

ANALISIS KEGAGALAN KOMPONEN MEKANIS KOMPRESOR AKIBAT PENGARUH MIGRASI CAIRAN REFRIGERAN

Irwan Hermawan ¹⁾

1) Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Indonesia

E-mail: irwanindo19@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab utama kegagalan mekanis pada kompresor pendingin berkapasitas 45 TR yang digunakan pada sistem grain cooler. Kegagalan yang diamati berupa patah pada valve plate kompresor, vibrasi tinggi, serta munculnya alarm low pressure secara berulang. Hasil inspeksi menunjukkan adanya indikasi migrasi cairan refrigeran (liquid migration) ke dalam crankcase kompresor pada saat off-cycle, yang menyebabkan hydraulic shock ketika kompresor mulai beroperasi. Metode analisis dilakukan dengan pendekatan diagram tekanan-entalpi ($P-h$ diagram) untuk mengevaluasi kondisi refrigeran R407C selama siklus kompresi, serta pengamatan langsung terhadap kondisi komponen dan data operasi sistem. Hasil analisa menunjukkan bahwa kontrol sistem tidak mampu mencegah perpindahan cairan ke sisi suction saat shutdown, sehingga menimbulkan tekanan balik tinggi pada valve plate. Penelitian ini menegaskan pentingnya penerapan crankcase heater dan prosedur pump down untuk mencegah migrasi cairan dan memperpanjang umur kompresor.

Kata kunci: kompresor, migrasi cairan, grain cooler, R407C, valve plate failure, $P-h$ diagram.

Pendahuluan

Kompresor merupakan komponen utama dalam sistem refrigerasi yang berfungsi mengisap dan menekan uap refrigeran agar dapat bersirkulasi dalam siklus pendinginan. Dalam aplikasi grain cooler, stabilitas operasi kompresor menjadi krusial karena sistem bekerja secara periodik mengikuti kebutuhan pendinginan silo penyimpanan gabah.

Namun, pada kondisi tertentu, refrigeran cair dapat bermigrasi dari sisi tekanan tinggi menuju crankcase kompresor ketika unit tidak beroperasi (off-cycle). Fenomena ini dikenal sebagai migrasi cairan refrigeran, dan dapat menyebabkan kerusakan mekanis serius akibat liquid slugging saat kompresor start-up.

Kasus ini diamati pada unit grain cooler berkapasitas 45 TR dengan refrigeran R407C, di mana terjadi alarm tekanan rendah berulang dan kegagalan mekanis pada valve plate kompresor. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi mekanisme kerusakan dan kaitannya dengan fenomena migrasi cairan.

Studi Pustaka

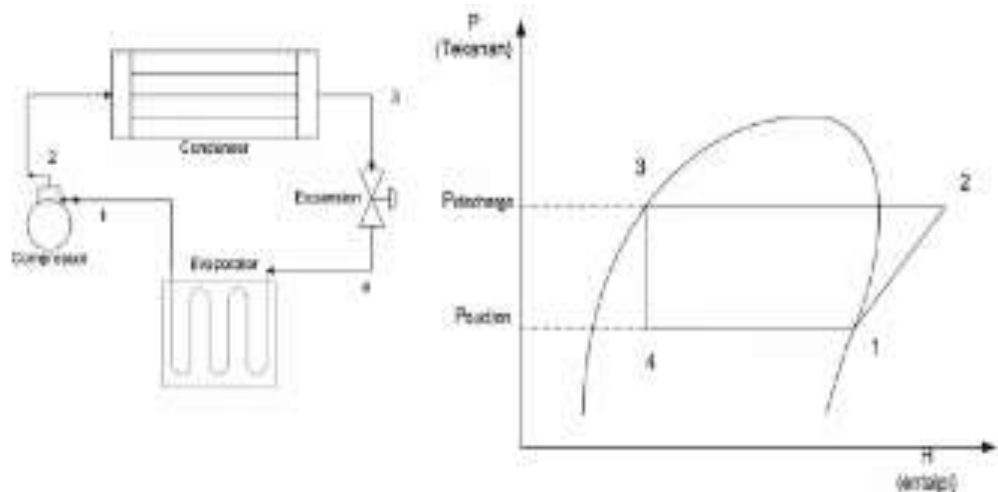
Menurut [1] dalam Air Conditioning Principles and Systems, migrasi cairan refrigeran terjadi akibat perbedaan tekanan parsial antara sistem dan crankcase, terutama ketika suhu minyak lebih rendah dari suhu refrigeran di sistem. Fenomena ini dapat menimbulkan liquid slugging, yakni masuknya refrigeran cair ke ruang kompresi yang menyebabkan tekanan mendadak dan kerusakan mekanis.

Standar [2] juga merekomendasikan penggunaan crankcase heater, pump down control, dan suction accumulator sebagai langkah pencegahan utama.

Kerusakan umum yang disebabkan oleh slugging meliputi:

- Patah pada valve plate reed valve.
- Deformasi connecting rod.
- Kegagalan bearing akibat pencampuran minyak dengan refrigeran cair.

Siklus refrigerasi akan dapat diilustrasikan dengan mudah melalui diagram moiler atau diagram tekanan-entalpi ($P-h$ diagram) secara skematis sebagai berikut:



Gambar 1. Siklus refrigerasi

Proses 1–2 (Kompresi): Uap refrigeran bertekanan rendah dikompresi hingga menjadi uap superheated bertekanan tinggi.

Proses 2–3 (Kondensasi): Uap panas tekanan tinggi melepaskan panas dan berubah menjadi cair bertekanan tinggi.

Proses 3–4 (Ekspansi): Cairan bertekanan tinggi diekspansi lewat katup, tekanannya turun dan sebagian menguap jadi campuran cair–uap dingin.

Proses 4–1 (Evaporasi): Campuran cair–uap menyerap panas dari ruangan hingga seluruhnya menjadi uap dan siap dikompresi kembali.

Parameter kinerja system refrigerasi diantaranya:

1. Superheat Evaporator
Proses pemanasan uap refrigeran setelah seluruh cairan menguap di evaporator agar uap yang masuk kompresor benar-benar kering dan mencegah liquid slugging.
Superheat = Temp. aktual suction evap. – Temp. saturasi pressure suction evap.
2. Subcooling Condenser
Proses pendinginan lanjut cairan refrigeran setelah kondensasi penuh agar tidak ada uap tersisa dan meningkatkan efisiensi sistem.
Subcooling = Temp. aktual liquid conden. – Temp. saturasi pressure liquid conden.
3. Kerja kompresor
Energi yang dibutuhkan kompresor untuk menaikkan tekanan refrigeran.
 $Q_w = h_2 - h_1$
4. Kalor kondensor
Panas yang dibuang ke udara.
 $Q_k = h_2 - h_3$
5. Kalor evaporator
Kapasitas pendinginan yang diserap dari ruangan.
 $Q_e = h_1 - h_4$
6. Rasio Kompresi
Perbandingan tekanan discharge dan suction.
 $R_c = P_d - P_s$
7. COP Actual
Efisiensi nyata sistem pendingin.
 $COP_{Act} = Q_e / Q_w$

8. COP Carnot
Efisiensi maksimum teoritis berdasarkan batas termodinamika.
 $COP_{Car} = T_e / (T_c - T_e)$
9. Efficiency System
Persentase seberapa dekat sistem nyata terhadap kondisi ideal.
 $Efficiency = (COP_{act} / COP_{car}) \times 100\%$

Metodologi Penelitian

Berikut ini diagram alir penelitian yang menggambarkan metodologi penelitian penulis:



Gambar 2. Diagram alir metode penelitian

Hasil dan Pembahasan

- Temuan Lapangan
 1. Alarm low pressure muncul berulang meskipun refrigeran telah ditambahkan.
 2. Pressure transmitter suction bekerja tidak stabil (intermiten).
 3. Vibrasi kompresor mencapai >7 mm/s RMS.
 4. Setelah pembongkaran, ditemukan valve plate patah dan permukaan piston mengalami benturan.
- Analisa Kinerja Sistem Refrigerasi
 1. Superheat Evaporator

Superheat	= Temp. aktual suction evap. – Temp. saturasi pressure suction evap.
Superheat	= $15 - 10,4$
	= $4,6$ K
 2. Subcooling Condenser

Subcooling	= Temp. saturasi pressure liquid conden. - Temp. aktual liquid conden.
Subcooling	= $49 - 38$
	= 11 K

3. Kerja kompressor

$$\begin{aligned}
 Q_w &= h_2 - h_1 \\
 Q_w &= 499,069 - 423,097 \\
 &= 75,927 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

4. Kalor kondensor

$$\begin{aligned}
 Q_k &= h_2 - h_3 \\
 Q_k &= 499,069 - 260,498 \\
 &= 238,571 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

5. Kalor evaporator

$$\begin{aligned}
 Q_e &= h_1 - h_4 \\
 Q_e &= 423,097 - 260,498 \\
 &= 162,599 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

6. Rasio Kompresi

$$\begin{aligned}
 R_c &= P_d - P_s \\
 R_c &= 21,68 - 6,52 \\
 &= 3,32
 \end{aligned}$$

7. COP Actual

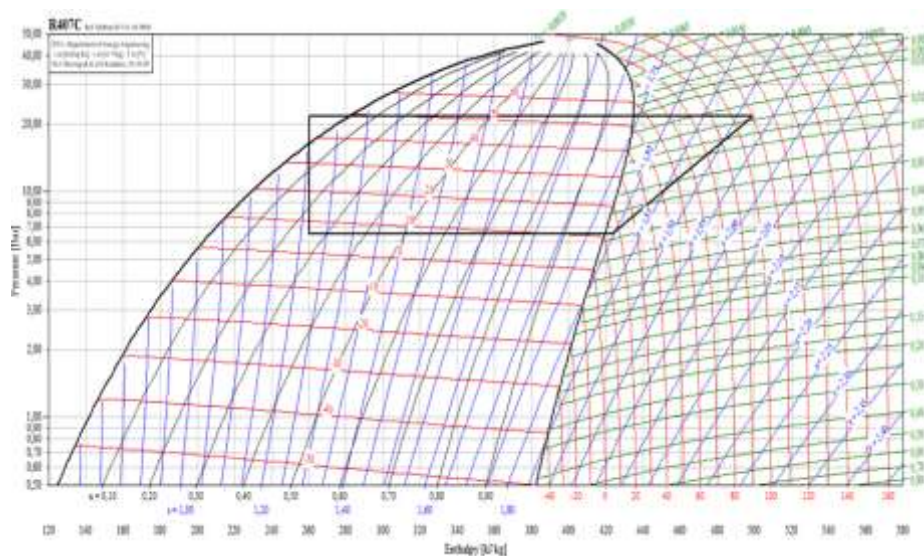
$$\begin{aligned}
 \text{COP Act} &= Q_e / Q_w \\
 \text{COP Act} &= 162,599 / 75,927 \\
 &= 2,14
 \end{aligned}$$

8. COP Carnot

$$\begin{aligned}
 \text{COP Car} &= T_e / (T_c - T_e) \\
 \text{COP Car} &= 283,91 / (310,15 - 283,91) \\
 &= 10,81
 \end{aligned}$$

9. Efficiency System

$$\begin{aligned}
 \text{Efficiency} &= (\text{COP act} / \text{COP car}) \times 100\% \\
 \text{Efficiency} &= (2,14 / 10,81) \times 100\% \\
 &= 19,7\%
 \end{aligned}$$



Gambar 3. Hasil perhitungan

- **Analisa Mekanis**

Kegagalan valve plate diklasifikasikan sebagai impact failure, bukan kelelahan material (fatigue). Pola patahan menunjukkan arah tegangan berasal dari sisi bawah reed valve akibat tekanan balik mendadak dari fase cair. Hal ini sejalan dengan gejala awal berupa vibrasi tinggi dan tekanan suction drop mendadak.

Kesimpulan

Kegagalan mekanis pada kompresor unit grain cooler kapasitas 45 TR dengan refrigeran R407C disebabkan oleh migrasi cairan refrigeran ke crankcase selama periode off-cycle. Kondisi ini menimbulkan liquid slugging yang mengakibatkan valve plate patah dan vibrasi tinggi.

Analisis dengan diagram P-h membuktikan bahwa refrigeran belum sepenuhnya menguap di suction line saat start-up. Pencegahan dapat dilakukan melalui penerapan crankcase heater, suction accumulator, dan sistem pump down otomatis untuk melindungi kompresor dari tekanan mendadak

Daftar Pustaka

- [1] W Pita, E.G. (2011). Air Conditioning Principles and Systems: An Energy Approach. 4th Edition. Pearson.
- [2] ASHRAE Handbook (2020). Refrigeration Systems and Applications. ASHRAE Inc.
- [3] Bitzer (2022). Compressor Application Manual R407C Series.