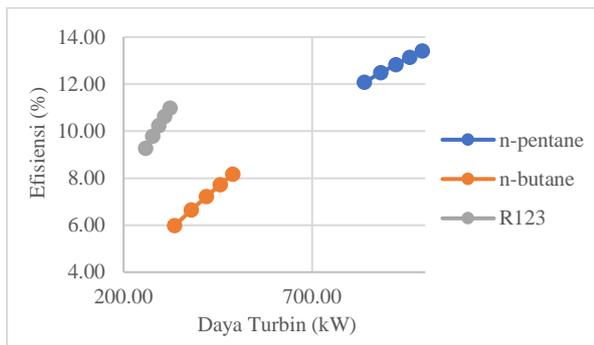
N o.	Laju Alir Massa	Q_{evap}	W_{turbin}	Q_{kond}	W_{pompa}	$Efisiensi$
	\dot{m}					
	kg/s	kJ/s	kW	kJ/s	kW	%
1	13.89	2660 .26	258.4 8	2413 .49	11.72	9.28
2	13.89	2693 .84	277.0 9	2430 .14	13.39	9.79
3	13.89	2723 .84	293.8 6	2445 .04	15.06	10.24
4	13.89	2750 .76	309.0 9	2458 .40	16.74	10.63
5	13.89	2774 .97	323.0 0	2470 .37	18.41	10.98

4. DISKUSI

Proses simulasi dilakukan dengan membentuk simulasi sistem ORC dengan *recuperator*. Simulasi ini dilakukan dalam 5 variasi tekanan umpan *heat exchanger* mulai dari 9 bar, 10 bar, 11 bar, 12 bar dan 13 bar. Penambahan *recuperator* pada sistem ORC berfungsi untuk mengurangi beban kinerja komponen lain pada sistem yang akan meningkatkan efisiensi siklus ini. Berdasarkan perhitungan efisiensi sistem ORC dengan *recuperator* yang ditunjukkan pada tabel sebelumnya maka dapat dibentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5 Grafik Efisiensi ORC Terhadap Tekanan Umpan ke HE



Gambar 6 Grafik Efisiensi ORC Terhadap Daya Turbin

Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa kenaikan nilai efisiensi juga dipengaruhi oleh tekanan fluida kerja yang masuk Heat Exchanger. Dapat diketahui bahwa semakin tinggi tekanan fluida kerja yang masuk ke Heat Exchanger maka akan semakin tinggi efisiensi yang diperoleh.

Fluida kerja n-pentane memiliki efisiensi dan output turbin yang lebih besar dibandingkan fluida kerja n-butane dan R123. Karakteristik dari n-pentane memiliki sifat beracun yang rendah dan juga mudah terbakar, tekanan kritis 33.3 bar dan temperatur kritis 196.6°C, tekanan kondensasi diantara fluida kerja lain juga memiliki nilai yang terendah yaitu sebesar 1 bar dengan temperatur 36°C. Fluida kerja R123 dan n-butane memiliki tekanan kondensasi sebesar 2 bar dengan temperatur 48°C dan 4 bar dengan temperatur 42°C

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data yang dilakukan membuktikan bahwa fluida kerja n-pentane merupakan fluida kerja dengan potensi terbaik untuk digunakan dalam kasus sumber panas brine dengan temperatur 169.932°C dan tekanan 7.999 bar. Efisiensi pada sistem juga akan meningkat dengan bertambahnya nilai tekanan umpan ke *Heat Exchanger*.

Dari hasil simulasi ini dapat dikatakan bahwa sumber panas *brine* yang tidak terpakai pada PLTP Ulubelu ini berpotensi dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik ORC dengan penambahan komponen *Recuperator*. Namun perlu dilakukan kajian ekonomi dan simulasi yang lebih detail agar model desain yang dibuat bisa sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Firdaus, A. N., & A. B. K., P. (2014). STUDI VARIASI LAJU PENDINGINAN COOLING TOWER TERHADAP SISTEM ORC (Organic Rankine Cycle) DENGAN FLUIDA KERJA R-123. Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri 1, 1-7.
- [2] DiPippo, R. (2012). Geothermal Power Plants : Principles, Applications, Case Studies, and Environmental Impact 3rd Edition. North Dartmouth, Massachusetts: Elsevier Ltd.
- [3] Frick, S., Sadaat, A., Surana, T., Siahaan, E. E., Kupfermann, G. A., Erbas, K., . . . Gani, M. A. (2015). Geothermal Binary Power Plant for Lahendong, Indonesia: A German-Indonesian Collaboration Project. Proceedings World Geothermal Congress 2015, 1-5.
- [4] Bergman, T. L. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Danvers: Wiley.
- [5] Daniansyah, I. (2019). Analisa Pemanfaatan Refrigerant R134a Sebagai Fluida Kerja (Working Fluid) pada PLTP (Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi) dengan Sistem Binary Cycle. Jakarta: Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Universitas Pertamina.
- [6] Gao, H., Liu, C., He, C., Xu, X., Wu, S., & Li, Y. (2012). Performance Analysis and Working Fluid Selection of a Supercritical Organic Rankine Cycle for Low Grade Waste Heat Recovery. Energies, 3233-3247.
- [7] Gitobu, G. G. (2016). MODEL ORGANIC RANKINE CYCLE FOR BRINE AT OLKARIA GEOTHERMAL FIELD, KENYA. Reykjavik, Iceland: United Nations University Geothermal Training Programme.
- [8] Macchi, E., & Astolfi, M. (2017). Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems : Technologies and Applications. Kidlington: Woodhead Publishing.
- [9] Sharma, S. (2019). Analysis and Design of Organic Rankine Cycle based Power Plants. Bangalore: Indian Institute of Science.
- [10] Yamamoto, T., Furuhashi, T., Arai, N., & Mori, K. (2001). Design and testing of the Organic Rankine Cycle. Energy 26, 239-251.