



## Studi Fluida Kerja pada Pemanfaatan Panasbumi Temperatur Rendah di Pulau Ambon dengan Siklus Biner

### *Working Fluids Study on Utilization of Low Temperature Geothermal in Ambon Island with Binary Cycle*

Muhamad Roni Hajianto

Politeknik Energi Mineral Akamigas Cepu, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, Jawa Tengah 58315

email: [ronihajianto80@gmail.com](mailto:ronihajianto80@gmail.com)

Naskah diterima: 21 Juli 2022, Revisi terakhir: 14 September 2022, Disetujui: 14 September 2022, Online: 01 November 2022

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23.4.225-234>

**Abstrak** - Studi ini membahas peluang pemanfaatan panasbumi temperatur rendah keluaran *wellpad* di Pulau Ambon sebagai pembangkit listrik tenaga panasbumi baru menggunakan siklus biner. Analisis termodinamika dilakukan dengan variasi 5 jenis fluida kerja, yaitu Isopentane, N-pentane, R245fa, Isobutane dan N-butane. Fluida kerja N-butane menghasilkan daya turbin bersih terbesar, yaitu 1,287 MW dan efisiensi termal sebesar 10,911 %. Fluida kerja isobutane menghasilkan daya bersih sebesar 1,259 MW dan efisiensi termal 10,093 %. Fluida kerja R245fa menghasilkan daya bersih sebesar 1,231 MW dan efisiensi termal 10,674 %. Fluida kerja N-pentane menghasilkan daya bersih sebesar 1,231 MW dan efisiensi termal 10,186 %. Fluida kerja Isopentane menghasilkan daya bersih sebesar 1,188 MW dan efisiensi termal 10,589 %.

Analisis ekonomi dilakukan pada siklus biner ini untuk mendapatkan harga *purchase equipment cost* (PEC) dan menentukan biaya pembangunan instalasi pembangkit. Fluida kerja N-butane menghasilkan harga terendah pada biaya pembangunan pembangkit sebesar 2.150 USD/kW. Pertimbangan terakhir adalah dampak lingkungan dan keamanan fluida kerja. Fluida kerja N-butane penurunan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 6.608,98 ton/tahun. Fluida N-butane termasuk memiliki *safety group* A3, 0 (nol) ODP dan 0 (nol) GWP.

**Katakunci:** Biaya pembangkitan, emisi CO<sub>2</sub>, siklus biner, temperatur rendah.

**Abstract** - This study discusses the opportunity to use low temperature geothermal *wellpad* output in Ambon Island as a new geothermal power plant using a binary cycle. Thermodynamic analysis was carried out with variations of 5 types of working fluid, namely Isopentane, N-pentane, R245fa, Isobutane and N-butane. The working fluid N-butane produces the largest net turbine power of 1.287 MW and thermal efficiency of 10.911 %. The isobutane working fluid produces a net power of 1.259 MW and a thermal efficiency of 10.093 %. The working fluid R245fa produces a net power of 1.231 MW and a thermal efficiency of 10.674 %. The working fluid N-pentane produces a net power of 1.231 MW and a thermal efficiency of 10.186%. Isopentane working fluid produces a net power of 1,188 MW and a thermal efficiency of 10,589 %.

Economic analysis is carried out on this binary cycle to obtain the purchase equipment cost (PEC) price and determine the cost of constructing a power plant. The working fluid N-butane produces the lowest price at the plant construction cost of 2,150 USD/kW. A final consideration is the environmental impact and safety of the working fluid. The working fluid N-butane reduces CO<sub>2</sub> emissions by 6,608.98 tons/year. The N-butane fluid has a safety group of A3, 0 (zero) ODP and 0 (zero) GWP.

**Keywords:** Generation cost, emission CO<sub>2</sub>, binary cycle, low temperature.

**PENDAHULUAN**

**Latar Belakang**

Energi fosil seperti minyak bumi, gas bumi dan batubara merupakan penggerak utama pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Sampai dengan tahun 2020 pemakaian energi primer untuk pembangkit listrik masih didominasi oleh energi fosil. Pemerintah mendorong EBT menjadi prioritas utama untuk menjaga ketahanan dan kemandirian energi mengingat potensi EBT sangat besar untuk dapat menjadi andalan dalam penyediaan energi nasional di masa mendatang.

Pemanasan global ini menjadi salah satu penyebab masalah perubahan iklim pada lingkungan di dunia. Salah satu energi yang memiliki sifat terus menerus, jumlahnya melimpah dan ramah terhadap lingkungan adalah energi panasbumi. Tabel 1 menunjukkan sumberdaya panasbumi di Indonesia yang cukup banyak dan melimpah ruah.

Pada Tabel 2, dapat dilihat bahwa penggunaan PLTP memiliki faktor emisi CO<sub>2</sub> kecil bila dibandingkan dengan pembangkit energi EBT lainnya, yaitu sekitar 0,586 kg/kWh (UNDP, 2007)

Di Indonesia sistem reservoir panasbumi entalpi rendah - menengah (*low - intermediate enthalpy*) belum banyak dikembangkan sebagai pembangkit

**Tabel 1.** Sumberdaya panasbumi di Indonesia (Badan Geologi, 2019)

No	Provinsi	No Lokasi	Sumber Daya (MW)						Total	Kapasitas Terpasang (MW)
			Ipekalut	Hipopotrik	Cebangan			Total		
					Mungkin	Tertaga	Terbaki			
1	Sulawesi	101	2.276	1.907	3.735	1.880,7	1.070,3	6.679	744,4	
2	Jawa	73	1.265	1.190	3.474	418	1.820	5.137	1.253,8	
3	Bali	6	79	21	104	110	30	335	0	
4	Nusa Tenggara	31	790	148	892	121	12,5	1.363,5	12,5	
5	Kalimantan	14	131	18	13	0	0	152	0	
6	Sulawesi	58	1.365	302	1.641	180	120	3.088	120	
7	Maluku	33	360	81	437	0	2	1.156	0	
8	Papua	0	75	0	0	0	0	75	0	
<b>Total</b>		<b>351</b>	<b>8.882</b>	<b>3.387</b>	<b>9.680</b>	<b>1.870,7</b>	<b>3.054,8</b>	<b>23.963,8</b>	<b>2.136,7</b>	

**Tabel 2.** Perbandingan emisi CO<sub>2</sub> berbagai jenis pembangkit listrik (UNDP, 2007).

Teknologi Pembangkit Daya	Jenis Bahan Bakar	CO <sub>2</sub> Emission Factor (kg/kWh)
Combined Cycle PP	Natural Gas	0,281
	HSD	0,076
PLTP		0,586
PLTA		0,786
Low Temperature Cogeneration	Natural Gas	0,481
High Temperature Cogeneration	Natural Gas	0,523
Biomassa Steam PP	Biomassa	0,786
Solar Termal	Solar Heat	0,786
Solar Photovoltaic	Solar Radiation	0,786
Angin	Angin	0,786
Mikrohidro	Air	0,786

listrik. *Organik Rankine cycle* atau siklus biner merupakan sistem pembangkit tenaga yang menggunakan fluida organik sebagai fluida kerjanya. Kerja siklus ini sama dengan siklus Rankine konvensional, yang beda hanyalah jenis fluida kerja yang digunakan. Jika pada siklus Rankine konvensional menggunakan fluida kerja air maka pada siklus biner menggunakan zat organik sebagai fluida kerja. Sistem ini dipilih atas dasar karakteristik kerja ORC yang mampu mengubah fluida kerja menjadi uap dengan menggunakan panas rendah panasbumi. Hal ini dapat dilakukan mengingat fluida kerja organik yang bisa menguap pada temperatur rendah (kurang dari 100<sup>o</sup>C).

Pulau Ambon merupakan salah satu lokasi yang memiliki potensi panasbumi dengan temperatur rendah yang belum dimanfaatkan dengan optimal, dengan adanya penyelidikan ini harapannya dapat memberikan gambaran optimalisasi potensi panasbumi yang ada.

**Data dan Manfaat**

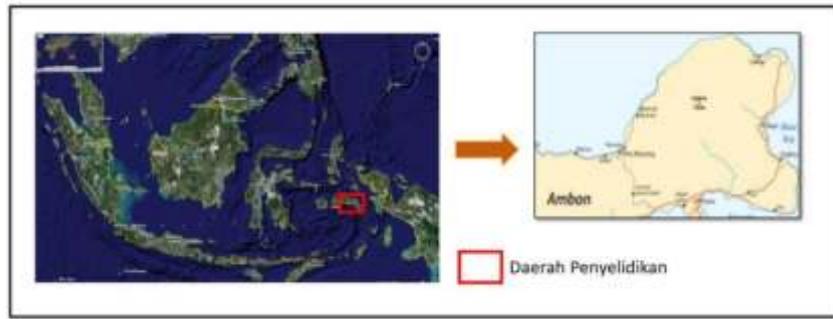
Data diperoleh dari data sekunder beberapa literatur dan dokumen arsip PT.XXX yang berlokasi di Pulau Ambon Provinsi Maluku (Gambar1). Penyelidikan ini menggunakan beberapa fluida kerja yang ramah lingkungan agar dapat berkontribusi pada permasalahan energi dan lingkungan.

Penyelidikan ini diharapkan memberikan manfaat:

1. Mendapatkan rancangan siklus PLTP yang optimal untuk pemanfaatan panasbumi temperatur rendah keluaran *wellpad* sebagai pedoman untuk pihak pengembang apabila akan merealisasikan pembangunan PLTP.
2. Mendapatkan gambaran perbandingan siklus yang biasa digunakan pada sistem PLTP dengan beberapa fluida kerja.
3. Mendapatkan informasi kemampuan operasi pembangkit dan kelayakan ekonomi serta lingkungan siklus PLTP sebagai pertimbangan realisasi proyek.
4. Menjadi penerapan dan pengembangan ilmu di bidang energi baru terbarukan khususnya panasbumi sehingga dapat menunjang keilmuan berkaitan dengan bidang pemanfaatan panasbumi.

**Metodologi**

Melakukan perancangan siklus termodinamika dengan memanfaatkan panasbumi temperatur rendah keluaran *wellpad* untuk pembangkit listrik tenaga panasbumi. Simulasi dan pemodelan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Aspen Hysis sebagai pembanding dan validasi, sedangkan dalam evaluasi analisis energi



Sumber: [www.google.com/map](http://www.google.com/map).

**Gambar 1.** Peta lokasi wilayah kerja Pulau Ambon.

menggunakan bantuan perangkat lunak Ms. Excell, dan REFPROP.

Melakukan optimasi secara termodinamika pada peralatan/sistem di siklus dengan beberapa fluida kerja yang berbeda untuk menghasilkan daya dan efisiensi terbaik.

Melakukan analisis ekonomi dengan menghitung *purchase equipment cost* (PEC) dan *total cost investment* (TCI) yang dihasilkan oleh siklus dengan beberapa fluida kerja.

Mengevaluasi dampak lingkungan dari siklus dengan beberapa fluida kerja dengan menghitung jumlah emisi yang dilepaskan ke udara.

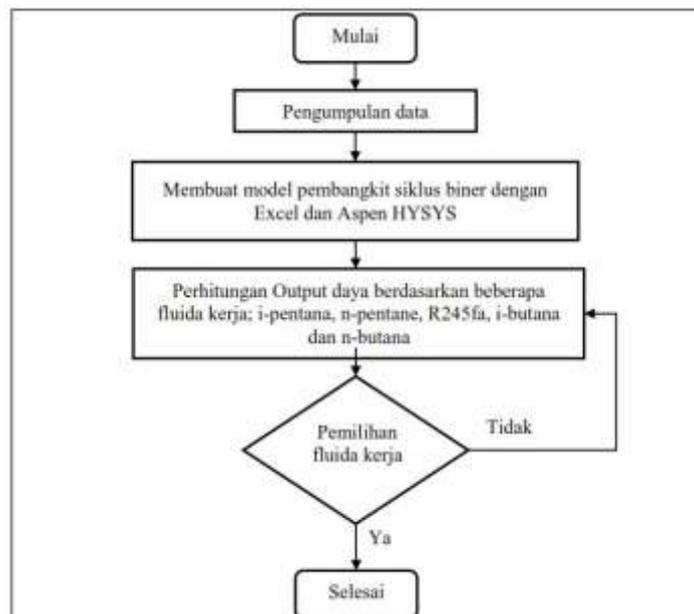
Membandingkan siklus dengan beberapa fluida kerja

sehingga didapatkan yang terbaik dari analisis energi, biaya pembangkitan dan dampak lingkungan.

Langkah dalam penyelidikan ini dapat digambarkan pada flow chart sebagai berikut ini (Gambar 2).

**Tujuan**

Melakukan simulasi dan perancangan PLTP dengan memanfaatkan panasbumi temperatur rendah keluaran *wellpad*. Perencanaan desain PLTP dengan siklus biner menggunakan beberapa fluida kerja kemudian dianalisis dan dilakukan optimasi performanya sehingga dapat dibandingkan performa yang terbaik baik secara energi yang dihasilkan, kelayakan kinerja, ekonomi dan dampak terhadap lingkungan.



**Gambar 2.** Diagram alir penyelidikan.

## GEOLOGI

Kepulauan Maluku adalah gugusan pulau-pulau yang terletak di sebelah timur Indonesia, memiliki panjang 180 km dari utara ke selatan dan lebar 70 km dari barat ke timur. Halmahera bagian barat tersusun dari busur vulkanik Ternate dan Halmahera Barat, sedangkan Halmahera bagian timurlaut – tenggara tersusun oleh melange. Maluku dapat dibagi menjadi dua bagian, yakni Maluku Utara dan Maluku Selatan. Maluku Utara sebagian dihubungkan dengan rangkaian pulau-pulau Asia Timur dan sebagian sistem Melanesia, sedangkan Maluku Selatan (Busur Banda) merupakan suatu bagian dari Sistem Pegunungan Sunda (Amarullah & Tobing, 2005).

### Geomorfologi

#### *Maluku Utara*

Maluku Utara merupakan wilayah kepulauan yang terdiri atas pulau-pulau vulkanik dan pulau-pulau non vulkanik. Pulau vulkanik menempati bagian barat termasuk Pulau Ternate, Pulau Tidore, Pulau Moti, Pulau Mare, Pulau Makian, dan Pulau Sangihe. Pulau non vulkanik antara lain Pulau Bacan, Pulau Kasiruta, Pulau Talaud, dan Pulau Obi. Pulau Halmahera sendiri termasuk pulau vulkanik meskipun aktivitas vulkanik yang aktif tidak terdapat seluruh wilayahnya. Bagian utara Pulau Halmahera merupakan lokasi aktivitas vulkanik yang aktif. Pulau-pulau non-vulkanik Maluku Utara saat ini berkembang di bawah pengaruh pengendapan laut. Bentuklahan vulkanik tererosi kuat terbentang dari timur ke barat pada zona vulkanik Holosen aktif. Blok baratlaut berada di bagian tepi Pulau Halmahera, dibatasi dari Graben Tengah oleh *escapment* yang membentang dari pesisir timur hingga pesisir barat. Graben Tengah sendiri berbatasan langsung dengan zona gunungapi dan banyak mendapat pengaruh aktivitas vulkanik terutama dari Gunungapi Dukono dan Gunungapi Ibu. Di dalam Graben Tengah terdapat dataran rendah. Blok bagian timur memanjang arah utara selatan dan menempati sebagian besar sisi barat Pulau Halmahera. Dataran rendah Kobe yang sempit memisahkan blok bagian timur Halmahera di sebelah barat dengan dataran relief berombak di timurnya (Amarullah & Tobing, 2005). Dataran relief berombak menempati bagian yang luas di timur Pulau Halmahera. Pada bagian ini dataran aluvial tidak ditemukan, tetapi memasuki daerah Kao, ditemukan dataran aluvial yang luas pada daerah pedalaman, juga dataran vulkanik yang berombak dan dataran aluvial berawa secara lokal. Pada kedua semenanjung (baik utara maupun timur laut) daerah pegunungan itu

masih dikelilingi oleh kawasan pegunungan dan perbukitan yang berkembang dari bahan yang sama. Pulau Morotai banyak memiliki kesamaan dengan Pulau Halmahera bagian utara, yang dicirikan oleh gunung-gunung yang berkembang dari batuan sedimen dan batuan beku basa. Pada semenanjung bagian selatan Halmahera lebih didominasi oleh daerah gunung yang terutama berkembang dari bahan-bahan sedimentasi napal dan batugamping. Pegunungan yang mendominasi bagian utara dan timurlaut Semenanjung Halmahera disusun oleh formasi gunungapi (andesit dan batuan beku basaltik; Sudarya, 2007).

#### *Maluku Selatan*

Maluku Selatan secara geomorfologi merupakan Busur Banda, yaitu sistem kepulauan yang membentuk busur mengelilingi cekungan tapal kuda Laut Banda yang membuka ke arah barat. Sistem Kepulauan Maluku Selatan dibedakan menjadi busur dalam vulkanik dan busur luar non-vulkanik. Busur dalam terdiri atas pulau-pulau kecil (kemungkinan puncak gunungapi bawah laut atau *seamount*) seperti Pulau Damar, Pulau Teun, Pulau Nila, Pulau Serua, Pulau Manuk dan Kepulauan Banda. Busur luar terdiri atas beberapa pulau yang agak luas dan membentuk kompleks kepulauan, antara lain Kepulauan Leti, Kepulauan Babar, Kepulauan Tanimbar, Kepulauan Aru, Kepulauan Kai, Kepulauan Watu Bela, Pulau Seram, dan Pulau Buru (Sumardi dkk., 2011).

### Stratigrafi

Secara stratigrafi daerah Maluku disusun oleh batuan vulkanik, sedimen dan endapan muda. Kegiatan tektonik mengakibatkan adanya perlipatan, dan pensesaran dan kegiatan magmatik (hidrotermal) yang mana hal tersebut merupakan media bagi pembentukan mineralisasi.

#### *Formasi Dorosagu (Tped)*

Perselingan antara batupasir dengan serpih merah dan batugamping. Batupasir kelabu kompak, halus - kasar, sebagian gampingan, mengandung fragmen batuan ultra basa graywake, kompak, komponen batuan ultrabasa, basal dan kuarsa; serpih berlapis baik, batugamping, kelabu dan merah, kompak, sebagian menghablur. Dari analisis fosil menunjukkan umur Paleosen - Eosen.

#### *Formasi Bacan (Tomb)*

Terdiri atas lava, breksi dan tuf dengan sisipan konglomerat dan batupasir. Breksi gunungapi kelabu kehijauan dan coklat, umumnya terpecah, mengandung barik kuarsa yang sebagian berpirit. Lava bersusunan andesit hornblende dan andesit piroksen, berwarna

kelabu kehijauan dan coklat, terpecah dan terubah, terpropilitkan dan termineralkan. Konglomerat kelabu kehijauan dan coklat, kompak, mengandung barik kuarsa, komponennya basal, batugamping, rijang, batupasir dan setempat batuan ultrabasa. Batupasir dari analisis fosil menunjukkan umur Oligosen - Miosen Bawah dan lingkungan litoral.

#### **Formasi Amasing (Tma)**

Berupa batupasir tufan berselingan dengan batulempung dan napal, bersisipkan batugamping. Batupasir tufan berwarna kelabu kehijauan, terpilah sedang, berkomponen terutama kuarsa, feldspar dan sedikit mineral bijih, bermasa dasar tuf. Batulempung dan napal berwarna kelabu kehijauan, agak kompak, mengandung banyak fosil foraminifora plangton berumur Miosen Bawah - Miosen Tengah.

#### **Formasi Weda (Tmfw)**

Berupa batupasir berselingan dengan napal, tuf, konglomerat dan batugamping. Batupasir kelabu - coklat muda, berbutir halus-kasar, berselingan dengan serpih kelabu kehijauan. Napal, putih, kelabu dan coklat, getas, mengandung banyak foraminifora setempat sisipan batubara dan batugamping. Formasi ini berumur Miosen Tengah - Awal Pliosen.

#### **Formasi Tingteng (Tmpt)**

Berupa batugamping hablur dan batugamping pasiran, sisipan napal dan batupasir. Batugamping pasiran, kelabu dan coklat muda; sisipan napal dan batupasir, kelabu, setebal 10 - 30 cm, umur Akhir Miosen - Awal Pliosen.

#### **Formasi Woi (Tmfw)**

Berupa batupasir, konglomerat dan napal. Batupasir kelabu, terpilah sedang, tufan. Konglomerat kelabu, kerakal andesit, basal dan batugamping. Napal kelabu, foraminifora dan moluska, setempat lignitan. Fosil foraminifora menunjukkan umur Miosen Atas sampai Pliosen berlingkungan sublitoralbatial. Tebalnya antara 500-600 m.

#### **Formasi Anggai (Tmps)**

Berupa batugamping dan batugamping pasiran, pejal. Fosil foraminifora menunjukkan umur Miosen Atas sampai Pliosen. Sebarannya di timur P. Obi. Ketebalannya kurang lebih 500 m. Formasi Anggai menjemari dengan Formasi Woi.

#### **Potensi Panasbumi**

Berdasarkan hasil resistivitas untuk mengidentifikasi zona prospek geotermal di daerah Larike, Ambon,

Maluku (Karyanto dkk., 2011). Hasil yang diperoleh pada area Larike memiliki empat lapisan berupa litologi lapisan atas, breksi, andesit dan tuf. Sebagai batuan penutup (*konduktif*) sistem geotermal adalah lapisan tuf berbagai tingkat ketebalan.

Daerah Suli juga merupakan daerah prospek panasbumi yang terbentuk sebagai akibat aktivitas pergerakan sesar normal berarah timurlaut-baratdaya menuju Kecamatan Leihitu. Daerah ini diduga sebagai media yang memunculkan manifestasi panasbumi, seperti banyaknya sumber air panas yang dijumpai. Suhu permukaan air panas tersebut berkisar antara 50,8°C - 60,2°C. Rentang suhu yang terjadi mungkin akibat pengaruh pencampuran dengan air permukaan (air hujan) dan suhu udara sekitarnya. Kontur suhu permukaan air panas Suli menunjukkan bahwa suhu rata-rata tertinggi pada hari pertama pengukuran, yaitu 60,1°C. Tampilan kontur suhu pada hari kedua menunjukkan tampilan yang hampir sama dengan hari pertama, dengan suhu permukaan rata-rata tertinggi, yaitu 60,0°C. Suhu rata-rata terendah pengukuran, yaitu 52,0°C (Andayany, 2012).

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berdasarkan hasil pengeboran awal sumur eksplorasi pada tahun 2011, disimpulkan bahwa WKP Tulehu terbukti memiliki sistem panasbumi yang dapat dikembangkan secara ekonomis. Pengeboran lanjutan pada 2017-2018, dari sumur ekplorasi telah dilaksanakan *well test* pada sumur. Hasil fluida yang keluar dari sumur diinjeksikan kembali melalui sumur injeksi. Berikut salah satu *sample data well test* pada tanggal 19 Februari 2018:

- WHP = 35.65 psia = 2.46 bara
- P. Line = 0.1 barg = 1.11 bara
- T. Line = 101.1 deg C
- P. lips 5" = 15.35 Psia = 1.06 Bara
- T. weir box = 76.3 C
- Brine rate = 19.87 ton/jam
- Steam rate = 13.03 ton/jam
- Dryness = 39.6 %
- Entalphy = 1321 kj/kg
- Mwe = 1.6 (asumsi 8 ton/MW)

#### **Pemodelan Siklus Biner**

Pemodelan dan simulasi siklus pembangkit listrik tenaga panasbumi dengan memanfaatkan panas fluida panabumi dari *well pad*. Selain data aktual tersebut ada

beberapa data yang perlu dilakukan asumsi untuk mempermudah dalam pemodelan, antara lain: siklus pembangkit listrik tenaga panasbumi beroperasi pada kondisi stabil (*steady state*); penurunan tekanan pada komponen penukar kalor dan pipa diabaikan; aliran dianggap seragam pada kondisi masuk maupun keluar sistem; dan perubahan energi potensial dan energi kinetik diabaikan.

Parameter lain yang diperlukan untuk melakukan pemodelan diambil dari berbagai literatur dapat dilihat pada Tabel 3.

Siklus biner pada penyelidikan ini menggunakan fluida kerja Isobutane, N-butane, Isopentane, N-pentane dan R245fa. Fluida ini dipilih karena memiliki temperatur didih yang lebih rendah daripada temperatur fluida panasbumi yang keluar dari sumur, sehingga dapat diperoleh tekanan masuk turbin yang maksimal untuk meningkatkan daya turbin. Karakteristik dari fluida kerja tersebut tercantum pada Tabel 4.

Peralatan utama siklus ini adalah preheater, evaporator, turbin, kondensor, dan pompa rekuperator. Pemodelan siklus biner untuk Pulau Ambon ini dapat diilustrasikan pada Gambar 3, dengan penambahan 1 sistem tertutup lagi.

Temperatur fluida panas bumi keluar dari *well pad* (titik 1) sebesar 101°C, sedangkan temperatur keluar dari penukar kalor ditentukan berdasarkan beberapa penyelidikan.

**Optimasi Siklus Biner**

Optimasi pada siklus biner dilakukan dengan menggunakan perangkat sederhana dengan validasi dengan Aspen Hysis. Adapun hasil yang dapat dilakukan dengan optimasi tekanan dan temperatur fluida panas bumi dapat dilihat pada Gambar 4.

**Perancangan Penukar Kalor**

Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan luas peralatan penukar kalor yang dimiliki oleh fluida kerja Isopentane, N-pentane, R245fa, Isobutane dan N-butane. Luas penukar kalor akan mempengaruhi nilai biaya investasi peralatan. Semakin besar luas setiap jenis penukar kalor maka biaya investas peralatan akan semakin besar.

Efisiensi yang dihasilkan dari optimasi dengan siklus biner digambarkan pada Gambar 5. Fluida N-butane memiliki efisiensi thermal terbesar sehingga dapat disimpulkan memiliki sisi keteknikan lebih baik dibanding fluida yang lainnya.

Daya turbin yang dihasilkan dari optimasi dengan siklus binary dapat dilihat pada Gambar 6. Fluida N-butane memiliki daya turbin terbesar 1,327 MW sehingga dapat disimpulkan memiliki sisi keteknikan lebih baik dibanding fluida lainnya.

**Analisis Keekonomian dan Lingkungan**

Nilai PEC dan TCI berbanding lurus sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 7. Dari penilaian ini menunjukkan bahwa fluida kerja Isopentane memiliki keekonomisan lebih baik daripada fluida kerja yang lain.

Nilai emisi CO<sub>2</sub> berbanding lurus dengan daya turbin yang dihasilkan sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 8. Dari penilaian ini menunjukkan bahwa fluida kerja N-butane memiliki penurunan emisi CO<sub>2</sub> terbanyak daripada fluida kerja yang lain.

Nilai emisi CO<sub>2</sub>, daya generator dan biaya pembangunan pembangkit pada fluida kerja N-butane memiliki nilai terbaik bila dibandingkan dengan fluida kerja yang lain, akan tetapi dari sisi biaya *total capital investment* (TCI) fluida kerja Isopentane memiliki nilai terendah pada Gambar 9.

**Tabel 3.** Asumsi pemodelan (DiPippo, 2007)

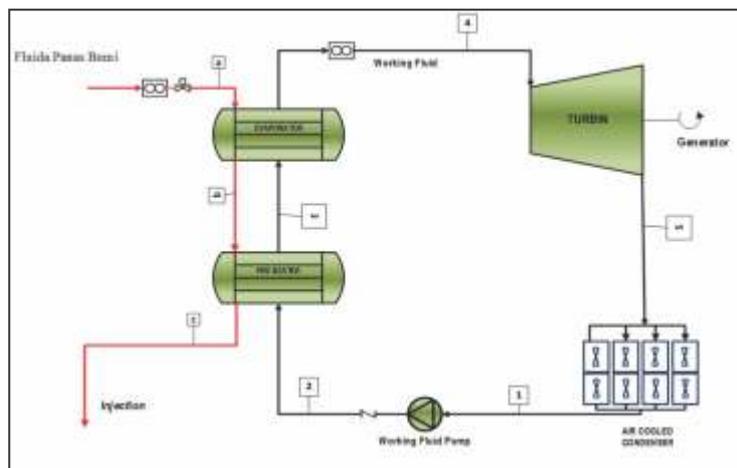
No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Efisiensi Turbin	90	%
2	Efisiensi Generator	97	%
3	Efisiensi Pompa fluida kerja	80	%
4	Efisiensi Pompa air	80	%
5	Efisiensi Fan	70	%

**Tabel 4.** Karakteristik fluida kerja yang digunakan dalam penyelidikan (Ashrae, 2017)

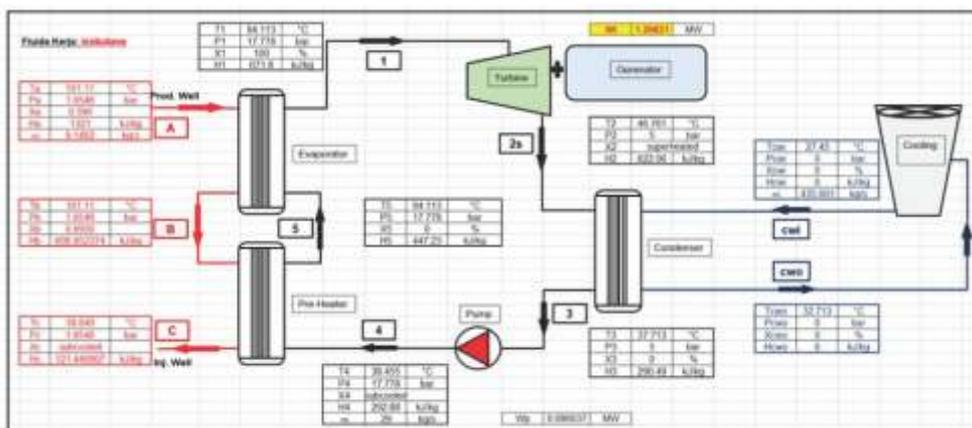
Fluida Kerja	Pc (Bara)	Tc(° C)	Density (kg/m3)	Toxicity	Flammability	ODP	GWP	Safety Group
Isopentane	33,3	187,8	616	Low	very high	0	3	A3
N-pentane	33,64	196,5	620,8	Low	very high	0	3	A3
R245fa	36,51	154,2	134,05	very high	Low	0	1030	B1
Isobutane	36,29	134,66	225,5	Low	very high	0	3	A3
N-butane	37,96	151,98	227,94	Low	very high	0	3	A3

**Tabel 5.** Perbandingan luas area penukar kalor dengan beberapa jenis fluida kerja

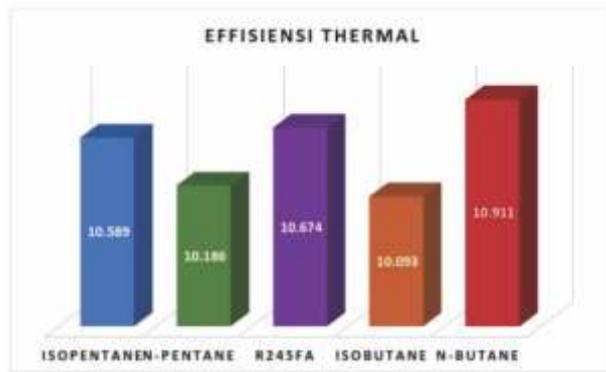
No.	Fluida Kerja	Q <sub>evaporator</sub> (kJ/s)	Q <sub>preheater</sub> (kJ/s)	Q <sub>Condensor</sub> (kJ/s)	A <sub>Evaporator</sub> (m <sup>2</sup> )	A <sub>preheater</sub> (m <sup>2</sup> )	A <sub>Condensor</sub> (m <sup>2</sup> )
1.	Isopentane	6708,96	3492,41	8885,69	541,19	281,72	716,78
2.	N-pentane	7250,64	3561,78	9441,02	584,88	287,32	761,58
3.	R245fa	6360,42	3939,44	8931,36	513,07	317,78	720,46
4.	Isobutane	6512,53	4458,82	9615,53	525,34	359,68	775,65
5.	N-butane	6646,25	4030,06	9261,25	536,13	325,09	747,07



**Gambar 3.** Pemodelan siklus biner Pulau Ambon.



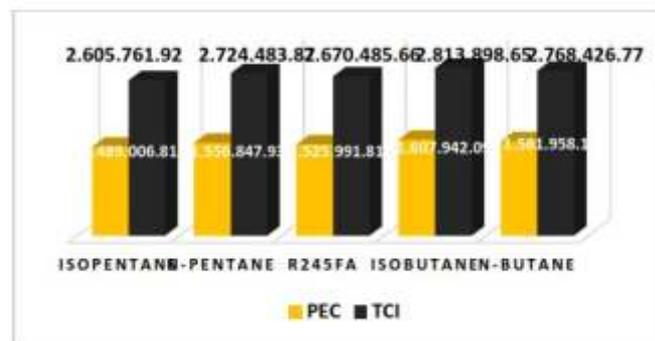
**Gambar 4.** Hasil optimasi dengan fluida kerja Isobutane.



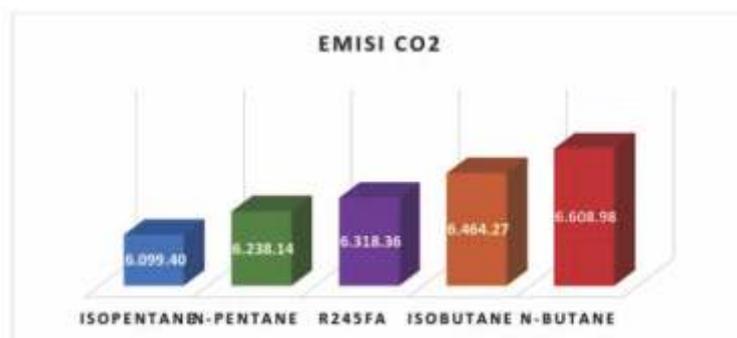
Gambar 5. Effisiensi termal hasil optimasi siklus biner.



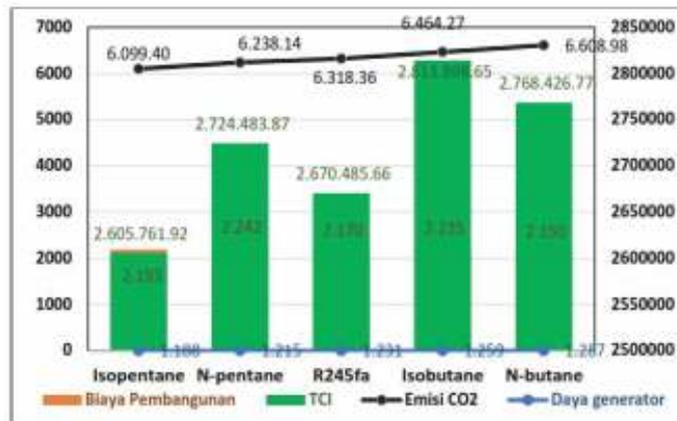
Gambar 6. Daya turbin hasil optimasi siklus biner.



Gambar 7. PEC dan TCI dengan beberapa jenis fluida kerja.



Gambar 8. Emisi CO<sub>2</sub> dengan beberapa jenis fluida kerja.



Gambar 9. Parameter teknis, ekonomi dan lingkungan fluida.

## KESIMPULAN

Fluida kerja N-butane memiliki nilai terbaik karena hasil analisis secara termodinamika menghasilkan daya generator sebesar 1,287 MW, diikuti dengan fluida isobutane sebesar 1,259 MW kemudian R245fa sebesar 1,231 MW kemudian N-pentane sebesar 1,215 MW dan Isopentane 1,188 MW.

Ramah lingkungan merupakan syarat selanjutnya dalam pemilihan fluida kerja. Tabel 3 menunjukkan

fluida kerja fluida kerja N-butane dengan status low toxicity, low flammability nilai ODP 0 (nol) dan nilai GWP 3 (tiga) serta termasuk dalam kelompok safety A3.

Analisis ekonomi dan teknis menjadi indikator untuk pemilihan fluida kerja paling efektif dan efisien. Pemilihan fluida terbaik adalah fluida kerja fluida N-butane menghasilkan daya generator sebesar 1,287 MW, penurunan emisi gas CO<sub>2</sub> sebesar 6.608,98 ton/tahun dan biaya pembangunan sebesar 2.150 USD/kW.

## ACUAN

- Amarullah, D. dan Tobing, R.L., 2005. Inventarisasi Batubara Marginal Daerah Obi Utara Kabupaten Halmahera Selatan Provinsi Maluku Utara. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Batubara*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Andayany, H., 2012. Penerapan Persamaan Geotermometer (SiO<sub>2</sub>) di Lapangan Panasbumi Suli, Ambon. *Jurnal Barekang*, 6(1): 33-36.
- Ashrae, 2017. *Designation and Safety Classification of Refrigerants*. Ashrae Standart Project Commitee34.
- Badan Geologi, 2019. *Sumber Daya Panas Bumi Di Indonesia*. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- DiPippo, R., 2011. *Geothermal Power Plant: Principles, Applications, Case Studies and Environment Impact*. Elsevier Inc., United Kingdom.
- Karyanto, W., Setiawan, A., dan Sismanto, 2011. Identifikasi Zona Konduktif di Daerah Prospek Panasbumi Larike, Ambon, Maluku. *Jurnal Sains MIPA*, 17(2): 67-74.
- Sudarya, S., 2007. Inventarisasi Mineral Logam di Kabupaten Halmahera Selatan dan Kota Tidore Maluku Utara. *Prosiding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan dan Non Lapangan Tahun 2007*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Sumardi, E., Bakhrun, Syuhada, dan Rihardiana, I., 2011. Survei Geofisika Terpadu Banda Baru, Maluku Tengah, Provinsi Maluku. *Prosiding Hasil Kegiatan Tahun 2011*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- UNDP, 2007. Microturbine Cogeneration Technology Application Project (MCTAP) Indonesia. Project Document Government of Indonesia and United Nations Development Programme. Unpublished Report.