

## DESAIN ALAT PENUKAR KALOR JENIS *SHELL AND TUBE* SEBAGAI EVAPORATOR UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI SUHU RENDAH DENGAN MENGGUNAKAN SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE* (ORC)

\*Andry Vega Nugraha<sup>1</sup>, Berkah Fajar TK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: [andry.vega.n@gmail.com](mailto:andry.vega.n@gmail.com)

### Abstrak

Sumber energi panas suhu rendah sangat melimpah di bumi. Mengubah energi panas bumi suhu rendah tersebut menjadi sebuah kerja yang efektif adalah salah satu cara untuk menghindari krisis energi. Pada penelitian Bertani tentang perkembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi di seluruh dunia menghasilkan peningkatan 2GW selama 5 tahun dari 2005 – 2010 dan jika pembangkit listrik tenaga panas bumi suhu rendah dan menengah ditingkatkan maka kapasitas instalasi pembangkit listrik tenaga panas bumi akan meningkat 8,3% dari total produksi listrik dunia 2050. Dari permasalahan tersebut telah dibuat sebuah siklus *Organic Rankine Cycle* (ORC) dengan menggunakan analisis manual serta modeling dan validasi oleh perangkat lunak pendukung yaitu *Cycle Tempo*, *REFROP*, dan *HTRI Xchanger Suite*. Adapun fluida kerja organik yang digunakan yaitu R-123, R-134, R-32 dan *n-pentane*. Hasil analisis dari sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) dengan data masukan suhu *reservoir* 70°C, laju aliran massa 0,515 kg/s, suhu masuk turbin 60°C, suhu keluar turbin 45°C, dari semua refrigeran yang dibandingkan telah didapat jenis refrigeran yang sesuai untuk digunakan pada sistem ORC tersebut yaitu dengan fluida organik R-123. Karena refrigeran tersebut memiliki tekanan relatif kecil, daya relatif tinggi dari refrigeran lainnya, efisiensi relatif tinggi dibanding refrigeran lainnya, serta pemasangan komponen, ijin yang lebih mudah dan biaya lebih murah, dan mudah didapatkan dibanding refrigerant lain. Desain evaporator didapatkan panjang *shell* ( $l$ ) 2 m, jumlah *tube* ( $Nt$ ) 322, *passage* 2 *pass*, *tube layout* 45° *triangular*, jarak antar *baffle* 0,2096 m, diameter *shell* ( $Ds$ ) 0,524 m, *OD tube* 0,01905 m, *ID tube* = 0,015748 m, jarak antar *tube* ( $Pt$ ) 0,024 m, *pressure drop shell* dan *tube*  $\Delta Ps = 4,688$  Pa dan  $\Delta Pt = 5,175$  Pa.

**Kata kunci** : *Organic Rankine Cycle*, fluida kerja, daya, tekanan, alat penukar kalor, evaporator

### Abstract

*Low temperature heat sources are very abundant in the earth. Changing the low-temperature geothermal energy is becoming an effective working is one way to avoid an energy crisis. In Bertani research on the development of geothermal power plants around the world resulted in increased 2GW for 5 years from 2005 to 2010 and if the geothermal power plant low and medium temperature enhanced the capacity of the power plant, geothermal power will increase 8.3% from total world electricity production by 2050. Of these problems has made an Organic Rankine Cycle (ORC) using manual analysis and modeling and validation by software support as Cycle Tempo, REFROP, and HTRI Xchanger Suite. The organic working fluid used is R-123, R-134, R-32 and n-pentane. The results of the analysis of the system Organic Rankine Cycle (ORC) with the data input reservoir temperature of 70 ° C, the mass flow rate of 0.515 kg / s, the turbine inlet temperature 60 ° C, the turbine outlet temperature 45 ° C, of all the refrigerant being compared have obtained appropriate for the type of refrigerant used in The ORC system is the organic fluid R-123. Because the refrigerant pressure is relatively small, relatively high power from other refrigerants, efficiency is relatively high compared to other refrigerants, as well as the installation of components, which permits easier and cheaper cost, and easier to get than other refrigerants. Evaporator design obtained shell length ( $l$ ) 2 m, the number of tube ( $nt$ ) 322, passage 2 passes, tube 45° triangular layout, the distance between the baffles 0.2096 m, the diameter of the shell ( $Ds$ ) 0524 m, *OD tube* 0.01905 m, *ID tube* = 0.015748 m, the distance between the tube ( $Pt$ ) 0.024 m, pressure drop of shell and tube  $\Delta Ps = 4.688$  Pa and  $\Delta Pt = 5.175$  Pa.*

**Keywords** : *Organic Rankine Cycle*, working fluid, power, pressure, heat exchanger, evaporator

## 1. Pendahuluan

Peningkatan konsumsi energi mengakibatkan polusi di lingkungan dan berkurangnya sumber energi. Sumber energi yang dapat diperbaharui adalah sebuah alternatif untuk pengganti sumber energi konvensional. Energi panas bumi merupakan sumber energi yang sudah sejak lama berada di bumi yang dapat diolah menjadi sebuah energi untuk menggantikan energi konvensional. Energi panas bumi sering digunakan untuk menghasilkan energi listrik [1].

Secara umum sumber panas bumi suhu tinggi ( $>220^{\circ}\text{C}$ ) adalah yang paling sesuai untuk produksi listrik. Sistem Uap kering dan *flash steam* adalah sistem yang banyak digunakan secara luas untuk memproduksi listrik dari sumber panas bumi suhu tinggi [3-5]. Sistem uap kering menggunakan uap sumber panas bumi yang datang dari sumur produksi, dan berjalan secara langsung melewati turbin / generator untuk memproduksi listrik [2].

Sumber panas bumi suhu menengah, dimana temperatur berkisar antara  $100-220^{\circ}\text{C}$ , sampai sejauh ini jenis sumber panas bumi suhu menengah adalah yang paling umum ditemukan. Pembangkit listrik tipe *binary cycle* adalah teknologi yang paling umum digunakan untuk sumber panas bumi suhu menengah. Ada banyak variasi dari Pembangkit listrik tipe *binary cycle* diantaranya adalah *Organic Rankine Cycles (ORC)* dan *Kalina cycles* [5-15]. Pembangkit listrik tipe *binary cycle* berbeda dari sistem uap kering dan *flash sistem*, air atau uap dari sumber panas bumi tidak secara langsung melewati turbin/generator. Pada pembangkit listrik tipe *binary cycle* air dari sumber panas bumi digunakan untuk memanaskan fluida kerja, fluida kerja tersebut akan menguap dan uap itu akan digunakan untuk menggerakkan turbin/generator. Air dari sumber panas bumi dan fluida kerja tidak secara langsung bercampur tetapi hanya di lewatkan ke sebuah alat penukar kalor [2].

Di era sekarang ini, potensi untuk menghasilkan listrik menggunakan sumber panas bumi suhu rendah (terutama diantara  $70-100^{\circ}\text{C}$ ) sudah jarang ditemukan. Perluasan dari teknologi pembangkit listrik tipe *binary cycle* untuk memanfaatkan sumber panas bumi suhu rendah sudah menarik banyak perhatian [6-14]. Karena perbedaan temperature yang tersedia sangat rendah, efisiensi dari siklus (berkisar 5-9%) sangat rendah dibanding sumber panas bumi suhu menengah (berkisar 10-15%) [4]. Pada sistem suhu rendah, dibutuhkan tempat alat penukar kalor yang lebih besar dibandingkan dengan sistem suhu menengah pada jumlah energi yang sama. Faktor tersebut yang membatasi eksploitasi pada sumber panas bumi suhu rendah dan menekankan kepada perancangan yang sistem yang paling efektif dari pembangkit listrik tipe *binary cycle* [2].

Dalam sistem pembangkit listrik *Organic Rankine Cycle (ORC)*, panas dari panas bumi akan memanaskan fluida kerja organik (isopentane, isobutane, R134a, R123 dll) pada tekanan konstan, sehingga berubah menjadi uap dan uap akan memutar turbin/generator. Uap sisa keluaran turbin akan dikondensasi dan akan dipompakan kembali ke alat penukar kalor pembentuk uap untuk mengulangi kembali siklus yang ada. Komponen utama pada sistem pembangkit listrik *Organic Rankine Cycle (ORC)* adalah evaporator, turbin, kondensor, dan pompa [16].

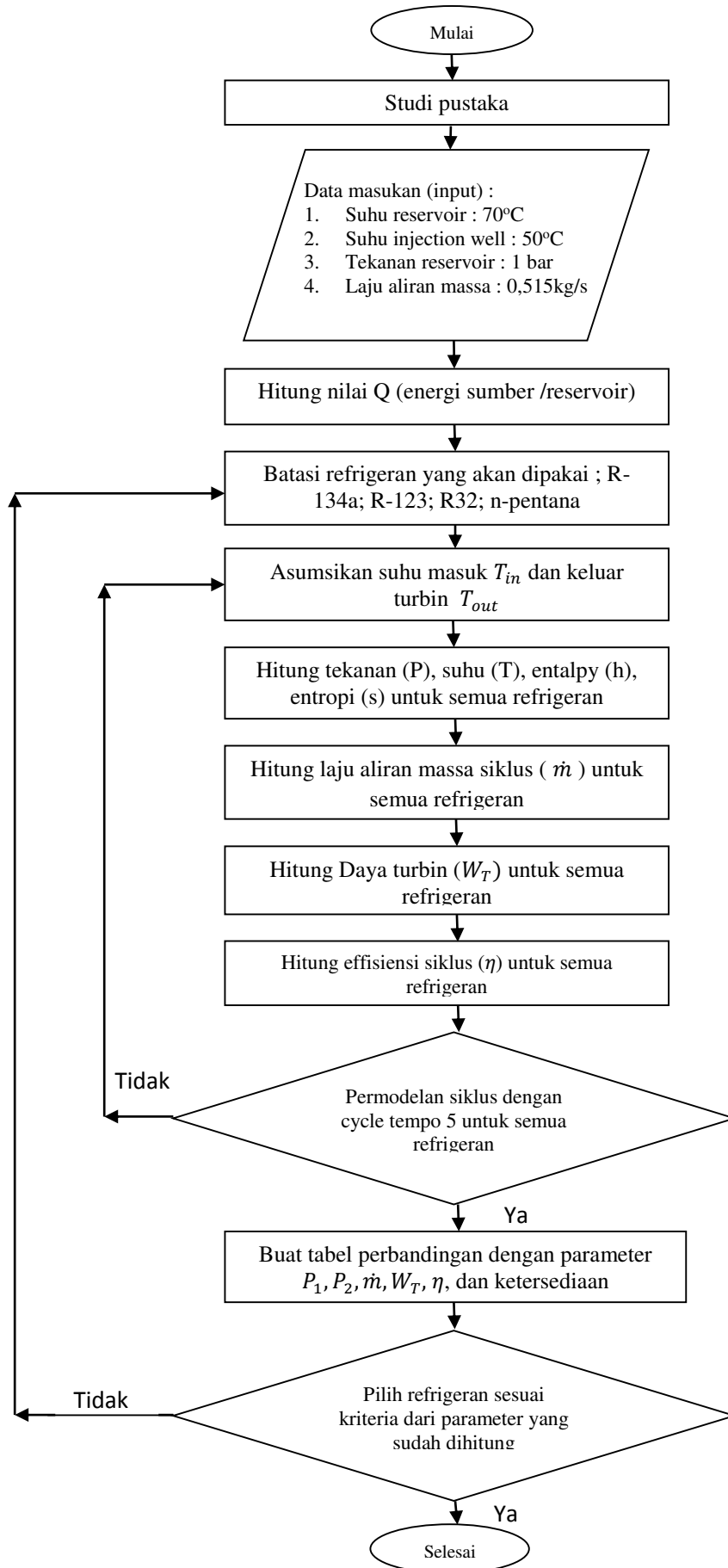
Sumber energi panas suhu rendah sangat melimpah di bumi. Mengubah energi panas bumi suhu rendah tersebut menjadi sebuah kerja yang efektif adalah salah satu cara untuk menghindari krisis energi [17]. Pada penelitian Bertani tentang perkembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi di seluruh dunia menghasilkan peningkatan 2GW selama 5 tahun dari 2005 – 2010 dan jika pembangkit listrik tenaga panas bumi suhu rendah dan menengah ditingkatkan maka kapasitas instalasi pembangkit listrik tenaga panas bumi akan meningkat 8,3% dari total produksi listrik dunia 2050 [18].

Oleh karena itu tujuan dalam penelitian ini adalah membuat sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi suhu rendah ( $70^{\circ}\text{C}$ ) dengan menggunakan sistem *ORC (Organic Rankine Cycle)* karena sistem *ORC (Organic Rankine Cycle)* sesuai untuk pemanfaatan sumber energi suhu rendah. Sistem akan dibuat dengan fluida kerja yang sudah ditentukan R134a, R123, R32, n-pentane dengan bantuan software *Cycle Tempo 5* dan *REFPROP 8*. Setelah sistem dibuat akan dilakukan proses desain evaporator dengan perhitungan manual serta menggunakan software *HTRI Xchanger Suite 6.0*.

## 2. Metodologi Desain

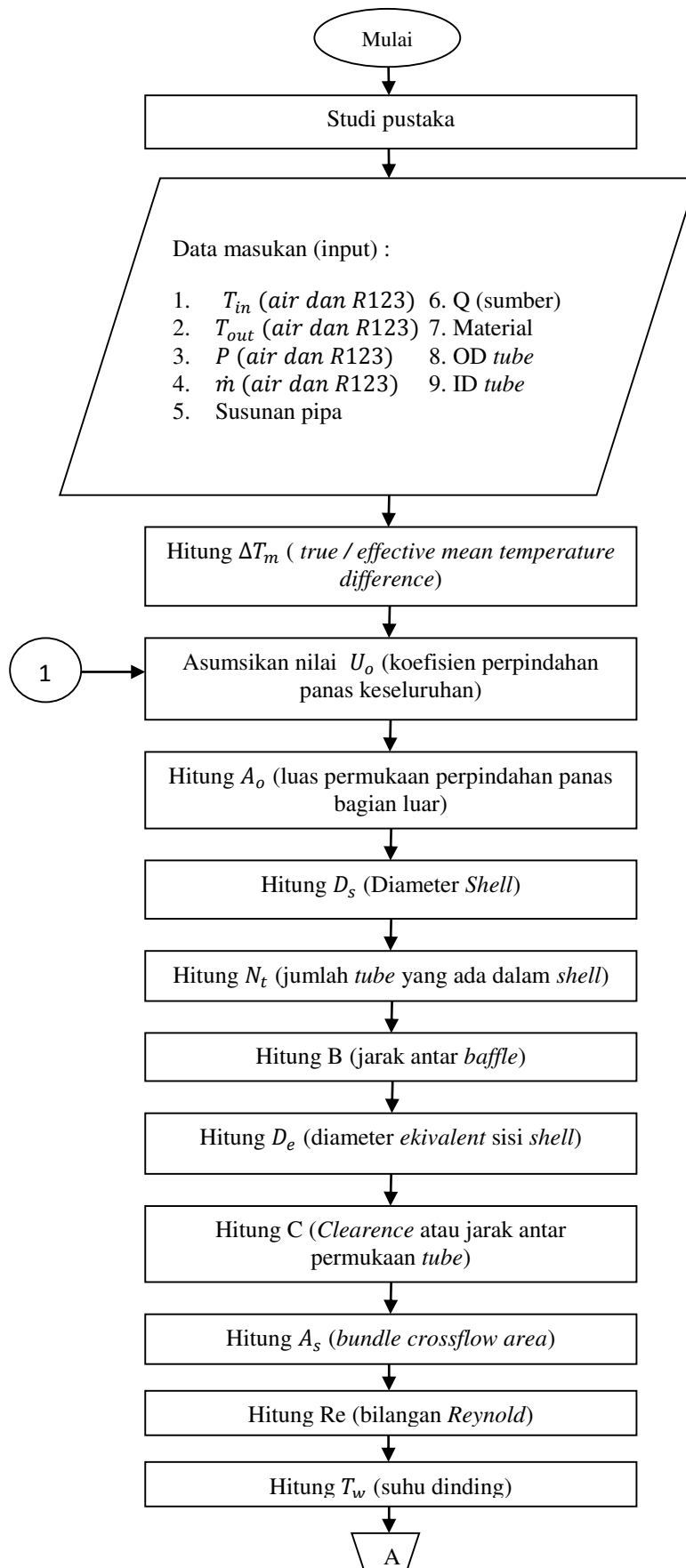
Pada penelitian akan dibuat sebuah sistem yang akan digunakan untuk menghasilkan listrik dari sumber panas bumi suhu rendah. Suhu yang digunakan adalah  $70^{\circ}\text{C}$  dan fluida yang digunakan memiliki fasa cair. Sistem yang akan dibuat adalah sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)*. Sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)* merupakan teknologi yang menjanjikan, melibatkan konversi panas dari berbagai sumber termasuk sumber energi yang dapat diperbaharui seperti matahari, panas bumi, biomassa, atau sisa panas dari sistem pembangkit. Sistem dari *Organic Rankine Cycle (ORC)* sama dengan konvensional *rankine cycle* perbedaannya terletak pada fluida kerja yang digunakan, *ORC* menggunakan *organic fluid* untuk menggantikan air yang digunakan pada sistem konvensional *rankine cycle*. Untuk selanjutnya proses pembuatan sistem dengan perhitungan manual dan software *Cycle Tempo* dapat dilihat pada Gambar 1

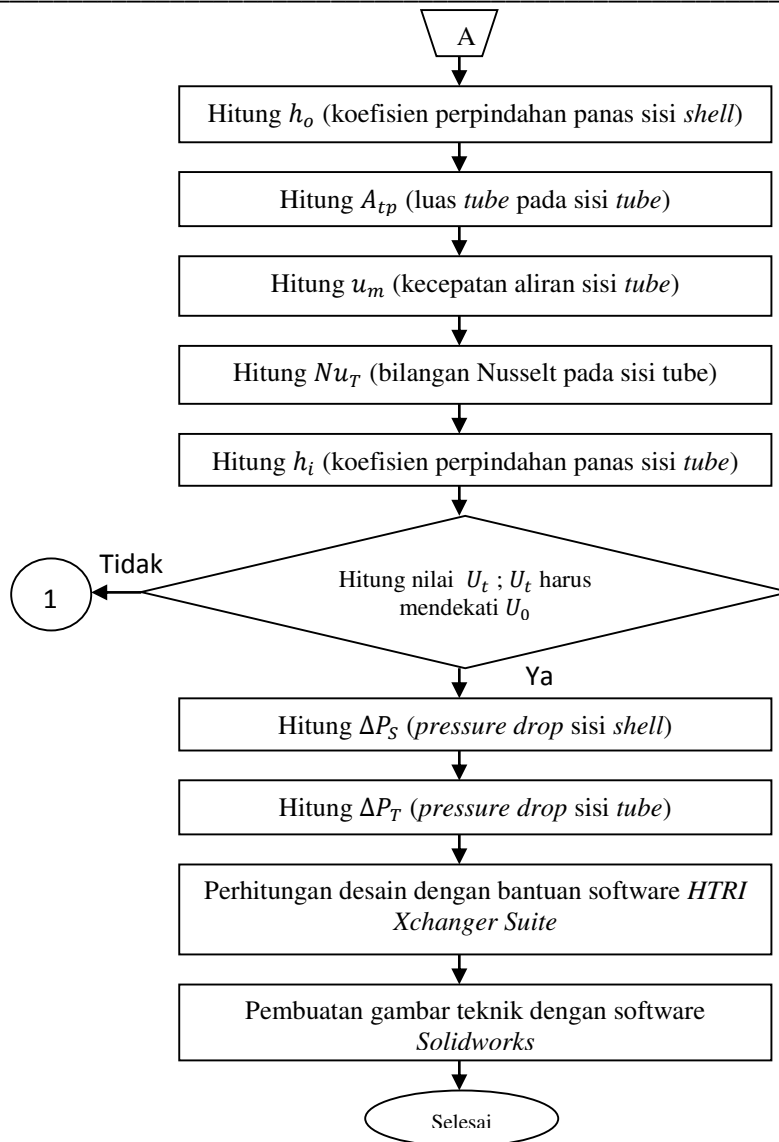
Setelah pembuatan sistem akan dilakukan pembuatan evaporator yang digunakan untuk mengubah fasa cair dari fluida kerja menjadi fasa uap agar dapat dilanjutkan prosesnya menuju turbin. Evaporator yang digunakan adalah alat penukar (evaporator) kalor jenis *shell and tube*. Alat penukar kalor tipe *shell and tube* disusun dari pipa lingkaran berukuran besar berbentuk cangkang (*shell*) dengan susunan pipa paralel didalam cangkang (*shell*) tersebut. Untuk selanjutnya proses pembuatan evaporator yang sesuai untuk sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)* yang sudah dibuat sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram alir pembuatan sistem

Setelah proses pembuatan sistem selesai dakan dibuat alat penukar kalor jenis shell and tube dengan langkah-langkah seperti pada Gambar 2





**Gambar 2.** Diagram alir pembuatan HE

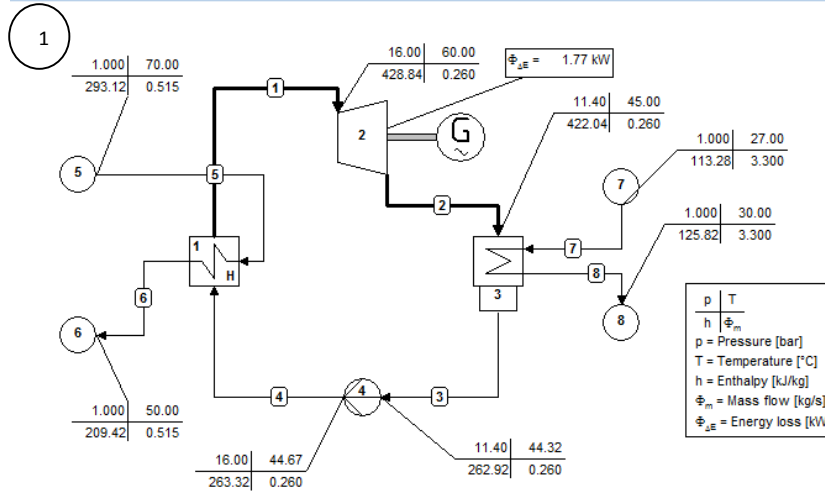
### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perbandingan refrigeran sebagai fluida kerja pada sistem *ORC* dalam tugas akhir ini hanya dibatasi dengan 4 refrigeran saja yaitu : R-134, R-123, R-32, dan *n-pentane*. Pada sistem ini proses penganalisaan dibantu dengan menggunakan perangkat lunak *Cycle Tempo* dan *REFROP*. Analisa yang dilakukan dengan cara membandingkan keempat refrigeran dengan temperature yang sama yaitu 60 °C (suhu masuk turbin) dan 45 °C (suhu keluar turbin). Berikut ini merupakan data masukan untuk membuat sistem *ORC* dengan fluida kerja yang telah ditentukan.

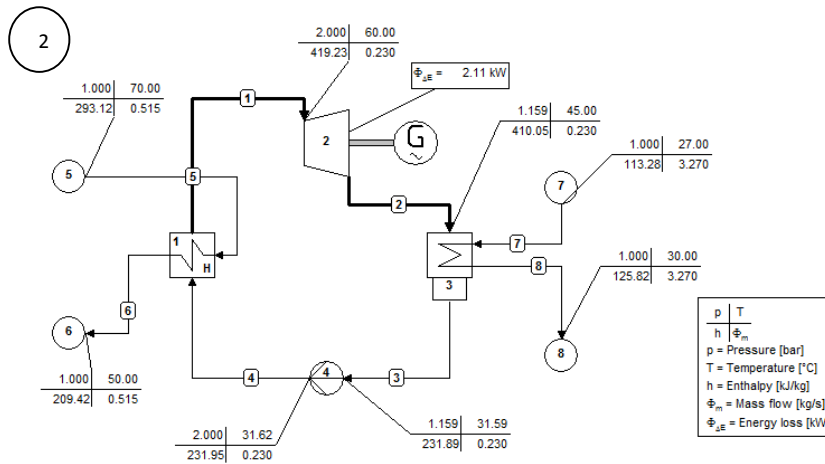
**Tabel 1.** Data Masukan (*input*)

Suhu <i>reservoir</i>	70°C
Laju aliran massa	0,515 kg/s
Tekanan	1 bar
Suhu masuk turbin	60°C
Suhu keluar turbin	45°C
Suhu masuk evaporator (Production Well)	70°C
Suhu keluar evaporator (injectionwell)	50°C

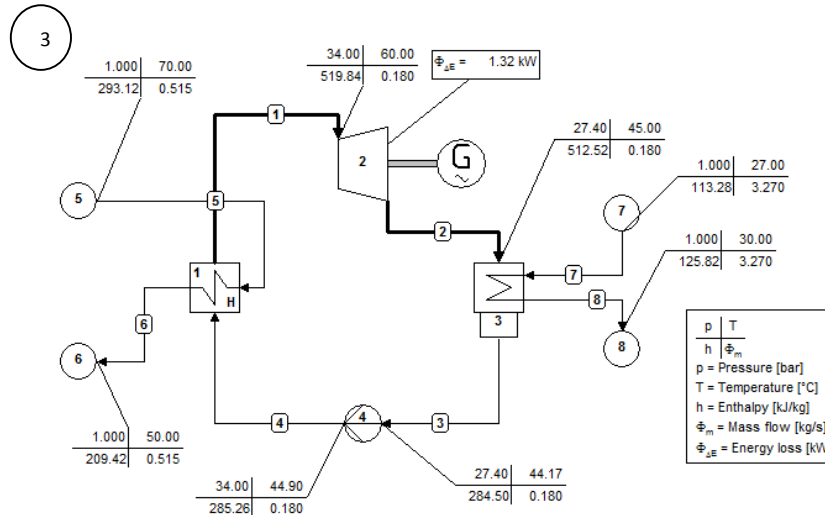
r-134a: Scheme

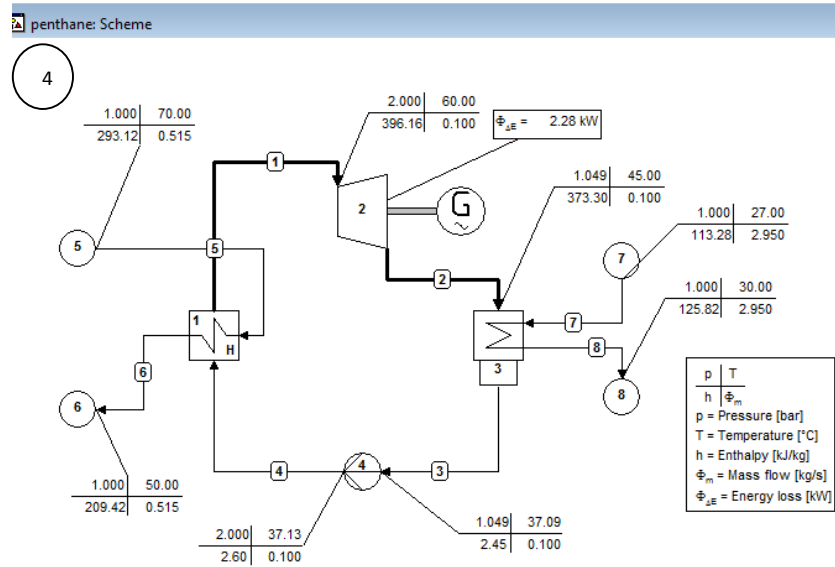


r-123: Scheme



r-32: Scheme





**Gambar 3.**Perbandingan refrigeran (1) R 134, (2) R 123, (3) R 32, (4) *n-pentane* menggunakan *software cycle tempo*.

Dari semua analisa keempat refrigeran (R-134, R-123, R-32 dan *n-pentane*) dengan suhu masuk turbin yaitu,  $T_{in} = 60^{\circ}\text{C}$  dan suhu keluar turbin,  $T_{out} = 45^{\circ}\text{C}$ , maka didapat Tabel 2 hasil perbandingan keempat refrigeran tersebut.

**Tabel 2.** Perbandingan Refrigeran Dengan Suhu Masuk Turbin  $60^{\circ}\text{C}$  Dan Keluar  $45^{\circ}\text{C}$

No	Refrigerant	$P_1$ (bar)	$P_2$ (bar)	$\dot{m}$ (kg/s)	W (kW)	Effisiensi (%)
1	R134a	16	11,397	0,26	1,7	4
2	R123	2	1,1592	0,23	2,1	5
3	R32	34	27,402	0,18	1,33	2
4	n-pentane	2	1,0499	0,10	2,28	5

Dari Tabel 2 diambil R-123 untuk sistem, karena refrigeran tersebut memiliki:

- Tekanan relative kecil serta pemasangan komponen, ijin lebih mudah dan biaya lebih murah.
- Daya yang dihasilkan relative tinggi daripada refrigeran lain.
- Mudah didapatkan dibanding refrigeran lain.
- Memiliki daya tahan yang lebih pendek pada atmosfer.

### 3.1 Desain Alat Penukar Kalor Jenis *Shell and Tube*

**Tabel 3.** Data Masukan Untuk Desain Evaporator

Hot Fluid ( Water ) $T_{in} = 70^{\circ}\text{C} = 343 \text{ K}$ $T_{out} = 50^{\circ}\text{C} = 323 \text{ K}$ $P = 1 \text{ bar}$ $m = 0,515 \text{ kg}$ $Q = 43,12 \text{ kW}$ $T_{av} = \frac{343+323}{2} = 333 \text{ K}$ Didapatkan properties fluida (REFPROP8) :	Cold Fluid ( R-123) $T_{in} = 31,605^{\circ}\text{C} = 304,605 \text{ K}$ $T_{out} = 60^{\circ}\text{C} = 333 \text{ K}$ $P = 2 \text{ bar}$ $m = 0,23 \text{ kg}$ $Q = 43,12 \text{ kW}$ $T_{av} = \frac{304,605+333}{2} = 318,8025 \text{ K}$ Didapatkan properties fluida (REFPROP8) :
--	--

$\rho = 983,27 \frac{kg}{m^3}$ $c_p = 4,1849 \text{ KJ/kg.K}$ $\mu = 0,00046745 \text{ Pa.s}$ $k = 0,65424 \text{ W/m.K}$ $Pr = 2,9901$ TEMA Design Fouling Resistant for water, $R_f : 0,000352 \text{ m}^2\text{K/W}$	$\rho = 1409,7 \frac{kg}{m^3}$ $c_p = 1,0459 \text{ KJ/kg.K}$ $\mu = 0,00033123 \text{ Pa.s}$ $k = 0,070898 \text{ W/m.K}$ $Pr = 4,8864$ TEMA Design Fouling Resistant for industrial fluid, untuk refrigerant liquid $R_f : 0,000176 \text{ m}^2\text{K/W}$
---	---

**Ukuran standard tube** yang akan dipakai :

OD :  $\frac{3}{4}$  in ; BWG : 16

Spesifikasinya dalam satuan SI :

Outlet Diameter (OD) : 0,01905 m

Thickness : 0,001651 m

Inlet Diameter (ID) : 0,015748 m

#### Material

*Shell* : Carbon Steel, properties dari material adalah

$\rho = 7800 \frac{kg}{m^3}$  ;  $c_p = 0,47 \text{ KJ/kg.K}$  ;  $k = 43 \text{ W/m.K}$

*Tube* : Copper ( tembaga ), properties dari material adalah

$\rho = 8950 \frac{kg}{m^3}$  ;  $c_p = 0,38 \text{ KJ/kg.K}$  ;  $k = 350 \text{ W/m.K}$

**Arah perpindahan panas = Counterflow (berlawanan arah)**

**Pitch ratio** ( Pt/do ) = 1.25

Pt = 0,024 m

**Tube layout angle** =  $45^\circ$

Tube layout constant (CL) = 1,0

**Passage** = 2 pass

Karena menggunakan 2 pass maka :

Tube count calculation constant (CTP) = 0,90

#### Baffle

Menggunakan *Single-segmental baffle*

*Baffle cut* 25%

Dari data masukan Tabel 3 didapatkan desain evaporator dengan perhitungan manual dan dengan menggunakan software *HTRI Xchnager Suite 6.0* didapatkan panjang shell ( $l$ ) 2 m, jumlah tube ( Nt ) 322, passage 2 Pass, tube layout  $45^\circ$  triangular, jarak antar baffle 0,2096 m, diameter shell 0,524 m, OD tube 0,01905 m, ID tube = 0,015748 m, jarak antar tube (Pt) 0,024 m, pressure drop shell dan tube  $\Delta P_s = 4,688 \text{ Pa}$  dan  $\Delta P_t = 5,175 \text{ Pa}$ . Pada Tabel 4 diuraikan perbandingan antara nilai perhitungan manual dan nilai pada software *HTRI Xchanger Suite 6.0*.

**Tabel 4.** Perbandingan variable desain *heat exchanger* jenis *shell and tube*

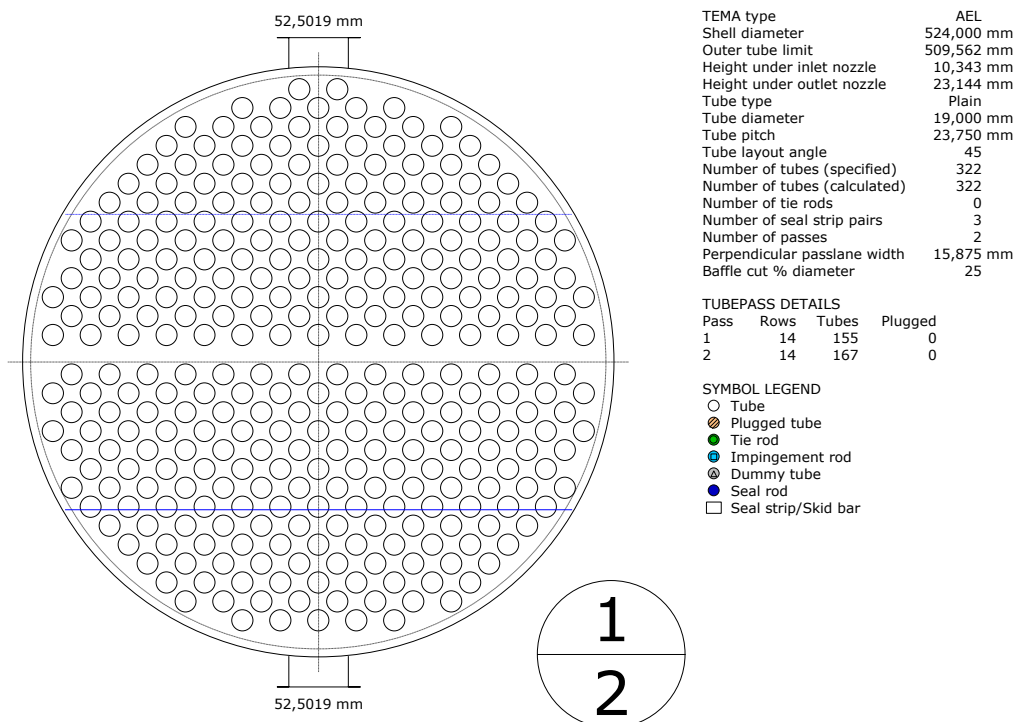
No	Parameter	Nilai perhitungan manual	<i>HTRI Xchanger Suite 6.0</i>
1	Panjang ( $l$ )	2 m	2 m
2	Diameter Shell (Ds)	0,524 m	0,524 m
3	Jumlah Tube (Nt)	322	322
4	Overall Heat Transfer (U)	86 W/m <sup>2</sup> .K	84,38 W/m <sup>2</sup> .K

Pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 ditunjukkan hasil dari perhitungan menggunakan software *HTRI Xchanger Suite 6.0* yang berupa sebuah gambar teknik 2D, 3D dan keterengannya.

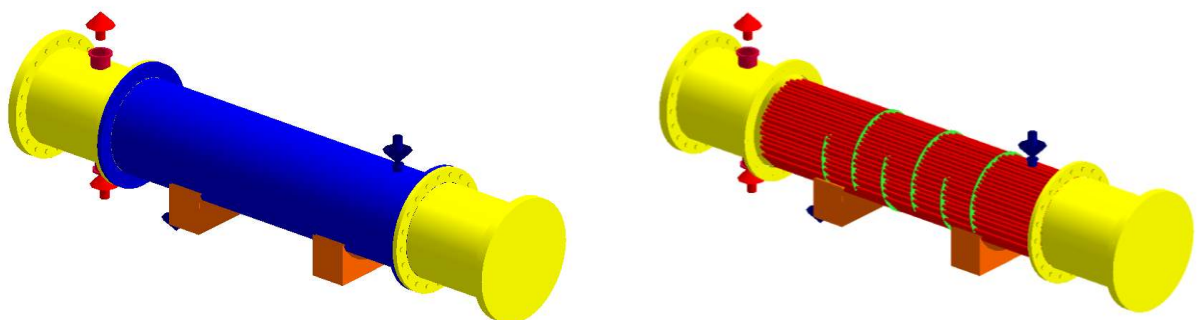




Gambar 4. Tube layout dan Shell (2D)



Gambar 5. Tube layout dan Shell (2D)



Gambar 6. Shell dan Tube layout (3D)

#### 4. Kesimpulan

Dari permasalahan yang sudah diketahui telah dibuat sebuah siklus *Organic Rankine Cycle (ORC)* dengan menggunakan analisis manual serta modeling dan validasi oleh perangkat lunak pendukung yaitu *Cycle Tempo* dan *REFROP*. Adapun fluida kerja organik yang digunakan yaitu R-123, R-134, R-32 dan *n-pentane*. Hasil analisis dari sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)* telah didapat jenis refrigeran yang sesuai untuk digunakan pada sistem *ORC*

tersebut yaitu dengan fluida organik R-123. Karena refrigeran tersebut memiliki tekanan relatif kecil, daya relatif tinggi dari refrigeran lainnya, efisiensi relatif tinggi dibanding refrigeran lainnya, serta pemasangan komponen, ijin yang lebih mudah dan biaya lebih murah, dan mudah didapatkan dibanding refrigeran lain. Desain evaporator dengan perhitungan manual dan dengan menggunakan software *HTRI Xchnager Suite 6.0* didapatkan panjang shell ( $L$ ) 2 m, jumlah tube ( $N_t$ ) 322, passage 2 Pass, tube layout  $45^\circ$  triangular, jarak antar baffle 0,2096 m, diameter shell 0,524 m, OD tube 0,01905 m, ID tube = 0,015748 m, jarak antar tube (Pt) 0,024 m, pressure drop shell dan tube  $\Delta P_s = 4,688$  Pa dan  $\Delta P_t = 5,175$  Pa.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] Astolfi M., Romano M.C., Bombarda P., Macchi E, 2013, “*Binary ORC (organic Rankine cycles) power plants for the exploitation of medium low temperature geothermal sources e Part A: Thermodynamic optimization*”, Italy : Elsevier-Journal of Energy
- [2] Madhawa H.D., Mihajlo G., William M.W., Yasuyuki I, 2006, “*Optimum design criteria for an Organic Rankine Cycle using low-temperature geothermal heat sources*”, USA dan Japan: Elsevier-Journal of Energy
- [3] Barbier E., 1997, “*Nature and technology of geothermal energy: a review. Renewable Sustainable Energy*”, 1(1–2):1–69.
- [4] Barbier E., 2002, “*Geothermal energy technology and current status: an overview. Renewable Sustainable Energy*”, 6:3–65.
- [5] Brown G., 2002, “*Geothermal energy. In: Boyle G, editor. Renewable energy—power for a sustainable future*”, Oxford: Oxford University Press, p. 353–92.
- [6] Liu B.T., Chien K., Wang C., 2002, “*Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery*”. 29:1207–17.
- [7] Mohanty B., Paloso G., 2002, “*Economic power generation from low-temperature geothermal resources using organic Rankine cycle combined with vapour absorption chiller*”, Heat Recovery Syst CHP . 12(2):143–58.
- [8] Tamamoto T., Furuhashi T., Arai N., Mori K., 2001, “*Design and testing of the Organic Rankine cycle*”, 26:239–51.
- [9] Hung T.C., 2001, “*Waste heat recovery of Organic Rankine cycle using dry fluids*”, 42:539–53.
- [10] Badr O., O’Callaghan P.W., Probert S.D., 1990, “*Rankine-cycle systems for harnessing power from low-grade energy sources*”, Appl Energy. 36(4):263–92.
- [11] Kalina A.I., Leibowitz H.M., 1989, “*Application of the Kalina Cycle Technology to geothermal power generation*”, Geothermal Resour Council Trans. 13:605–11.
- [12] Desideri U., Bidini G., 1997, “*Study of possible optimization criteria for geothermal power plants*”, Energy Convers Manage. 38(15–17):1681–91.
- [13] Hung T.C., Shai T.Y., Wang S.K., 1997, “*A review of Organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat*”, Energy. 22(7):661–7.
- [14] Subbiah S., Natarajen R., 1988, “*Thermodynamic analysis of binary-fluid Rankine cycles for geothermal power plants*”, Energy Convers Manage. 28(1):47–52.
- [15] Uehara H., Ikegami Y., 1990, “*Optimization of a closed-cycle OTEC plant system*”, J Solar Eng . 112:247–56.
- [16] Gazo F., Lind L., 2010, “*Low Enthalpy Geothermal Energy – Technology Review*”, GNS Science Report 2010/20. 58p.
- [17] DiPippo R., 2005., “*Geothermal power plants: principles, applications and case studies*”, 3rd ed. Elsevier Science
- [18] Bertani R., 2010., “*Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. Geothermics 2012*”, 41:1–29..