

## IDENTIFIKASI DAN ANALISA REFRIGERANT SEBAGAI FLUIDA KERJA SIKLUS RANKINE ORGANIK UNTUK APLIKASI DI INDONESIA

### (IDENTIFICATION AND ANALYSIS REFRIGERANT AS WORKING FLUID ORGANIC RANKINE CYCLE FOR INDONESIA APPLICATION)

Candra Bachtlyar<sup>1</sup> dan Himsar Ambarita<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknologi Mekanik Industri-Pendidikan Teknologi Kimia Industri Medan, Jln. Medan Tenggara VII Medan, 20228, Telp. (061) 7867810, Fax, (061) 7862439.

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin-Universitas Sumatera Utara, Jln. Almamater Kampus USU, 20155, Telp. (061) 8214033, Fax, (061) 8211822, candra-b@kemenperin.go.id

#### ABSTRAK

Siklus Rankine Organik (ORC) dapat digunakan dalam menghasilkan listrik dari sumber panas temperatur rendah seperti panas terbuang mesin dan panas bumi. Pemilihan fluida kerja merupakan salah satu kunci dalam pengembangan ORC. Pada studi ini fluida kerja diidentifikasi berdasarkan kriteria sifat termodinamika, aspek keamanan dan ketersediaan di Indonesia. Fluida kerja yang terpilih akan disimulasikan menggunakan skema ORC sederhana dalam upaya melakukan evaluasi unjuk kerja. Simulasi dilakukan berdasarkan kondisi Indonesia dengan temperatur kondensator dipilih tetap 35 °C dan temperatur evaporator divariasikan 70 °C, 80 °C dan 90 °C. Hasil identifikasi dari 56 kandidat *refrigerant*, hanya R 134a, R 236fa, R 23, R 404A, R 407C dan R 410A yang memenuhi kriteria. Diantara *refrigerant* yang sesuai kriteria, R 236fa menghasilkan efisiensi terbaik. Studi ini diharapkan memberikan informasi penting dalam pengembangan ORC di Indonesia.

**Kata kunci:** fluida kerja organik, refrigerant, siklus Rankine organik, sistem pembangkit uap, sumber panas temperatur rendah

#### ABSTRACT

*Organic Rankine Cycle (ORC) can be utilized to produce electricity from low grade heat sources such as waste heat and geothermal water. The selection of the working fluids is one of the main key in developing an ORC. In the present study, working fluids have been identified based on thermodynamic properties, environment safety criteria and availability in Indonesia market. The selected working fluids are simulated in a simple ORC in order to evaluate the cycle performance. The simulations are carried out for the typical Indonesian conditions. The condensation temperature was fixed at 35 °C and evaporation temperature was varied 70 °C, 80 °C, and 90 °C. The result reveals that from 56 identified refrigerants, R 134a, R 236fa, R 23, R 404A, R 407C, and R 410A meet the criterions. Among those R 236 fa shows the best efficiency. This study is expected to give the usefull information to develop ORC in Indonesia.*

**Keywords:** organic working fluid, refrigerant, organic Rankine cycle, power generation, low grade heat source

#### PENDAHULUAN

Pada dekade terakhir ini, perhatian terhadap kondisi lingkungan menjadi topik utama diseluruh dunia. Meningkatnya konsumsi bahan bakar fosil diduga menjadi penyebab utama masalah lingkungan seperti pemanasan global, penipisan lapisan ozon dan polusi udara. Banyak negara telah menetapkan target untuk menurunkan emisi karbon guna mengurangi efek buruk pemanasan global. Pemerintah Indonesia menargetkan akan mengurangi emisi karbon hingga 26% sampai tahun 2020. Mengurangi emisi karbon berarti mengurangi konsumsi energi fosil dan melakukan efisiensi energi. Salah satu langkah yang sedang

dilakukan pemerintah adalah meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan sampai dengan 17% pada tahun 2025 (Perpres No. 5, 2006).

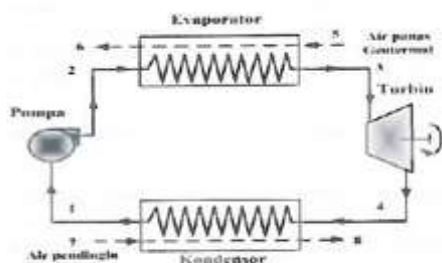
Pemanfaatan panas yang telah tersedia di alam atau panas yang terbuang dari mesin industri dapat dijadikan sebagai alternatif sumber energi baru. Indonesia mempunyai banyak sumber panas yang belum dimanfaatkan, antara lain energi surya dan panas bumi. Dari energi surya, bagian barat Indonesia mendapat rata-rata radiasi sebesar 16,2 MJ/m<sup>2</sup> setiap hari dan bagian timur 18,36 MJ/m<sup>2</sup> (KESDM, 2010). Salah satu cara memanen energi ini adalah dengan

menggunakan solar kolektor termal. Selain itu, Indonesia juga mempunyai potensi sumber panas bumi sebesar 27,3 GW, tetapi sebagian besar mempunyai kualitas uap rendah dengan kandungan air sekitar 35%, temperatur uapnya sekitar 80 °C-170 °C. Sumber panas lainnya yang dapat dimanfaatkan adalah panas terbuang dari mesin-mesin industri. Sejah penelusuran yang telah kami lakukan, belum dijumpai data yang menyebutkan potensi dari panas buang mesin-mesin industri di Indonesia. Sebagai perbandingan, laporan *Energy Conservation Center of Japan* menyebutkan panas buang dari industri di Jepang mencapai 1,1 Exajoule/tahun atau setara dengan 70% konsumsi energi untuk bangunan komersial dan rumah tangga per tahun. Sekitar 85% dari panas buang ini mempunyai temperatur lebih dari 100 °C (Nasu, 1997). Diyakini Indonesia juga mempunyai persentase yang tidak jauh berbeda dengan Jepang.

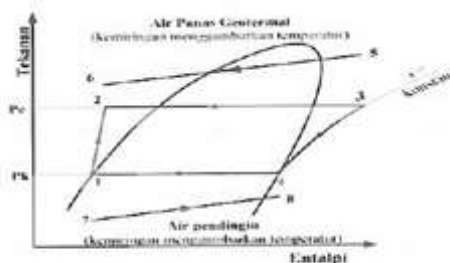
Fakta-fakta di atas menunjukkan bahwa tersedia sumber panas yang belum dikelola yang dapat dijadikan sebagai sumber energi alternatif. Meskipun jumlahnya sangat besar, sumber ini mempunyai temperatur rendah (umumnya kurang dari 220 °C). Sehingga,

siklus Rankine konvensional tidak dapat diaplikasikan untuk mengkonversikannya menjadi listrik. Pada penelitian ini diusulkan pemanfaatan panas temperatur rendah menggunakan siklus Rankine Organik (*Organic Rankine Cycle, ORC*) dalam menghasilkan listrik ramah lingkungan. Komponen utama ORC adalah evaporator, turbin, pompa, kondensator, dan fluida kerja (Lee, 1998). *Refrigerant* digunakan sebagai fluida kerja pengganti air karena titik didihnya yang rendah (sudah mendidih pada temperatur di bawah 50 °C).

Pemilihan fluida kerja organik adalah salah satu kunci utama pengembangan ORC. Performansi ORC sangat tergantung pada pemilihan fluida kerja. Penelitian ini akan menunjukkan langkah pemilihan fluida kerja ORC khusus untuk aplikasi di Indonesia dengan tujuannya adalah memberikan informasi yang akurat tentang *refrigerant* yang tersedia jika digunakan sebagai fluida kerja ORC. Hasil penelitian ini diharapkan dapat merangsang pengembangan ORC di Indonesia yang akhirnya memberikan sumbangan pemenuhan target pemerintah akan penggunaan energi terbarukan 17% pada tahun 2025. Skema ORC sederhana ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Skema ORC sederhana



Persamaan yang digunakan untuk menunjukkan tingkat keadaan (*phase*) dari komponen pembangun ORC ditunjukkan sebagai berikut.

**Tingkat keadaan pompa (1-2)**

Pada proses ini berlangsung kompresi isentropik oleh pompa. Besarnya daya pompa dan efisiensi pompa dalam kondisi isentropik ditunjukkan oleh persamaan

$$W_p = m_w (h_2 - h_1) \quad (1)$$

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

**Tingkat keadaan evaporator (2-3)**

Proses selanjutnya adalah pemanasan fluida kerja yang berlangsung pada tekanan konstan di evaporator. Besarnya panas yang diserap oleh fluida kerja ditunjukkan oleh persamaan

$$Q_E = m_{ref} (h_3 - h_2) \quad (3)$$

### Tingkat keadaan turbin (3-4)

Proses yang terjadi pada turbin adalah ekspansi isentropis. Besarnya daya yang dapat dibangkitkan turbin pada ORC untuk menghasilkan listrik dan efisiensi turbin pada kondisi isentropik ditunjukkan oleh persamaan

$$W_T = m_{ref} (h_3 - h_4) \eta_{mekanik} \quad (4)$$

$$\eta_{isentropikTurbin} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4is}} \quad (5)$$

### Tingkat keadaan kondensator (4-1)

Pada kondensator terjadi proses pelepasan panas atau pendinginan fluida kerja. Fluida kerja ORC didinginkan sampai dengan *phase* cair pada proses ini. Selain itu, *phase* ini berlangsung pada tekanan konstan dengan besarnya panas yang dilepaskan ditunjukkan oleh persamaan

$$Q_C = m_{ref} (h_4 - h_1) \quad (6)$$

Dimana besarnya efisiensi teoritis dari ORC dihitung menggunakan persamaan

$$\eta_{th} = \frac{W_{neto}}{Q_{in}} = \frac{[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)]}{(h_3 - h_2)} \quad (7)$$

Bila kerja pompa  $W_p$  jauh lebih kecil daripada daya yang dibangkitkan turbin, maka  $W_p$  dapat diabaikan. Jika proses 1-2 berlangsung secara kompresi isentropik maka persamaan  $(h_3 - h_2)$  pada persamaan 5 dapat digantikan dengan  $(h_3 - h_1)$  sehingga persamaan efisiensi dapat diubah menjadi

$$\eta_{th} = \frac{[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)]}{(h_3 - h_2)} \cong \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_1)} \quad (8)$$

## BAHAN DAN METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini berupa studi literatur, bersumber dari sekitar 20 buah *paper* yang dipublikasikan di jurnal internasional dan mempunyai *impact factor* tinggi pada periode 1996-2010. Hal ini diharapkan akan memberikan data yang terpercaya dan terbaru. Identifikasi fluida kerja organik yang dapat

diaplikasikan dalam skema ORC didasarkan atas 5 (lima) kriteria yaitu sifat termofisik, aspek lingkungan, aspek keamanan, unjuk kerja (operasi) dan ketersediaan di Indonesia dengan parameter setiap kriteria ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria fluida kerja ORC

Kriteria	Parameter
Sifat termofisik	Massa jenis, panas penguapan, kapasitas panas, kekentalan, konduktivitas panas, titik lebur, temperatur kritis, tekanan kritis
Aspek lingkungan	Ozone depletion potential (ODP), Global warming potential (GWP), Atmosfor life time
Aspek keamanan	Toxicity, flammability
Unjuk kerja (Operasi)	Efisiensi, tekanan kerja maksimum, tekanan minimum, laju aliran massa, pinch point, capacity
Ketersediaan di pasar	Jenis refrigerant di pasar Indonesia

Langkah yang ditempuh dalam penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Metodologi penelitian



Identifikasi fluida kerja ORC, baik dari *paper* simulasi maupun eksperimen selanjutnya ditabulasikan berdasarkan kriteria sifat termofisik, aspek lingkungan dan aspek keamanan yang ditunjukkan dalam Tabel 2. Kriteria ketersediaan *refrigerant* di pasar Indonesia didapatkan dari internet dengan menghubungi produsen *refrigerant* dan toko *online* serta distributor yang selanjutnya dibandingkan dengan Tabel 2 untuk

menentukan kandidat *refrigerant* yang dapat diaplikasikan di Indonesia. Analisa yang dilakukan menggunakan skema ORC sederhana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan sumber panas sebagai contoh dari panas bumi. Selanjutnya dilakukan perhitungan berdasarkan sifat termodinamika dan divalidasi dengan hasil penelitian lainnya, kemudian dilakukan penarikan kesimpulan.

Tabel 2. Data sifat termofisik, keamanan, dan aspek lingkungan fluida kerja organik

Fluida Kerja	Sifat Termofisik				Aspek lingkungan			Aspek Keamanan
	MR (Kg/Kmol)	Boiling Point (°C)	Temperatur kritis (°C)	Tekanan kritis (bar)	ODP	GWP (100 yr)	Atmosfer life time (yr)	Kode ASHRAE
Methane	16,04	-161	-82,52	46	0	23	12	A3
Ethane	30,07	-89	32,28	48,84	0	20	na	A3
HCFC 23	70,01	-82,1	25,9	48,4	0	12000	260	A1
CO2	44,01	-78,4	31,1	73,8	0	1	na	A1
CH3F	34,03	-78,1	44,1	59	0	97	2,6	na
CF3CF3	138,01	-78,02	19,9	30,4	0	11900	10000	A1
CH2F2	52,02	-52	78,2	58	0	550	5	A2
HFC 32/ HFC 125 (50/50)	72,58	-51,6	72,5	49,5	0	2000	na	A1
HCFC 22/ HFC 125/ HC 290 (38/60/2)	101,55	-49,2	76	42,3	0,013	2700	na	A1
HFC 125	120,02	-49	86,18	36,3	0	3400	29	A1
Propylene	42,08	-47,7	92,4	48,7	0	20	na	A3
HFC 143a	84,04	-47,4	72,9	37,64	0	4300	52	A2
HCFC 22/HFC 125/HC 2907 (60/38/2)	94,71	-47,2	83	45,3	0,02	2300	na	A1
HFC 125/ HFC 143a/ HFC 134a (44/52/4)	97,6	-46,6	72,1	37,4	0	3800	na	A1
CFC 115/HCFC 22 (51/49)	111,63	-45,3	80,7	40,2	0,221	4500	na	A1
HFC 32/ HFC 125a/HFC 143a (23/25/52)	86,2	-43,8	87,3	46,3	0	1700	na	A1
Propane	44	-42	96,67	42,5	0	20	0,041	A3
HCFC 22	86,47	-40,8	96,2	49,9	0,034	1700	11,9	A1
Perfluoropropane	188,02	-37	71,69	26,6	0	8600	2600	A1
HCFC 22/HCFC 124/ HFC 152a (61/28/11)	92,84	-36,7	103,5	46,8	0,028	1200	na	A1
HCFC 22/ HCFC 124/ HCFC 142b (60/25/15)	97,43	-35,4	106,9	46,9	0,039	1500	na	A1
HCFC 22/HCFC 124/ HFC 152a (53/34/13)	94,44	-34,4	105,3	46,1	0,027	1100	na	A1
CFC 12/ HFC 152a (73,8/ 26,2)	99,3	-33,6	102,1	41,7	0,616	7900	na	A1
Cyclopropane	42,08	-33,5	125,2	55,8	0	na	na	A1

Fluida Kerja	Sifat Termofisik				Aspek lingkungan			Aspek Keamanan
	MR (Kg/Kmol)	Boiling Point $^{\circ}$	Temperatur kritis $^{\circ}$	Tekanan kritis (bar)	ODP	GWP (100 yr)	Atmosphere life time (yr)	Kode ASHRAE
Cyclopropane	42,08	-33,5	125,2	55,8	0	na	na	A1
Amoniak	17,03	-33,3	132,3	113,4	0	<1	0,01	B2
CFC 12	120,91	-29,8	112	41,14	0,82	10500	100	A1
HFC 134a	102,03	-26,1	101,1	40,6	0	1300	13,8	A1
Dimethyl ether	46,07	-24,8	126,85	53,2	0	1	0,015	na
Methyl Chloride	50,48	-24,2	143,1	66,7	0,02	16	1,3	B2
HFC 152a	66,05	-24	113,3	45,2	0	120	1,4	A2
CF3I	195,91	-21,8	123,29	39,53	0	1	<0,1	na
CF3CHCF3	170,03	-15,81	102,8	29,8	0	3500	33	na
HCFC 124	136,47	-13,19	122,28	36,24	na	na	Na	A1
Iso butane	58,12	-11,7	134,7	36,4	0	20	0,019	A3
HCFC 142b	100,5	-9	137,2	41,23	0,043	2400	19	A2
C4F8	200,03	-6	115,2	27,8	0	10.000	3200	A1
Hexafluoro propane	152,04	-1,4	124,9	32	0	9400	220	A1
n Butane	58,12	-0,5	152	38	0	20	0,018	A3
CFC 14	170,92	3,6	145,7	32,6	0,85	9800	300	A1
CHF2-O-CHF2	118,03	6,2	160,8	42,3	0	6100	26,2	na
R 236 ea	152,04	6,2	139,3	35,03	na	1200	Na	A1
HCFC 21	102,92	8,9	178,3	51,8	0,01	210	2	B1
Ethyl chloride	64,5	13,1	187,2	52,67	0	na	<1	na
HFC 245fa	134,05	15,1	154,1	44,3	0	950	7,2	A1
CFC 11	137,37	23,82	198,05	44,67	1	4600	45	A1
HCFC 123	152,93	27,8	183,8	36,68	0,012	120	1,4	B1
HCFC 141b	116,95	32	204,2	42,5	0,086	700	9,3	na
Diethyl ether	74,12	34,6	214	80	0	na	na	na
C5H12	72,15	36	196,6	33,7	0	11	<<1	A3
CFC 113	187,37	47,6	214,1	33,9	0,9	6000	85	A1
Methanol	32,04	64,4	240,2	81,04	na	na	na	na
Ethanol	46,07	78,4	240,8	61,48	na	na	na	na
Cyclohexane	84,16	80,7	280,39	40,73	na	na	na	A3

MR = Molekul Mass, BP = Boiling Point, ODP = Ozon Depleting Potential, GWP = Global Warming Potential, Na = Not available

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan identifikasi fluida organik yang telah dilakukan terdapat 56 kandidat fluida ORC.

Khusus *refrigerant* sebagai fluida kerja ORC telah dievaluasi oleh beberapa peneliti baik melalui eksperimen maupun simulasi seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Identifikasi *refrigerant* sebagai fluida ORC oleh berbagai peneliti

Jumlah Peneliti	Refrigerant	Sumber panas	$T_{max}$ (°C)	Efisiensi (%)	$P_{max}$ (Bar)	$P_{min}$ (Bar)	$\dot{m}$ (kg/s)	Kapasitas (KW)
13	601	Geo	100	12,91	5,963	0,828	16,331	1000
10	123	Low Temp	137	13,08	17,65	4,54	na	na
8	134a	Geo	67,75	7,74	20	7,22	68,55	1000
	600a	Geo	100	12,12	19,98	4,038	20,43	1000
7	600	Solar	145	14,13	34	4	na	na
	245fa	Geo	100	12,52	12,67	1,801	33,424	1000
	113	Waste heat	199	20,13	28,2	0,54	na	na
5	290	Geo	100	5,91	20	10,79	48,776	1000
	717	Waste heat	145	12,1	39	10,03	0,93	161,6
	236ea	Solar	132,2	13,67	30	3	na	na
	141b	Waste heat	145	31,91	4,4	0,79	4,86	155,17
4	32	Solar	75	2,611	54,17	21,9	0,212	2
	152a	Geo	100	8,82	20	6,88	38,503	1000
	Cyclohexane	Solar	75	4,609	0,84	0,2	0,098	2
3	170	Geo	100	9,38	20	6,733	63,068	1000
	125	Geo	100	2,32	20	15,64	400,37	1000
	143a	Geo	100	3,14	20	14,4	197,92	1000
	C 318	Solar	109,7	11,53	52,9	3	na	na
	C 270	Low Temp	137	12,34	58,63	23,88	na	na
	E 134	Solar	136,6	13,19	35	3	na	na
	407C	Solar	75	3,087	37,5	15,35	0,25	2

Geo = Geothermal, Low Temp = Low temperature, na = Not available

Fluida yang paling sering dijadikan kandidat dalam ORC adalah R 601, R 123, R 134a, dengan peneliti sebanyak 13, 10, 8 orang secara berturut-turut. Sedangkan keberadaan *refrigerant* sebagai fluida kerja ORC yang umum tersedia di Indonesia adalah R 134a, R 12, R 236 fa, R 600a, R 245fa, R 123, R 141b, R 22, R 23, R 401A, R 401B, R 402A, R 402B, R 404A, R 407C, R 410A, R 124, R 409a, R 502.

Berdasarkan kriteria aspek lingkungan, *refrigerant* dengan nilai ODP : 0 (nol) yang dapat dijadikan sebagai kandidat fluida kerja ORC dan berdasarkan kriteria keamanan hanya kandidat yang memiliki kode ASHRAE

: A1, aman dijadikan sebagai fluida kerja ORC. Sehingga berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan maka *refrigerant* R 134a, 236fa, 23, 404A, 407C, 410A, merupakan kandidat fluida kerja ORC yang dapat diaplikasikan di Indonesia.

Unjuk kerja *refrigerant* sebagai fluida kerja ORC akan dianalisa menggunakan skema ORC sederhana seperti Gambar 1 dengan parameter operasi yang dipilih  $T_{max} = 100$  °C,  $P_{max} = 10$  bar,  $T_{soud} = 35$  °C dan nilai efisiensi isentropik turbin = 0,7, efisiensi mekanik = 0,6 dan efisiensi pompa = 0,8. Asumsi lainnya yang digunakan adalah aliran dalam kondisi *steady* (tunak), energi kinetik, potensial



panas dan gesekan diabaikan. Pada skema ini, *refrigerant* sebagai fluida kerja memasuki turbin dalam *phase* uap. Hal ini ditujukan untuk mencegah kerusakan pada sudu turbin, yang selanjutnya berekspansi dan memasuki kondensator untuk didinginkan sampai menjadi *phase* cair. *Refrigerant* dalam *phase* cair akan dipompakan kembali menuju evaporator untuk diuapkan yang selanjutnya memasuki turbin guna melengkapinya skema siklus ORC.

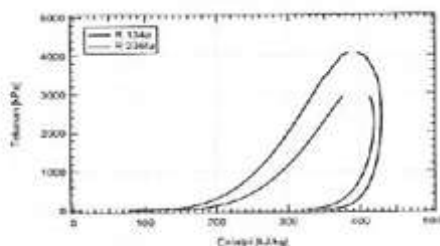
*Refrigerant* kandidat fluida kerja ORC merupakan *refrigerant* ramah lingkungan. Hal ini ditunjukkan keberadaannya merupakan pengganti *refrigerant* sebelumnya yang berpotensi menjadi penyebab penipisan lapisan ozon. Sedangkan aplikasi umum *refrigerant* kandidat fluida ORC ditabulasikan (Dupont, 2010; Powel, 2002; UNEP, 2001) dan ditunjukkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Aplikasi umum *refrigerant* kandidat fluida kerja ORC

<i>Refrigerant</i>	Aplikasi	Pengganti <i>Refrigerant</i>
134a	Pendingin mobil, Pendingin komersial, pembuat es	12
236fa	<i>Chiller</i> , Sistem pendingin pada industri proses	114
404 A	Supermarket	502
407C	Supermarket	502
410 A	AC komersial	22
23	Pendingin medis, <i>environmental chambers</i>	13 dan 503

Parameter kerja yang dipilih adalah tekanan evaporator maksimum 10 bar maka *refrigerant* 404A, 407C dan 410A gagal sebagai fluida kerja ORC dikarenakan tekanan kerja kondensator pada temperatur 35 °C mencapai 16 bar, 23 bar dan 21,39 bar secara berurutan. Untuk R 23, memiliki temperatur maksimum saat saturasi adalah 25 °C sebesar 47,29 bar. Sehingga R 23 merupakan kandidat yang tidak sesuai untuk aplikasi tekanan rendah. P-H diagram yang dapat dibangun oleh *refrigerant* sebagai

kandidat fluida kerja ORC ditunjukkan pada Gambar 3 (Dupont, 2005; Dupont, 2004).



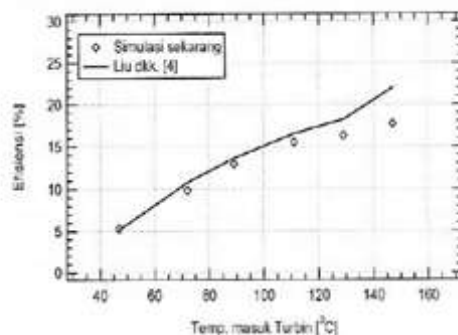
Gambar 3. Diagram P-H fluida ORC

### 1. Validasi perhitungan

Validasi perhitungan dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari parameter dan asumsi yang dipilih yaitu nilai efisiensi turbin isentropik, efisiensi mekanik dan efisiensi pompa dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti lainnya. *Refrigerant* yang dipilih dalam validasi adalah R 123. Hasil validasi menunjukkan, untuk temperatur inlet turbin dibawah 100 °C memberikan nilai efisiensi yang sama dengan simulasi yang dilakukan oleh Liu dkk (Liu, 2004).

### 2. Simulasi

Gambar 4. Validasi perhitungan R 12 Hasil simulasi *refrigerant* sebagai fluida kerja ORC



Gambar 4. Validasi perhitungan R 123

dengan parameter daya spesifik, efisiensi, laju aliran fluida ditunjukkan dalam Tabel 5. Efisiensi terbaik didapatkan dari R 236fa, pada tekanan maksimum 10 bar,  $T_{\text{evaporator}} = 80$  °C dengan nilai efisiensi 5,01%. Kondisi ini

Tabel 5. Daya Spesifik dan efisiensi *refrigerant* untuk aplikasi tekanan rendah di Indonesia

Refrigerant	$P_{max}$	$T_{evaporator}$	Efisiensi	Daya Spesifik	$\eta$
	(Kpa)	°C			
R 134a	900	70	0,08491	0,225324	7,366771
	900	80	0,09601	0,263363	6,328397
	900	90	0,09551	0,25772	6,466664
R 134b	1000	70	0,76296	2,01690	0,826326
	1000	80	0,77063	2,126534	0,763011
	1000	90	0,76721	2,213114	0,753087
236fa	900	70	4,45484	9,382727	0,178011
	900	80	4,52203	10,0254	0,165244
	900	90	4,41558	10,34078	0,161174
236ba	1000	70	4,84294	10,134	0,164625
	1000	80	5,01469	11,076	0,152448
	1000	90	4,87520	11,396	0,146250

menunjukkan pemilihan *refrigerant* sebagai fluida ORC dengan parameter operasi tekanan rendah mampu memberikan nilai efisiensi yang tidak jauh berbeda dengan tekanan menengah yaitu 20 bar.

Untuk daya spesifik, yang secara matematis didapatkan dari pengurangan enthalpi *inlet* turbin dan entalpi *outlet* turbin, nilai daya spesifik terbaik didapatkan dari R 236fa, pada tekanan 10 bar dan temperatur evaporator 90 °C dengan nilai 11,396 KJ/Kg. Kondisi ini menunjukkan nilai daya terbesar dari *refrigerant* untuk aplikasi temperatur rendah tidak memiliki efisiensi paling baik.

Sedangkan berdasarkan laju aliran massa pada simulasi daya keluaran turbin 1 KW, R 236fa memerlukan laju aliran massa terkecil pada parameter daya spesifik terbaik.

### KESIMPULAN

Berdasarkan kriteria termodinamik, aspek lingkungan, aspek keamanan, unjuk kerja dan ketersediaan fluida kerja ORC khususnya *refrigerant*, R 236fa merupakan *refrigerant* yang sesuai untuk aplikasi di Indonesia dengan parameter operasi terbaik didapatkan pada tekanan 10 bar, temperatur evaporator 80 °C dan efisiensi maksimum 5,01%. Kondisi ini

menunjukkan pemilihan *refrigerant* sebagai fluida ORC dengan parameter operasi tekanan rendah dan sumber panas temperatur rendah mampu memberikan nilai efisiensi yang tidak jauh berbeda dengan tekanan menengah yaitu 20 bar dalam aplikasi ORC. Sedangkan berdasarkan kriteria daya spesifik terbaik didapatkan dari R 236fa dengan parameter operasi, tekanan 10 bar, temperatur evaporator 90 °C dengan nilai 11,396 KJ/kg. Efisiensi dan daya spesifik maksimum R 236fa didapat dari parameter operasi yang berbeda.

### DAFTAR PUSTAKA

- ASHRAE. 1997. Designation and Safety Classifications of Refrigerants. ANSI/ASHRAE 34-1997. [http://www.alliance-co2-solutions.org/docs/ASHRAE\\_standard.pdf](http://www.alliance-co2-solutions.org/docs/ASHRAE_standard.pdf). [3 April 2010].
- Bruno, Joan Carles, Villada, Jesu's Lo'pez, Letelier, Eduardo, Romera, Silvia, Coronas, Alberto. 2008. Modelling and Optimisation of Solar Organic Rankine Cycle Engines for Reverse Osmosis Desalination. Applied Thermal Engineering. 28. 2212-2226.
- Cairn, J.M, Hourahan, G.C. 2001. Refrigerant Data Summary, Engineered Systems. 18 (11). 74-88. <https://www.acca.org/Files/?id=124>. [15 April 2010].
- Chacartegui, R, Sánchez, D, Muñoz, J.M., Sánchez, T. 2009. Alternative ORC Bottoming Cycles for Combined Cycle Power Plants. Applied Energy. 86. 2162-2170.
- Dai, Yiping, Wang, Jiangfeng, Gao, Lin. 2009. Parametric Optimization and Comparative Study of Organic Rankine cycle (ORC) for Low Grade Waste Heat Recovery. Energy Conversion and Management. 50. 576-582.
- Desai, Nishit B, Bandyopadhyay, Santanu. 2009. Process Integration of Organic Rankine Cycle. Energy. 34. 167-1686.
- Dupont. 2004. Thermodynamic properties of HFC 134a. [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/assets/downloads/h47752\\_hfc134a\\_thermo\\_prop\\_si.pdf](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/h47752_hfc134a_thermo_prop_si.pdf). [18 Nopember 2009].
- Dupont. 2005. Thermodynamic properties of Dupont™ Suva 236fa. [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/assets/downloads/k05720\\_Suva236fa\\_thermo\\_prop.pdf](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/k05720_Suva236fa_thermo_prop.pdf). [5 Februari 2009].



- Dupont. 2010. DuPont™ ISCEON® refrigerants. [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/products/ISCEON/index.html](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/products/ISCEON/index.html). [10 Juni 2010].
- H. Nasu. 1997. Waste Heat Quantity Assumption From Overall Japan Industries. Energy Conservation Center of Japan. Press Release. 12 Agustus.
- Hetiarachchia, H.D. Madhawa, Golubovica, Mihajlo, Worek, William M Ikegamib, Yasuyuki. 2007. Optimum Design Criteria for an Organic Rankine Cycle Using Low-Temperature Geothermal Heat Sources. *Energy*. 32. 1698–1706.
- Invernizzi, Costante, Iora, Paolo, Silva, Paolo. 2007. Bottoming Micro-Rankine Cycles for Micro-Gas Turbines. *Applied Thermal Engineering*. 27. 100–110.
- KESDM. 2010. Pemanfaatan Energi Surya Di Indonesia. <http://www.esdm.go.id/news-archives/56-artikel/3347-pemanfaatan-energi-surya-di-indonesia.html>. [1 Juni 2010]
- Kosmadakis, G., Manolakis, D., Kyritsis, S., Papadakis, G. 2009. Comparative Thermodynamic Study of Refrigerants To Select The Best for Use in The High-Temperature Stage of a Two-Stage Organic Rankine Cycle for RO Desalination. *Desalination*. 243. 74–94.
- Lakew, Amlaku Abie, Bolland, Ollav. 2010. Working Fluid for Low Temperature Heat Source. *Applied Thermal Engineering*. 30. 1262-1268.
- Lee, Y.K, Park, H.S, Kang D.H, Chang, R.W. 1998. Organic Rankine Cycle for Recovery of Low Temperature Grade Waste Heat. [www.rist.re.kr/inc/downloadpds.jsp? f Name= RIST2001000070.pdf](http://www.rist.re.kr/inc/downloadpds.jsp? f Name= RIST2001000070.pdf). [2 Februari 2010].
- Liu BT, Chien K, Wang C. 2002. Effect of Working Fluids on Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery. *Energy*. 29. 1207-17.
- Mago, Pedro J., Chamra, Louay M., Srinivasan, Kalyan, Somayaji, Chandramohan. 2008. An examination of Regenerative Organic Rankine Cycles Using Dry Fluids. *Applied Thermal Engineering*. 28. 998–1007.
- Manolakis, D, Kosmadakis, G, Kyritsis, S, Papadakis, G. 2009. Identification of Behaviour and Evaluation of Performance of Small Scale Low Temperature Organic Rankine Cycle System Coupled with a RO Desalination Unit. *Energy*. 34. 767-774.
- Miazza, V, Miazza, A. 1996. Working Fluid in Non Steady Flows For Waste Energy Recovery System. *Applied Thermal Engineering*. Vol 16. No. 7. pp. 579-590.
- Mohd.Tahir, Musthafah b., Yamada, Noboru, Hoshino, Tetsuya. 2010. Efficiency of Compact Organic Rankine Cycle System with Rotary-Vane-Type Expander for Low Temperature Waste Heat Recovery. *International Journal of Environmental Science and Engineering*. Vol 2. No.1. pp.11-16.
- Nguyen, T.Q, Slawwhite, J.D, Boulama, K. Goni. 2010. Power Generation From Residual Industrial Heat. *Energy Conversion and Management*. in press.
- Nguyen, V.M, Doherty, P.S, Riffat, S.B. 2001. Development of a Prototype Low Temperature Rankine Cycle Electricity Generation System. *Applied Thermal Engineering*. 21. 169-181.
- Peraturan Presiden No.5 Republik Indonesia Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional. [http://www.batan.go.id/prod\\_hukum/extern/Perpres5\\_2006.pdf](http://www.batan.go.id/prod_hukum/extern/Perpres5_2006.pdf). [5 Juni 2008].
- Perry, Robert H, Green, Don E. 1997. Perry's Chemical Engineering's Hand Book. Seven Edition. McGraw-Hill, New York.
- Powel, Richard L. 2002. CFC phase-out: have we met the challenge?. *Journal of Fluorine Chemistry*. 114. 237-250.
- Riffat, S.B, Zao, X. 2004. A Novel Hybrid Heat-Pipe Solar Collector/ CHP System Part II : Theoretical and Experimental Investigation. *Renewable Energy*. 29. 1965-1990.
- Salch, Bahaa, Koglbauer, Gerald, Wendland, Martin, Fischer, Johann. 2007. Working fluids for Low-Temperature Organic Rankine Cycles. *Energy*. 32. 1210–1221.
- Tchanche, Bertrand Fankam, Papadakis, George, Lambrinos, Gregory, Frangoudakis, Antonios. 2009. Fluid Selection for a Low-Temperature Solar Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*. Vol 29. pp. 2468-2476.
- UNEP. 2001. Inventory of Trade Names of Chemical Products Containing Ozone Depleting Substances and their Alternatives. [www.unep.fr/ozonaction/information/mmcfiles/3328-e.pdf](http://www.unep.fr/ozonaction/information/mmcfiles/3328-e.pdf). [10 Juni 2010]
- Wang, X.D., Zhao, L., Wang, J.L, Zhang, W.Z., Zhao, X.Z., Wu, W. 2010. Performance Evaluation of a Low-Temperature Solar Rankine Cycle System Utilizing R 245fa. *Solar Energy*. 84. 353–364.

Wei, Donghong, Lu Xuesheng, Lu Zhen, Gu, Jianning. 2007. Performance Analysis And Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) for Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*. 48, 1113-1119.

Yamamoto, Takahisa, Furuhashi, Tomohiko, Arai, Norio, Mori, Koichi. 2001. Design and Testing of The Organic Rankine Cycle. *Energy*. 26. pp 239-251.