

Analisis dan Pemilihan Fluida Kerja *Organic Rankine Cycle* (ORC) untuk Panas Bumi Temperatur Rendah

Nathanael P. Tandian^{1, a*} dan Ridho Muntaha^{2, b}

¹Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, Jl. Ganesa 10, Bandung-40132, INDONESIA

² PT. PLN Pusat Enjiniring Ketenagalistrkan, Jl. Aibda K. S. Tubun, Jakarta, INDONESIA
email: n4th4n.t4nd14n@gmail.com, r1_dho@yahoo.com

Abstrak

Indonesia yang terletak pada lintasan vulkanik memiliki potensi energi panas bumi yang sangat besar. Sebagian besar sumber panas bumi yang ada bertemperatur sedang dan rendah yang menghasilkan uap basah. Walau sumber panas bumi demikian dapat digunakan untuk pembangkit listrik dengan menerapkan siklus ORC (*Organic Rankine Cycle*), namun sampai sekarang belum banyak dimanfaatkan. Dengan meningkatnya harga energi, pembangkit daya panas bumi temperatur sedang dan rendah semakin kompetitif. Makalah ini bertujuan untuk memperbandingkan dan memilih fluida kerja dan jenis siklus yang sesuai untuk siklus ORC pada pembangkit daya panas bumi bertemperatur sedang atau rendah. Dalam makalah ini disimulasikan siklus ORC pembangkit daya geotermal yang memanfaatkan *waste brine* (uap buangan pembangkit panas bumi temperatur tinggi) atau uap dari sumur daerah *lateral outflow* yang bertemperatur sedang/rendah. Sebelas alternatif jenis fluida kerja organik dan dua alternatif jenis siklus ORC (superkritik atau subkritik) diteliti dan diperbandingkan dalam simulasi ini. Parameter penting kinerja siklus berupa kerja netto spesifik dan keramahan lingkungan dijadikan kriteria pemilihan fluida kerja organik yang paling sesuai. Dari hasil simulasi, disimpulkan bahwa untuk pemanfaatan *waste brine* direkomendasikan penggunaan butana dengan siklus subkritik, sedangkan untuk uap dari sumur *lateral outflow* direkomendasikan penggunaan siklus superkritik dengan propana atau isobutana.

Kata kunci: *Organic Rankine Cycle* (ORC), fluida kerja, panas bumi, *waste brine*, *lateral outflow*, subkritik, superkritik

Pendahuluan

Peran sumber energi terbarukan semakin penting karena selain bersifat terbarukan, energi ini juga mempunyai keunggulan karena lebih ramah lingkungan (tingkat emisi polutan sangat minim). Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak tersedia di Indonesia adalah energi panas bumi (geotermal). Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar yaitu sekitar 29.038 GWe atau 40% dari potensi panas bumi dunia [1]. Dari potensi sumber energi panas bumi tersebut, sebagian besar merupakan sumber panas bumi bertemperatur sedang dan rendah [2]. Sayangnya sumber panas bumi temperatur sedang dan rendah belum dimanfaatkan di Indonesia, walaupun sumber panas bumi demikian dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik dengan menerapkan teknologi siklus Rankine biner atau Siklus Rankine Organik (ORC, *Organic Rankine Cycle*).

Sejak tahun 2000an cukup banyak studi pembangkit daya ORC dan melibatkan cukup banyak jenis fluida kerja [3-6]. Saat ini pembuat peralatan ORC menggunakan jenis fluida kerja tertentu. Oleh karena itu, dalam makalah ini

dilakukan studi pemilihan fluida kerja dan jenis siklus Rankine yang paling sesuai untuk pembangkit energi panas bumi temperatur rendah (di bawah 200°C), baik sebagai *waste brine* dari sumber *liquid dominated* yang telah dimanfaatkan maupun sebagai uap baru dari sumber pada daerah *lateral outflow*.

Energi Panas Bumi Temperatur Rendah

Ada dua jenis energi panas bumi temperatur rendah yang dibahas dalam makalah ini, yaitu: energi *waste brine* dan energi *lateral outflow*.

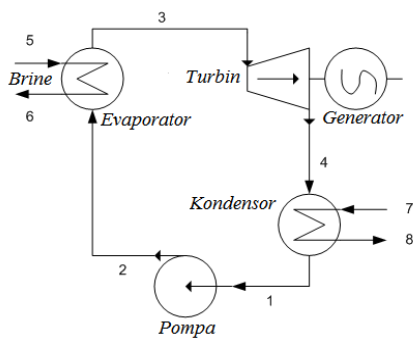
Waste Brine. Pada pembangkit panas bumi yang memanfaatkan uap jenis *liquid dominated*, umumnya uap dari sumur dipisah menjadi uap kering yang dialirkan ke turbin pembangkit daya dan air (*waste brine*) yang diinjeksikan kembali ke dalam tanah. *Waste brine* ini memiliki temperatur dan tekanan yang cukup tinggi, yaitu masing-masing 140-190°C dan di atas 5 bar. Energi yang dikandung *waste brine* ini masih dapat dimanfaatkan dengan sistem ORC.

Lateral Outflow. Daerah *lateral outflow* adalah daerah sumber panas bumi yang terletak cukup jauh dari lapisan batuan panas atau magma akibat

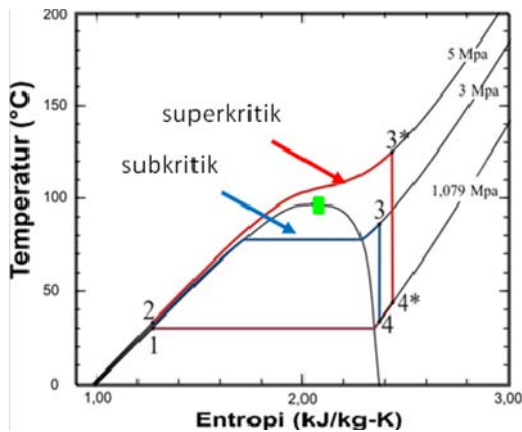
adanya aliran panas ke arah samping. Sumber panas *lateral outflow* umumnya relatif dekat permukaan bumi, yaitu kurang dari 1 km. Energi panas bumi sumur ini biasa diperoleh sebagai energi air panas (*brine*) dengan temperatur 120-180°C dengan tekanan yang mencapai 10 bar.

Pembangkit Daya Organic Rankine Cycle

Siklus ORC. Siklus biner atau *Organic Rankine Cycle* (ORC) merupakan siklus pembangkit daya Rankine yang menyerap energi dari air panas (*brine*), yaitu *waste brine* atau *lateral outflow brine*, serta menggunakan fluida kerja dari bahan organik bertitik didih relatif rendah (di bawah titik didih air). Peralatan utama yang digunakan untuk siklus ini pada dasarnya seperti diperlihatkan pada Gambar 1, dengan diagram *T-s* siklus ORC yang ideal diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Skema peralatan sistem ORC.



Gambar 2. Diagram *T-s* ORC ideal.

Pada Gambar 2 tampak bahwa ORC dapat dioperasikan dalam dua modus siklus, yaitu siklus subkritik atau superkritik. Kedua modus siklus ini dibedakan oleh tingkat keadaan fluida kerja saat masuk turbin. Pada siklus subkritik, temperatur dan tekanan fluida kerja saat masuk turbin lebih rendah dari temperatur dan tekanan kritis fluida kerja, sebaliknya temperatur dan tekanan tingkat keadaan masuk turbin superkritik di atas tekanan dan temperatur kritis fluida kerja.

Jika pompa dianggap adiabatik dengan efisiensi isentropik η_p , maka kerja pompa (proses 1-2,) dapat dirumuskan sebagai

$$W_p = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m} \frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_p} \quad (1)$$

dengan \dot{m} laju alir massa fluida kerja, h entalpi, v volume jenis, dan P tekanan. Subskrip 1 dan 2 masing-masing menyatakan nomor lokasi tingkat keadaan terkait, yaitu pada saat masuk dan keluar pompa.

Dengan menganggap tidak ada perpindahan panas atau “*stray heat*” antara penukar panas dengan lingkungan, maka daya panas yang dipindahkan dari *brine* masuk evaporator Q_E (proses 2-3) dapat dirumuskan sebagai

$$Q_E = \dot{m}_b c_{p,b}(T_5 - T_6) = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (2)$$

dengan \dot{m}_b laju massa *brine*, $c_{p,b}$ panas jenis *brine*, dan T adalah temperatur.

Daya mekanik yang dapat dibangkitkan turbin (proses 2-3) dapat dirumuskan sebagai

$$W_T = \dot{m}(h_3 - h_4) = \eta_T (h_3 - h_{4s}) \quad (3)$$

dengan η_T efisiensi isentropik turbin.

Daya panas yang dibuang pada kondensor (proses 4-1) dapat dirumuskan dengan Pers. 5

$$Q_K = \dot{m}_c c_{p,c}(T_8 - T_7) = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (5)$$

dengan \dot{m}_c laju alir massa fluida pendingin, dan $c_{p,c}$ panas jenis fluida pendingin.

Efisiensi daya ORC η dapat dirumuskan sebagai Pers. 6

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_E} = \frac{W_T - W_p}{Q_E} \quad (6)$$

dengan W_{net} daya netto ORC.

Salah satu kriteria yang sering digunakan untuk memilih fluida kerja adalah daya kerja netto spesifik berbasis laju massa *brine*, yang didefinisikan dengan persamaan berikut

$$w^* = W_{net} / \dot{m}_b \quad (4)$$

Fluida Kerja Organik untuk ORC. Fluida kerja yang dibahas dalam makalah ini merupakan fluida kerja organik yang umumnya dianjurkan oleh para pembuat peralatan ORC. Secara umum fluida kerja untuk ORC diharap memenuhi kriteria sifat fisik berikut:

1. Memiliki titik didih yang rendah, sehingga dapat menguap pada temperatur rendah,
2. Temperatur dan tekanan kritis yang rendah, sehingga memungkinkan dioperasikan dengan modus siklus superkritik,

3. Konduktivitas termal dan kapasitas panas relatif yang besar sehingga memberikan karakteristik perpindahan panas yang baik,
4. Mudah didapat dan relatif murah, dan
5. Lebih diinginkan tidak korosif, tidak beracun, tidak mudah terbakar, serta ramah lingkungan.

Dengan memperhatikan berbagai kriteria di atas dan anjuran pembuat peralatan ORC, dalam makalah ini ditinjau 11 jenis fluida kerja ORC, yaitu: propana, butana, isobutana, pentana, isopentana, R134a, R141b, R143a, R152a, R227ea, dan R245fa.

Metodologi

Studi dalam makalah ini bertujuan untuk memilih fluida kerja ORC terbaik untuk memanfaatkan energi panas bumi temperatur rendah yang berasal dari *waste brine* maupun sumur di daerah *lateral outflow*. Kriteria pemilihan yang digunakan semata-mata hanya pada aspek keramahan lingkungan dan aspek termodinamika yaitu kerja netto spesifik ORC yang didapat dari analisis termodinamika ORC, tanpa memperhatikan aspek ekonomi.

Analisis termodinamika dilakukan dengan menerapkan beberapa asumsi penting berikut: (1) proses *steady*, (2) pompa dan turbin adiabatik, (3) kondensat masuk pompa sebagai cairan jenuh, dan (4) pengaruh energi kinetik serta potensial diabaikan. Di samping asumsi tersebut, agar hasil analisis dapat diperbandingkan dengan adil, kesebelas fluida kerja diterapkan pada analisis termodinamika dengan basis nilai parameter perhitungan yang sama, yaitu seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter analisis termodinamika.

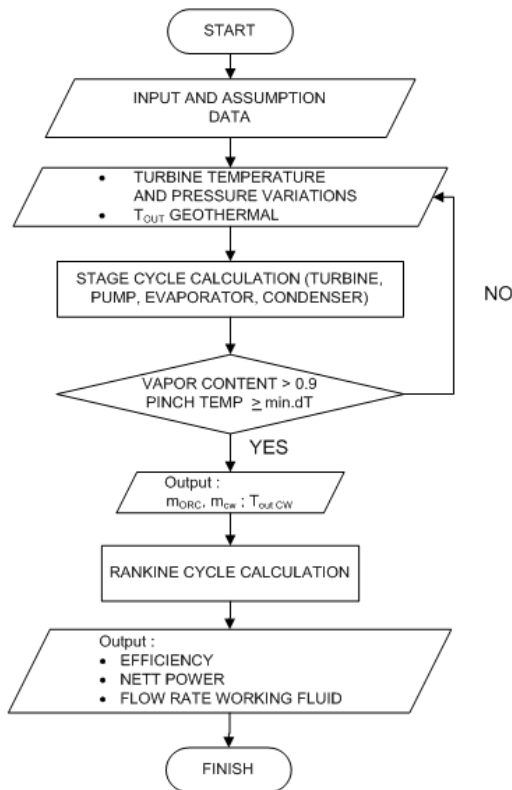
Parameter	Waste Brine	Lateral Outflow
Efisiensi isentropik turbin dan pompa	80%	
Penurunan tekanan penukar panas	0,2 bar	
Temperatur masuk pompa	30°C	
Laju massa <i>brine</i>	5 kg/s	
Tekanan <i>brine</i>	10 bar	
Temperatur <i>brine</i>	160; 170;	130; 150;

		180°C	170°C
Temperatur reinjeksi <i>brine</i>		150°C	70°C
Beda temperatur minimum penukar panas		15°C	
Temperatur fluida kerja	Maks.	$T_{brine} - 20^\circ\text{C}$	
	Min.	$T_c - 20^\circ\text{C}$	
Tekanan fluida kerja	Maks.	$0,8 \times P_{kritis}$	
	Min.	$1,3 \times P_{kritis}$	
Kualitas uap turbin minimum		90%	

Analisis termodinamika dilakukan dengan mengikuti algoritma sesuai diagram alir perhitungan seperti pada Gambar 3. Sifat fisik fluida kerja diperoleh dengan menggunakan paket *software* REFPROP 9.0. Dari hasil analisis sesuai algoritma perhitungan di Gambar 3 dapat diperoleh berbagai parameter kinerja ORC, seperti daya netto, efisiensi, *back work ratio*, laju massa *brine* dan kerja netto spesifik. Dalam makalah ini parameter kinerja yang dijadikan kriteria utama pemilihan fluida kerja adalah kerja netto spesifik dan dampak lingkungan fluida kerja.

Hasil dan Pembahasan

Pemilihan Fluida Kerja. Kerja netto spesifik hasil simulasi ORC subkritis dan superkritis yang didayai energi *waste brine* 160, 170, dan 180°C dengan temperatur reinjeksi 150°C dan menggunakan kesebelas jenis fluida kerja yang diteliti diperlihatkan pada Gambar 4. Fluida kerja pada Gambar 4 diurut dari fluida kerja dengan temperatur kritis terbesar (R1441b) sampai yang mempunyai temperatur kritis terkecil (R143a). Pada gambar tersebut tampak bahwa fluida kerja R1441b, isopentana, pentana, R245fa, dan butana tidak memiliki data yang terkait siklus superkritis. Hal ini disebabkan karena temperatur kritis fluida kerja tersebut relatif tinggi dibandingkan temperatur *waste brine* yang digunakan sehingga fluida kerja tersebut tidak dapat diterapkan untuk siklus superkritis. Pada Gambar 4 tampak bahwa secara umum, fluida kerja yang memiliki temperatur kritis di atas temperatur *waste brine* sangat berpotensi memberikan kerja netto spesifik yang tinggi bila digunakan pada ORC subkritis.

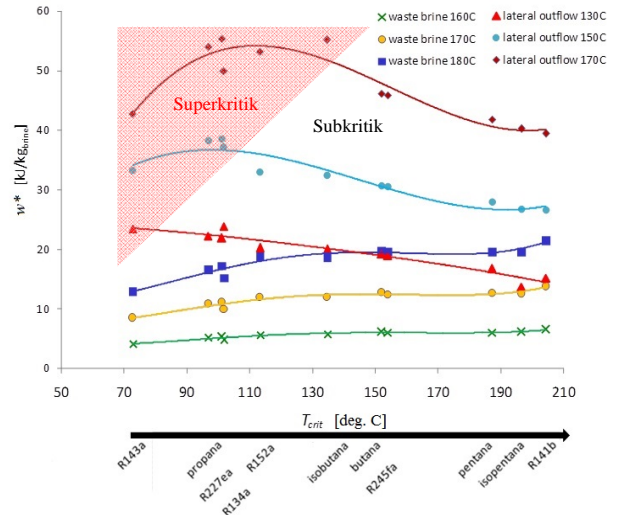


Gambar 3. Diagram alir simulasi kinerja

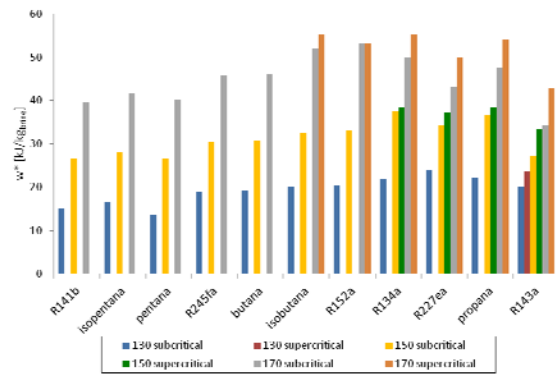
Dari Gambar 4 juga tampak bahwa R141b yang digunakan pada ORC subkritik dapat memberikan kerja netto spesifik yang terbesar dibandingkan fluida kerja lainnya. Namun R141b merupakan bahan yang termasuk HCFC dan harus dihapus penggunaannya di tahun 2015, sehingga penggantian, disarankan penggunaan fluida kerja butana dengan menggunakan ORC subkritik. Pada Gambar 4 tampak bahwa kinerja isopentana, pentana, dan R245fa sama baiknya dengan butana, tetapi butana lebih ekonomis dan mempunyai ketersediaan yang lebih baik di Indonesia dibanding fluida kerja lainnya sehingga lebih dianjurkan untuk digunakan.

Gambar 5 memperlihatkan kerja netto spesifik hasil simulasi ORC subkritik dan superkritik yang didayai energi *brine* dari *lateral outflow* 160, 170, dan 180°C dengan temperatur reinjeksi 70°C dan menggunakan kesebelas jenis fluida kerja yang diteliti. Pada Gambar 5 tampak bahwa lebih banyak kasus dimana siklus superkritik tidak dapat diterapkan dibanding pada Gambar 4. Hal ini disebabkan karena temperatur *brine* pada kasus di Gambar 5 lebih dingin dibandingkan kasus di Gambar 4.

Secara umum ORC yang didayai oleh *lateral outflow* (Gambar 5) memberikan kerja netto spesifik yang lebih besar dibanding dengan ORC yang didayai oleh *waste brine* (Gambar 4). Hal ini



Gambar 6. Peta pemilihan fluida kerja dan sistem ORC



Gambar 5. Kerja netto spesifik ORC didayai *lateral outflow* pada berbagai berbagai temperatur

disebabkan karena temperatur reinjeksi *brine* yang berasal dari *lateral outflow* dapat lebih rendah dibandingkan pada kasus dengan *waste brine*. Perbedaan temperatur reinjeksi ini disebabkan karena pada umumnya *waste brine* lebih mudah mengalami *scaling* karena berasal dari sumur panas bumi bertemperatur tinggi.

Berdasarkan kriteria kerja netto spesifik yang dihasilkan, maka direkomendasikan penggunaan fluida kerja propana atau isobutana dengan menerapkan ORC superkritik dengan sumber daya dari *lateral outflow* 180°C. Tetapi bila temperatur *brine* dari *lateral outflow* yang tersedia lebih rendah, maka dianjurkan menggunakan fluida kerja propana. Fluida kerja R134a sebenarnya mempunyai kinerja yang setara dengan propana, tetapi tergolong dalam kelompok bahan HFC yang tergolong sebagai bahan yang berpotensi menimbulkan *efek rumah kaca* atau pemanasan global, sehingga pemakaiannya.

Pemetaan Fluida Kerja dan Jenis ORC. Fluida kerja yang diperlihatkan pada Gambar 4 dan 5 secara berurutan berdasarkan temperatur kritik

fluida kerja, mulai dari temperatur kritik terbesar pada sebelah kiri sampai yang terkecil di sebelah kanan gambar. Dengan memperhatikan bahasan dalam sub-bagian sebelumnya, penggabungan data pada Gambar 4 dan 5 memberikan pemetaan fluida kerja dan jenis ORC yang dianjurkan seperti yang disajikan pada Gambar 6. Kurva-kurva *trendline* pada pemetaan ini menggambarkan hubungan kasar antara kerja netto spesifik (w^*) dengan temperatur kritik fluida kerja (T_c) yang dapat digunakan untuk pemilihan fluida kerja maupun jenis ORC (siklus subkritik atau superkritik) yang terbaik dari aspek termodinamik. Kurva-kurva pada Gambar 6 berguna dalam melakukan seleksi awal fluida kerja berdasarkan temperatur kritik. Setelah diperoleh beberapa kandidat fluida kerja, kemudian dilakukan proses pemilihan yang lebih teliti dengan memperhatikan aspek-aspek lain yang penting, seperti aspek lingkungan fluida kerja, keamanan/kesehatan, ketersediaan, aspek ekonomi, dll.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hasil penting sebagai berikut:

1. Untuk sumber energi dari *waste brine* PLTP, dianjurkan menerapkan ORC subkritik dengan fluida kerja optimal butana.
2. Untuk sumber energi dari sumur *lateral outflow*, dianjurkan menerapkan ORC superkritik dengan fluida kerja optimal propana atau isobutana.
3. Studi yang dilakukan berhasil memetakan pemilihan awal fluida kerja dan jenis ORC yang sesuai untuk pembangkit panas bumi temperatur rendah.

Daftar Notasi

c_p	Panas jenis
h	Entalpi
\dot{m}	Laju alir massa fluida kerja
P	Tekanan
Q	Laju perpindahan panas
T	Temperatur
T_c	Temperatur kritik fluida kerja
v	Volume jenis
W	Daya mekanik (kerja per satuan waktu)
η_s	Efisiensi isentropik
η	Efisiensi konversi energi ORC

Subskrip

b	Fluida panas bumi (<i>brine</i>)
c	Air pendingin
P	Pompa

E	Evaporator
K	Kondensor
T	Turbin
net	Netto siklus

Ucapan Terima Kasih

Sebagian kegiatan penelitian dalam makalah ini didanai oleh Program Magister Teknik Mesin ITB dalam rangka kerja sama ITB dengan PT. Perusahaan Listrik Negara. Karena itu, penulis mengucapkan terima kepada PT. Perusahaan Listrik Negara yang telah memberi dukungan untuk penelitian ini.

Referensi

- [1] S. Darma, S. Harsoprayitno, B. Setiawan, Hadyanto, R. Sukhyar, A.W. Soedibjo, N. Ganefianto, dan J. Stimac, Geothermal Energy Update: Geothermal Energy Development and Utilization in Indonesia, *Proc. World Geothermal Congress*, Bali Indonesia, 2010.
- [2] V. Steffanson, World Geothermal Assessment, *Proc. World Geothermal Congress*, Antalya Turkey, 2005.
- [3] S. Karellas dan A. Schuster, Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications, *Int. J. Thermodynamics*, 11 (2008) 101-108.
- [4] C. Vetter, Parameterstudie zur Simulation von Niedertemperatur-Kreisprozessen, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2011.
- [5] M. Khennich dan N. Galanis, Optimal Design of ORC Systems with a Low-Temperature Heat Source, *Entropy*, 14 (2012) 370-389.
- [6] H. Gao, C. Liu, C. He, X. Xu, S. Wu dan Y. Li, Performance Analysis and Working Fluid Selection of a Supercritical Organic Rankine Cycle for Low Grade Waste Heat Recovery, *Energies*, 5 (2012) 3233-3247.