

Pemanfaatan Gas Buang Turbin Gas Siklus Terbuka Dengan Sistem *Organic Rankine Cycle*

Tua Harolt Hutapea, Jaka Windarta

Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro;

Email : harolthutapea@students.undip.ac.id (T.H.H), jakawindarta@lecturer.undip.ac.id (J.W)

Abstrak : Gas buang Turbin Gas Siklus Terbuka (PLTG) yang masih bersuhu tinggi merupakan suatu pemborosan energi sehingga diperlukan usaha untuk memanfaatkannya karena energi adalah sumber daya yang berharga dan setiap panas buang yang berasal dari pembangkit listrik siklus terbuka, mesin-mesin atau industri harus menggunakannya secara efisien dan efektif. ORegen™ adalah siklus *Rankine* Organik GE yaitu suatu sistem yang didesain untuk memanfaatkan energi panas gas buang dari Turbin Gas atau dari sumber-sumber panas buangan lainnya. Sistem ORegen GE merupakan siklus panas lanjut Termodinamika dengan menggunakan fluida kerja cyclo pentane yang memanfaatkan panas buang dari Turbin Gas dan kemudian mengkonversikannya menjadi ekstra listrik sehingga 16 MW tanpa menggunakan bahan bakar ataupun air dan tidak menghasilkan tambahan emisi-emisi CO₂ atau NO_x. Dari beberapa tipe Turbin Gas GE dalam studi ini diperoleh efisiensi tertinggi keseluruhan dari sistem yaitu sebesar 51,5% dengan efisiensi Turbin Gas sebesar 41,1% yang diperoleh oleh Turbin Gas PGT25+ G4 pada beban 34 MW dan mendapatkan ekstra listrik dari ORegen sebesar 8,9 MW.

Kata Kunci : Siklus *Rankine* organik, Siklus panas lanjut Termodinamika. ORegen. Siklo Pentana. Turbin Gas

Abstract : Open cycle Gas Turbines *exhaust* still contain high temperature flue gas which is actually energy waste discharged into atmosphere so it requires effort to use it as much as possible because energy is valuable resource and every open cycle power plant, engines or other industrial waste heat should utilize this energy effectively and efficiently. ORegen™ is GE *Organic Rankine Cycle* which designed to utilize waste heat energy from Gas Turbine which free from water or CO₂. GE ORegen system categorized as Thermodynamics superheat cycle using cyclopentane as working fluid which absorbed Gas Turbine waste heat by diathermic oil and convert it into extra 16 MW electricity without additional fuel or water and does not release any emissions such as CO₂ or NO_x. Base on several GE Gas Turbines type from this study, the highest combined system thermal efficiency is 51.5% with Gas Turbine efficiency 41.1% from Gas Turbine PGT25+ G4 at load 34 MW and get extra electricity 8.9 MW produced from ORegen.

Keywords : *Organic Rankine Cycle*. Thermodynamic superheat cycle. ORegen. Cyclo Pentane. Gas Turbine

1. Pendahuluan

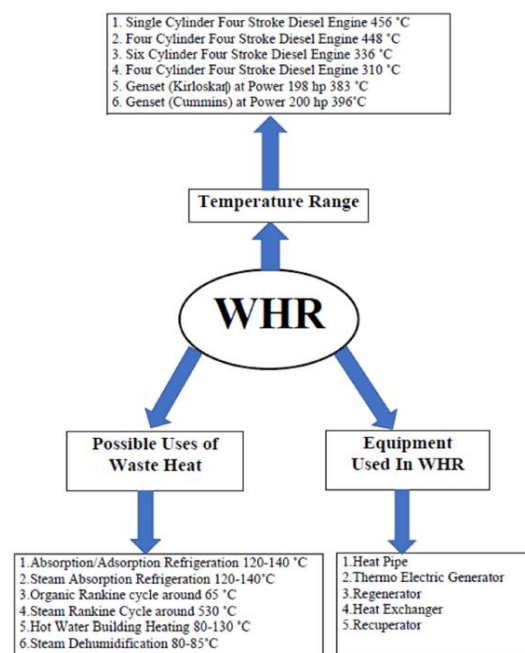
Dengan kemungkinan akan habisnya sumber daya energi konvensional seperti minyak bumi, gas alam dan batubara maka usaha-usaha untuk mencari dan meneliti sumber energi baru (EBT) telah giat dilakukan yaitu dengan menggali sumber energi yang bersifat non konvensional (*renewable resources*) seperti: panas matahari, angin, air, lautan (panas lautan, pasang surut, gelombang laut), biomassa dan lain-lain. Usaha penghematan energi juga perlu dilakukan dengan memanfaatkan setiap sumber energi yang berharga ini semaksimal mungkin, diantaranya dengan berusaha mengurangi rugi-rugi energi, kebocoran dan memanfaatkan gas buang yang terjadi pada berbagai sistem.

(Fierro et al., 2020), menjelaskan bahwa proses penggunaan energi secara intensif serta emisi yang berasal dari industri-industri seperti besi dan baja, petrokimia, semen, kertas, keramik, gelas dan makanan bertanggung jawab terhadap 1/3 dari emisi-emisi gas rumah kaca global tahunan. Karena itu berbagai alternatif sedang dikaji untuk mengurangi emisi gas rumah kaca serta memanfaatkan panas buang yang terjadi.

(G. Fan et al., 2021), menyatakan bahwa penghematan energi, rugi-rugi energi serta masalah efisiensi sistem yang rendah merupakan hal yang perlu diteliti dan penggunaan *Organic Rankine Cycle* adalah salah satu penerapan penting untuk meningkatkan konsumsi energi dan pemanfaatan panas yang dilepaskan ke lingkungan.

Organic Rankine Cycle (ORC) menurut (Herath et al., 2020), diidentifikasi sebagai suatu sistem yang dapat menghasilkan listrik dari sumber panas yang bersuhu rendah. ORC beroperasi pada suhu dan tekanan rendah dibandingkan dengan siklus *Rankine* konvensional sehingga fluida organik atau refrigeran akan digunakan sebagai fluida kerja, tidak seperti air yang lebih sesuai untuk pemakaian pada sistem yang bertekanan dan bersuhu tinggi.

Skema pemanfaatan gas buang (*Waste Heat Recovery-WHR*) pada berbagai sistem menurut (Kumar & Rakshit, 2021), dapat diringkaskan pada gambar di bawah ini:



Gambar 1. Pemanfaatan gas buang pada berbagai sistem (Kumar & Rakshit, 2021)

Menurut (Xu et al., 2020), terdapat beberapa teknologi pemanfaatan gas buang dari berbagai sistem seperti generator termoelektrik, *turbo-compounding* dan *organic rankine cycle*. Generator termoelektrik berbentuk padat dan ringan tapi efisiensinya sangat rendah dan biayanya sangat tinggi. Turbo-compounding juga padat namun efisiensinya terbatas. Diantara ketiga teknologi WHR ini, ORC yang mempunyai efisiensi tertinggi meskipun mempunyai keterbatasan seperti tingkat kerumitan, faktor keamanan dan daya tahannya.

(Dai et al., 2020) menguraikan bahwa ORC merupakan pilihan yang efektif untuk memanfaatkan sumber panas buang dibandingkan teknologi konversi yang lain sebab memiliki keuntungan yang lebih baik pada output sistem, efisiensi termal dan kestabilan operasinya.

ORC subkritikal yang menggunakan suhu sumber panas rendah dan sedang, telah digunakan secara luas pada pembangkit-pembangkit surya, geotermal, biomassa dan sistem panas buang industri. Sedangkan ORC dengan suhu tinggi, dapat meningkatkan suhu siklus maksimum yang akan meningkatkan pula efisiensi termal teoritis serta output dari sistem. ORC mempunyai sistem yang hampir sama dengan siklus uap kecuali ORC tidak menggunakan air tapi suatu fluida kerja. Karena suhu kritis fluida organik yang rendah dibandingkan air maka ORC akan dapat digunakan pada sumber-sumber panas dengan suhu rendah termasuk panas buang industri, atau sumber EBT seperti surya, geotermal dan biomassa. Adapun kapasitas ORC dapat mencakup rentang kapasitas 200 kW sampai 130 MW dimana siklus ini dapat menggunakan sumber panas yang rendah dari 100°C sampai 500°C (Ghasemian & Ehyaei, 2018).

Pada Pembangkit Listrik Turbin Gas (PLTG) dengan siklus terbuka seharusnya dilakukan usaha untuk memanfaatkan gas buang keluaran dari Turbin Gas yang masih tinggi yaitu dapat mencapai 420°C sampai 550°C (tergantung dari beban Turbin Gas tersebut). Keluaran gas buang dari Turbin Gas dengan suhu yang masih tinggi adalah suatu pemborosan energi karena gas buang itu akan terbuang sia-sia ke udara sekelilingnya. Hal ini tentu saja menurunkan efisiensi dari Pembangkit Listrik Siklus Terbuka yang lebih rendah bila dibandingkan dengan sistem kombinasi menggunakan HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) ataupun Evaporator (*Vaporizer*) yang akan menguapkan fluida kerja dan memutar Turbin Uap atau Turbo Ekspander untuk kemudian menghasilkan ekstra listrik dari gas buang Turbin Gas tersebut. Beberapa pemanfaatan gas buang dari Turbin Gas siklus terbuka akan mengubah sistem Turbin Gas menjadi Pembangkit Listrik Gas Uap (PLTGU) yang menggunakan HRSG atau dapat juga menggunakan teknologi sistem pemanfaatan gas buang dengan sistem ORC (*Organic Rankine Cycle*) yang dalam studi ini juga membahas ORC buatan dari GE yang disebut dengan ORegen ("*ORegen waste-heat recovery system*").

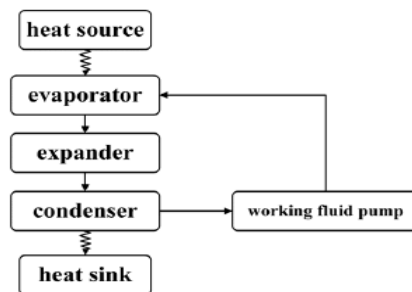
2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan studi pustaka terhadap sumber-sumber penelitian, yaitu dengan melakukan kajian terhadap:

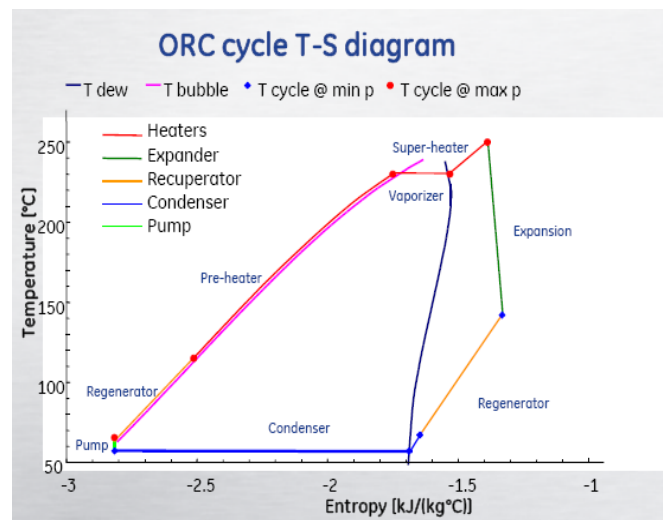
- 1) Efisiensi termal dari sistem ORegen pada berbagai tipe Turbin Gas buatan dari *General Electric* (GE) dan juga acuan efisiensi pada sistem-sistem lainnya.
- 2) Mengetahui unjuk kerja, kelebihan dan kekurangan fluida kerja khususnya fluida kerja siklus pentana.
- 3) Bahasan tentang Turbo Ekspander, jenis dan berbagai penggunaannya.

2.1. Siklus Rankine Organik

Siklus *Rankine* organik atau *Organic Rankine Cycle* (ORC) merupakan siklus termodinamika berdasarkan pada siklus klasik *Rankine* dengan menggunakan fluida kerja organik. (Yang et al., 2021), mendefinisikan ORC berdasarkan parameter-parameter siklus dan sifat-sifat fluida kerjanya. Parameter-parameter siklus tersebut diantaranya yaitu : Suhu penguapan (T_{evap}), suhu pengembunan (T_{con}), dan derajat panas lanjut (ΔT_{sup}), sedangkan fluida kerja diwakilli oleh sifat-sifat seperti suhu kritis (T_c), tekanan kritis (P_c), faktor asentris (ω) dan kapasitas panas molar gas ideal isobar. Sistem ORC biasanya berada pada siklus *Rankine* subkritis namun dapat juga diterapkan pada siklus transkritis sebagaimana pada studi yang dilakukan oleh (Zhu, Bo, et al., 2015), dimana cara ini mempunyai keuntungan ketika fluida kerja yang dipanaskan berubah dari fase cair ke keadaan kritis secara langsung tanpa melalui daerah dua fase. Secara garis besar proses ORC dapat digambarkan pada diagram alir berikut ini:



Gambar 2. Diagram alir untuk proses ORC (Chen et al., 2018)



Gambar 3. Diagram T-S dari Siklus ORC (Burrato, 2013)

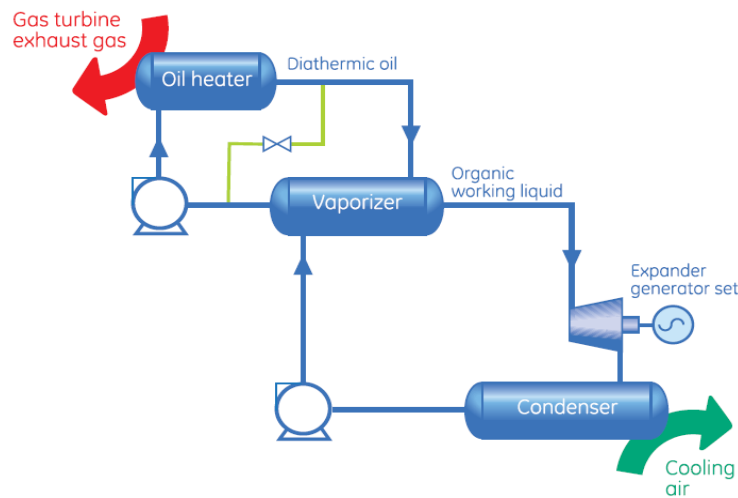
Sistem ORC ini juga sesuai digunakan untuk memanfaatkan panas buang yang terdapat pada industri dimana (Fierro et al., 2020), menentukan fluida kerja yang lebih sesuai berdasarkan suhu buangnya yaitu dengan mengacu pada:

- 1) Untuk suhu buangan yang tinggi sebagai sumber panas maka jenis alkana adalah fluida kerja yang lebih layak.
- 2) Sedangkan untuk suhu buangan yang rendah maka dapat digunakan refrigeran.

2.2. Proses dari Sistem ORC

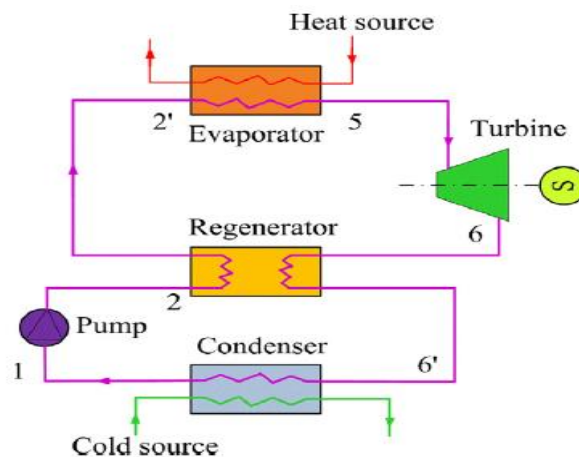
Setiap Siklus *Rankine* baik yang konvensional (siklus air-uap) maupun yang ORC selalu terdiri dari empat komponen utama yaitu pompa, evaporator (*vaporizer*), turbin dan kondensator dimana di dalam komponen-komponen ini terdapat empat proses yang terjadi yaitu : peningkatan tekanan, penguapan, ekspansi dan pendinginan (Aboelwafa et al., 2020),

ORGen adalah suatu siklus termodinamika panas lanjut (*superheat*) yang memanfaatkan gas buang dari keluaran Turbin Gas dan mengubahnya menjadi tenaga listrik. Siklus termodinamikanya berdasarkan siklus organik *Rankine*. Proses yang terjadi dari sistem ORC ini dapat dijelaskan pada diagram berikut ini:

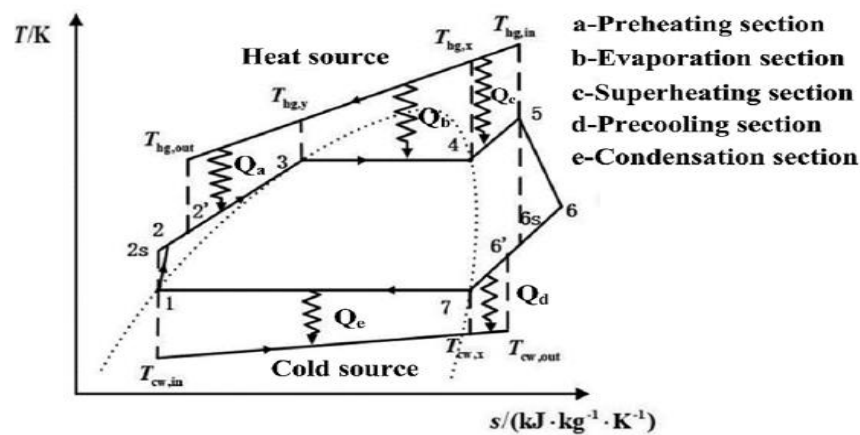


Gambar 4. Sistem *Organic Rankine Cycle* (General Electric, 2011)

Panas dari keluaran Turbin diserap oleh minyak diatermik (*diathermic oil*) yang merupakan suatu rangkaian tertutup yang selanjutnya digunakan untuk memanaskan rangkaian fluida organik di *Vaporizer*. Panas dengan suhu yang lebih rendah ini kemudian pada Ekspander dan Generator akan dikonversikan menjadi kerja berguna yang dapat menghasilkan listrik. ORC bekerja dengan fluida hidrokarbon yang menggantikan air sebagaimana sistem konvensional pada HRSG.



Gambar 5. Proses dari ORC (H. Feng et al., 2020)

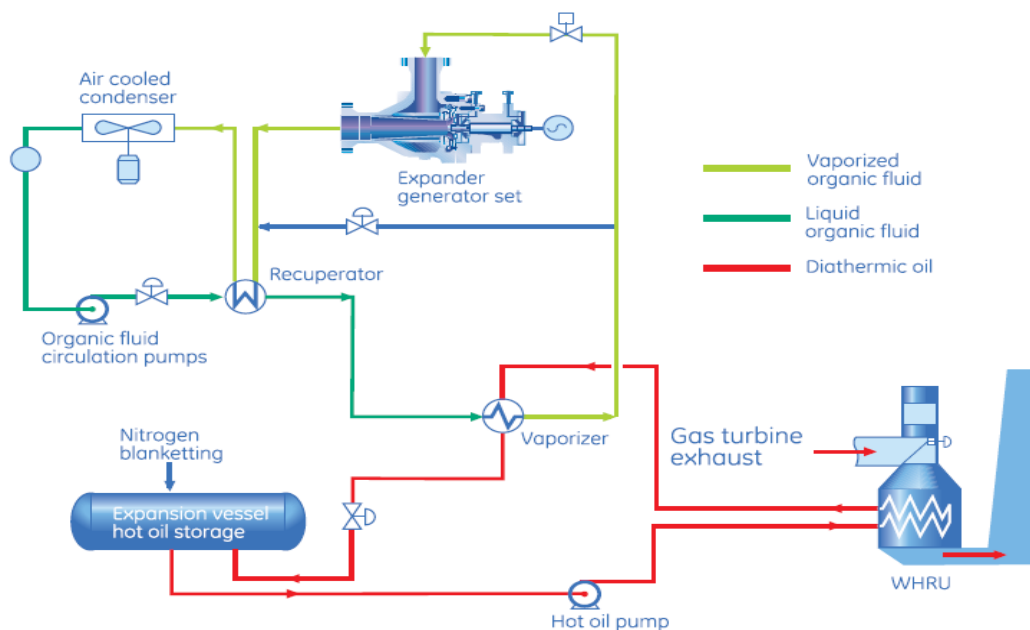


Gambar 6. Diagram T-S dari sistem konfigurasi ORC (H. Feng et al., 2020)

Sistem ORC ini serupa dengan siklus air-uap yang menggunakan fluida organik untuk menggerakkan “Turbo Expander” dan generator untuk menghasilkan listrik. Minyak diatermik dan fluida organik memungkinkan sumber-sumber panas yang bersuhu rendah digunakan secara efisien untuk menghasilkan listrik dengan rentang beberapa MW sampai 16 MW setiap unitnya (H. Feng et al., 2020).

2.3. Cara Kerja Sistem ORC

Fluida kerja organik bekerja dalam suatu rangkaian tertutup dimana fluida kerja tersebut diuapkan dan ditekan di dalam Vaporizer (Evaporator) oleh panas yang diperoleh dari keluaran Turbin Gas. Kemudian uap berekspansi di dalam Turbo Expander dan dikondensasikan dengan menggunakan penukar panas udara (Air Cooled Condenser) ataupun air. Kondensat di pompa kembali ke Vaporizer sehingga melengkapi suatu siklus termodinamika tertutup.

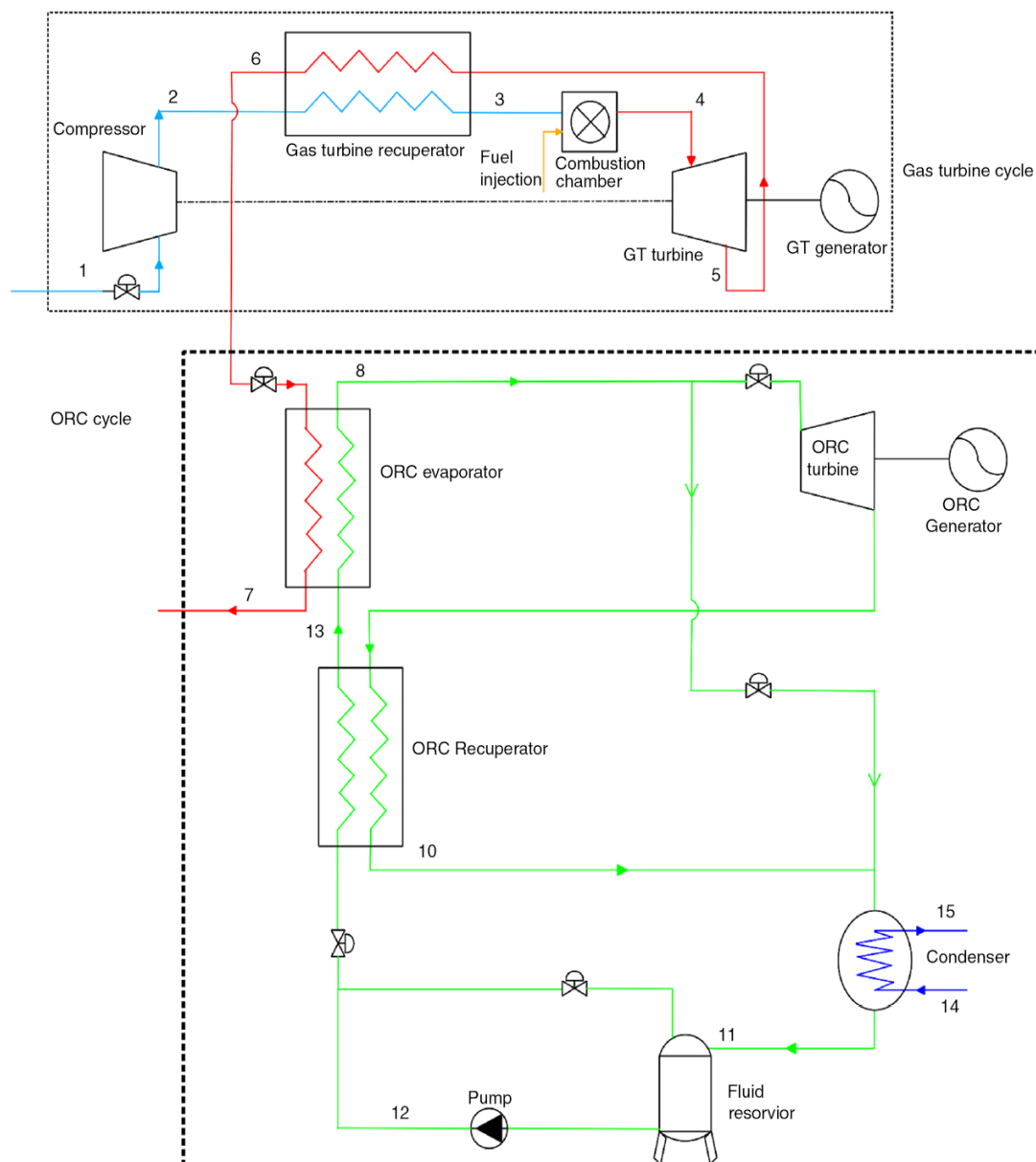


Gambar 7. Skema sistem ORegen Organic Rankine Cycle (General Electric 2011)

Minyak diatermik bekerja sebagai pembawa panas antara keluaran Turbin (*Turbine exhaust*) dan fluida kerja siklo pentana, dimana fluida kerja yang menguap di *Vaporizer* akan berekspansi di dalam Turbo Expander yang dihubungkan dengan generator untuk kemudian menghasilkan listrik.

Sumber-sumber pemanasan dan pendinginan pada peralatan penukar panas di *Vaporizer* maupun *Recuperator* tidak bersentuhan secara langsung dengan fluida kerja. Untuk penerapan dengan suhu yang lebih tinggi maka minyak termal (diatermik) dengan suhu tinggi akan digunakan sebagai pembawa panas dan regenerator ditambahkan untuk meningkatkan unjuk kerja siklus agar supaya lebih baik lagi.

Sistem ORC dapat juga diaplikasikan tanpa menggunakan minyak termal (*diathermic oil*) dimana panas gas buang Turbin Gas digunakan secara langsung memanaskan fluida kerja di *Evaporator* seperti terdapat pada gambar 8. di bawah ini (Ahmadi et al., 2020):



Gambar 8. Siklus Turbin Gas dan ORC tanpa minyak termal (Ahmadi et al., 2020)

Untuk proses-proses pada siklus gabungan antara Turbin Gas dan ORC tanpa menggunakan minyak termal dapat dijelaskan sebagai berikut :

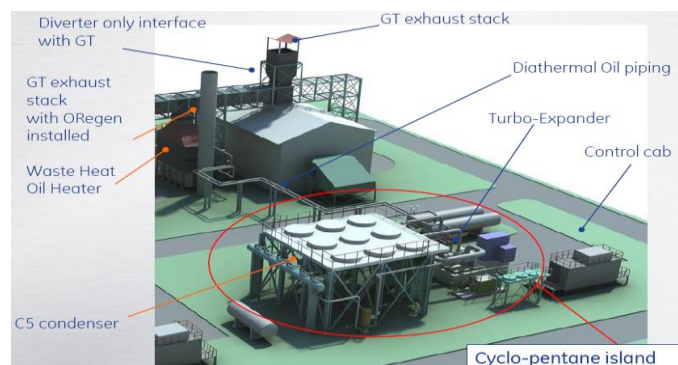
Siklus Turbin Gas :

- 1-2 : Kompresi udara di Kompresor
- 2-3 : Pemanasan awal udara di Recuperator
- 3-4 : Proses pembakaran di ruang bakar
- 4-5 : Ekspansi di Gas Turbin yang dihubungkan dengan Generator untuk menghasilkan listrik
- 5-6 : Panas gas buang Turbin Gas dimanfaatkan untuk pemanasan awal udara di Recuperator

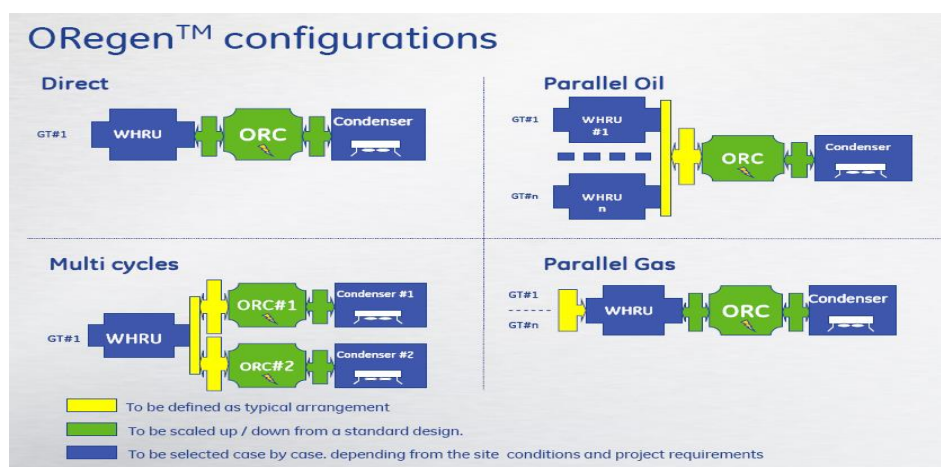
Siklus Rankine Organik (ORC) :

- 13-8 : Pemanasan fluida kerja di Evaporator
- 8-10 : Ekspansi di ORC Turbin atau Ekspander yang dihubungkan Generator kemudian fluida kerja memasuki Recuperator ORC
- 10-11 : Fluida kerja dikondensasikan di Kondensor
- 11-12 : Kondensat dipompa menuju ORC Recuperator untuk kemudian membentuk siklus tertutup lagi.

2.4. Tata Letak Pembangkit ORC dan Konfigurasinya



Gambar 9. Tipikal tata letak (layout) pembangkit ORegen (Burrato, 2013)



Gambar 10. Beberapa konfigurasi pembangkit ORegen (Burrato, 2013)

Multi siklus ORC dapat digunakan untuk memanfaatkan panas buang seperti pada penelitian yang dilakukan oleh (Yun et al., 2015), yang mengkaji penggunaan sistem ORC ganda (dual ORC) di kapal-kapal laut yang mengeluarkan panas buang yang besar pada berbagai kondisi pelayaran, dimana hal ini perlu dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi polusi dari emisi gas-gas buang serta untuk menghemat bahan bakar.

2.5. Fluida Kerja

Pemilihan fluida kerja adalah hal yang penting pada sistem ORC, menurut (Khater et al., 2021), fluida kerja mempengaruhi unjuk kerja dari siklus. Fluida kerja juga mempengaruhi desain dari turbin, keselamatan dari sistem, material dari komponen-komponen sistem, kondisi operasi, dampak terhadap lingkungan dan evaluasi ekonomi dari sistem.

Tabel 1.

Karakteristik Ukuran Unjuk Kerja dari Desain Fluida Kerja ORC (Khater et al., 2021)			
Termodinamika	Lingkungan	Keamanan	Proses
Massa jenis (ρ)	Potensi pengurangan Ozone (ODP)	Toksisitas (C)	Efisiensi (η)
Panas laten penguapan (H_v)	Potensi pemanasan global (GWP)	Sifat mudah terbakar (F)	Tekanan operasi maksimum (P_{max})
Kapasitas panas cairan (C_{pl})			Laju alir massa (m_f)
Viskositas (μ)			Tekanan kritis (P_c)
Konduktivitas panas (λ)			
Suhu titik cair (T_m)			
Suhu kritis (T_c)			

(Liao et al., 2020), juga menyatakan betapa sifat-sifat fluida kerja mempunyai pengaruh yang besar terhadap efisiensi termal dari sistem ORC. Berdasarkan kurva uap jenuh pada diagram suhu-entropi, maka fluida kerja pada ORC dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu : fluida kering, fluida isentropis, dan fluida basah.

Sesuai dengan hasil studi oleh (W. Fan et al., 2020), salah satu faktor yang mempengaruhi hubungan antara fluida kerja dan unjuk kerja termodinamika dari siklus ORC adalah suhu kritis (T_c) yang mempengaruhi stabilitas termal selama proses perpindahan panas di dalam Evaporator.

Karena banyaknya kemungkinan jenis fluida kerja maka ada beberapa kriteria yang diusulkan oleh (Pantaleo et al. 2019) yang dapat diikuti dalam memilih jenis fluida kerja, yaitu sebagai berikut:

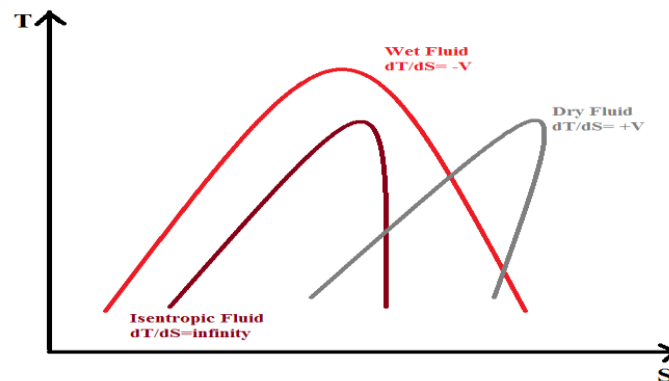
- 1) Potensi pemanasan global atau *Global Warming Potential* (GWP) ≤ 1430 (R134a)
- 2) Potensi Penghilangan Ozon atau *Ozone Depletion Potential* (ODP) $\leq 0,01$
- 3) Kesehatan (NFPA) \leq bahaya sedang (2)
- 4) Ketidakstabilan (NFPA) \leq bahaya rendah (1)

(Fierro et al., 2020), telah melakukan evaluasi dan kajian terhadap beberapa fluida kerja (R1234yf, R134a, Pentana, Siklo Pentana) dan mendapati bahwa golongan alkana mempunyai unjuk kerja yang lebih baik daripada refrigeran ketika pertimbangannya adalah terhadap suhu yang lebih tinggi. Adapun ORC yang beroperasi pada $T=180^\circ\text{C}$ dengan Siklo Pentana (*Cyclo-Pentane*) sebagai fluida kerja mempunyai NPV (*Net Present Value*) = 0,37 MUSD, ROR (*Rate of Return*) : 10,33% serta waktu pengembalian PB (*Payback time*) = 8,04 tahun merupakan alternatif fluida kerja yang terbaik.

(Aboelwafa et al., 2020), membagi tiga tipe fluida kerja yang terdapat pada siklus *Rankine* yang diklasifikasikan berdasarkan kemiringan (slope) dari kurva garis uap dalam diagram suhu-entropi (diagram T-S). Tiga tipe tersebut adalah :

- 1) Fluida basah dengan slope negatif
- 2) Fluida kering dengan slope positif
- 3) Fluida isentropis dengan slope bernilai tak berhingga (infinite) dimana kondisi ini hampir vertikal pada kurva uap jenuh.

Kondisi-kondisi ini dapat diilustrasikan pada gambar di bawah ini (Aboelwafa et al., 2020):



Gambar 11. Diagram T-S fluida kerja kering, basah, isentropis diklasifikasikan sesuai slope (dT/dS)

Tabel 2.

Sifat termal-fisik dan parameter kritis beberapa fluida kerja (Gong et al., 2015)

Working Fluids	M Kg/kmol	T_{ai} °C	P_{ai} MPa	P_{ai} Kg/m ³	Fluid Type
RC318	200,04	115,23	2,778	569,15	Dry
R124	136,48	122,28	3,624	539,07	Isentropic
R236fa	152,04	124,92	3,20	551,04	Dry
Isobutane	58,12	134,66	3,629	224,59	Isentropic
R236ra	152,04	139,29	3,502	833,70	Dry
R114	170,92	145,68	3,257	720,36	Dry
R600	58,12	151,98	3,796	227,35	Isentropic
R245fa	134,05	154,01	3,651	489,31	Isentropic
Neopentane	72,15	160,59	3,196	214,96	Dry
Cis-butene	56,11	162,60	4,226	191,10	Isentropic
R245ca	134,15	174,42	3,925	516,14	Dry
R123	152,93	183,68	3,662	524,99	Isentropic
Isopentane	72,15	187,20	3,378	215,65	Dry
N-pentane	72,15	196,55	3,370	207,74	Dry
R141b	116,95	204,35	4,212	492,97	Isentropic
R113	187,38	214,06	3,392	530,16	Dry
Isohexane	86,18	224,55	3,040	203,38	Dry
N-hexane	86,18	234,67	3,034	183,50	Dry

General Electric (GE) menggunakan Siklo pentana (*Cyclopentane*, C_5H_{10}) sebagai fluida kerja pada sistem ORC ini karena faktor ketersediaannya dan mempunyai harga yang relatif lebih murah.

Beberapa karakteristik utama dari Siklo pentana ini adalah:

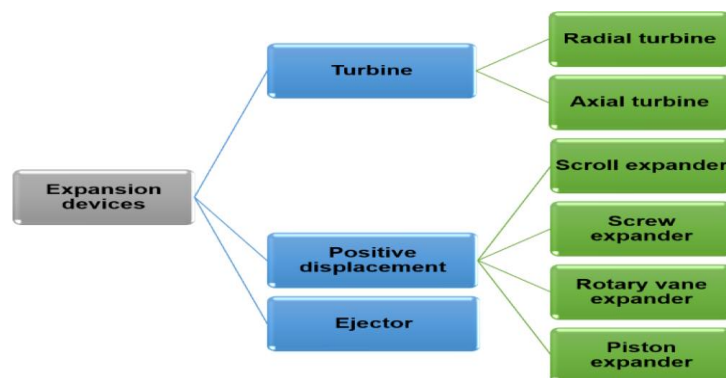
- 1) Mempunyai titik didih (boiling point) : $121^\circ F$ ($49,3^\circ C$)
- 2) Mempunyai titik beku (freezing point) : $-137^\circ F$ ($-94^\circ C$)
- 3) Berat molekul: 70.1
- 4) Penampakan: bening, cairan tidak berwarna
- 5) Mempunyai bau seperti bensin
- 6) Merupakan jenis hidrokarbon alisiklik yang sangat mudah terbakar
- 7) Tidak menimbulkan masalah korosi pada peralatan pembangkit listrik

2.6. Turbo Ekspander

Peralatan ekspansi merupakan komponen penting dalam ORC, karena ekspander merupakan alat yang mengekspansikan fluida kerja yang dihubungkan dengan generator untuk menghasilkan listrik.

(Zhao et al., 2019), membagi jenis ekspander menjadi 3 berdasarkan prinsip kerjanya yaitu:

- 1) Turbin (ekspander dinamis)
- 2) Ekspander dengan pergerakan positif (positive displacement)
- 3) Ejektor



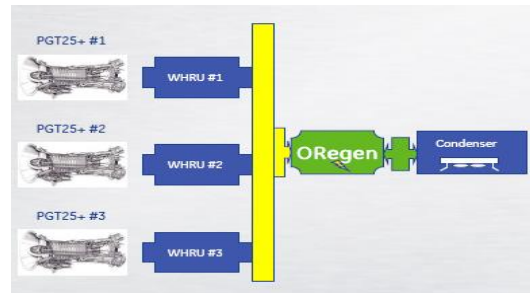
Gambar 12. Jenis-jenis peralatan ekspansi pada sistem ORC (Zhao et al., 2019)

Ekspander jenis Turbin sesuai digunakan untuk sistem ORC berskala besar. Screw ekspander sesuai untuk sistem ORC berskala menengah, sedangkan ekspander piston dan scroll lebih cocok untuk ORC yang kecil dan mikro. Khususnya ekspander scroll lebih sesuai digunakan untuk percobaan ORC di laboratorium. Ejektor adalah peralatan ekspansi tanpa rotor yang berarti tidak adanya output power pada poros. Energi dari proses ekspansi hanya dapat digunakan di dalam sistem ORC. Penggunaan ejektor dihubungkan secara seri dengan ekspander jenis lain yang dihubungkan dengan generator.

3. Hasil dan Manfaat ORegen

3.1. Manfaat ORegen

Suatu contoh manfaat sistem ini yaitu pada pembangkit ORegen di Canada yaitu dengan konfigurasi seperti di bawah ini:



Gambar 13. Konfigurasi pembangkit ORegen di Canada (Burrato, 2013)

Status dari konfigurasi pembangkit:

- 1) 3 unit Turbin Gas yang dihubungkan dengan 1 pembangkit ORegen
- 2) 2 unit Turbin Gas beroperasi dengan satu Turbin Gas berhenti (standby)

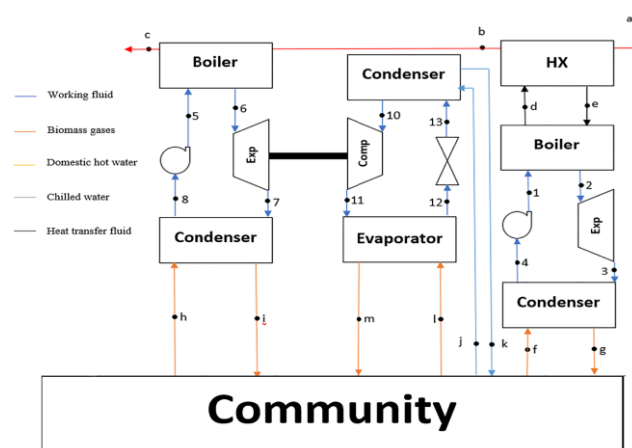
Dengan konfigurasi ini dapat menghasilkan tambahan energi listrik 14 MW dengan parameter sebagai berikut:

Tabel 3.

Hasil dari pembangkit ORegen dengan konfigurasi 3 GT (Burrato, 2013)

Net Output Power (MW)	Power yang dihasilkan		Pengurangan CO ₂ (Ton/tahun)
	MWh/tahun	MMBTU/tahun	
14	119.000	1.100.000	38.000

Pemanfaatan ORC bahkan dapat digunakan juga pada sistem yang disebut sebagai trigeneration sebagaimana studi yang dilakukan oleh (Nasir et al., 2021), dimana sumber energi terbarukan dari biomassa digunakan dalam kombinasi pendinginan, pemanasan dan sistem tenaga listrik berdasarkan pada ORC dan siklus uap bertekanan yang diaplikasikan pada skala kecil dan komunitas yang kurang berkembang.



Gambar 14. Skema sistem trigeneration yang diusulkan oleh (Nasir et al., 2021)

3.2. Perbandingan ORegen dengan PLTGU

Adapun perbandingan antara ORegen dengan siklus uap konvensional (PLTGU) dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.

Perbandingan ORegen dengan PLTGU (*General Electric*, 2011)

Deskripsi	ORegen	Standard PLTGU
Bebas air (water free)	***	*
Pemeliharaan (low maintenance)	***	*
Fleksibilitas tenaga (Power flexibility)	***	*
Investasi (Low investment)	**	*
Kesederhanaan pembangkit (Plant simplicity)	***	*
Pengurangan jejak Karbon	***	*
Fluida kerja (No replenishment of working fluid)	***	*
Kapabilitas personil (Unmanned Capability)	***	*
Output tambahan	**	***

3.3. Perbandingan Parameter beberapa tipe Turbine Gas GE

Hasil tenaga listrik untuk ORegen dari beberapa jenis pembangkit listrik Turbin Gas produksi dari GE (*General Electric*) yaitu sebagai berikut:

Tabel 5.

Data-Data Berbagai Tipe Turbin Gas GE dan ORegen (Burrato, 2013)

Model Turbin Gas	Turbin Gas	Aliran	Suhu	Efisiensi	ORegen <i>Gross</i>	Efisiensi
	Power (KW)	<i>Exhaust</i> (kg/s)	<i>Exhaust</i> (°C)	Turbin Gas (%)	<i>Output</i> (Mwe)	Sistem (%)
PGT25 (*)	23.261	68,9	525	37,7	6,9	48,9
PGT25+ (*)	31.364	84,3	500	41,1	7,9	51,5
PGT25+ G4 (*)	33.973	89,0	510	41,1	8,6	51,5
MS5001 (*)	26.830	125,2	483	28,4	11,3	40,4
MS5002B (*)	26.100	121,6	491	28,8	10,8	40,7
MS5002C (*)	28.340	124,3	517	28,8	12,4	41,4
MS5002D (*)	32.580	141,4	509	29,4	13,8	41,9
MS5002E (*)	32.000	101,0	510	36,2	9,8	47,2
MS6001B (*)	43.530	145,0	544	33,3	15,6	45,2
MS7001E (*)	87.300	302,0	535	33,1	31,1	44,9
LM6000 (**)	43.397	125,6	454	41,7	9,7	51,1
LMS100 (**)	100.700	216,8	423	43,8	15,7	50,8

Data referensi: kondisi ISO, 100% beban Gas Turbin, konfigurasi satu-satu.

(*) Nilai pada poros Turbin Gas.

(**) Nilai pada terminal generator untuk LM6000PC dengan frekuensi generator 60 Hz.

Studi dari (Oyedepo & Fakeye, 2020) menyatakan bahwa teknologi pemanfaatan gas buang secara efektif dapat menghasilkan sekitar 16,8% tenaga listrik nominal dari pembangkit listrik Turbin Gas serta mengurangi emisi setiap kW yang dibangkitkan, hal ini sesuai dengan keberlanjutan lingkungan dan mempromosikan keamanan dan penghematan energi.

(Wang et al., 2012) memberikan pernyataan tentang unjuk kerja dan kelayakan dari ORC yaitu:

- Suhu sumber panas yang lebih tinggi tidak berarti unjuk kerja yang lebih baik dari beda suhu “*pinch*” yang sama.
- Sistem ORC tidak ekonomis untuk suhu sumber panas lebih rendah daripada 100°C.

4. Analisa

4.1. Kelebihan dan Kekurangan ORegen

Setiap sistem yang dikembangkan selalu ada sisi kelebihan maupun kekurangannya, demikian juga dengan pembangkit ORegen, hal tersebut dapat diuraikan sebagai berikut:

Kelebihan ORegen:

- 1) Pemanfaatan gas buang dengan metode ORegen yaitu sistem ORC ini dapat meningkatkan produksi listrik tanpa adanya bahan bakar tambahan.
- 2) Mengurangi konsumsi energi “*house load*” secara keseluruhan.
- 3) Sistem ORegen ini meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.
- 4) Sistem ORegen ini ramah lingkungan serta mematuhi peraturan tentang lingkungan.

Kekurangan ORegen:

- 1) Dengan sifat siklo pentana yang mudah terbakar maka perlu pemeriksaan dan pencegahan yang teliti untuk mencegah adanya kebocoran dan kebakaran.
- 2) Perlu adanya N₂ *blanketting* atau *capping* selama pembangkit ORegen berhenti beroperasi (*shutdown*) dalam waktu yang lama untuk preservasi.

Untuk sistem ORC secara umum maka (Lim et al., 2017), menjelaskan beberapa keuntungan dan kelemahan dari ORC yang beberapa diantaranya yaitu sebagai berikut:

Keuntungan dari sistem ORC :

- 1) Terdapat berbagai macam alternatif fluida kerja.
- 2) Fluida kerja hampir merupakan fluida yang kering. Oleh karena itu kondisi panas lanjut dapat secara mudah dijaga setelah proses ekspansi.
- 3) Fluida kerja secara relatif mempunyai suhu penguapan yang rendah, maka fluida organik dapat dipakai untuk memperoleh energi dari sumber panas buangan, sebagai contohnya yaitu panas buang dengan suhu yang rendah 100-300°C dari industri, perkapalan dan geotermal.

Kelemahan dari sistem ORC :

- 1) Koefisien perpindahan panas yang kecil. Maka penukar panas tipe ‘shell and tube’ dapat digunakan pada sistem ORC.
- 2) Kebanyakan dari fluida organik adalah beracun dan mempunyai sifat mudah terbakar, karena itu pengoperasian sistem harus dilakukan secara sangat berhati-hati.

4.2. Analisa Energi

Hukum Termodinamika pertama tentang konservasi energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan tapi hanya berubah dari suatu bentuk ke bentuk lainnya. Berdasarkan konsep inilah maka efisiensi dari sistem dapat didefinisikan dimana efisiensi adalah kerja output yang dihasilkan dibandingkan dengan energi input yang diberikan.

Secara umum (Fierro et al., 2020), mengatakan bahwa semakin tinggi suhu buang maka efisiensi termal dan efisiensi eksergi dari siklus juga akan semakin tinggi demikian juga kerusakan total eksergi akan semakin berkurang.

(Wang et al., 2017), dalam studinya menyatakan bahwa modifikasi konfigurasi ORC adalah suatu metode yang efektif untuk mencapai efisiensi konversi energi yang lebih tinggi. Hal itu ditunjukkan oleh ORC dengan menggunakan regeneratif sehingga dapat menghasilkan nilai efisiensi yang lebih tinggi daripada ORC dasar.

4.3. Efisiensi Energi Termal

Dari Hukum pertama Termodinamika tentang kekekalan Energi: (R.K Rajput, Engineering Thermodynamic, 2007):

$$\Delta U = Q_{in} - W_{out} \quad (1)$$

$$dU = \partial Q_{in} - \partial W_{out}$$

$$\int dQ - \int dW = 0$$

Dengan adanya interaksi panas Q , maka:

$$W_{out} = Q - Q_0 \quad (2)$$

Efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output dengan input sehingga:

$$\eta = \frac{W_{out}}{Q} \quad (3)$$

masukkan persamaan (2) ke dalam persamaan (3) menjadi:

$$\eta = \frac{Q - Q_0}{Q} \quad (4)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_0}{Q}$$

Mesin kalor Carnot menyatakan bahwa: $\eta_{reversible} = f(T_H, T_L)$

$$\eta_{reversible} = f(T_H, T_L) \quad (5)$$

Sehingga

$$\frac{Q_0}{Q_{in}} = \frac{T_L}{T_H} \quad (6)$$

Masukkan persamaan (6), maka persamaan (4) dapat dituliskan dengan:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (7)$$

Sehingga efisiensi mesin kalor Carnot dapat dinyatakan menjadi:

$$\eta = 1 - \frac{Q_0}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (8)$$

Adapun kerja output maksimum adalah diambil dari persamaan (3), sehingga menjadi:

$$W_{out} = \eta \times Q_{in} \quad (9)$$

Kerja output maksimum yang dapat dilakukan yaitu:

$$W_{\text{out}} = \left[1 - \frac{T_L}{T_H} \right] \times Q_{\text{in}} \quad (7)$$

dimana:

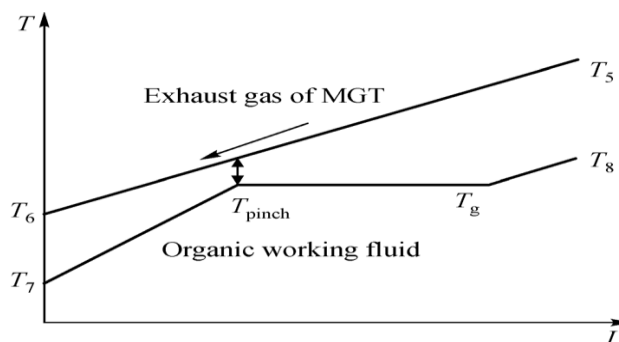
- Q_{in} = panas yang masuk ke mesin kalor dari suhu lebih tinggi T_H
- Q_{out} = panas yang keluar dari mesin kalor ke suhu lebih rendah T_{out}
- T_H = suhu pada saat panas masuk ke mesin kalor
- T_L = suhu pada saat panas dibuang dari mesin kalor
- T_o = suhu referensi yang mengacu pada lingkungan
- P_o = tekanan referensi yang mengacu pada lingkungan
- W_{out} = energi yang tersedia dari interaksi panas pada suhu T_H dengan referensi T_o

(Ui-tao et al., 2012), menyatakan bahwa unjuk kerja ORC utamanya dipengaruhi oleh beberapa hal sebagai berikut:

- Sifat-sifat termodinamika dari fluida kerja
- Suhu panas buang
- Suhu “pinch point” di Evaporator
- Kapasitas panas jenis dari pembawa panas
- Suhu inlet Turbin yaitu pada suhu lingkungan

(Bo et al., 2019), menunjukkan bahwa beberapa faktor seperti suhu inlet turbin, rasio tekanan, suhu evaporasi, dan suhu “pinch” merupakan ha-hal yang mempunyai dampak penting terhadap unjuk kerja dari sistem. Metode “pinch point” digunakan untuk perhitungan proses perpindahan panas di dalam evaporator maupun pada penukar panas lainnya. Perbedaan suhu minimum antara gas keluaran (*exhaust gas*) dan fluida kerja disebut sebagai perbedaan suhu “pinch point”. Biasanya “pinch point” diperoleh pada titik gelembung (didih) dari fluida kerja.

(Li et al., 2019) mengusulkan suatu sistem kombinasi “Trilateral Cycle-Organic Rankine Cycle (TLC-ORC) pada pemanfaatan panas buang untuk memperoleh unjuk kerja yang lebih baik dari kesesuaian antara sumber panas dan fluida kerja.



Gambar 15. Skema proses pertukaran panas di dalam Evaporator (Li et al., 2019)

(Zhu, Kang, et al., 2015) menjelaskan bahwa untuk suhu penguapan di atas dari nilai optimal maka keluaran tenaga bersih (net power output) adalah berbanding terbalik secara proporsional terhadap efisiensi termal, sehingga efisiensi termal bukanlah satu-satunya fokus ketika merancang sistem pembangkit listrik.

Ditinjau dari segi efisiensinya maka kombinasi sistem ORC tentu saja akan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Sebagaimana yang dilakukan oleh (Gotovskiy et al., 2012), yang meneliti kombinasi uap-air dan ORC untuk mencapai efisiensi yang lebih baik pada unit-unit Turbin Gas dan motor pembakaran dalam dimana pemanfaatan panas buang dengan menggunakan fluida kerja bertitik didih rendah dapat meningkatkan efisiensi menjadi 28-30%. Jika distribusi pembangkitan listrik atau kombinasi produksi panas dan listrik diimplementasikan maka efisiensi listrik dapat mencapai hingga 58-60% dengan faktor utilisasi panas bahan bakarnya sebesar 90%.

(Y. qiang Feng et al., 2020), juga menjelaskan bahwa penambahan regenerator untuk memanfaatkan panas ekstra dari gas keluaran (*exhaust gas*) dapat meningkatkan unjuk kerja sistem secara keseluruhan.

5. Diskusi

Mengatasi masalah lingkungan telah menjadi inisiatif yang utama di seluruh dunia pada masa ini. Pengurangan emisi CO₂ dan NO_x yang merupakan sumber polusi udara adalah hal penting dalam kontribusi untuk pencegahan perubahan iklim.

Sangat banyak proses-proses industri yang menghasilkan energi buang yang keluar ke cerobong suatu pabrik, kilang atau pembangkit listrik menuju ke atmosfer dan kemudian hilang begitu saja. Energi yang dimanfaatkan dari panas buang dapat memberikan tambahan suplai listrik tanpa adanya biaya, karena tidak diperlukan bahan bakar lagi. Karena itu pemanfaatan panas buang Turbin Gas akan memberikan kesempatan yang besar untuk menghemat energi secara produktif dan sekaligus juga menurunkan emisi CO₂ dan NO_x.

Kombinasi pembangkitan sistem adalah suatu metode yang efektif untuk meningkatkan efisiensi menyeluruh dari sistem tersebut. (Qu et al., 2021) menjelaskan bahwa terdapat beberapa keuntungan dari Turbin Gas seperti efisiensi yang tinggi, struktur yang sederhana serta teknologi yang mapan, serta:

- Suhu gas buang yang tinggi setelah keluaran dari Turbin Gas yang digunakan secara langsung sebagai sumber panas buang akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi.
- Terdapat berbagai pilihan Turbin Gas yang terjangkau biayanya, bagaimanapun juga disebabkan oleh pengaruh kondensasi asam maka supaya gas keluaran dari Turbin Gas tersebut dapat dimanfaatkan maka suhu gas keluarannya tidak boleh terlalu rendah.

Pemakaian siklus *Rankine* (RC) sangat baik pada suhu sumber panas yang sedang, adapun siklus tekanan ganda *Rankine* telah digunakan lebih dari seabad lamanya dan teknologi ini telah digunakan secara meluas sehingga rantai industri yang mapan ini dapat mengurangi biaya secara banyak. Bagaimanapun untuk sumber-sumber panas buang yang bersuhu rendah, sistem uap kurang efektif secara biaya dan sumber panas yang lebih rendah tidak memberikan cukup energi untuk menyediakan uap panas lanjut, sehingga dapat menimbulkan erosi pada sudu-sudu Turbin.

Susunan ORC hampir mirip RC tapi efisiensi termalnya lebih tinggi daripada RC pada suhu menengah dan rendah, sebab fluida kerja organik memberikan unjuk kerja yang lebih baik pada suhu yang rendah karena disebabkan oleh:

- Panas laten penguapan dari fluida kerja organik lebih rendah daripada air.
- Suhu dan tekanan proses penguapan lebih rendah.
- Pada fluida kering dan isentropis, proses ekspansi selesai pada daerah panas lanjut atau daerah uap sehingga tidak ada resiko korosi pada sudu Turbin.

- Perbedaan suhu antara penguapan dan pengembunan adalah kecil sehingga penurunan tekanan (pressure drop) juga kecil dan Turbin tingkat tunggal dapat digunakan. Namun demikian pemilihan dari ORC adalah suatu studi penting yang harus melibatkan kestabilan kimia, keselamatan dan faktor ramah terhadap lingkungan.

(Lei et al., 2021), telah menemukan suatu inovasi yang berkaitan dengan CPDR (*Critical Pressure Drop produced by Regenerator*) yang merupakan suatu kriteria efektif untuk mengevaluasi keefektifan termodinamika dengan adanya penambahan regenerator di dalam sistem ORC. Nilai CPDR yang negatif mengindikasikan bahwa penambahan regenerator tidak akan berkontribusi terhadap efisiensi termodinamika dari sistem ORC sehingga suatu regenerator yang efektif memerlukan nilai CPDR yang positif. Telah ditemukan juga bahwa suhu penguapan yang lebih rendah atau penggunaan fluida kerja dengan suhu kritis yang lebih tinggi cenderung akan mengurangi nilai dari CPDR. Efisiensi ekspander yang lebih rendah, suhu penguapan yang lebih tinggi dan keefektifan dari regenerator secara umum akan meningkatkan nilai CPDR. Berbagai ketentuan ini mengindikasikan bahwa penambahan regenerator perlu pertimbangan yang hati-hati, untuk sistem ORC dengan suhu penguapan yang rendah dan suhu kritis fluida kerja yang tinggi, maka penurunan tekanan yang dihasilkan regenerator juga kondensator dan pipa-pipa yang berkaitan harus diatur secara teliti, bila tidak maka hal-hal tersebut tidak akan meningkatkan efisiensi termodinamika sistem ORC sama sekali.

6. Kesimpulan

- Penggunaan instalasi ORC maupun ORegen pada PLTG akan meningkatkan kapabilitas aliran gas alam yaitu dengan memanfaatkan gas buangan Turbin Gas.
- Menurut (Köse et al., 2020), pemilihan fluida kerja memainkan peran yang penting dan kritis terhadap unjuk kerja dari sistem ORC, maka sebelum merancang sistem dari ORC pemilihan fluida kerja yang tepat akan membantu mengurangi ketidakefisiensian termodinamika dan mendapatkan tenaga bersih (MW) yang lebih tinggi dengan biaya kapital yang lebih rendah.
- Dari hasil penelitian (Meng et al., 2021), didapatkan bahwa dengan kenaikan dari suhu sumber panas maka nilai kondisi operasi yang optimal dari sistem juga akan meningkat yang seterusnya akan memperbaiki unjuk kerja termodinamika dan tekno-ekonomi secara berarti.
- (Wu et al., 2014), juga menyimpulkan bahwa unjuk kerja sistem ORC akan naik dengan meningkatnya suhu inlet dari gas buang (flue gas). Bagaimanapun juga suhu inlet gas buang (*flue gas*) yang lebih tinggi tidak semestinya merupakan suhu optimal dari keluaran gas buang tersebut karena terdapat suhu masuk gas buang yang sedang (*moderate*) yang akan membuat suhu keluaran gas buang optimal untuk mendapatkan nilai maksimum.
- ORC dan ORegen dapat dan mampu untuk dipasangkan pada setiap sistem Turbin Gas siklus terbuka (PLTG) maupun sistem-sistem lainnya yang mempunyai gas buang dengan suhu rendah, menengah ataupun tinggi.
- Sistem ORC dan ORegen dapat bekerja pada beban yang sangat rendah dan tidak akan mempengaruhi operasional dari sistem.
- ORC dan ORegen juga dapat beroperasi pada suhu luar (*ambient temperature*) yang sangat rendah.
- ORC dan ORegen dapat dioperasikan tanpa memerlukan pengawasan operasional dalam waktu 24 jam terus menerus, tapi hanya memerlukan pemeriksaan rutin secara berkala saja.

- Dari beberapa tipe Turbin Gas keluaran GE diperoleh efisiensi tertinggi keseluruhan dari sistem yaitu 51,5% dengan efisiensi Turbin Gas sebesar 41,1% yang diperoleh oleh Turbin Gas PGT25+ G4 dengan beban 34 MW dan ekstra listrik dari ORegen sebesar 8,6 MWe dan Turbin Gas PGT25+ yang juga mempunyai efisiensi sistem: 51,5% dengan efisiensi GT: 41,1% pada beban 31,4 MW dan beban ORegen: 7,9 MWe.
- Efisiensi sistem terendah yaitu 40,4% diperoleh oleh GT tipe MS5001 dengan efisiensi GT: 28,4%, dengan beban ORegen 11,3 MW dan beban GT: 26,8 MW.
- Adapun beban Oregan tertinggi diperoleh dari tipe Turbin Gas MS7001E yaitu 31.1 MWe dengan efisiensi GT: 33.1% dan efisiensi sistem 44,9% dengan beban GT: 87,3 MW.
- Beban ORegen terendah yaitu 6,9 MWe didapat oleh GT tipe PGT25 dengan efisiensi 37,7% dan efisiensi sistem 48,9% pada beban GT: 23,3 MW.

7. Saran

- Makalah ini dapat ditindak lanjuti dengan membuat penelitian lanjutan untuk suatu studi kasus khusus pada pembangkit listrik tertentu sudah yang menggunakan fasilitas ORegen.
- Melakukan studi lebih lanjut terhadap sistem eksergi dimana (Moghimi & Khosravian, 2018) menyatakan bahwa usaha-usaha penghematan energi karena adanya pengurangan bahan bakar fosil serta pemanasan global dapat dilakukan dengan mencoba menemukan kembali kehilangan energi pada berbagai siklus. Hal itu dapat dilakukan dengan melakukan analisa efisiensi eksergi terhadap sistem.
- Melakukan analisa biaya dan investasi apabila memungkinkan tersedianya data-data yang diperlukan yang biasanya merupakan kerahasiaan dari suatu perusahaan.

Daftar Pustaka

- Ahmadi, B., Golneshan, A. A., Arasteh, H., Karimipour, A., & Bach, Q. V. (2020). *Energy and exergy analysis and optimization of a gas turbine cycle coupled by a bottoming organic Rankine cycle*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 141(1), 495–510. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09088-6>
- Bo, Z., Zhang, K., Sun, P., Lv, X., & Weng, Y. (2019). *Performance analysis of cogeneration systems based on micro gas turbine (MGT), organic Rankine cycle and ejector refrigeration cycle*. Frontiers in Energy, 13(1), 54–63. <https://doi.org/10.1007/s11708-018-0606-7>
- Burrato, A. (2013). *ORegen TM Waste Heat Recovery: Development and Applications*.
- Chen, W., Feng, H., Chen, L., & Xia, S. (2018). *Optimal Performance Characteristics of Subcritical Simple Irreversible Organic Rankine Cycle*. Journal of Thermal Science, 27(6), 555–562. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1049-5>
- Dai, X., Shi, L., & Qian, W. (2020). *Material Compatibility of Hexamethyldisiloxane as Organic Rankine Cycle Working Fluids at High Temperatures*. Journal of Thermal Science, 29(1), 25–31. <https://doi.org/10.1007/s11630-019-1147-z>
- Fan, G., Gao, Y., Ayed, H., Marzouki, R., Aryanfar, Y., Jarad, F., & Guo, P. (2021). *Energy and exergy and economic (3E) analysis of a two-stage organic Rankine cycle for single flash geothermal power plant exhaust exergy recovery*. Case Studies in Thermal Engineering, 28. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101554>

Fan, W., Han, Z., Li, P., & Jia, Y. (2020). *Analysis of the thermodynamic performance of the organic Rankine cycle (ORC) based on the characteristic parameters of the working fluid and criterion for working fluid selection*. *Energy Conversion and Management*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112746>

Feng, H., Chen, W., Chen, L., & Tang, W. (2020). *Power and efficiency optimizations of an irreversible regenerative organic Rankine cycle*. *Energy Conversion and Management*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113079>

Feng, Y. qiang, Wang, X., Niaz, H., Hung, T. C., He, Z. xia, Jahan Zeb, A., & Xi, H. (2020). *Experimental comparison of the performance of basic and regenerative organic Rankine cycles*. *Energy Conversion and Management*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113459>

Fierro, J. J., Escudero-Atehortua, A., Nieto-Londoño, C., Giraldo, M., Jouhara, H., & Wrobel, L. C. (2020). *Evaluation of waste heat recovery technologies for the cement industry*. *International Journal of Thermofluids*, 7–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100040>

Ghasemian, E., & Ehyaei, M. A. (2018). *Evaluation and optimization of organic Rankine cycle (ORC) with algorithms NSGA-II, MOPSO, and MOEA for eight coolant fluids*. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 9(1), 39–57. <https://doi.org/10.1007/s40095-017-0251-7>

Gong, X. W., Wang, X. Q., Li, Y. R., & Wu, C. M. (2015). *Thermodynamic performance analysis of a coupled transcritical and subcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery*. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(7), 3017–3029. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0632-x>

Gotovskiy, M. A., Grinman, M. I., Fomin, V. I., Aref'ev, V. K., & Grigor'ev, A. A. (2012). *Use of combined steam-water and organic rankine cycles for achieving better efficiency of gas turbine units and internal combustion engines*. *Thermal Engineering*, 59(3), 236–241. <https://doi.org/10.1134/S0040601512030032>

Herath, H. M. D. P., Wijewardane, M. A., Ranasinghe, R. A. C. P., & Jayasekera, J. G. A. S. (2020). *Working fluid selection of Organic Rankine Cycles*. *Energy Reports*, 6, 680–686. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.150>

Khater, A. M., Soliman, A., Ahmed, T. S., & Ismail, I. M. (2021). *Power generation in white cement plants from waste heat recovery using steam-organic combined Rankine cycle*. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100138>

Köse, Ö., Koç, Y., & Yağlı, H. (2020). *Performance improvement of the bottoming steam Rankine cycle (SRC) and organic Rankine cycle (ORC) systems for a triple combined system using gas turbine (GT) as topping cycle*. *Energy Conversion and Management*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112745>

Kumar, A., & Rakshit, D. (2021). *A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on Organic Rankine Cycle applications*. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100292>

Lei, B., Zhang, C., Zhang, Y., Wu, Y., Wang, W., & Ma, C. (2021). *A Theoretical Criterion for Evaluating the Thermodynamic Effectiveness of Regenerators in Organic Rankine Cycle Systems*. *Journal of Thermal Science*, 30(6), 2027–2036. <https://doi.org/10.1007/s11630-021-1521-5>

Li, Z., Huang, R., Lu, Y., Roskilly, A. P., & Yu, X. (2019). *Analysis of a combined trilateral cycle - Organic Rankine cycle (TLC-ORC) system for waste heat recovery*. *Energy Procedia*, 158, 1786–1791. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.421>

Liao, G., E, J., Zhang, F., Chen, J., & Leng, E. (2020). *Advanced exergy analysis for Organic Rankine Cycle-based layout to recover waste heat of flue gas*. *Applied Energy*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114891>

Lim, H. S., Choi, B. S., Park, M. R., Hwang, S. C., Park, J. Y., Seo, J., Bang, J. S., & Kim, B. O. (2017). *Performance evaluation of two-stage turbine for the organic rankine cycle system*. Journal of Mechanical Science and Technology, 31(12), 5849–5855. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-1127-8>

Meng, N., Li, T., Gao, X., Liu, Q., Li, X., & Gao, H. (2022). *Thermodynamic and techno-economic performance comparison of two-stage series organic Rankine cycle and organic Rankine flash cycle for geothermal power generation from hot dry rock*. Applied Thermal Engineering, 200. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117715>

Moghim, M., & Khosravian, M. (2018). *Exergy optimization for a novel combination of organic Rankine cycles, Stirling cycle and direct expander turbines*. Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung, 54(6), 1827–1839. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2270-6>

Nasir, M. T., Ekwonu, M. C., Esfahani, J. A., & Kim, K. C. (2021). *Performance assessment and multi-objective optimization of an organic Rankine cycles and vapor compression cycle based combined cooling, heating, and power system*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101457>

ORegen* Waste Heat Recovery System for GE and other OEM Gas Turbines Get more from your Gas Turbines ecomagination SM. (n.d.). Organic Rankine Cycle and Steam Rankine Cycle for Waste Heat Recovery in a Cement Plant in Egypt: A Comparative Case Study. (2020). Water, Energy, Food and Environment, 1(1), 19–42. <https://doi.org/10.18576/wefej/010102>

Oyedepo, S. O., & Fakeye, A. B. (2020). Electric power conversion of exhaust waste heat recovery from gas turbine power plant using organic Rankine cycle. International Journal of Energy and Water Resources, 4(2), 139–150. <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00055-3>

Qu, J., Feng, Y., Zhu, Y., Zhou, S., & Zhang, W. (2021). *Design and thermodynamic analysis of a combined system including steam Rankine cycle, organic Rankine cycle, and power turbine for marine low-speed diesel engine waste heat recovery*. Energy Conversion and Management, 245. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114580>

Rajput, R. K. (2007). ENGINEERING THERMODYNAMICS T H I R D E D I T I O N SI Units Version. (n.d.). <http://boilersinfo.com/>

Ui-tao, W. H., Hua, W., & Zhu-min, Z. (n.d.). • ScienceDirect Optimization of Low-Temperature Exhaust Gas Waste Heat Fueled Organic Rankine Cycle. www.sciencedirect.com

Wang, Z. qi, Zhou, Q. yu, Xia, X. xia, Liu, B., & Zhang, X. (2017). *Performance comparison and analysis of a combined power and cooling system based on organic Rankine cycle*. Journal of Central South University, 24(2), 353–359. <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3437-5>

Wang, Z., Zhou, N., Zhang, J., Guo, J., & Wang, X. (2012). *Parametric optimization and performance comparison of organic Rankine cycle with simulated annealing algorithm*. Journal of Central South University, 19(9), 2584–2590. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1314-9>

Wu, S. Y., Li, C., Xiao, L., Li, Y. R., & Liu, C. (2014). *The role of outlet temperature of flue gas in organic Rankine cycle considering low temperature corrosion*. Journal of Mechanical Science and Technology, 28(12), 5213–5219. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1145-8>

Xu, B., Rathod, D., Yebi, A., & Filipi, Z. (2020). *A comparative analysis of real-time power optimization for organic Rankine cycle waste heat recovery systems*. Applied Thermal Engineering, 164. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114442>

Yang, F. bin, Yang, F. F., Li, J., Hu, S. Z., Yang, Z., & Duan, Y. Y. (2021). *Analysis of the thermodynamic performance limits of the organic Rankine cycle in low and medium temperature heat source*

applications. Science China Technological Sciences, 64(8), 1624–1640. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1787-6>

Yun, E., Park, H., Yoon, S. Y., & Kim, K. C. (2015). *Dual parallel organic Rankine cycle (ORC) system for high efficiency waste heat recovery in marine application*. Journal of Mechanical Science and Technology, 29(6), 2509–2515. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0548-5>

Zhao, Y., Liu, G., Li, L., Yang, Q., Tang, B., & Liu, Y. (2019). *Expansion devices for organic Rankine cycle (ORC) using in low temperature heat recovery: A review*. In Energy Conversion and Management (Vol. 199). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111944>

Zhu, J., Kang, Z., An, Q., & Li, T. (2015). *Parametric optimization of organic Rankine cycle with R245fa/R601a as working fluid*. Transactions of Tianjin University, 21(1), 69–75. <https://doi.org/10.1007/s12209-015-2361-8>

Zhu, J. ling, Bo, H. yu, Li, T. lu, Hu, K. yong, & Liu, K. tao. (2015). *A thermodynamics comparison of subcritical and transcritical organic Rankine cycle system for power generation*. Journal of Central South University, 22(9), 3641–3649. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2905-z>