Perancangan dan Evaluasi Kinerja *High Temperature Heat Pump* Berkapasitas 2.100 kW Sebagai Pengganti Boiler Gas

Moch Gaduh Pribadi[1], Windy Hermawan Mitrakusuma[2*], Luga Martin Simbolon[3]

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

ABSTRAK

Kebutuhan air panas industri masih didominasi boiler berbahan bakar fosil yang berkonsumsi energi tinggi dan berkontribusi terhadap emisi karbon. High Temperature Heat Pump (HTHP) berkembang sebagai alternatif yang memanfaatkan panas buang sebagai sumber energi untuk menghasilkan air panas dengan efisiensi lebih tinggi. Penelitian ini merancang dan mengevaluasi sistem HTHP berkapasitas 2.100 kW sebagai pengganti boiler gas berdasarkan Engineering Selection Report (ESR) menggunakan perangkat lunak COMP2, melalui pendekatan engineering design: identifikasi Customer Requirement, Engineering Selection, Engineering Verification, serta analisis energi, lingkungan, dan ekonomi. Customer Requirement meliputi kapasitas pemanasan 2.100 kW, temperatur air keluar 75°C dari 56°C, sumber panas cooling tower (36/26°C), dan target Coefficient of Performance (COP Heating) minimum 4,5. Hasil ESR menunjukkan sistem dua tingkat dengan Heating Capacity 2.100 kW, Compressor Power 434 kW, dan COP Heating 4,84. Engineering Verification melalui perhitungan independen titik-titik keadaan termodinamika menghasilkan deviasi 0,47-2,60% terhadap nilai ESR, membuktikan hasil ESR taat asas terhadap hukum kekekalan energi. Penerapan HTHP berpotensi menurunkan konsumsi energi 81,4%, emisi CO2 36,8%, dan biaya operasi 76,1% dibandingkan boiler gas, dengan Simple Payback Period sekitar 10 bulan. Hasil ini menunjukkan bahwa ESR yang divalidasi melalui Engineering Verification dapat digunakan sebagai dasar andal untuk merancang dan mengevaluasi sistem HTHP industri.

Kata Kunci:
High Temperature Heat Pump, Engineering Selection Report, Engineering Verification, COP, dekarbonisasi industri

Industrial hot water demand is dominated by fossil-fuel boilers, which have high energy consumption and contribute to carbon emissions. The High Temperature Heat Pump (HTHP) has emerged as an alternative that utilizes waste heat to produce hot water at higher efficiency. This study designs and evaluates a 2,100 kW HTHP system as a gas-boiler replacement based on an Engineering Selection Report (ESR) using COMP2 software, via an engineering-design approach: Customer Requirement identification, Engineering Selection, Engineering Verification, and energy, environmental, and economic analyses. Requirements include a Heating Capacity of 2,100 kW, outlet temperature of 75°C from 56°C, a cooling-tower source (36/26°C), and a minimum COP Heating of 4.5. Results show a two-stage configuration with a Heating Capacity of 2,100 kW, Compressor Power of 434 kW, and COP Heating of 4.84. Engineering Verification, via independent recalculation from the cycle's thermodynamic state points, yielded deviations of 0.47-2.60% from the ESR values, confirming compliance with energy conservation. The HTHP can reduce energy consumption by 81.4%, CO2 emissions by 36.8%, and operating cost by 76.1% versus a gas boiler, with a Simple Payback Period of about 10 months. This confirms that an ESR validated through Engineering Verification reliably supports designing and evaluating industrial HTHP systems.

Keywords:
High Temperature Heat Pump, Engineering Selection Report, Engineering Verification, COP, industrial decarbonization

1. PENDAHULUAN

Energi panas merupakan kebutuhan utama pada berbagai proses industri untuk pemanasan, pencucian, sterilisasi, dan evaporasi. Berdasarkan International Energy Agency, lebih dari separuh konsumsi energi sektor industri digunakan untuk process heating, sehingga peningkatan efisiensi sistem penyedia panas menjadi strategi penting dalam menekan konsumsi energi dan emisi karbon (1). Kebutuhan tersebut umumnya masih dipenuhi boiler berbahan bakar fosil yang menyebabkan konsumsi energi primer dan emisi CO2 relatif tinggi (2).

High Temperature Heat Pump (HTHP) berkembang sebagai alternatif boiler pada rentang temperatur rendah-menengah karena memanfaatkan panas buang sebagai sumber energi. Berbeda dengan boiler yang membakar bahan bakar, HTHP memindahkan energi panas dari sumber bertemperatur rendah ke temperatur lebih tinggi melalui siklus kompresi uap, sehingga energi listrik hanya digunakan menggerakkan kompresor (3).

Penelitian HTHP di Indonesia masih terbatas pada skala laboratorium atau heat recovery konvensional (4–6), sedangkan penelitian internasional berkembang pada kajian teknis-ekonomi dan optimasi desain (7–9) maupun pedoman integrasi proses dan dokumentasi vendor (10,11). Penerapan engineering design berbasis perangkat lunak vendor pada HTHP skala industri yang diverifikasi termodinamika di Indonesia masih sangat terbatas dibahas. Penelitian ini merancang sistem HTHP berkapasitas 2.100 kW menggunakan perangkat lunak Sabroe COMP2 sebagai pengganti boiler gas untuk menghasilkan air panas 75°C pada sebuah industri ragi, bersumber panas cooling tower (36/26°C).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) merancang sistem HTHP berdasarkan Customer Requirement menggunakan Engineering Selection Report (ESR); (2) melakukan Engineering Verification terhadap hasil ESR menggunakan persamaan termodinamika; serta (3) menganalisis potensi peningkatan efisiensi energi, pengurangan emisi karbon, dan kelayakan ekonomi HTHP dibandingkan boiler gas.

2. METODE

2.1 Jenis dan Objek Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (engineering design research) yang menghasilkan rancangan HTHP sesuai kebutuhan proses industri tanpa prototipe atau pengujian laboratorium, mengikuti karakter penelitian rekayasa (12). Objek penelitian adalah sistem HTHP pengganti boiler gas pada sistem penyedia air panas proses industri, dibatasi pada tahap perancangan dan evaluasi performa; proses manufaktur, instalasi, commissioning, dan pengujian lapangan berada di luar lingkup penelitian.

Data primer bersumber dari Engineering Selection Report (ESR) yang dihasilkan perangkat lunak COMP2 (14) berdasarkan Customer Requirement, meliputi Heating Capacity, Compressor Power, Coefficient of Performance (COP), temperatur dan tekanan operasi, serta laju alir massa refrigeran. Data sekunder bersumber dari buku referensi, jurnal ilmiah, standar internasional, dan dokumentasi teknis vendor yang menjadi dasar teori, metode analisis, dan pembanding hasil penelitian. Customer Requirement penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

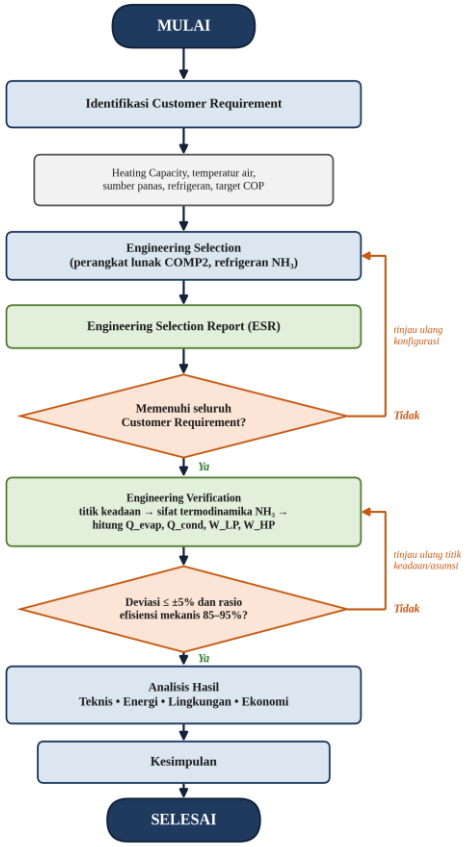
Tabel 1. Ringkasan Customer Requirement

Parameter	Nilai
Heating Capacity	2.100 kW
Temperatur air masuk/keluar	56 / 75 °C
Sumber panas (cooling tower)	36/26 °C
Target COP Heating (min.)	≥ 4,5
Refrigeran	NH3 (R-717)

Sumber: Batasan penelitian, dikonfirmasi terhadap parameter input ESR.

2.2 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui empat tahap utama yang saling berkaitan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1: (a) identifikasi Customer Requirement, meliputi kapasitas pemanasan, temperatur air, temperatur sumber panas, refrigeran, dan target performa sistem; (b) Engineering Selection, yaitu memasukkan parameter kebutuhan ke perangkat lunak COMP2 untuk memperoleh Engineering Selection Report (ESR); (c) Engineering Verification, yaitu verifikasi parameter performa ESR menggunakan persamaan termodinamika independen; dan (d) analisis hasil, mencakup analisis teknis, energi, lingkungan, dan ekonomi sebagai dasar penyusunan kesimpulan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.3 *Engineering Selection*

Konfigurasi sistem diperoleh melalui Engineering Selection menggunakan perangkat lunak COMP2 dengan refrigeran NH3 sebagai fluida kerja, menghasilkan Engineering Selection Report (ESR) yang memuat Heating Capacity, Compressor Power, COP, serta parameter operasi (temperatur, tekanan, dan laju alir massa refrigeran) pada Design Condition (cooling tower 36/26°C).

2.4 *Engineering Verification*

Karena tidak dilakukan Factory Acceptance Test, hasil ESR divalidasi melalui Engineering Verification. Verifikasi langsung terhadap Persamaan (1) menggunakan nilai keluaran ESR tidak memberikan pembuktian independen, karena nilai tersebut pada dasarnya sudah taat asas terhadap neraca energi sejak dihasilkan perangkat lunak. Oleh karena itu, parameter performa dihitung ulang secara independen

dari titik-titik keadaan termodinamika siklus kompresi uap dua-tingkat, kemudian dibandingkan terhadap nilai ESR, mengacu hukum kekekalan energi (13):

$$Q_{cond} = Q_{evap} + W_{comp} \quad (1)$$

dengan Qcond kapasitas pemanasan, Qevap panas yang diserap evaporator, dan Wcomp daya kompresor (kW). Coefficient of Performance pemanasan dihitung terhadap daya listrik total yang dikonsumsi sistem (Pkonsumsi), bukan hanya kerja termodinamika kompresor, karena Pkonsumsi memperhitungkan pula efisiensi motor dan Variable Speed Drive (VSD):

$$COP_{Heating} = Q_{cond} / P_{konsumsi} \quad (2)$$

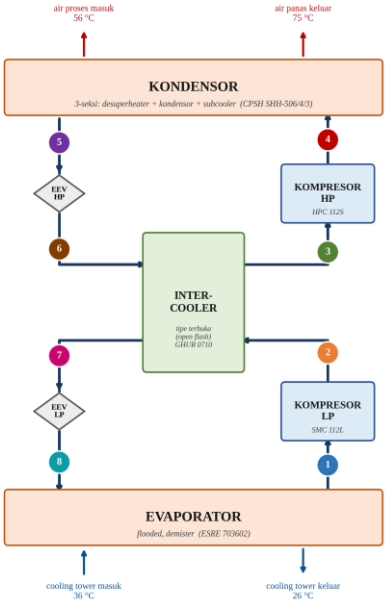
Sistem yang dievaluasi menggunakan konfigurasi kompresi dua tingkat dengan intercooler tipe terbuka, sehingga siklus refrigerasinya direpresentasikan dalam delapan titik keadaan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2: (1) isap kompresor tingkat rendah/LP, (2) buang kompresor LP, (3) isap kompresor tingkat tinggi/HP, (4) buang kompresor HP, (5) keluar kondensor/subcooler, (6) masuk intercooler sisi HP, (7) cair jenuh keluar intercooler, dan (8) masuk evaporator.

Tekanan dan temperatur tiap titik keadaan diperoleh langsung dari ESR (Lampiran A), sedangkan entalpi (h) ditentukan dari sifat termodinamika refrigeran amonia (R-717) dengan acuan International Institute of Refrigeration (IIR) (hf = 200 kJ/kg pada 0°C cair jenuh), mengikuti pendekatan analisis siklus refrigerasi yang dijelaskan Cengel dkk. (13). Kurva tekanan-temperatur jenuh yang digunakan dikalibrasi terhadap dua pasang data jenuh yang dilaporkan ESR sendiri (evaporator 23,08°C/9,45 bar dan kondensor 74,45°C/36,64 bar), kemudian divalidasi independen pada titik interstage 41°C dengan deviasi hanya 0,2% terhadap tekanan interstage ESR (15,98 bar). Seluruh titik keadaan dan entalpinya untuk Design Condition ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Termodinamika Tiap Titik Keadaan Siklus (Design Condition)

Titik	P (bar,a)	T (°C)	Fase	h (kJ/kg)
1	9,45	24,08	Uap superheat	1.477,7
2	16,37	71,59	Uap superheat	1.566,5
3	15,85	41,00	Uap jenuh	1.486,1
4	37,03	117,40	Uap superheat	1.611,6
5	36,64	59,00	Cair subcooled	487,4
6	15,98	41,00	Campuran (flash)	487,4*
7	15,98	41,00	Cair jenuh	394,5
8	9,45	23,08	Campuran (flash)	394,5*

*Lokasi tiap titik mengikuti penomoran pada Gambar 2 dan uraian di atas. Sumber P, T: Lampiran A — Engineering Selection Report (COMP2). Entalpi (h) dihitung penulis dari korelasi sifat termodinamika NH3 (acuan IIR), dikalibrasi terhadap data jenuh ESR. *h6 = h5 dan h8 = h7 (proses ekspansi isoentalpik).*



Gambar 2. Skema Sistem HTHP Dua Tingkat (Design Condition, CT 36/26°C)

Sumber: disusun ulang penulis berdasarkan konfigurasi COMP2 System Report, Johnson Controls–Sabroe (14), Lampiran A. Penomoran titik mengikuti diagram Log(P)-h sistem.

Kapasitas evaporator dan kondensor dihitung dari selisih entalpi dikalikan laju alir massa refrigeran pada masing-masing tingkat:

$$Q_{evap} = \dot{m}_{LP}(h_1 - h_8) \quad (3)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}_{HP}(h_4 - h_5) \quad (4)$$

dengan ṁLP = 1,55 kg/s dan ṁHP = 1,82 kg/s merupakan laju alir massa refrigeran pada kompresor tingkat rendah dan tinggi sesuai hasil ESR. Kerja tiap tingkat kompresor dihitung dengan:

$$W_{LP} = \dot{m}_{LP}(h_2 - h_1) \quad (5)$$

$$W_{HP} = \dot{m}_{HP}(h_4 - h_3) \quad (6)$$

Sebagai pemeriksaan tambahan terhadap konsistensi titik keadaan yang digunakan, dilakukan pula neraca massa-energi pada intercooler, yang menerima uap buang kompresor LP dan cairan hasil ekspansi dari sisi kondensor, kemudian menghasilkan uap menuju isap kompresor HP dan cairan menuju katup ekspansi evaporator:

$$\dot{m}_{LP}h_2 + \dot{m}_{HP}h_6 = \dot{m}_{HP}h_3 + \dot{m}_{LP}h_7 \quad (7)$$

Hasil perhitungan Persamaan (3)–(6) dibandingkan terhadap nilai Cooling Capacity, Heating Capacity, dan Compressor Power pada ESR dalam bentuk deviasi (%). Karena nilai kerja kompresor pada ESR merupakan daya poros (shaft power) sedangkan Persamaan (5) dan (6) menghasilkan kerja termodinamika aktual pada refrigeran, perbandingan keduanya turut mempertimbangkan efisiensi mekanis kompresor. Deviasi Cooling/Heating Capacity dan COP Heating dianggap dapat diterima pada rentang ±5%, mengikuti toleransi lazim untuk verifikasi tidak langsung (indirect verification) terhadap keluaran perangkat lunak vendor, sedangkan rasio kerja kompresor dianggap wajar

pada rentang efisiensi mekanis kompresor torak industri, yaitu 85–95% (13). Kedua kriteria ini menjadi dasar keputusan pada diagram alir (Gambar 1): apabila terpenuhi, konfigurasi hasil Engineering Selection dinyatakan taat asas terhadap prinsip termodinamika dan digunakan sebagai dasar analisis performa, energi, lingkungan, dan ekonomi.

2.5 Metode Analisis Energi, Lingkungan, dan Ekonomi

Analisis energi, lingkungan, dan ekonomi membandingkan HTHP terhadap boiler gas pada kapasitas pemanasan puncak yang sama (QH,puncak = 2.100 kW). Konsumsi energi tahunan boiler gas dan HTHP dihitung dengan:

$$E_{boiler} = (Q_{H,puncak} / \eta_{boiler}) \times t_{operasi} \quad (8)$$

$$E_{HTHP} = (Q_{H,puncak} / COP_H) \times t_{operasi} \quad (9)$$

dengan ηboiler efisiensi pembakaran boiler dan toperasi jam operasi tahunan sistem (8.000 jam/tahun, operasi kontinu). Efisiensi boiler 90% merupakan data teknis boiler eksisting pada industri pengguna, sebagaimana tercantum pada dokumen Customer Requirement pihak industri. Energy Saving dihitung dari selisih kedua konsumsi energi:

$$\%E_{saving} = [(E_{boiler} - E_{HTHP}) / E_{boiler}] \times 100\% \quad (10)$$

Emisi CO2 tahunan dihitung dari konsumsi energi dikalikan faktor emisi (FE) yang sesuai dengan jenis energi — faktor emisi gas mengacu IPCC (15) dan faktor emisi listrik grid Indonesia mengacu GreenCalculus (16):

$$M_{CO2} = FE \times E / 1.000 \quad (11)$$

CO2 Reduction dihitung dari selisih emisi kedua sistem dengan cara yang sama seperti Persamaan (10). Biaya operasi tahunan dihitung dari konsumsi energi dikalikan tarif energi masing-masing (tarif listrik PLN untuk HTHP, harga gas industri untuk boiler):

$$C_{operasi} = E \times Tarif \quad (12)$$

Simple Payback Period (SPP) dihitung dari rasio Capital Expenditure (CAPEX) HTHP (termasuk unit, pengiriman, instalasi, dan perawatan tahun pertama) terhadap penghematan biaya operasi tahunan (Btahunan = Coperasi,boiler − Coperasi,HTHP):

$$SPP = CAPEX / B_{tahunan} \quad (13)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemenuhan *Customer Requirement*

Hasil Engineering Selection Report pada Design Condition (cooling tower 36/26°C) menunjukkan seluruh parameter Customer Requirement terpenuhi: Heating Capacity 2.100 kW, temperatur air panas 75°C, dan COP Heating 4,84 — 7,6% di atas target minimum 4,5, dengan Compressor Power 434 kW (Tabel 3). Kondensor mampu menaikkan temperatur air dari 56°C menjadi 75°C tanpa sumber panas tambahan, sedangkan kebutuhan daya kompresor (434 kW) relatif rendah dibandingkan kapasitas pemanasan yang dihasilkan (2.100 kW), mengindikasikan sebagian besar energi panas berasal dari pemanfaatan panas buang cooling tower dan hanya sebagian kecil dari energi listrik penggerak kompresor.

Tabel 3. Pemenuhan Customer Requirement terhadap Hasil ESR

Parameter	Target	Hasil ESR
Heating Capacity	2.100 kW	2.100 kW
Temp. keluar/masuk	75/56°C	75/56°C
COP Heating (min.)	≥ 4,5	4,84
Refrigeran	NH3	NH3 (R-717)

Seluruh parameter: status Terpenuhi.

3.2 *Engineering Verification*

Engineering Verification melalui titik-titik keadaan termodinamika pada Tabel 2 menghasilkan Heating Capacity 2.046,0 kW (deviasi −2,57%), Cooling Capacity 1.679,0 kW (deviasi −0,47%), dan COP Heating 4,71 (deviasi −2,60%) terhadap nilai ESR — seluruhnya dalam batas toleransi ±5% (Tabel 4).

Tabel 4. Hasil Engineering Verification dibandingkan Hasil ESR

Parameter	ESR	Manual	Deviasi
Heating Cap. (kW)	2.100	2.046,0	−2,57%
Cooling Cap. (kW)	1.687	1.679,0	−0,47%
W LP (kW)*	153,9	137,6	89,5%
W HP (kW)*	259,1	228,4	88,2%
COP Heating	4,84	4,71	−2,60%

**Kerja kompresor: ESR = daya poros, Manual = kerja termodinamika aktual; deviasi = rasio (mencerminkan efisiensi mekanis kompresor, bukan kesalahan hitung).*

Deviasi Cooling/Heating Capacity dan COP Heating yang kecil (0,47–2,60%) menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil perhitungan mandiri dengan hasil ESR; selisih ini wajar terjadi karena entalpi pada perhitungan manual diperoleh dari korelasi pendekatan sifat termodinamika NH3, sedangkan ESR menggunakan model termodinamika penuh pada perangkat lunak COMP2.

Deviasi kerja kompresor tampak jauh lebih besar (rasio 88,2–89,5%), tetapi hal ini bukan kesalahan perhitungan, melainkan mencerminkan efisiensi mekanis kompresor. Nilai kerja kompresor pada ESR (153,9 kW dan 259,1 kW) merupakan daya poros (shaft power) yang harus disediakan motor penggerak, sedangkan nilai mΔh pada Persamaan (5) dan (6) merupakan kerja termodinamika aktual yang diterima refrigeran; selisih keduanya berasal dari gesekan piston, ring, dan bantalan. Rasio 88,2–89,5% berada pada rentang efisiensi mekanis tipikal kompresor torak amonia industri (85–95%), dan konsisten dengan efisiensi motor+VSD hasil ESR sebesar 95,2% yang menjembatani daya poros total (413,0 kW) menjadi konsumsi daya listrik (434 kW, Power Consumption ESR). Sebagai pemeriksaan tambahan, neraca massa-energi intercooler melalui Persamaan (7) menghasilkan selisih hanya 0,02%, memperkuat validitas titik keadaan yang digunakan. Secara keseluruhan, parameter performa ESR konsisten dengan hukum kekekalan energi dan sifat termodinamika amonia, sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis energi, lingkungan, dan ekonomi berikut.

3.3 Analisis Energi, Lingkungan, dan Ekonomi

Dengan COP Heating 4,84, setiap 1 kW energi listrik yang dikonsumsi kompresor menghasilkan sekitar 4,84 kW energi panas — artinya sebagian besar panas yang diserahkan ke air proses berasal dari panas buang cooling tower, dan hanya sebagian kecil dari energi listrik. Hal ini menjelaskan mengapa penerapan HTHP menghasilkan penghematan energi primer yang besar: konsumsi energi turun dari 18.666.667 kWh/tahun (setara gas, efisiensi boiler 90%, 8.000 jam/tahun) menjadi 3.472.000 kWh/tahun (listrik), atau Energy Saving 81,4%. Karena emisi CO2 dan biaya operasi berbanding lurus dengan konsumsi energi, penurunan energi primer ini juga berdampak langsung pada penurunan emisi CO2 (dari 3.733,3 menjadi 2.361,0 ton/tahun, reduksi 36,8%) dan biaya operasi (dari Rp17.292.735.656 menjadi Rp4.131.680.000/tahun, hemat 76,1%), menghasilkan Simple Payback Period 0,83 tahun (≈10 bulan) terhadap CAPEX USD 604.500 (Tabel 5).

Tabel 5. Ringkasan Perbandingan Energi, Lingkungan, dan Ekonomi

Parameter	Boiler Gas	HTHP	Hemat
Energi (kWh/th)	18.666.667	3.472.000	81,4%
CO2 (ton/th)	3.733,3	2.361,0	36,8%
Biaya (Rp juta/th)	17.292,7	4.131,7	76,1%
SPP	–	0,83 th	(≈10 bl)

Asumsi: 8.000 jam/tahun, efisiensi boiler 90%, kurs Rp18.100/USD, tarif listrik Rp1.190/kWh, harga gas USD15/MMBTU. CAPEX HTHP USD 604.500.

Selisih emisi CO2 yang signifikan (36,8%) meskipun Energy Saving mencapai 81,4% disebabkan faktor emisi listrik grid Indonesia (≈0,68 kgCO2e/kWh) yang secara relatif lebih tinggi per kWh dibandingkan faktor emisi gas (≈0,20 kgCO2e/kWh); dengan kata lain, manfaat lingkungan HTHP pada perhitungan ini masih dibatasi oleh bauran energi primer pembangkit listrik, dan berpotensi meningkat lebih lanjut seiring dekarbonisasi grid listrik nasional. Dari sisi ekonomi, Simple Payback Period sekitar 10 bulan menunjukkan investasi HTHP kembali jauh lebih cepat dibandingkan umur teknis peralatan (>15 tahun), sehingga secara finansial layak dipertimbangkan terutama pada proses industri yang beroperasi kontinu dengan kebutuhan air panas stabil sepanjang tahun.

3.4 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan engineering design yang memadukan Engineering Selection Report dan Engineering Verification mampu menghasilkan sekaligus membuktikan validitas rancangan HTHP yang memenuhi seluruh Customer Requirement. Proses Engineering Verification membuktikan bahwa keluaran perangkat lunak vendor (ESR) tidak hanya bergantung pada black-box perhitungan internal COMP2, tetapi dapat ditelusuri ulang secara independen hingga taat asas terhadap hukum kekekalan energi dan sifat termodinamika refrigeran, sehingga hasil rancangan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis sebelum tahap implementasi.

Hasil ini sejalan dengan temuan bahwa HTHP efektif meningkatkan efisiensi energi dan mendukung dekarbonisasi industri (3). Berbeda dengan kajian teknis-ekonomi yang mengevaluasi kelayakan HTHP berdasarkan keluaran perangkat lunak vendor tanpa verifikasi termodinamika independen (7), penelitian ini membuktikan bahwa ESR (COMP2) dapat diverifikasi secara independen dan digunakan sebagai dasar perancangan HTHP skala industri yang andal. Dengan demikian, kombinasi Engineering Selection Report dan Engineering Verification dapat diterapkan sebagai metode umum untuk memvalidasi hasil rancangan HTHP berbasis perangkat lunak vendor lain pada studi selanjutnya, tidak terbatas pada perangkat lunak COMP2 maupun kapasitas sistem pada penelitian ini.

4. KESIMPULAN

Perancangan sistem HTHP 2.100 kW berhasil memenuhi seluruh Customer Requirement dengan COP Heating 4,84 (7,6% di atas target). Engineering Verification menghasilkan deviasi 0,47–2,60% terhadap nilai ESR untuk Cooling/Heating Capacity dan COP Heating, serta rasio kerja kompresor 88,2–89,5% yang konsisten dengan efisiensi mekanis kompresor torak industri, membuktikan hasil ESR taat asas terhadap prinsip termodinamika. Dibandingkan boiler gas, penerapan HTHP berpotensi menurunkan konsumsi energi 81,4%, emisi CO2 36,8%, dan biaya operasi 76,1%, dengan Simple Payback Period sekitar 10 bulan. Pendekatan Engineering Selection Report yang dipadukan Engineering Verification dapat digunakan sebagai metode sistematis merancang dan mengevaluasi kelayakan sistem HTHP pada aplikasi penyedia air panas industri sebelum tahap implementasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, atas dukungan fasilitas dan bimbingan akademik.

DAFTAR PUSTAKA

1. International Energy Agency. World energy outlook 2023. Paris: IEA; 2023.
2. International Energy Agency. The future of heat pumps. Paris: IEA; 2022.
3. Arpagaus C, Bless F, Bertsch S, Krummenacher P, Flórez Orrego DA, Pina EA, et al. Integration of high-temperature heat pumps in Swiss industrial processes (HTHP-CH). Proc 14th IEA Heat Pump Conf. 2023;Paper 494.
4. Qurratu'ain PD. Analisis performa sistem refrigerasi pada heat pump dan air conditioning skala laboratorium [tugas akhir]. 2021.
5. Santoso NA. Pemanfaatan panas buang (heat recovery steam generator) pada gas turbine generator unit utilitas pengolahan gas [tugas akhir]. 2023.
6. Cahyana MF. Analisis efektivitas heat exchanger pada H2S removal unit [tugas akhir]. 2025.
7. Dumont M, Wang R, Wenzke D, Blok K, Heijungs R. The techno-economic integrability of high-temperature heat pumps for decarbonizing process heat in the food and beverages industry. Resour Conserv Recycl. 2023;188:106605.

8. Bever PM, Bless F, Arpagaus C, Bertsch S. High-temperature heat pumps for industrial use. Chem Ing Tech. 2024;96(8):1071–84.

9. Dong S, Hu P, Zhang C, Hu X, Zhuang W, Wu D. How to optimally design industrial high-temperature heat pump for multiple objectives and working conditions? Energy. 2025;329:136830.

10. IEA Heat Pumping Technologies (HPT) Annex 58. High-temperature heat pumps: technologies – state of the art and ongoing developments [Internet]. 2022 [cited 2026 Aug 4]. Available from: https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/

11. Johnson Controls–Sabroe. Sabroe industrial heat pumps: HeatPAC, DualPAC, HicaHP [Internet]. 2025 [cited 2026 Aug 4]. Available from: https://www.sabroe.com/heatpumps

12. Politeknik Negeri Bandung. Panduan tugas akhir program diploma empat. Bandung: Politeknik Negeri Bandung; 2018.

13. Cengel YA, Boles MA, Kanoğlu M. Thermodynamics: an engineering approach. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2019.

14. Johnson Controls–Sabroe. COMP2 system report: proyek BJARNE_DUALPAC [laporan teknis perangkat lunak]. 2025.

15. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva: IPCC; 2019.

16. GreenCalculus. Grid electricity emission factors by country [Internet]. 2025 [cited 2026 Aug 4]. Available from: https://greencalculus.com/data/grid-electricity-emission-factors/