Evaluasi Kelayakan Teknis Penggunaan Refrigeran R717 sebagai Alternatif Pengganti R22 pada Sistem Pendingin *Plant Dry Ice Expanded Tobacco* Berdasarkan Simulasi Termodinamika

Yogaswara Chudan Permana[1], Parisya Premiera Rosulindo[2]
Windy Hermawan Mitrakusuma[3*]

[1]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: yogaswara.chudan.tptu425@polban.ac.id
[2]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: parisya.premiera@polban.ac.id
[3]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
**E-mail korespondensi: windyhm@polban.ac.id*

ABSTRAK

Refrigeran R22 telah lama digunakan pada sistem pendingin industri dan komersial karena memiliki karakteristik termodinamika yang baik. Namun, R22 termasuk refrigeran HCFC yang memiliki *Ozone Depletion Potential* (ODP) dan *Global Warming Potential* (GWP) sebesar 1760, sehingga penggunaannya dihentikan secara bertahap sesuai Protokol Montreal. Salah satu alternatif yang potensial adalah amonia (R717), yang memiliki ODP nol, GWP mendekati nol, serta performa termodinamika yang lebih baik. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan penggunaan R717 sebagai pengganti R22 pada sistem pendingin Plant *Dry Ice Expanded Tobacco* (DIET). Metode penelitian menggunakan studi literatur dan analisis data sekunder terhadap sifat termodinamika refrigeran, kinerja sistem pendingin yang meliputi *Coefficient of Performance* (COP), kapasitas pendinginan, konsumsi energi, serta aspek keselamatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan R717 meningkatkan COP sebesar 4,6% dan kapasitas pendinginan sebesar 5,5%, sehingga menghasilkan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan R22. Dari aspek ekonomi, diperoleh potensi penghematan biaya operasional sekitar Rp85 juta per tahun dengan *payback period* selama 11 tahun. Meskipun R717 memiliki sifat toksik dan korosif, penerapannya tetap layak dilakukan dengan memperhatikan desain sistem, pemilihan material, dan penerapan standar keselamatan yang memadai. Secara keseluruhan, R717 merupakan alternatif yang layak menggantikan R22 dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan.

Kata Kunci:
R717 (Amonia), R22, Retrofit, Kelayakan Teknis, Analisis Ekonomi

R22 refrigerant has been widely used in industrial and commercial refrigeration systems due to its favourable thermodynamic properties and operational reliability. However, as a hydrochlorofluorocarbon (HCFC), R22 has an ozone depletion potential (ODP) and a high global warming potential (GWP) of 1760, leading to its gradual phase-out under the Montreal Protocol. Ammonia (R717) is considered a promising alternative because it has zero ODP, a near-zero GWP, and superior thermodynamic performance. This study evaluates the technical, economic, and environmental feasibility of replacing R22 with R717 in the Dry Ice Expanded Tobacco (DIET) Plant refrigeration system. The research employed a literature review and secondary data analysis to assess refrigerant thermodynamic properties, refrigeration system performance, including the coefficient of performance (COP), cooling capacity, energy consumption, and safety aspects. The results indicate that replacing R22 with R717 increases the COP by 4.6% and the cooling capacity by 5.5%, resulting in improved energy efficiency. From an economic perspective, the proposed system offers an estimated annual operating cost saving of approximately IDR 85 million with a payback period of 11 years. Although R717 is toxic and corrosive, its implementation is technically feasible when appropriate system design, material selection, and safety measures are applied. Overall, R717 is a viable alternative to R22 from technical, economic, and environmental perspectives.

Keywords:
R717 (Ammonia), R22, Retrofit, Technical Feasibility, Economic Analysis

1. PENDAHULUAN

Refrigeran R22 (*chlorodifluoromethane*) telah menjadi salah satu refrigeran komersial yang paling banyak digunakan pada sistem pendingin industri dan komersial selama beberapa dekade terakhir. Hal ini disebabkan oleh sifat termodinamika yang sangat baik, stabilitas kimia yang tinggi, serta kompatibilitasnya dengan berbagai material dan minyak pelumas yang umum digunakan. Namun, R22 termasuk dalam kelompok *hydrochlorofluorocarbon* (HCFC) yang diketahui memiliki potensi merusak lapisan ozon (*Ozone Depletion Potential*/ODP) sebesar 0,055 serta nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang sangat tinggi, yaitu 1760. Berdasarkan Protokol Montreal dan amandemennya, seluruh negara di dunia berkomitmen untuk menghentikan produksi dan penggunaan HCFC secara bertahap (6). Indonesia sebagai negara pihak telah meratifikasi protokol tersebut dan mengimplementasikan program *HCFC Phase-Out Management Plan (HPMP)* yang dikoordinasikan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan bersama dengan UNDP (7).

Salah satu alternatif refrigeran yang dinilai paling potensial untuk menggantikan R22 pada aplikasi industri adalah R717 atau amonia. Amonia merupakan refrigeran alami yang memiliki keunggulan luar biasa dari sisi lingkungan, yaitu nilai ODP = 0 dan GWP yang mendekati nol (2,14). Selain itu, amonia memiliki sifat termodinamika yang unggul, khususnya kalor laten penguapan yang tinggi, sehingga menghasilkan efisiensi energi (*Coefficient of Performance/COP*) yang lebih baik dibandingkan banyak refrigeran sintetis (5). Di negara-negara maju, amonia telah lama digunakan secara luas dalam industri pengolahan makanan, penyimpanan dingin berskala besar, serta proses manufaktur yang memerlukan pendinginan dengan kapasitas tinggi.

Namun demikian, penerapan R717 bukannya tanpa tantangan. Amonia memiliki karakteristik toksik (kategori B2L berdasarkan ASHRAE Standard 34) dan korosif terhadap logam *non-ferrous* seperti tembaga dan kuningan (3). Oleh karena itu, sistem refrigerasi amonia memerlukan desain keselamatan yang ketat, pemilihan material yang tepat, serta prosedur operasi dan pemeliharaan yang sesuai standar internasional seperti ASHRAE 15, IIAR, dan ISO 5149 (10). Di sisi lain, sebagian besar sistem pendingin industri di Indonesia, termasuk *Plant Dry Ice Expanded Tobacco (DIET)*, masih menggunakan R22. *Plant* DIET memanfaatkan sistem pendingin untuk menjaga temperatur CO2 cair yang digunakan dalam proses ekspansi tembakau (11,16). Dengan adanya tekanan regulasi dan komitmen perusahaan terhadap keberlanjutan, maka diperlukan kajian komprehensif untuk mengevaluasi kelayakan penggantian R22 dengan R717.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan performa termodinamika antara R22 dan R717 pada kondisi operasi yang sama, mengidentifikasi modifikasi instalasi dan komponen yang diperlukan, mengevaluasi aspek keselamatan sesuai standar yang berlaku, serta menentukan kelayakan ekonomi dari proses *retrofit*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi industri sejenis dalam mengambil keputusan strategis menuju sistem pendingin yang lebih ramah lingkungan dan efisien.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan kinerja R22 dengan refrigeran alternatif, termasuk R717. Kumar dkk. (4) melakukan studi eksperimental dan simulasi terhadap berbagai alternatif R22 dan menyimpulkan bahwa R717 merupakan salah satu pengganti terbaik dari segi termodinamika, meskipun memerlukan penanganan khusus karena sifat toksisitasnya. Pearson (2) dalam konferensi di Purdue menekankan bahwa amonia dapat menjadi pengganti yang layak untuk sistem R22 modular berukuran sedang, dengan catatan modifikasi desain dan pemilihan komponen yang sesuai.

Cholik dkk. (1) mengevaluasi performa nyata sistem refrigerasi amonia di pabrik tekstil dan menemukan bahwa sistem tersebut mencapai COP yang tinggi dengan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan sistem berbasis HFC. Pachai dkk. (5) menyoroti bahwa refrigeran alami, terutama amonia, akan memainkan peran penting dalam sistem refrigerasi industri dan pompa panas di masa depan karena tuntutan regulasi lingkungan yang semakin ketat.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah membuktikan keunggulan R717, sebagian besar masih berfokus pada simulasi atau pengujian laboratorium. Masih jarang penelitian yang mengevaluasi *retrofit* R22 ke R717 pada sistem yang sudah beroperasi dengan mempertimbangkan aspek teknis, keselamatan, dan ekonomi secara terpadu. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan melakukan studi kasus pada plant DIET yang nyata.

2.2 Perbandingan Sifat R22 dan R717

Tabel 1 menyajikan perbandingan sifat termodinamika dan lingkungan antara R22 dan R717. Terlihat bahwa R717 memiliki kalor laten penguapan yang jauh lebih tinggi, tekanan evaporasi yang lebih rendah, dan rasio kompresi yang lebih tinggi pada temperatur operasi yang sama.

Tabel 1. Perbandingan Sifat Termodinamika R22 dan R717

Sifat	R22	R717
ODP	0,055	0
GWP	1760	0
Titik Didih (°C)	-40,8	-33,3
Kalor Laten (kJ/kg)	233	1370
Tekanan Kritis (bar)	49,9	113,3
Temperatur Kritis (°C)	96,2	132,4
Material	Tembaga/Baja	Baja/SS
Toksisitas	Rendah (A1)	Sedang (B2L)

Sumber: ASHRAE Handbook–Refrigeration (2022) (8); IIAR Green Paper (2019) (14); Engineering ToolBox (15)

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan studi kasus pada sistem pendingin DIET. Data diperoleh melalui observasi lapangan, studi literatur, dan analisis data sekunder. Simulasi performa sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak Coolselector 2 (Danfoss) untuk perhitungan siklus termodinamika dan Sabroe COMP1 untuk seleksi kompresor. Analisis mencakup aspek termodinamika, perubahan instalasi, keselamatan, dan ekonomi.

3.1 Analisis Termodinamika

Parameter utama yang dianalisis adalah *Coefficient of Performance* (COP), kapasitas pendinginan (*cooling capacity*), konsumsi daya kompresor, dan *heat rejection*. Persamaan yang digunakan adalah:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{komp}} \quad (1)$$

dimana Q_{evap} adalah kapasitas pendinginan (kW) dan W_{komp} adalah daya kompresor (kW). Efek pendinginan (*refrigeration effect*) dihitung dari selisih entalpi refrigeran keluar evaporator dan keluar katup ekspansi (8). *Heat rejection* dihitung berdasarkan neraca energi kondensor:

$$Q_{cond} = Q_{evap} + W_{comp} \quad (2)$$

3.2 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi menggunakan metode *Engineering Economy* (12) dengan parameter *Capital Expenditure* (CAPEX), *Operational Expenditure* (OPEX), *Return on Investment* (ROI), dan *Payback Period* (PBP). Tarif listrik industri mengacu pada Peraturan Menteri ESDM Nomor 7 Tahun 2024 tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT PLN (Persero) (13). Estimasi CAPEX didasarkan pada survei harga pasar komponen refrigerasi industri dan penawaran dari distributor resmi komponen amonia (12). Perhitungan CAPEX menggunakan persamaan:

$$CAPEX = \sum_{i=1}^{n} C_i \quad (3)$$

dimana C_i adalah biaya masing-masing komponen investasi. OPEX dihitung dari biaya energi, refrigeran, pemeliharaan, dan inspeksi tahunan. Penghematan tahunan (*Annual Saving*) dihitung dari selisih OPEX R22 dan R717, kemudian ROI dan PBP dihitung sebagai berikut:

$$ROI = \frac{Annual\ Saving}{CAPEX} \times 100\% \quad (4)$$

$$PBP = \frac{CAPEX}{Annual\ Saving} \quad (5)$$

3.3 Analisis Keselamatan

Analisis keselamatan mengacu pada standar ASHRAE Standard 15 (10), ASHRAE Standard 34 (3), dan IIAR Standards (9). Identifikasi dilakukan terhadap kebutuhan detektor gas, ventilasi darurat, *emergency shut-off valve*, *pressure relief valve*, dan desain ruang mesin khusus.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Desain Sistem R22 Eksisting

Berdasarkan hasil observasi dan verifikasi P&ID, sistem pendingin DIET menggunakan kompresor *reciprocating* Sabroe SMC 108 S dengan 8 piston, kondensor *shell and tube* berpendingin air, evaporator *shell and tube flooded* untuk kondensasi CO2, dan *electronic expansion valve* tipe PHTQ dari Danfoss. Sebagian besar jalur pipa menggunakan material *Carbon Steel A106 Schedule 40 Seamless*, namun beberapa komponen seperti *filter dryer*, *sight glass*, dan *expansion valve* menggunakan material berbasis tembaga atau kuningan. Data operasi sistem R22 dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Data Desain dan Performa Sistem R22

Parameter	Nilai	Satuan
Refrigeran	R22	-
Tekanan Evaporasi	3,14	barg
Temperatur Evaporasi	-5	°C
Tekanan Kondensasi	14,34	barg
Temperatur Kondensasi	40	°C
Kapasitas Pendinginan (Q)	286,3	kW
Daya Kompresor (W)	77,2	kW
Motor Rating	110	kW
COP	3,71	-

Sistem R22 beroperasi dengan COP 3,71 yang masih tergolong baik untuk aplikasi industri. Beban motor kompresor tercatat sekitar 70,2% dari kapasitas nominal, sehingga masih terdapat cadangan daya sebesar 29,8%.

4.2 Simulasi Kinerja R717

Dengan menggunakan perangkat lunak COMP1, dilakukan simulasi pada kondisi operasi yang sama (evaporasi -5°C, kondensasi 40°C) namun dengan refrigeran R717 dan kompresor yang telah dimodifikasi sesuai spesifikasi amonia. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem R717 menghasilkan kapasitas pendinginan 302 kW, daya kompresor 77,8 kW, dan COP 3,88. Perbandingan performa disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Performa R22 dan R717

Parameter	R22	R717	Selisih
Kapasitas Pendinginan (Q)	286,3 kW	302,0 kW	+15,7 kW (+5,5%)
Daya Kompresor	77,2 kW	77,8 kW	+0,6 kW (+0,8%)
COP	3,71	3,88	+0,17 (+4,6%)
Heat Rejection	363,5 kW	380,0 kW	+16,5 kW

Peningkatan COP sebesar 4,6% menunjukkan bahwa R717 mampu menghasilkan efek pendinginan yang lebih besar dengan masukan daya yang hampir sama. Hal ini disebabkan oleh kalor laten penguapan R717 yang jauh lebih tinggi (1370 kJ/kg) dibandingkan R22 (233 kJ/kg), sehingga laju aliran massa yang dibutuhkan lebih kecil untuk menghasilkan kapasitas pendinginan yang sama (8). Adapun kenaikan daya kompresor yang sangat kecil (0,6 kW) mengindikasikan bahwa motor listrik 110 kW masih memiliki cadangan daya yang cukup (sekitar 29,3%). *Heat*

rejection dihitung berdasarkan neraca energi kondensor $Q_{cond} = Q_{evap} + W_{comp}$ (8), menghasilkan nilai 363,5 kW untuk R22 dan 380,0 kW untuk R717.

4.3 Analisis Tekanan Operasi dan Rasio Kompresi

Pada temperatur evaporasi -5°C dan kondensasi 40°C, tekanan evaporasi R717 adalah 2,53 barg, lebih rendah 19,4% dibandingkan R22 (3,14 barg). Sementara itu, tekanan kondensasi R717 adalah 14,53 barg, sedikit lebih tinggi 1,3% dari R22. Akibatnya, rasio kompresi (*pressure ratio*) R717 menjadi 5,74, meningkat 25,6% dibandingkan R22 yang hanya 4,57 (Tabel 4). Rasio kompresi yang lebih tinggi mempengaruhi kerja kompresor dan suhu *discharge* (8).

Tabel 4. Perbandingan Tekanan Operasi

Parameter	R22	R717	Selisih
Tekanan Evaporasi	3,14 barg	2,53 barg	-19,4%
Tekanan Kondensasi	14,34 barg	14,53 barg	+1,3%
Rasio Kompresi	4,57	5,74	+25,6%

Meskipun rasio kompresi yang lebih tinggi umumnya menurunkan efisiensi volumetrik kompresor, peningkatan COP yang tetap terjadi menunjukkan bahwa sifat termodinamika R717 yang unggul mampu mengompensasi kerugian tersebut. Hal ini sejalan dengan temuan Pearson (2) yang menyatakan bahwa amonia tetap unggul dalam aplikasi industri meskipun rasio kompresinya lebih tinggi.

4.4 Analisis Perubahan Instalasi dan Kompatibilitas Material

Berdasarkan hasil identifikasi P&ID dan observasi lapangan, sebagian besar jalur perpipaan utama menggunakan *Carbon Steel A106 Sch 40 Seamless* yang kompatibel dengan R717. Namun, beberapa komponen kritis harus diganti atau dimodifikasi:

1. **Kompresor Sabroe SMC 108 S**: Kompresor R22 tidak dapat langsung digunakan karena perbedaan material *seal*, *ring piston*, dan *valve plate*. Diperlukan *retrofit kit* dari pabrikan yang mencakup penggantian O-ring, piston ring, *suction valve plate*, *discharge valve plate*, serta penggantian minyak pelumas dari mineral/AB ke *Polyalphaolefin* (PAO) yang kompatibel dengan amonia.
2. **Kondensor**: Kondensor eksisting menggunakan tubing tembaga yang tidak tahan korosi terhadap amonia. Oleh karena itu, kondensor harus diganti dengan desain baru yang menggunakan material baja karbon atau *stainless steel* dengan *heat rejection capacity* yang disesuaikan (380 kW) (3).
3. **Expansion Valve**: *Electronic expansion valve* PHTQ berbahan kuningan harus diganti dengan katup khusus amonia dari seri AKVA yang dilengkapi dengan *level transmitter* AKS 4100 dan *level controller* EKE 347.
4. **Filter Dryer dan Sight Glass**: Komponen berbahan tembaga/kuningan ini harus diganti dengan seri FIA dan SVA yang terbuat dari baja karbon.

Selain itu, penambahan instrumentasi keselamatan wajib dilakukan, meliputi detektor gas amonia (NH3 detector), sistem ventilasi mekanis darurat, *emergency shut-off valve* (ESV), serta *pressure relief valve* (PRV) dengan *vent line* yang mengarah ke area aman di luar bangunan.

4.5 Analisis Keselamatan

Berdasarkan standar ASHRAE 15 dan IIAR, sistem amonia memerlukan *dedicated machinery room* dengan persyaratan khusus (9,10). Beberapa aspek keselamatan yang harus dipenuhi adalah:

1. **Deteksi Kebocoran**: *Detektor* amonia dipasang di ruang mesin, area kompresor, dan sekitar evaporator. *Detektor* ini memiliki dua tingkat alarm: *Level 1 (warning)* dan *Level 2 (emergency)* yang secara otomatis mengaktifkan ventilasi darurat dan sistem *shutdown*.
2. **Ventilasi Darurat**: *Exhaust fan* dengan kapasitas yang cukup untuk melakukan pergantian udara minimal 10 kali per jam sesuai standar IIAR (9).
3. **Emergency Shut-Off Valve (ESV)**: Katup otomatis yang terintegrasi dengan PLC untuk mengisolasi kebocoran dalam waktu kurang dari 30 detik.
4. **Pressure Relief Valve (PRV)**: Setiap bejana tekan dilengkapi PRV dengan saluran pembuangan (*vent line*) yang diarahkan ke luar bangunan pada ketinggian aman (10).
5. **Perlengkapan Darurat**: *Safety shower*, *eyewash*, dan APAR tipe *dry chemical*/CO2 harus tersedia di area kerja.

Dengan penerapan *engineering controls* dan *administrative controls* yang sesuai, risiko kebocoran amonia dapat dikelola dengan baik dan sistem tetap aman untuk dioperasikan.

4.6 Analisis Lingkungan

Penggantian R22 ke R717 memberikan manfaat lingkungan yang signifikan. Dengan asumsi muatan refrigeran sistem sekitar 500 kg, emisi CO2e yang dihasilkan akibat kebocoran tahunan (asumsi 5%) dapat dihitung. Untuk R22: 500 kg × 5% × 1760 GWP = 44.000 kg CO2e/tahun. Sedangkan R717: 500 kg × 5% × 0 GWP = 0 kg CO2e/tahun. Hal ini sejalan dengan program HPMP yang menargetkan pengurangan HCFC secara nasional dan kontribusi terhadap target penurunan emisi gas rumah kaca sesuai kesepakatan Paris (7).

4.7 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi dilakukan dengan asumsi operasi 24 jam/hari, 330 hari/tahun, tarif listrik industri Rp1.700/kWh berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 7 Tahun 2024 (13), dan umur proyek 20 tahun (12). Estimasi biaya *retrofit* (CAPEX) disajikan pada Tabel 5. Harga komponen didasarkan pada survei pasar dan penawaran distributor resmi untuk komponen amonia.

Tabel 5. Estimasi Biaya *Retrofit* (CAPEX)

Uraian	Qty	Jumlah (Rp)
Retrofit Kompresor	1	350.000.000,00
Instrumentasi	1	125.000.000,00
Line Component	1	54.000.000,00
NH3 *Detector*	1	70.000.000,00
Ventilasi Darurat	1	50.000.000,00
ESD System	1	40.000.000,00
Kondensor Baru	1	65.000.000,00
Modifikasi *Piping*	1	50.000.000,00
Commissioning	1	40.000.000,00
	Subtotal	844.000.000,00
	***Eng. & Cont.* (15%)**	126.600.000,00
	Total Investasi	**970.600.000,00**

Biaya operasi tahunan (OPEX) untuk kedua sistem dibandingkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan OPEX Tahunan

Komponen	R22 (Rp)	R717 (Rp)
Energi Listrik	1.039.420.800,00	993.812.800,00
Refrigeran	13.200.000,00	1.000.000,00
Maintenance	53.050.000,00	25.858.000,00
Inspeksi	20.000.000,00	20.000.000,00
Total OPEX	**1.125.670.800,00**	**1.040.670.800,00**

Penghematan tahunan (*Annual Saving*) yang diperoleh adalah Rp85.000.000,00. Dengan investasi Rp970.600.000,00, maka:

$$ROI = \frac{85.000.000,00}{970.600.000,00} \times 100\% = 8{,}76\% \quad (6)$$

$$PBP = \frac{970.600.000,00}{85.000.000,00} = 11{,}42\ tahun \quad (7)$$

Meskipun *payback period* tergolong panjang (sekitar 11,4 tahun), investasi ini masih layak mengingat umur ekonomis sistem refrigerasi industri yang dapat mencapai 20-25 tahun (12). Selain itu, jika mempertimbangkan aspek kepatuhan regulasi dan pengurangan risiko lingkungan, nilai investasi menjadi lebih strategis.

5. DISKUSI

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Kumar dkk. (4) yang menyatakan bahwa R717 merupakan alternatif terbaik untuk R22 dari sisi termodinamika. Peningkatan COP sebesar 4,6% yang ditemukan dalam penelitian ini mendukung pernyataan Pearson (2) bahwa amonia dapat meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan meskipun memerlukan modifikasi instalasi.

Meskipun biaya investasi awal cukup besar (Rp970 juta), penghematan operasional Rp85 juta per tahun memberikan keuntungan finansial jangka panjang. Namun, perlu diperhatikan bahwa biaya keselamatan (*detector*, ventilasi, ESV) menyumbang porsi yang tidak kecil (sekitar 20% dari total CAPEX). Hal ini menjadi pertimbangan penting bagi industri dalam merencanakan anggaran *retrofit*.

Dari perspektif lingkungan, penggantian R22 dengan R717 memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca dan mendukung komitmen Indonesia dalam program HPMP. Dengan GWP = 0, R717 menjadi solusi yang sangat ramah lingkungan dan tahan terhadap regulasi di masa depan (5,9,14).

Keterbatasan penelitian ini adalah tidak dilakukannya uji eksperimen langsung karena keterbatasan akses dan biaya. Simulasi yang dilakukan masih bersifat teoritis berdasarkan data desain. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan verifikasi lapangan setelah implementasi *retrofit* guna memastikan hasil simulasi sesuai dengan kondisi aktual.

6. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian evaluasi kelayakan teknis penggunaan R717 sebagai pengganti R22 pada sistem pendingin *Plant* DIET, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Performa sistem pendingin dengan R717 terbukti lebih unggul dibandingkan R22 pada kondisi operasi yang sama (evaporasi -5°C, kondensasi 40°C), dengan peningkatan COP sebesar 4,6% dan kapasitas pendinginan sebesar 5,5%, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi energi sistem secara signifikan.
2. Proses *retrofit* memerlukan modifikasi instalasi yang mencakup penggantian komponen berbahan tembaga/kuningan (seperti *expansion valve*, *filter dryer*, *sight glass*, dan tubing kondensor), *retrofit* kompresor dengan suku cadang khusus amonia, serta penambahan sistem keselamatan seperti detektor gas, ventilasi darurat, ESV, dan PRV. Namun, sebagian besar jalur pipa *carbon steel* yang ada masih dapat dipertahankan.
3. Dari aspek ekonomi, *retrofit* memerlukan investasi awal sekitar Rp970 juta dan memberikan penghematan biaya operasional tahunan sebesar Rp85 juta, dengan *payback period* 11,4 tahun dan ROI 8,76%. Meskipun *payback* relatif panjang, investasi ini layak mengingat umur proyek 20 tahun dan keuntungan strategis kepatuhan regulasi.
4. Dari aspek keselamatan dan lingkungan, R717 memiliki risiko toksisitas yang lebih tinggi yang dapat dikelola melalui desain keselamatan sesuai standar ASHRAE 15 dan IIAR, serta memberikan keuntungan lingkungan besar karena ODP=0 dan GWP mendekati nol (2,14).
5. Secara keseluruhan, R717 dinilai layak secara teknis, ekonomis, lingkungan, dan keselamatan untuk menggantikan R22 pada Plant DIET, dengan syarat seluruh modifikasi dan prosedur keselamatan diterapkan sesuai standar yang berlaku.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Perusahaan tempat penelitian dilaksanakan, yang telah memberikan izin dan dukungan penuh selama pelaksanaan penelitian, serta kepada dosen pembimbing dan seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Cholik A, Ruhyat N, Novianto S. Performance Evaluation of Ammonia Refrigeration Systems in a Texturizing Plant. International Journal of Innovation in Mechanical Engineering and Advanced Materials. 2024;6(3):161. doi: 10.22441/ijimeam.v6i3.27476.
2. Pearson A. Ammonia as a Replacement for Medium Sized Modular R-22 Systems. In: International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. 2010. [Online]. Available: http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1112
3. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 34-2022 - Designation and Safety Classification of Refrigerants. Atlanta: ASHRAE; 2022. [Online]. Available: www.ashrae.org
4. Kumar R, Singh J, Sharma A. Comparative analysis of low-GWP refrigerants as alternatives to R22 in vapor compression refrigeration systems. International Journal of Refrigeration. 2020;119:234-245. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.07.015.
5. Pachai AC, Hafner A, Ciconkov R. Application of natural refrigerants in the industrial refrigeration and heat pumps in the future. In: Proceedings of the 15th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants. 2022.
6. United Nations Environment Programme (UNEP). The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Nairobi: UNEP; 1987.
7. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). HCFC Phase-Out Management Plan (HPMP) Indonesia. Jakarta: KLHK; 2015.
8. ASHRAE. ASHRAE Handbook—Refrigeration (SI Edition). Atlanta: ASHRAE; 2022.
9. IIAR. IIAR Standard 2-2014 - American National Standard for Design of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems. Arlington: International Institute of Ammonia Refrigeration; 2014.
10. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 15-2019 - Safety Standard for Refrigeration Systems. Atlanta: ASHRAE; 2019. [Online]. Available: www.ashrae.org
11. Tobacco Research Institute. Dry Ice Expanded Tobacco (DIET) Process Technology - Technical Manual. Bandung: Research and Development Center, PT XXX; 2020. (Internal document)
12. Blank L, Tarquin A. Engineering Economy. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2012.
13. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2024 tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero). Jakarta: Kementerian ESDM; 2024.
14. IIAR. IIAR Green Paper - Natural Refrigerations for a Sustainable Future. Arlington: International Institute of Ammonia Refrigeration; 2019.
15. Engineering ToolBox. Ammonia - Properties at Gas-Liquid Equilibrium Conditions. 2024. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d_971.html. Accessed: July 24, 2026.
16. Wu S, et al. Study on the mechanism of dry ice tobacco expansion process. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities. 2024;38(4):548-557. doi: 10.3969/j.issn.1003-9015.2024.04.003.