Analisis Kinerja *Water Chiller System* Pada Inert Gas Generator Akibat Retrofit Kompresor Di Kapal LNG

Martua Jambak[1], Andriyanto Setyawan[2], Luga Martin Simbolon[3], Utami Nuri Adilah[4]

[1]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: martua78@gmail.com
[2]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: andriyanto@polban.ac.id
[3]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: lugamartin@polban.ac.id
[4]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: utaminuri@polban.ac.id

ABSTRAK

Sistem *Inert Gas Generator* (IGG) pada kapal *Liquefied Natural Gas* (LNG) berfungsi menghasilkan gas lembam berkandungan oksigen rendah dan *Dew Point* sesuai spesifikasi untuk mencegah kebakaran dan ledakan pada tangki muatan. Kinerja IGG sangat dipengaruhi oleh *Water Chiller System* yang mendinginkan gas hasil pembakaran sebelum memasuki dehumidifier. Data historis operasi menunjukkan *Water Chiller System* mengalami penurunan performa berupa *high pressure alarm* berulang, penurunan kapasitas pendinginan, serta kompresor Hartford tipe 1218NHF6W4K yang telah berstatus *obsolete*. Penelitian ini menganalisis pengaruh retrofit kompresor terhadap kinerja *Water Chiller System* dan kualitas gas lembam pada IGG kapal LNG berkapasitas 163.392 GT. Retrofit dilakukan dengan mengganti kompresor Hartford screw full-hermetic (436 kW) dengan Bitzer CSH9563-210Y-40D screw semi-hermetic (399 kW), serta mengganti refrigeran R404A menjadi R407C. Analisis dilakukan terhadap data operasi sebelum dan sesudah retrofit menggunakan diagram tekanan-entalpi (P-h). Hasil penelitian menunjukkan kapasitas pendinginan meningkat dari 112 kW menjadi 414 kW dan COP meningkat dari 1,27 menjadi 2,9. Temperatur gas keluaran *Gas Cooler* menurun dari 0,5°C menjadi −4,5°C, *Dew Point* turun dari −66°C menjadi −69,6°C, dan kandungan oksigen turun dari 0,89% menjadi 0,68%. Retrofit kompresor terbukti meningkatkan keandalan operasional *Water Chiller System* pada sistem IGG kapal LNG.

Kata Kunci:
Inert Gas Generator, *Water Chiller System* , Retrofit Kompresor, *Dew Point*, Kandungan Oksigen

The Inert Gas Generator (IGG) on a Liquefied Natural Gas (LNG) carrier produces inert gas with low oxygen content and a specified Dew Point to prevent fire and explosion hazards in cargo tanks. IGG performance strongly depends on the Water Chiller System that cools combustion gas before it enters the dehumidifier. Operational data showed the Water Chiller System experiencing recurring high-pressure alarms, reduced cooling capacity, and an obsolete Hartford 1218NHF6W4K compressor. This study analyzes the effect of compressor retrofit on Water Chiller System performance and inert gas quality on a 163,392 GT LNG carrier. The retrofit replaced the full-hermetic Hartford screw compressor (436 kW) with a semi-hermetic Bitzer CSH9563-210Y-40D (399 kW), together with a refrigerant change from R404A to R407C. Pre-and post-retrofit operating data were analyzed using pressure-enthalpy (P-h) diagrams. Results show the cooling capacity increased from 112 kW to 414 kW and COP increased from 1.27 to 2.9. Gas Cooler outlet temperature decreased from 0.5°C to −4.5°C, Dew Point decreased from −66°C to −69.6°C, and oxygen content decreased from 0.89% to 0.68%. The compressor retrofit was proven to improve the operational reliability of the Water Chiller System in the LNG carrier IGG.

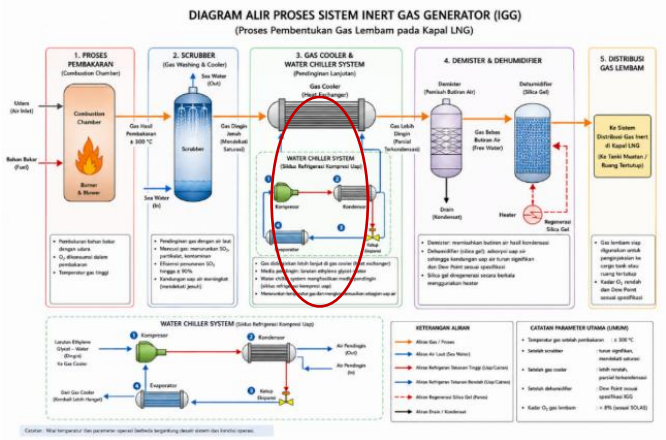
Keywords:
Inert Gas Generator, Water Chiller System, Compressor Retrofit, Dew Point, Oxygen Content

1. PENDAHULUAN

Peningkatan pemanfaatan *Liquefied Natural Gas* (LNG) sebagai energi transisi turut meningkatkan kebutuhan sistem transportasi laut yang aman dan andal. Berdasarkan *International Convention for the Safety of Life at Sea* (SOLAS) (1) dan *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk* (IGC Code) (2), kapal LNG wajib dilengkapi sistem gas lembam (*Inert Gas System*) untuk mencegah terbentuknya atmosfer mudah terbakar di dalam tangki muatan. Sesuai *International*

Code for Fire Safety Systems (FSS Code), kandungan oksigen gas lembam yang disuplai ke tangki muatan harus dipertahankan tidak melebihi 8% volume, sehingga atmosfer di dalam tangki tetap berada di luar rentang mudah terbakar (3). Selain itu, gas lembam harus memiliki tingkat kekeringan (*Dew Point*) yang memadai untuk mencegah terjadinya kondensasi maupun pembentukan es selama operasi kapal LNG (4,7,10)

Sistem *Inert Gas Generator* (IGG) menghasilkan gas lembam melalui proses pembakaran terkendali yang diikuti proses *scrubbing*, pendinginan (*Gas Cooler*), dan pengeringan (*demister* dan *dehumidifier*) sehingga menghasilkan gas lembam dengan kualitas yang memenuhi persyaratan operasional, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Proses Sistem Inert Gas Generator (IGG)

Kualitas gas lembam ditentukan oleh kandungan oksigen dan *Dew Point*, yang keduanya dipengaruhi secara langsung oleh kinerja *Water Chiller System* sebagai penyedia media pendingin pada *Gas Cooler* sebelum gas memasuki dehumidifier (4,7). Pada objek penelitian, sebuah kapal LNG berkapasitas 163.392 Gross Ton (GT) dengan IGG berkapasitas 25.000 m³/jam, *Water Chiller System* menggunakan kompresor *full-hermetic screw* Hartford tipe 1218NHF6W4K. Berdasarkan data historis operasi, sistem mengalami penurunan performa yang ditandai dengan seringnya *discharge pressure high alarm*, menurunnya kapasitas pendinginan serta kompresor telah berstatus *obsolete (discontinued product)* sehingga ketersediaan unit maupun suku cadangnya semakin terbatas.

Sebagai upaya meningkatkan keandalan sistem, dilakukan retrofit kompresor dari Hartford tipe 1218NHF6W4K menjadi Bitzer tipe CSH9563-210Y-40D mengacu pada *Competitive Replacement Guideline* yang diterbitkan oleh BITZER US (5) disertai penggantian refrigeran dari R404A menjadi R407C.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa retrofit sistem refrigerasi melalui penggantian kompresor maupun refrigeran merupakan salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan efisiensi energi, kapasitas pendinginan, serta mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan refrigeran dengan nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang tinggi (14–20). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut dilakukan pada sistem refrigerasi komersial atau aplikasi HVAC umum. Hingga saat ini, kajian mengenai pengaruh retrofit kompresor yang disertai penggantian refrigeran R404A menjadi R407C terhadap kinerja *Water Chiller System* pada *Inert Gas Generator* (IGG) kapal LNG masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi perubahan kinerja *Water Chiller System* dan kualitas gas lembam setelah dilakukan retrofit kompresor Hartford tipe 1218NHF6W4K menjadi Bitzer tipe CSH9563-210Y-40D serta penggantian refrigeran R404A menjadi R407C.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh retrofit kompresor tersebut terhadap kinerja *Water Chiller System* dan kualitas gas lembam yang dihasilkan sistem IGG, ditinjau berdasarkan perubahan tekanan kerja, kapasitas pendinginan, *Coefficient of Performance* (COP), temperatur gas, *Dew Point*, dan kandungan oksigen.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Objek dan Metode Penelitian

Objek penelitian adalah *Water Chiller System* pada sistem IGG kapal LNG 163.392 GT. Data primer diperoleh dari histori operasi sistem kontrol (*Programmable Logic Controller/Human Machine Interface*), pembacaan instrumen tekanan dan temperatur, serta hasil *testing and commissioning* setelah retrofit. Data sekunder meliputi spesifikasi teknis kompresor (6), karakteristik refrigeran (7), serta *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID) sistem yang digunakan sebagai acuan identifikasi konfigurasi instalasi refrigerasi. Data operasi sebelum retrofit diambil pada 22 Mei 2018 dan data setelah retrofit diambil pada 9 Oktober 2018, pada kondisi operasi normal yang sebanding (21).

2.2 Metode Analisis Data

Analisis dilakukan secara komparatif terhadap kondisi sebelum dan sesudah retrofit berdasarkan parameter tekanan kerja, temperatur operasi, kapasitas pendinginan, dan *Coefficient of Performance* (COP). Data primer diperoleh dari histori operasi sistem kontrol yang ditampilkan pada *Human Machine Interface* (HMI), pembacaan instrumen tekanan dan temperatur, serta hasil *testing and commissioning report* setelah retrofit. Seluruh data diambil pada kondisi operasi normal sesuai dengan *commissioning report* kapal LNG.

Kondisi termodinamika refrigeran pada setiap titik siklus dianalisis menggunakan perangkat lunak CoolPack dengan memasukkan data tekanan dan temperatur hasil pengukuran. Selanjutnya, kondisi refrigeran diplot ke dalam diagram tekanan–entalpi (P–h) untuk memperoleh nilai entalpi pada setiap titik siklus refrigerasi, sebagaimana ditunjukkan pada

Gambar 2. Nilai entalpi tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan kapasitas pendinginan dan *Coefficient of Performance* (COP) sistem (8,9).

Instrumen yang digunakan untuk memperoleh data operasi merupakan instrumen yang terpasang pada *Water Chiller System* sesuai spesifikasi pabrikan IGG. Jenis instrumen yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat Ukur

Parameter	Instrument	Model
Pressure	*Pressure Transmitter*	Danfos, AKS33; -1/ 34 bar: 060G2103
Temperature	*Temperature Transmitter*	MTR10; 4v PT100; o..+150ec; 4. 20mA,
Dew Point	*Dew Point Analyzer*	±1°C
O_2	*Oxygen Analyzer*	±0,1%

Sumber: *Spare part List IGG System*

Parameter dan lokasi pengambilan data pada sistem ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Titik Pengukuran

Parameter	Lokasi
Suction Pressure	Masuk Kompresor
Discharge Pressure	Keluar Kompresor
Temperatur refrigeran	Masuk Evaporator
Temperatur refrigeran	Keluar Kompresor
Temperatur *Gas Cooler*	Keluar *Gas Cooler*
Temperatur IGG	Keluar IGG, sebelum ke tanki LNG
Dew Point	Keluar Dehumidifier
Kandungan O_2	Keluar IGG sebelum ke tanki LNG

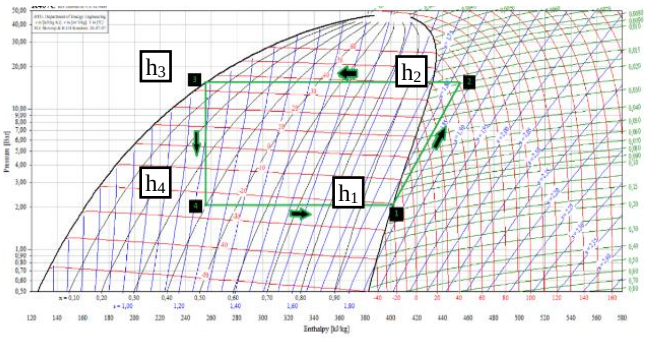
Sumber: Data historis operasi 22 Mei 2018 dan hasil commissioning report, 9 Oktober 2018.

Kapasitas pendinginan (*Cooling Capacity*,) dan *Coefficient of Performance* (COP) dihitung menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (2) berdasarkan hasil analisis diagram tekanan–entalpi (P–h) (8,9).

$$Qe = \dot{m}\,(h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$COP = (h_1 - h_4) \,/\, (h_2 - h_1) \quad (2)$$

Dengan $\dot{m}$ adalah laju aliran massa refrigeran (kg/s), h_1 adalah entalpi refrigeran keluar evaporator, h_2 adalah entalpi refrigeran keluar kompresor, h_4 adalah entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg). Laju aliran massa refrigeran ditentukan berdasarkan daya input kompresor yang dihitung dari hasil pengukuran arus dan tegangan listrik selama operasi. Perhitungan daya input kompresor mengacu pada daya aktif sistem tiga fasa yang dihitung dari hasil pengukuran tegangan, arus, dan faktor daya.



Gambar 2. Diagram Tekanan-entalpi (P-h)

Selanjutnya, hasil perhitungan kapasitas pendinginan dan COP dibandingkan dengan perubahan temperatur gas pada *Gas Cooler* , nilai *Dew Point*, dan kandungan oksigen gas lembam untuk mengevaluasi pengaruh retrofit terhadap kinerja *Water Chiller System* dan kualitas gas lembam yang dihasilkan oleh sistem IGG.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

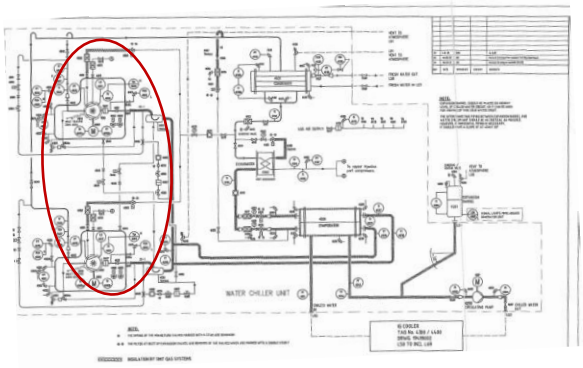
3.1 Kondisi *Water Chiller System* Sebelum Retrofit

Berdasarkan histori alarm sistem kontrol, *Water Chiller System* berulang kali mengalami *Discharge Pressure High Sensor Alarm* yang menyebabkan kompresor trip sebagai bagian dari fungsi proteksi. Inspeksi lapangan turut mengonfirmasi adanya kebocoran refrigeran pada *chiller unit* sehingga tekanan sisi hisap kompresor jauh di bawah kondisi desain. Selain penurunan performa operasi, kompresor Hartford tipe 1218NHF6W4K berstatus tidak diproduksi lagi (*obsolete*) sehingga ketersediaan unit maupun suku cadang semakin terbatas, menjadikannya pertimbangan utama pelaksanaan retrofit (5).

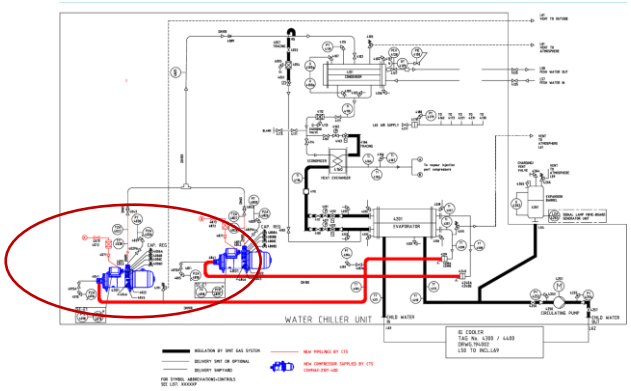
3.2 Implementasi Retrofit Kompresor dan Refrigeran

Retrofit sistem refrigerasi dilakukan melalui penggantian kompresor Hartford tipe 1218NHF6W4K (full-hermetic screw, 436 kW) menjadi Bitzer tipe CSH9563-210Y-40D (semi-hermetic screw, 399 kW), disertai penggantian refrigeran dari R404A menjadi R407C, modifikasi sistem pelumasan dari external oil separator menjadi internal oil separator, penyesuaian perpipaan refrigeran, serta penyesuaian parameter kontrol dan sistem proteksi.

Konfigurasi sistem refrigerasi sebelum retrofit berdasarkan Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan konfigurasi sistem setelah retrofit ditunjukkan pada Gambar 4. Perubahan konfigurasi tersebut memperlihatkan penyesuaian komponen utama sistem refrigerasi sesuai dengan spesifikasi kompresor Bitzer dan refrigeran R407C.



Gambar 3. *Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) Water Chiller System* sebelum Retrofit



Gambar 4. *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID) *Water Chiller System* sesudah Retrofit

Perbandingan parameter operasi hasil pengukuran sebelum dan sesudah retrofit disajikan pada Tabel 3. Secara umum, hasil pengukuran menunjukkan adanya peningkatan kinerja *Water Chiller System* setelah dilakukan retrofit kompresor dan penggantian refrigeran. Perubahan tersebut ditunjukkan oleh peningkatan *suction pressure*, penurunan *discharge pressure* dan rasio kompresi, penurunan temperatur gas keluaran *Gas Cooler* dan IGG, penurunan nilai *Dew Point* serta kandungan oksigen, serta peningkatan kapasitas produksi gas lembam.

Tabel 3. Perbandingan Parameter Operasi *Water Chiller* Unit Sebelum dan Sesudah Retrofit Kompresor

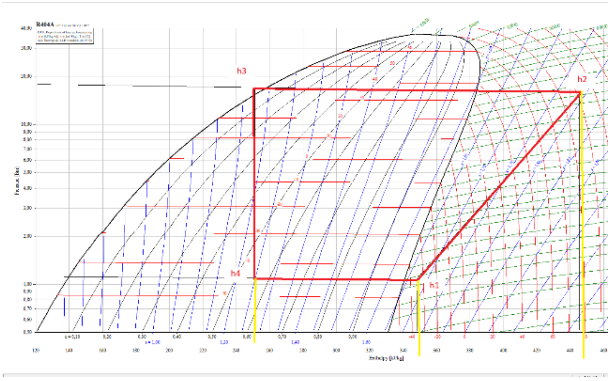
Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah
Suction pressure	bar	0,3	3,3
Discharge pressure	bar	17,4	15,4
Rasio kompresi		14,15	3,81
Temp. keluaran *Gas Cooler*	(°C)	0,5	−4,5
Temp. keluaran IGG	(°C)	18	13
Dew Point	(°C)	−66	−69,6
Kandungan O_2	%	0,89	0,68
Kapasitas produksi gas	m³/jam	17.800	28.000

Sumber: Data historis operasi 22 Mei 2018 dan hasil testing and commissioning 9 Oktober 2018.

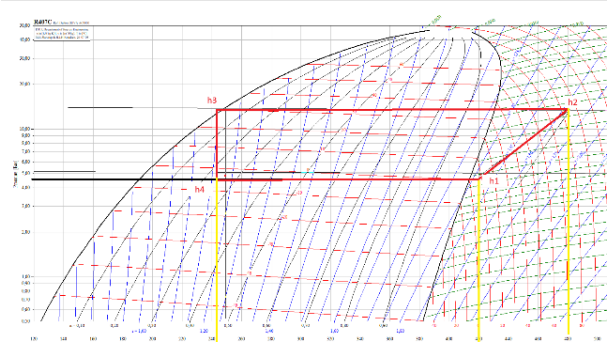
Tabel 3 menunjukkan bahwa *discharge pressure* menurun dari 17,4 bar menjadi 15,4 bar, sedangkan *suction pressure* meningkat dari 0,3 bar menjadi 3,3 bar sehingga rasio kompresi kompresor menurun dari 14,15 menjadi 3,81. Penurunan rasio kompresi menunjukkan bahwa beban kerja kompresor selama proses kompresi menjadi lebih rendah sehingga proses kompresi berlangsung lebih efisien. Rasio kompresi yang lebih rendah juga berkontribusi terhadap penurunan temperatur keluaran kompresor (*discharge temperature*), sehingga proses kondensasi refrigeran berlangsung lebih stabil dan mendukung peningkatan efisiensi siklus refrigerasi. Namun demikian, nilai suction pressure yang sangat rendah pada kondisi sebelum retrofit tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik kompresor Hartford, tetapi juga oleh adanya kebocoran refrigeran pada Water Chiller Unit. Oleh karena itu, perbandingan rasio kompresi setelah retrofit merupakan hasil dari kombinasi penggantian kompresor, penggantian refrigeran R404A menjadi R407C, serta perbaikan kondisi sistem refrigerasi secara keseluruhan.

3.3 Analisis Kapasitas Pendinginan dan COP

Analisis kapasitas pendinginan dan COP dilakukan berdasarkan hasil plot diagram P–h menggunakan perangkat lunak CoolPack untuk kondisi sebelum dan sesudah retrofit. Diagram siklus refrigerasi sebelum retrofit menggunakan kompresor Hartford dan refrigeran R404A ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan kondisi sesudah retrofit menggunakan kompresor Bitzer dan refrigeran R407C ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Diagram P-h Hartford



Gambar 6. Diagram P-h Bitzer

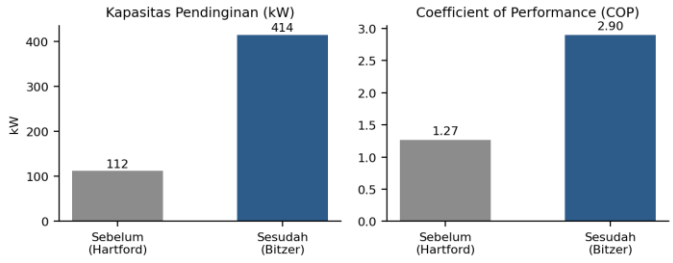
Untuk memudahkan tampilan data, berikut tabel analisa data sebelum dan sesudah retrofit.

Tabel 4. Analisis *Water Chiller*

Parameter	Satuan	Hartford (R404A)	Bitzer (R407C)	Perubahan
Refrigeran		R404A	R407C	-
Tekanan hisap *(Suction Pressure)*	bar	0,3	3,3	↑
Tekanan buang (*Discharge Pressure)*	bar	17,4	15,4	↓
Rasio Kompresi (Compression Ratio)		14,15	3,81	↓73%
h_1	kJ/kg	350	420	-
h_2	kJ/kg	445	480	-
h_3	kJ/kg	250	245	-
h_4	kJ/kg	250	245	-
Efek Refrigerasi *(Refrigeration Effect)* (h_1-h_4)	kJ/kg	100	175	↑75%
Kerja Kompresor (*Compressor Work*) (h_2-h_1)	kJ/kg	95	60	↓36%
Laju aliran Massa (*Mass Flow)*	kg/s	1,12	2,43	↑117%
Kapasitas Pendinginan (*Cooling Capacity)*	kW	112	414	↑270%
COP		1,27	2,9	↑128%

Sumber : Hasil analisis penulis berdasarkan data historis operasi, *testing and commissioning report*, dan analisis diagram P–h menggunakan CoolPack.

Dari Tabel 4 didapatkan peningkatan COP sebesar 128%, peningkatan tersebut disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu meningkatnya laju aliran massa refrigeran serta meningkatnya efek refrigerasi akibat karakteristik termodinamika R407C dan kondisi operasi kompresor yang lebih stabil. Perbandingan kapasitas pendinginan dan COP ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Kapasitas Pendinginan dan COP

3.4 Pengaruh Retrofit terhadap Kualitas Gas Lembam

Peningkatan kapasitas pendinginan *Water Chiller System* berdampak langsung pada proses pendinginan gas lembam di *Gas Cooler* . Pada Tabel 3, temperatur gas keluaran *Gas Cooler* menurun dari 0,5°C menjadi −4,5°C, diikuti penurunan temperatur gas keluaran IGG dari 18°C menjadi 13°C. Secara termodinamika, semakin rendah temperatur gas yang keluar dari *Gas Cooler* , semakin besar peluang kondensasi uap air yang terkandung di dalam gas sebelum memasuki *dehumidifier*, sehingga beban adsorpsi pada media Silika Gel menjadi lebih rendah (10). Kondisi penurunan *Dew Point* dan kandungan oksigen bisa dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Perbandingan Parameter Kualitas Gas Lembam pada Sistem IGG Sebelum dan Sesudah Retrofit

Parameter	Satuan	Persyaratan	Sebelum Retrofit	Sesudah Retrofit
Kandungan O_2	%	≤ 8	0,89	0,68
Dew Point	°C	≤ −40	−66	−69,6
Kapasitas Produksi IGG	m³/jam	25.000	17.800	28.000

Sumber: Hasil analisa Penulis 2026

Kapasitas produksi gas lembam meningkat dari 17.800 m³/jam menjadi 28.000 m³/jam sehingga telah memenuhi bahkan melampaui kapasitas desain sebesar 25.000 m³/jam. Peningkatan tersebut dicapai karena sistem IGG dapat beroperasi secara berkesinambungan tanpa mengalami interupsi akibat alarm maupun *trip* pada *Water Chiller System*. Seluruh parameter kualitas gas lembam setelah retrofit memenuhi persyaratan IMO dan IGC Code (2), dan sistem IGG mampu beroperasi secara berkesinambungan tanpa alarm maupun shutdown pada kondisi operasi yang diuji. Dengan demikian, retrofit kompresor Bitzer CSH9563-210Y-40D dapat dinyatakan sebagai solusi teknis yang efektif untuk memulihkan keandalan *Water Chiller System* pada IGG kapal LNG dengan karakteristik operasi sejenis.

3.5 Dokumentasi Implementasi Retrofit

Untuk memperlihatkan implementasi retrofit secara aktual, kondisi *Water Chiller System* sebelum dan sesudah pekerjaan retrofit ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Gambar 7 memperlihatkan kondisi sistem sebelum dilakukan penggantian kompresor, sedangkan Gambar 8 menunjukkan kondisi sistem setelah seluruh pekerjaan retrofit selesai dilaksanakan. Dokumentasi tersebut memperlihatkan bahwa penggantian kompresor, penyesuaian perpipaan refrigeran, dan konfigurasi sistem telah berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan retrofit.

Gambar 7. Kondisi Aktual *Water Chiller System* Sebelum Retrofit

Gambar 8. Kondisi Aktual *Water Chiller System* Setelah Retrofit

Dokumentasi tersebut memperlihatkan bahwa seluruh pekerjaan retrofit telah selesai dilaksanakan sesuai dengan konfigurasi sistem yang direncanakan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa: (1) Kinerja *Water Chiller System* berpengaruh langsung terhadap performa sistem IGG, ditunjukkan oleh penurunan temperatur *Gas Cooler* , penurunan *Dew Point*, dan penurunan kandungan oksigen setelah kapasitas pendinginan meningkat; dan (2) Retrofit kompresor Hartford tipe 1218NHF6W4K menjadi Bitzer tipe CSH9563-210Y-40D terbukti meningkatkan kapasitas pendinginan dari 112 kW menjadi 414 kW dan COP dari 1,27 menjadi 2,9, sehingga kapasitas produksi gas lembam meningkat dari 17.800 m³/jam menjadi 28.000 m³/jam dan memenuhi seluruh persyaratan operasi IGG.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, serta rekan-rekan PT Catur Mitra Teknologi atas dukungan data dan kesempatan pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. International Maritime Organization (IMO). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, as Amended*. London: IMO; 2020.
2. International Maritime Organization (IMO). *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code).* London: IMO; 2016.
3. International Maritime Organization (IMO). *International Code for Fire Safety Systems (FSS Code).* Resolution MSC.98(73). London: IMO; 2000.
4. Society of International Gas Tanker and Terminal Operators (SIGTTO). *Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals (LGHP4).* 4th ed. Livingston: Witherby Publishing Group; 2016.
5. BITZER US. *Competitive Replacement Guideline: Hartford Dunham Bush NHF Screw Cross Reference Guide.* Document XR-0019-01. Flowery Branch, GA: BITZER US; 2013.
6. BITZER. *Screw Compressors Technical Information.* Sindelfingen, Germany: BITZER; 2023.
7. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *ASHRAE Handbook—Refrigeration.* Atlanta, GA: ASHRAE; 2022.
8. Dossat RJ, Horan TJ. *Principles of Refrigeration.* 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education; 2002.
9. Çengel YA, Boles MA. *Thermodynamics: An Engineering Approach.* 9th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2019.
10. Wärtsilä. *Inert Gas Generator Operation and Maintenance Manual.* Helsinki: Wärtsilä; 2018.
11. Whitman B, Johnson B, Tomczyk J, Silberstein E. *Refrigeration and Air Conditioning Technology.* 9th ed. Boston: Cengage Learning; 2021.
12. Purnomo T, Sinaga N, Almuzani N. Studi kasus proses inerting tanki muatan pada kapal MT. GasWalio dalam rangka persiapan docking. *Dinamika Jurnal Ilmiah Teknik Mesin.* 2021;12(2):80–87.
13. Wijayanto F. *Optimalisasi Inert Gas System Guna Mencegah Timbulnya Ledakan di Dalam Tangki Akibat Konsentrasi Oksigen yang Terlalu Tinggi di Kapal MT. Gede* [Skripsi]. Semarang: Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang; 2019.
14. Devecioğlu AG, Oruç V. Experimental comparison of R404A and R452A in refrigeration systems. *Science and Technology for the Built Environment.* 2021;27(1):61–69.
15. Llopis R, Calleja-Anta D, Sánchez D, Cabello R, Torrella E. R454C, R459B, R457A and R455A as low-GWP replacements of R404A: Experimental evaluation and optimization. *International Journal of Refrigeration.* 2019;106:133–142.
16. Oruç V, Devecioğlu AG, İlhan DB. Retrofit of an internal heat exchanger in an R404A refrigeration system using R452A: Experimental assessment. *International Journal of Refrigeration.* 2024;167:250–260.
17. Mota-Babiloni A, Haro-Ortuño J, Navarro-Esbrí J, Barragán-Cervera Á. Experimental drop-in replacement of R404A for warm countries using the low-GWP mixtures R454C and R455A. *International Journal of Refrigeration.* 2018;91:136–145.
18. Koşan M. Investigation of using low-GWP alternatives to replace R404A in the refrigeration system. *International Journal of Energy Studies.* 2023;8(3):453–464.
19. Wang Z, Zhang Y, Li X, et al. Comparative study on the performance of an R404A commercial refrigeration system retrofitted with R290 and R454C. *Journal of Engineering Sciences.* 2024;12(4):381–392.
20. Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Barragán-Cervera Á, et al. Overview of refrigerant options for replacing R404A in commercial refrigeration. *International Journal of Refrigeration*. 2017;82:288–301.
21. *Testing and Commissioning Report* Kapal LNG Zagra, 9 Oktober 2018.