

Syamsuri Hasan, dkk.

# SISTEM REFRIGERASI DAN TATA UDARA

## JILID 1

untuk  
Sekolah Menengah Kejuruan



Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan  
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

Sapto Widodo  
Syamsuri Hasan

# SISTEM REFRIGERASI DAN TATA UDARA JILID 1

**SMK**



**Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan**

Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional

# SISTEM REFRIGERASI DAN TATA UDARA JILID 1

## Untuk SMK

Penulis Utama : Sapto Widodo  
Syamsuri Hasan  
Editor : Winarso A. Sukarno  
Perancang Kulit : Tim  
Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

WID WIDODO, Sapto  
r Sistem Refrigerasi dan Tata Udara Jilid 1 untuk SMK/oleh  
Sapto Widodo, Syamsuri Hasan ---- Jakarta : Direktorat  
Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal  
Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen  
Pendidikan Nasional, 2008.  
xii. 175 hlm  
Daftar Pustaka : LAMPIRAN A  
Glosarium : LAMPIRAN B  
ISBN : 978-979-060-032-4  
978-979-060-033-1

Diterbitkan oleh  
**Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan**  
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah  
Departemen Pendidikan Nasional  
Tahun 2008

## KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional, telah melaksanakan kegiatan penulisan buku kejuruan sebagai bentuk dari kegiatan pembelian hak cipta buku teks pelajaran kejuruan bagi siswa SMK. Karena buku-buku pelajaran kejuruan sangat sulit di dapatkan di pasaran.

Buku teks pelajaran ini telah melalui proses penilaian oleh Badan Standar Nasional Pendidikan sebagai buku teks pelajaran untuk SMK dan telah dinyatakan memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh penulis yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para pendidik dan peserta didik SMK.

Buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*download*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Dengan ditayangkan *soft copy* ini diharapkan akan lebih memudahkan bagi masyarakat khususnya para pendidik dan peserta didik SMK di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri untuk mengakses dan memanfaatkannya sebagai sumber belajar.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para peserta didik kami ucapkan selamat belajar dan semoga dapat memanfaatkan buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, 17 Agustus 2008  
Direktur Pembinaan SMK

## **PRAKATA**

Buku ini disusun dengan maksud untuk memenuhi kebutuhan buku-buku teknik yang komprehensif, berorientasi pada masalah praktis, di bidang Teknik Refrijerasi dan Tata Udara pada level Teknisi atau level SMK. Walaupun begitu, buku ini dapat digunakan pula oleh kalangan lain yang berminat pada dunia refrijerasi dan tata udara.

Setiap topik bahasan didahului dengan pembahasan secara konseptual untuk meletakkan dasar yang kuat dari segi keilmuannya kemudian dilanjutkan ke segi praktisnya. Untuk memperdalam pokok permasalahan, adakalanya bahan kajian diberikan melalui contoh-contoh permasalahan yang aplikatif disertai dengan solusinya. Penggunaan hitungan matematis yang terlalu rumit dihindari, tetapi lebih menekankan pada penggunaan Tabel, grafik dan chart.

Pada keseluruhan pembahasan, diarahkan pada siklus refrijerasi kompresi uap, dan permasalahan yang dapat timbul pada setiap bagiannya. Setiap bagian dibahas secara komprehensif termasuk hubungannya dengan bagian lain yang ada pada sistem refrijerasi kompresi uap. Semoga bermanfaat.

## DAFTAR ISI

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
|                                              | Hal |
| <b>SAMBUTAN DIREKTUR PEMBINAAN SMK .....</b> |     |
| <b>PRAKATA .....</b>                         | i   |
| <b>DAFTAR ISI .....</b>                      | ii  |
| <b>SINOPSIS .....</b>                        | vii |
| <b>DESKRIPSI KONSEP PENULISAN .....</b>      | ix  |
| <b>PETA KOMPETENSI .....</b>                 | x   |

### BUKU 1

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Gaya dan Energi yang terkandung pada Benda . .</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Masa dan Berat Jenis . . . . .                        | 3         |
| 1.2 Gravitasi Spesifik dan Berat Jenis Relatif . . . . .  | 5         |
| 1.3 Masa dan Volume Zat yang Mengalir . . . . .           | 5         |
| 1.4 Velositas dan Kecepatan Gerak Benda . . . . .         | 7         |
| 1.5 Percepatan . . . . .                                  | 8         |
| 1.6 Percepatan Gravitasi . . . . .                        | 9         |
| 1.7 Gaya . . . . .                                        | 10        |
| 1.8 Gaya Gravitasi . . . . .                              | 10        |
| 1.9 Energi Kinetik Eksternal . . . . .                    | 11        |
| 1.10 Energi Potensial Eksternal . . . . .                 | 12        |
| 1.11 Energi Eksternal Total . . . . .                     | 13        |
| 1.12 Hukum Konservasi Energi . . . . .                    | 13        |
| 1.13 Energi Internal . . . . .                            | 14        |
| 1.14 Energi Kinetik Internal . . . . .                    | 15        |
| 1.15 Energi Potensial Internal . . . . .                  | 15        |
| <b>2. Energi Panas, Daya dan Perubahan Wujud. . . . .</b> | <b>18</b> |
| 2.1 Energi Panas dan Daya . . . . .                       | 19        |
| 2.2 Metoda Pemindahan Panas . . . . .                     | 21        |
| 2.3 Perhitungan Energi Panas . . . . .                    | 28        |
| 2.4 Suhu . . . . .                                        | 32        |
| 2.5 <i>Thermometer</i> . . . . .                          | 32        |
| 2.6 Suhu Absolut . . . . .                                | 35        |
| 2.7 Tekanan . . . . .                                     | 36        |
| 2.8 Perubahan Wujud Benda . . . . .                       | 43        |
| 2.9 Saturasi, Panaslanjutan, dan Superdingin . . . . .    | 50        |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>3. Sifat Udara dan Psikrometri</b> . . . . .                                   | 53  |
| 3.1 Komposisi Udara . . . . .                                                     | 54  |
| 3.2 Campuran Uap Air dan Udara Kering . . . . .                                   | 56  |
| 3.3 Suhu Saturasi . . . . .                                                       | 61  |
| 3.4 Uap Panaslanjut . . . . .                                                     | 62  |
| 3.5 Cairan Superdingin . . . . .                                                  | 63  |
| 3.6 Efek Tekanan pada Suhu Saturasi . . . . .                                     | 63  |
| 3.7 Evaporasi . . . . .                                                           | 64  |
| 3.8 Kondensasi . . . . .                                                          | 67  |
| 3.9 Suhu Titik Embun ( <i>Dew-point</i> ) . . . . .                               | 67  |
| 3.10 Kandungan Uap Air Maksimum . . . . .                                         | 70  |
| 3.11 Kelembaban Absolut . . . . .                                                 | 71  |
| 3.12 Kelembaban Relatif . . . . .                                                 | 72  |
| 3.13 Kelembaban Spesifik . . . . .                                                | 73  |
| 3.14 Suhu Bola Basah dan Suhu Bola Kering . . . . .                               | 74  |
| 3.15 Proses Transfer Panas . . . . .                                              | 76  |
| <b>4. Psychrometric Chart</b> . . . . .                                           | 81  |
| 4.1 Pemetaan Psikrometrik <i>Chart</i> . . . . .                                  | 82  |
| 4.2 Pengenalan Letak Garis Skala pada <i>Chart</i> . . . . .                      | 82  |
| 4.3 Definisi Istilah dan Pemetaan ( <i>Plotting</i> ) pada <i>Chart</i> . . . . . | 84  |
| 4.4 Cara Membaca <i>Chart</i> . . . . .                                           | 86  |
| 4.5 Perubahan Kondisi Udara Ruang . . . . .                                       | 88  |
| 4.6 Pemanasan Udara tanpa Penambahan Uap Air ..                                   | 88  |
| 4.7 Pemanasan dengan Penambahan Uap Air . . . . .                                 | 91  |
| 4.8 Pendinginan tanpa Pengurangan Uap Air. . . . .                                | 92  |
| 4.9 Pendinginan dengan Pengurangan Uap Air . . . . .                              | 94  |
| 4.10 Percampuran Udara . . . . .                                                  | 96  |
| <b>5. Refrigeran dan Sistem Kompresi Uap</b> . . . . .                            | 98  |
| 5.1 Masalah Lingkungan . . . . .                                                  | 99  |
| 5.2 Klasifikasi Refrijeran . . . . .                                              | 100 |
| 5.3 Refijeran yang Ramah Lingkungan . . . . .                                     | 102 |
| 5.4 Sistem Refrijerasi . . . . .                                                  | 105 |
| 5.5 Pengontrolan Suhu Penguapan Refrijeran . . . . .                              | 106 |
| 5.6 Evaporasi Terus-menerus . . . . .                                             | 108 |
| 5.7 Siklus Ulang Refrijeran . . . . .                                             | 110 |
| 5.8 Tipikal Sistem Kompresi Gas . . . . .                                         | 111 |
| 5.9 Service Valve . . . . .                                                       | 112 |
| 5.10 Pembagian Sistem . . . . .                                                   | 112 |
| 5.11 Kondensing Unit . . . . .                                                    | 113 |

|           |                                                                         |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.12      | Pengaruh Tekanan Liquid terhadap Suhu<br>Evaporasi Refrijeran . . . . . | 114        |
| 5.13      | Pengaruh Tekanan Gas terhadap Suhu<br>Kondensasi refrijeran . . . . .   | 115        |
| 5.14      | Siklus Refrijeran . . . . .                                             | 117        |
| 5.15      | Tipikal Proses Aktual . . . . .                                         | 121        |
| <b>6.</b> | <b>Diagram Siklus Refrijerasi . . . . .</b>                             | <b>126</b> |
| 6.1       | Diagram Siklus . . . . .                                                | 127        |
| 6.2       | P-H Diagram . . . . .                                                   | 128        |
| 6.3       | Pengaruh Suhu Evaporasi terhadap Efisiensi<br>Siklus . . . . .          | 134        |
| 6.4       | Pengaruh Suhu Kondensasi terhadap Efisiensi<br>Siklus . . . . .         | 137        |
| 6.5       | Siklus Refrijerasi Aktual . . . . .                                     | 140        |
| <b>7.</b> | <b>Aplikasi Sistem Refrigerasi Mekanik . . . . .</b>                    | <b>146</b> |
| 7.1       | Ruang Lingkup Industri . . . . .                                        | 147        |
| 7.2       | Klasifikasi . . . . .                                                   | 147        |
| 7.3       | Pengawetan Makanan . . . . .                                            | 153        |
| 7.4       | Gudang Pendinginan . . . . .                                            | 155        |
| 7.5       | Cara Pembekuan . . . . .                                                | 156        |
| <b>8.</b> | <b>Evaporator . . . . .</b>                                             | <b>157</b> |
| 8.1       | Jenis Evaporator . . . . .                                              | 158        |
| 8.2       | Konstruksi Evaporator . . . . .                                         | 158        |
| 8.3       | <i>Bare Tube Evaporator</i> . . . . .                                   | 158        |
| 8.4       | <i>Plate Surface Evaporator</i> . . . . .                               | 160        |
| 8.5       | <i>Finned Evaporator</i> . . . . .                                      | 161        |
| 8.6       | Kapasitas Evaporator . . . . .                                          | 161        |
| <b>9.</b> | <b>Pengontrolan laju Aliran Refrijeran . . . . .</b>                    | <b>164</b> |
| 9.1       | Pengontrolan Laju Aliran Refrijeran . . . . .                           | 165        |
| 9.2       | <i>Hand Expansion Valve</i> . . . . .                                   | 165        |
| 9.3       | <i>Automatic Expansion Valve</i> . . . . .                              | 166        |
| 9.4       | <i>Thermostatic Expansion Valve</i> . . . . .                           | 168        |
| 9.5       | Pipa Kapiler . . . . .                                                  | 173        |

## JILID 2

|            |                                                |            |
|------------|------------------------------------------------|------------|
| <b>10.</b> | <b>Kondensor Dan Pemeliharaannya . . . . .</b> | <b>175</b> |
| 10.1       | Pendahuluan . . . . .                          | 176        |
| 10.2       | Permasalahan Kondensor . . . . .               | 176        |

|            |                                                               |            |
|------------|---------------------------------------------------------------|------------|
| 10.3       | Permukaan Kondensor Kotor . . . . .                           | 179        |
| 10.4       | Pemeliharaan <i>Air-cooled Condensor</i> . . . . .            | 180        |
| 10.5       | Pemeliharaan <i>Water-cooled Condensor</i> . . . . .          | 182        |
| <b>11.</b> | <b>Kompresor dan Pemeliharaannya . . . . .</b>                | <b>187</b> |
| 11.1       | Fungsi Kompresor . . . . .                                    | 188        |
| 11.2       | Kompresor Torak . . . . .                                     | 190        |
| 11.3       | Piston ( <i>Compressor</i> ) <i>Displacement</i> . . . . .    | 195        |
| 11.4       | Efisiensi Volumetrik . . . . .                                | 196        |
| 11.5       | Perbandingan Kompresi . . . . .                               | 197        |
| 11.6       | Kontaminasi . . . . .                                         | 198        |
| 11.7       | Pengujian Kompresor . . . . .                                 | 200        |
| <b>12.</b> | <b>Kontrol Komponen dan Rangkaian . . . . .</b>               | <b>204</b> |
| 12.1       | Fungsi Pengontrol Sistem Refrijerasi dan Tata Udara . . . . . | 205        |
| 12.2       | Fungsi Mengatur Kondisi Ruang . . . . .                       | 205        |
| 12.3       | Fungsi Proteksi dan Perlindungan . . . . .                    | 205        |
| 12.4       | Fungsi Operasi Ekonomis . . . . .                             | 206        |
| 12.5       | Fungsi <i>Starting dan Stopping</i> . . . . .                 | 208        |
| 12.6       | Fungsi Pengontrol Operasi . . . . .                           | 208        |
| 12.7       | Fungsi pengontrol Kondisi Ruang . . . . .                     | 208        |
| 12.8       | Fungsi Pengontrol Residential <i>AC</i> . . . . .             | 209        |
| 12.9       | Fungsi Pengontrol <i>AC</i> Komersial . . . . .               | 210        |
| 12.10      | Fungsi Pengontrol untuk <i>Central Station (AC)</i> . . . . . | 211        |
| 12.11      | Sistem Kontrol Elektrik . . . . .                             | 212        |
| 12.12      | Sistem Kontrol Pneumatik . . . . .                            | 213        |
| 12.13      | Sistem Kontrol Elektronik . . . . .                           | 214        |
| 12.14      | <i>Thermostat</i> . . . . .                                   | 215        |
| 12.15      | <i>Humidistat</i> . . . . .                                   | 224        |
| 12.16      | <i>Pressure Control</i> . . . . .                             | 225        |
| 12.17      | <i>Oil differential Pressure Control</i> . . . . .            | 231        |
| 12.18      | <i>Evaporator Pressure Regulator</i> . . . . .                | 232        |
| 12.19      | <i>Crankcase Pressure Regulator</i> . . . . .                 | 234        |
| 12.20      | <i>Capacity Regulator</i> . . . . .                           | 235        |
| <b>13.</b> | <b>Pengujian Sistem Refrijerasi Mekanik . . . . .</b>         | <b>238</b> |
| 13.1       | Peralatan <i>Service</i> . . . . .                            | 239        |
| 13.2       | Penggunaan <i>Service Manifold</i> . . . . .                  | 246        |
| 13.3       | Pengujian Kebocoran dan Tekanan . . . . .                     | 249        |
| 13.4       | Pemeriksaan Tekanan Kondensasi . . . . .                      | 256        |
| 13.5       | Evakuasi . . . . .                                            | 260        |
| 13.6       | <i>Charging</i> . . . . .                                     | 262        |

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>14. Pemipaan Sistem Refrijerasi . . . . .</b>                 | <b>265</b> |
| 14.1 Jenis pipa . . . . .                                        | 266        |
| 14.2 Pipa Tembaga . . . . .                                      | 267        |
| 14.3 Pipa Alumunium . . . . .                                    | 270        |
| 14.4 Pipa Baja . . . . .                                         | 271        |
| 14.5 Pipa Fleksibel . . . . .                                    | 272        |
| 14.6 Pipa Kapiler . . . . .                                      | 274        |
| 14.7 <i>Soldering Fitting</i> . . . . .                          | 278        |
| 14.8 Alat Kerja Pipa . . . . .                                   | 282        |
| 14.9 Pengerjaan Pemipaan Refrijerasi . . . . .                   | 289        |
| 14.10 Brazing dan Perlengkapan Las <i>Oxi-acetilin</i> . . . . . | 301        |
| <b>15. Motor Listrik dan Rangkaian Kontrol . . . . .</b>         | <b>313</b> |
| 15.1 Motor Listrik . . . . .                                     | 314        |
| 15.2 Motor Satu Fasa . . . . .                                   | 315        |
| 15.3 Motor Tiga Fasa . . . . .                                   | 318        |
| 15.4 Rangkaian Kontrol Motor . . . . .                           | 322        |
| <b>16. AC Mobil . . . . .</b>                                    | <b>325</b> |
| 16.1 Pendahuluan . . . . .                                       | 326        |
| 16.2 Operasi AC Mobil . . . . .                                  | 327        |
| 16.3 Kapasitas Pendinginan . . . . .                             | 329        |
| 16.4 Tipikal Sistem dan Instalasi AC Mobil . . . . .             | 330        |
| 16.5 <i>Magnetic Clutch</i> . . . . .                            | 332        |
| 16.6 Kompresor . . . . .                                         | 334        |
| 16.7 Instalasi Sabuk Puli . . . . .                              | 336        |
| 16.8 Kondensor dan Evaporator . . . . .                          | 337        |
| 16.9 <i>Receiver-Dryer</i> . . . . .                             | 338        |
| 16.10 Katub Ekspansi . . . . .                                   | 339        |
| 16.11 Pekerjaan <i>Service</i> . . . . .                         | 399        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA . . . . .</b>                                  | <b>344</b> |
| <b>DAFTAR ISTILAH . . . . .</b>                                  | <b>345</b> |

## SINOPSIS

Buku ini dimaksudkan untuk membuka wawasan siswa SMK yang akan menggeluti dunia refrijerasi dan tata udara. Untuk maksud itu, Buku ini membahas berbagai aspek yang ada di dunia refrijerasi dan Tata Udara (refrigeration & Air Conditioning), meliputi gejala fisik dan termodinamika, pentingnya refrijerasi dan tata udara, tantangan yang dihadapi dalam berbagai level pekerjaan, dan lingkup dunia industri refrijerasi dan tata udara.

Tidak dapat dibayangkan, bagaimana dalam fase kehidupan modern seperti saat ini, tanpa ada keterlibatan sistem Refrijerasi dan Tata Udara. Urusan bisnis dan urusan komersial lainnya, proses manufaktur di industri, penyimpanan dan pengawetan makanan, transportasi dan pengapalan serta urusan rumah tangga, mempunyai ketergantungan yang sangat tinggi terhadap kegiatan pengkondisian suhu dan kelembaban udara di dalam ruang.

Industri refijerasi dan Tata Udara telah membantu dan membuka peluang terhadap segala keperluan perilaku kehidupan modern. Pada bidang refrijerasi, penanganan kegiatan pasca panen mengharuskan buah-buahan dan sayuran segera didinginkan agar kondisinya tetap segar dan kualitasnya tetap prima. Kemudian pada kegiatan penyimpanan produk di gudang pendingin (cold storage) dan pemasaran produk dalam skala besar di supermarket, seperti pendinginan dan pembekuan daging, pendinginan minuman memerlukan sentuhan sistem refrjerasi dan Tata Udara. Sistem Tata Udara telah meningkatkan efisiensi dan produktifitas dunia usaha dan industri ketika kenyamanan kerja, melalui pengkondisian suhu dan kelambaban udara ruang mulai dipertimbangkan. Banyak pabrik dan industri besar memanfaatkan Sistem Tata Udara untuk membantu proses produksi mereka.

Perencanaan atau desain peralatan, manufaktur atau pembuatan peralatan, penjualan, pemasangan dan pemeliharaan peralatan refrijerasi dan tata udara menyediakan banyak pekerjaan dan sekaligus tantangan. Tidak dapat dipungkiri, karena begitu banyaknya pengguna peralatan refrijerasi dan tata udara, maka menuntut siapa saja yang akan berkecimpung di dalam industri ini harus memiliki kemampuan dan pengetahuan tentang dasar pengkondisian udara serta proses refrijerasi.

Industri Refrijerasi dan Tata Udara pada umumnya dapat dibagi menjadi tiga kelompok industri, yaitu:

1. Domestik
2. Komersial
3. Industrial

Kelompok domestic diarahkan untuk memenuhi keperluan rumah tangga. Peralatan domestik yang banyak beredar di pasaran antara lain *home refrigerator*, *freezer* dan *air conditioner*, tipe *window* dan tipe *split*. Pada aplikasi komersial, peralatannya mencakup peralatan komersial yang lazim digunakan di supermarket, misalnya reach-in freezer, service case, dan produce sale case, water cooler, beverage cooler dan truck refrigeration system. Pada aplikasi industri, peralatannya meliputi central air conditioner, packing plant, cold storage dan pabrik es.

Industri Refrijerasi dan Tata Udara memerlukan dan membuka banyak peluang pekerjaan di berbagai jenjang dan level jabatan yaitu:

1. Level Pelaksana, tingkat Muda, Madya dan Utama.
2. Level Teknisi tingkat Muda, Madya dan Utama.
3. level Ahli dan Spesialis tingkat Muda, Madya dan Utama.

Lulusan SMK dapat mengisi pekerjaan pada level Pelaksana Utama dan Teknisi Muda, dalam hal pemasangan dan pemeliharaan peralatan refrijerasi dan tata udara untuk keperluan rumah tangga (domestik) dan komersial.

## **DESKRIPSI KONSEP PENULISAN**

Buku Refrijerasi dan Tata Udara ini diharapkan dapat dijadikan sebagai buku teks dasar bagi para teknisi dan praktisi di dunia refrijerasi dan pengkondisian udara. Sebagai buku teks dasar bagi para teknisi lapangan pada level SMK, maka penyajian buku ini dibuat sederhana dimulai dengan gejala fisik dan hukum-hukum fisik yang berkaitan kemudian dilanjutkan dengan pembahasan praktis yang terjadi di lapangan pekerjaan.

Buku ini dibagi menjadi lima belas bagian, yang disajikan secara berurutan, dimulai dari yang mudah menuju ke yang lebih kompleks. Karena refrijerasi berkaitan dengan perpindahan energi panas maka masalah yang sangat krusial ini disajikan pada bagian pertama buku ini dengan harapan siswa akan mendapat pengetahuan dasar yang kuat tentang energi panas. Pada bagian selanjutnya disajikan masalah sifat-sifat udara dan berbagai proses pengkondisiannya.

Berikutnya disajikan aplikasi berbagai sistem refrijerasi dan permasalahannya. Yang pertama adalah masalah komponen yang digunakan dan pengaturannya, serta masalah pemeliharannya. Yang terakhir disajikan masalah pemipaan refrijerasi dan motor listrik yang digunakan sebagai penggerak kompresor.

**PETA UNIT KOMPETENSI**  
**BIDANG TEKNIK PENDINGIN DAN TATA UDARA**

| <b>Kode Unit</b> | <b>Unit Kompetensi</b>                                |
|------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>U</b>         | <b>KELOMPOK UMUM</b>                                  |
| TP-U1-OO-A       | Melaksanakan pekerjaan secara aman (K -3)             |
| TP-U2-OO-A       | Mengukur Besaran Listrik dan Temperatur Tata Udara    |
| TP-U3-OO-A       | Memeriksa Fungsi dan Performansi Peralatan            |
| TP-U4-OO-A       | Membaca Gambar Sistem Pemipaan Refrijerasi Primer     |
| TP-U5-OO-A       | Membaca Gambar Sistem Pemipaan Refrijerasi Sekunder   |
| TP-U6-OO-A       | Membaca Gambar Sistem Ducting Teknik Pendingin        |
| TP-U7-OO-A       | Membaca Gambar Pabrik Es/Refrijerasi Komersial        |
| TP-U8-OO-A       | Membaca gambar Cold Storage                           |
| TP-U9-OO-A       | Membaca gambar Cold Storage Transportasi              |
| TP-U10-OO-A      | Membaca Gambar Ruang Retail                           |
| TP-U11-OO-A      | Membaca Gambar Perencanaan AC Sentral                 |
| TP-U12-OO-A      | Membaca gambar Ruang Bersih                           |
| TP-U13-OO-A      | Mengisi Refrijerasi Mesin pendingin kurang dari 2 PK  |
| TP-U14-OO-A      | Mengisi Refrijerasi Mesin pendingin lebih dari 2 PK   |
| TP-U15-OO-A      | Mengisi Refrijerasi sekunder Mesin Pendingin Sentral. |
| TP-U16-OO-A      | Mengganti Refrijerasi (Retrofitting)                  |

| <b>G</b>    | <b>KELOMPOK MENGGAMBAR</b>                                       |
|-------------|------------------------------------------------------------------|
| TP-G1-OO-A  | Menaggambar Instalasi Pemipaan Refrijerasi Teknik Pendingin.     |
| TP-G2-OO-A  | Menggambar Sistem Pemipaan Refrijerasi Sekunder Teknik Pendingin |
| TP-G3-OO-A  | Menggambar Ducting Teknik Pendingin.                             |
| TP-G4-PE-A  | Menggambar Pabrik Es/Refrijerasi Komersial                       |
| TP-G5-CS-A  | Menggambar Sistem Cold Storage.                                  |
| TP-G6-CS-A  | Menggambar Cold Storage Transportasi Darat.                      |
| TP-G7-CS-A  | Menggambar Cold Storage Transportasi Laut                        |
| TP-G8-TU-A  | Menggambar Sistem Ruang Retail.                                  |
| TP-G9-TU-A  | Menggambar Sistem Tata Udara Industri/Produksi.                  |
| TP-G10-TU-A | Menggambar Sistem Tata Udara Sentral.                            |

|             |                                               |
|-------------|-----------------------------------------------|
| TP-G11-TU-A | Menggambar Sistem Tata Udara Ruang Bersih     |
| TP-G12-OO-A | Menggambar Teknik Pendingin dengan Metode CAD |

| <b>L</b>   | <b>KELOMPOK MELAYANI MESIN</b>                                         |
|------------|------------------------------------------------------------------------|
| TP-L1-PE-A | Mengoperasikan Pabrik Es Komersial                                     |
| TP-L2-CS-A | Mengoperasikan dan Mealayani Cold Storage untuk Sayuran                |
| TP-L3-CS-A | Mengoperasikan dan Mealayani Cold Storage untuk Daging, Ikan dan Udang |
| TP-L4-CS-A | Melayani Cold Storage Transportasi Darat                               |
| TP-L5-CS-A | Melayani Cold Storage Transportasi Laut                                |

| <b>R</b>    | <b>KELOMPOK MERAWAT DAN MEMPERBAIKI</b>                            |
|-------------|--------------------------------------------------------------------|
| TP-R1-OO-A  | Merawat peralatan Udara Ventilasi                                  |
| TP-R2-OO-A  | Merawat dan Memperbaiki Kompresor Mesin Pendingin                  |
| TP-R3-OO-A  | Merawat dan Memperbaiki Alat Penukar Kalor                         |
| TP-R4-OO-A  | Merawat dan Memperbaiki Mesin Listrik Teknik Pendingin             |
| TP-R5-PE-A  | Merawat dan Memperbaiki Mesin Pabrik Es (Refrijerasi)              |
| TP-R6-CS-A  | Merawat dan Memperbaiki Cold Storage                               |
| TP-R7-CS-A  | Merawat dan Memperbaiki Cold Storage Transportasi Darat            |
| TP-R8-CS-A  | Merawat dan Memperbaiki Cold Storage Transportasi Laut             |
| TP-R9-TU-A  | Merawat dan Memperbaiki tata Udara Industri                        |
| TP-R10-OO-A | Merawat dan Memperbaiki Mesin Pendingin                            |
| TP-R11-TU-A | Merawat dan Memperbaiki Mesin Pendingin Mobil Pribadi              |
| TP-R12-TU-A | Mengoperasikan dan Merawat Mesin Pendingin Rumah Tangga (Domestik) |
| TP-R13-OO-A | Merawat dan Memperbaiki Kontrol Mesin Pendingin Sentral            |
| TP-R14-TU-A | Merawat dan Melayani Restoran dan Kelab Malam                      |
| TP-R15-TU-A | Merawat dan Memperbaiki Ruang Retail                               |
| TP-R16-TU-A | Merawat dan Memperbaiki Mesin Pendingin Sentral                    |
| TP-R17-TU-A | Merawat dan Memperbaiki Pengatur Kualitas Udara Indoor (KUI)       |
| TP-R18-TU-A | Merawat dan memperbaiki Sistem Pendingin Ruang Bersih              |

| <b>P</b>    | <b>KELOMPOK PEMASANGAN /PEMBANGUNAN</b>           |
|-------------|---------------------------------------------------|
| TP-P1-TU-A  | Memilih Lokasi dan Pemasangan Outdoor Unit        |
| TP-P2-PE-A  | Membangun Pabrik Es (Mesin Refrijerasi) komersial |
| TP-P3-CS-A  | Membangun Ruang Dingin (Cold Storage)             |
| TP-P4-CS-A  | Membangun Cold Storage Transportasi Darat         |
| TP-P5-CS-A  | Membangun Cold Storage transportasim Laut.        |
| TP-P6-TU-A  | Memasang Mesin Tata Udara Domestik                |
| TP-P7-TU-A  | Memasang Mesin Tata Udara Mobil.                  |
| TP-P8-TU-A  | Membangun Tata Udara Industri                     |
| TP-P9-TU-A  | Membangun Ruang Retail.                           |
| TP-P10-TU-A | Membangun Tata Udara Sentral                      |
| TP-P11-TU-A | Membangun Tata Udara Ruang Bersih                 |

| <b>D</b>    | <b>KELOMPOK MERENCANA /ODESAIN</b>                  |
|-------------|-----------------------------------------------------|
| TP-D1-OO-A  | Merencana Instalasi Pemipaan Refrijeran Primer      |
| TP-D2-OO-A  | Merencana Instalasi Pemipaan Refrijeran Sekunder    |
| TP-D3-OO-A  | Merencana Instalasi Lorong ( <i>ducting</i> ) Udara |
| TP-D4-EPE-A | Merencana Pabrik Es Komersial                       |
| TP-D5-CS-A  | Merencana Ruang Dingin (Cold storage)               |
| TP-D6-CS-A  | Merencana Cold Storage Transportasi Darat           |
| TP-D7-CS-A  | Merencana Cold Storage Transportasi Laut            |
| TP-D8-TU-A  | Merencana Ruang Retail                              |
| TP-D9-TU-A  | Merencana Tata Udara Industri/Produksi              |
| TP-D10-TU-A | Merencana tata Udara Gedung Sentral                 |
| TP-D11-TU-A | Merencana Ruang Bersih/Steril                       |

# GAYA DAN ENERGI YANG TERKANDUNG PADA BENDA

1

---

## Kerangka Isi

- 1.1 Masa dan Berat Jenis
- 1.2 Gravitasi Spesifik dan Berat Jenis Relatif
- 1.3 Masa dan Volume Zat yang Mengalir
- 1.4 Velocitas dan Kecepatan Gerak Benda
- 1.5 Percepatan
- 1.6 Percepatan Gravitasi
- 1.7 Gaya
- 1.8 Gaya Gravitasi
- 1.9 Energi Kinetik Eksternal
- 1.10 Energi Potensial Eksternal
- 1.11 Energi Eksternal Total
- 1.12 Hukum Konservasi Energi
- 1.13 Energi Internal
- 1.14 Energi Kinetik Internal
- 1.15 Energi Potensial Internal

Pada prinsipnya Sistem Refrijerasi dan Tata Udara berbasis kepada prinsip-prinsip keilmuan dan rekayasa. Padahal keilmuan dan rekayasa itu sendiri mengakar pada ilmu fisika dan matematika terapan. Proses pendinginan udara ruang (***cooling process***) dan proses pemanasan udara ruang (***heating process***) berdasar kepada hukum Penukaran Kalor (***heat exchange***) yang berlangsung pada elemen-elemen fisis.

Desain dan operasi peralatan pendingin dan pemanas ruangan berbasis pada salah satu cabang ilmu fisika yaitu ***thermodynamics***. Sedangkan proses aktual pada pengkondisian ruangan, yakni pengontrolan suhu udara dan kandungan uap air atau kelembaban udara tergantung kepada pengetahuan dari salah satu cabang ilmu fisika yang lazim disebut sebagai psikrometri (***psychrometry***). Pendistribusian udara yang sudah dikondisi ke ruang-ruang yang memerlukannya, dan pengaturan udara segar dari luar ruangan berhubungan erat dengan masalah ventilasi (***ventilation***). Proses aliran fluida dalam suatu siklus menyangkut aliran fluida dan energi kinetik (***kinetic energy***). Pemeliharaan suhu ruangan agar selalu konstan pada titik yang diinginkan akan berkaitan dengan masalah pemindahan panas (***heat transfer***).

Setiap aspek yang ada di dalam sistem refrijerasi dan tata udara berkaitan dengan satu atau lebih prinsip-prinsip di dalam ilmu fisika. Konsekuensinya, prinsip-prinsip dasar pada ilmu fisika, seperti panas atau kalor, suhu, berat jenis, grafitasi spesifik, tekanan, energi, usaha dan daya harus dapat dipahami dan dihayati.

Energi dapat dinyatakan sebagai kemampuan untuk melakukan suatu usaha. Energi diperlukan untuk melaksanakan suatu usaha, dan suatu benda dikatakan memiliki energi ketika ia memiliki kapasitas untuk melakukan suatu usaha. Jumlah energi yang diperlukan untuk melakukan suatu usaha selalu sama dengan jumlah usaha yang dilakukan. Sama halnya, jumlah energi yang dimiliki suatu benda selalu sama dengan jumlah usaha yang dikenakan pada benda tersebut. Usaha dan energi diukur dalam satuan Joule.

### 1.1 Masa dan Berat Jenis

Dalam bidang Refrijerasi dan Tata Udara, ukuran utama untuk menentukan kuantitas suatu benda adalah masa ( $m$ ), biasanya dinyatakan dalam gram ( $g$ ) atau kilogram ( $kg$ ), volume ( $v$ ), biasanya diekspresikan dalam centimetre kubik ( $cm^3$ ) atau meter kubik ( $m^3$ ). Satu meter kubik sama dengan 1.000.000 centimeter kubik. Ukuran lain dari volume fluida adalah liter. Satu liter sama dengan 1/1000 meter kubik.

Berat jenis ( $\rho$ ) dinyatakan sebagai masa per satuan volume. Sedang volume spesifik ( $v$ ) dinyatakan sebagai volume per satuan masa. Bila diekspresikan dalam formula matematika; adalah,

$$\rho = m/V \quad (1.1)$$

$$v = V/m \quad (1.2)$$

Berat jenis lazimnya diekspresikan dalam kilogram per meter kubik ( $kg/m^3$ ) atau per liter ( $kg/l$ ). Jadi,  $\rho = 1/v$  dan  $v = 1/\rho$ .

**Contoh 1.1** Udara mempunyai berat jenis 0,0807 lb/ft<sup>3</sup>. Tentukan volume spesifiknya?

Solusi 
$$v = 1/\rho = \frac{1}{0,0807 \frac{lb}{ft^3}} = 12,4 \frac{ft^3}{lb}$$

**Contoh 1.2** Udara mempunyai berat jenis 1,293 kg/m<sup>3</sup>. Tentukan volume spesifiknya?

Solusi 
$$v = 1/\rho = \frac{1}{1,293 \frac{kg}{m^3}} = 0,773 \frac{m^3}{kg}$$

Tabel 1.1 Berat Jenis dan grafitasi Spesifik beberapa benda

| Nama Benda         | Berat Jenis        |                   | Grafitasi Spesifik |
|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|                    | Lb/ft <sup>3</sup> | Kg/m <sup>3</sup> |                    |
| Air                | 62,4               | 1000              | 1                  |
| Aluminium          | 168                | 2690              | 2,7                |
| Amonia cair (60oF) | 38,5               | 615               | 0,62               |
| Beton              | 112                | 1790              | 1,8                |
| Tembaga            | 560                | 8980              | 8,98               |
| Cork               | 15                 | 240               | 0,24               |
| Gelas              | 175                | 2800              | 2,8                |
| Mercury            | 848                | 13570             | 13,6               |
| Minyak             | 48,6               | 780               | 0,78               |
| Baja               | 486                | 7780              | 7,8                |
| Kayu Oak           | 50                 | 800               | 0,8                |
| Kayu pinus         | 34,2               | 550               | 0,55               |

Akan dapat diketahui pada pembahasan berikutnya, bahwa volume spesifik dan berat jenis suatu benda tidak konstan tetapi bervariasi terhadap suhu benda. Tetapi untuk keperluan perhitungan praktis dalam bidang refrigerasi, berat jenis air adalah 1000 kg/m<sup>3</sup>. Ini merupakan harga maksimum berat jenis air pada suhu 4°C. Berat jenis air turun menjadi 958 kg/m<sup>3</sup> pada suhu 100°C, yakni titik didih air pada tekanan atmosfer. Untuk mengetahui nilai yang lebih akurat lagi, dapat dilihat dari tabel Uap.

**Contoh 1.3** Sebuah fan menghembuskan udara kering pada suhu 32°F, sebesar 3000 ft<sup>3</sup> per menit (cfm) pada tekanan 1 atmosfer. Hitung kuantitas udara yang disirkulasikan setiap jam dalam satuan pound dan kilogram?

*Solusi*

- a. Dari tabel 1.2 diperoleh  $\rho = 0,087 \text{ lb/ft}^3$ .

$$\begin{aligned} \text{Jadi } Q &= 3000 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \times 0,0807 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \\ &= 14.520 \text{ lb/hr} \end{aligned}$$

- b. Dari tabel 1.2 diperoleh  $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$ .

$$\begin{aligned} \text{Jadi } Q &= 3000 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \times 0,0283 \frac{\text{m}^3}{\text{ft}^3} \times 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \\ &= 6590 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

## 1.2 Grafitasi Spesifik atau Berat Jenis Relatif

Grafitasi spesifik dari suatu benda merupakan nilai perbandingan antara berat jenis benda tersebut dengan berat jenis benda yang dijadikan standar acuan. Pada kasus cairan, maka yang dijadikan standar acuan adalah air yang memiliki berat jenis maksimum  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Jika  $\rho_w$  adalah berat jenis air, maka grafitasi spesifik ( $\rho_r$ ) suatu benda adalah,

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.3)$$

**Contoh 1.4** Tembaga mempunyai berat jenis sebesar  $560 \text{ lb/ft}^3$ . Tentukan nilai grafitasi Spesifik

*Solusi*

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{560 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{62,4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}} = 8,98$$

Tabel 1.2 Berat Jenis dan grafitasi Spesifik beberapa jenis Gas

| Nama Benda | Berat Jenis        |                   | Grafitasi Spesifik |
|------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|            | Lb/ft <sup>3</sup> | Kg/m <sup>3</sup> |                    |
| Udara      | 0,0807             | 1,293             | 1                  |
| Amonia     | 0,482              | 0,769             | 0,596              |
| CO2        | 0,1234             | 1,98              | 1,53               |
| Hidrogen   | 0,0056             | 0,0896            | 0,069              |
| Oksigen    | 0,0892             | 1,428             | 1,105              |

## 1.3 Masa dan Volume Zat yang Mengalir

Bila masa benda diukur dalam satuan gram (g) atau kilogram (kg), maka masa suatu zat cair yang mengalir diukur dalam satuan gram per detik (g/s) atau dalam kilogram per detik (kg/s). Satuan lain yang dapat dipakai untuk mengukur aliran suatu zat cair adalah kilogram per menit (kg/m) dan kilogram per jam (kg/h). Sama seperti masa, volume diukur dalam meter kubik (m<sup>3</sup>) atau dalam liter (l), volume suatu zat cair yang mengalir diukur dalam satuan

meter kubik per detik ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) atau dalam liter per detik ( $\text{l/s}$ ) atau dalam meter kubik per jam ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

Dari persamaan (1.1) dan (1.2), dapat dibuat hubungan antara masa dan volume, aliran masa dan aliran volume sebagai berikut,

$$m = (V)(\rho) = \frac{V}{v} \quad (1.4)$$

$$V = (m)(v) = \frac{m}{\rho} \quad (1.5)$$

Dalam hal ini  $m$  = masa atau masa zat yang mengalir  
 $V$  = volume atau volume zat yang mengalir

**Contoh 1.5** Masa air yang mengalir dalam suatu pipa adalah  $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tentukan masa air yang mengalir dalam satuan kilogram per detik ( $\text{kg/s}$ )?

*Solusi* Anggaplah berat jenis air adalah  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Dengan menggunakan formula (1-4), didapatkan,

$$M = (0,03 \text{ m}^3/\text{s})(1000 \text{ kg/m}^3) = 30 \text{ kg/s}.$$

**Contoh 1.6** Sebuah kompresor refrijerasi memompa gas amonia. Laju aliran gas amonia adalah  $85 \text{ lb/min}$ . Suhu gas amonia adalah  $32^\circ\text{F}$  dan tekanannya  $1 \text{ atm}$ . Tentukan laju aliran gas amonia dalam satuan  $\text{cfm}$  dan dalam  $\text{m}^3/\text{s}$ .

*Solusi* Lihat Tabel 1.2

a. Laju aliran gas dalam  $\text{cfm}$

$$Q = \frac{85 \frac{\text{lb}}{\text{min}}}{0,482 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}} = 176 \text{ ft}^3/\text{min} (\text{cfm})$$

b. Laju aliran gas dalam  $\text{m}^3/\text{s}$

$$Q = \frac{176 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}}{35,3 \frac{\text{ft}^3}{\text{m}^3} (\text{Tabel 1.3})} = 0,0831 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Contoh 1.7** Udara yang masuk ke koil pendingin mempunyai volume spesifik sebesar  $12,6 \text{ ft}^3/\text{lb}$ . Bila blower yang digunakan dapat mensirkulasikan udara sebesar  $2000 \text{ ft}^3/\text{min}$  (cfm), tentukan berapa pound jumlah udara yang disirkulasikan oleh blower per jam?

Solusi

$$Q = \frac{2000 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}}{12,6 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}} = 9520 \text{ lb/hr.}$$

#### 1.4 Velositas dan Kecepatan Gerak Benda

Contoh gerakan sederhana dari suatu benda yang dapat dilakukan adalah gerakan benda dalam kecepatan konstan pada garis lurus. Dalam hal ini, gerakan benda tersebut memiliki arah dan jarak yang sama per satuan waktu. Gerakan benda yang demikian dikatakan gerakan yang memiliki velositas konstan. Ingat, bahwa istilah velositas konstan mempunyai implikasi tidak adanya perubahan arah dan kecepatan benda. Tetapi bila benda bergerak dengan kecepatan konstan, maka arah gerakan benda tersebut dapat berubah.

Jadi velositas (velocity), merupakan kuantitas vektor, di mana satuan velositas memiliki arah dan besaran. Sedang kecepatan (speed) merupakan kuantitas skalar, tidak memiliki arah tetapi hanya memiliki besaran. Walaupun begitu, karena arah gerakan tidak begitu penting, maka dalam buku ini velositas dianggap sama dengan kecepatan yaitu sebagai kuantitas skalar.

Kecepatan benda yang sedang bergerak adalah jarak yang ditempuh benda bergerak per satuan waktu. Secara matematika, formulanya dapat dituliskan sebagai berikut,

$$v = \frac{s}{t} \quad (1.6)$$

Dalam hal ini  $v$  = kecepatan dalam satuan meter per detik (m/s) atau meter per menit (m/min) atau kilometer per jam (km/h)

$s$  = jarak yang ditempuh dalam meter (m) atau kilometer (km)

$t$  = waktu tempuh dalam detik (s), menit (min) atau dalam jam (h)

**Contoh 1.8** Suatu peluru bergerak sejauh 1000 meter dalam waktu 3,5 detik. Hitung kecepatan rata-rata dalam satuan m/s?

*Solusi* Dengan menggunakan persamaan (1.6), diperoleh,

$$v = \frac{1000m}{3,5s} = 285,7 \text{ m/s}$$

## 1.5 Percepatan

Benda yang sedang bergerak biasanya akan mengalami perubahan kecepatan. Gerakan benda yang mengalami perubahan kecepatan lazim disebut sebagai akselerasi gerakan, dan satuan waktu dari perubahan kecepatan disebut sebagai akselerasi atau percepatan ( $a$ ). Akselerasi atau percepatan dapat positif atau negative tergantung pada nilai kecepatannya apakah naik atau turun.

Bila kecepatan awal adalah  $v_0$  dan kecepatan sesaat adalah  $v_i$ , maka pada waktu  $t$  detik, diperoleh formula sebagai berikut,

$$v_i = v_0 + (a)(t) \quad (1.7)$$

Bila gerakan benda dimulai dari keadaan diam, sehingga kecepatan awalnya  $v_0$  adalah nol, maka persamaa 1.7 dapat disederhanakan menjadi,

$$v_i = (a)(t) \quad (1.8)$$

kemudian

$$t = \frac{v_i}{a} \quad (1.9)$$

Dan

$$a = \frac{v_i}{t} \quad (1.10)$$

Dapat dilihat, bahwa kecepatan rata-rata ( $v$ ) suatu benda yang sedang bergerak dengan akselerasi sama mulai dari posisi diam adalah  $v_i/2$ . Substitusi dengan persamaan 1.6, jarak yang ditempuh benda dalam waktu  $t$  detik, adalah

$$s = \frac{(v_i)(t)}{2} = \frac{(a)(t^2)}{2} \quad (1.11)$$

## 1.6 Percepatan Gravitasi

Contoh nyata adanya akselerasi sama dalam kehidupan sehari-hari yang dapat diambil adalah benda jatuh bebas dari ketinggian tertentu. Benda jatuh bebas ke permukaan tanah karena adanya gravitasi bumi akan mengalami akselerasi sebesar 9,807 m/s untuk setiap detiknya. Nilai tersebut dikenal sebagai akselerasi standar dari gravitasi atau dikenal pula dengan sebutan konstanta gravitasi universal ( $g$ ) di mana  $g = 9,807 \text{ m/s}$ .

**Contoh 1.9** Suatu bola besi, mempunyai masa 0,21 kg, jatuh secara bebas dari puncak gedung ke tanah. Bila gesekan udara diabaikan dan waktu yang ditempuh adalah 3,5 detik, tentukan, (a) kecepatan gerak bola besi dan (b) tinggi gedung?

*Solusi* Dengan menerapkan persamaan 1.8, diperoleh

$$v_i = (9,087 \text{ m/s})(3,5 \text{ s}) = 34,32 \text{ m/s}$$

Dengan menggunakan persamaan 1.11,

$$s = \frac{(934,32 \text{ m/s})(3,5 \text{ s})}{2} = 60 \text{ m}$$

## 1.7 Gaya

Gaya dapat dinyatakan sebagai suatu dorongan atau tarikan pada suatu benda. Gaya adalah sesuatu yang memiliki kecenderungan untuk membuat benda bergerak, membuat benda yang sedang bergerak menjadi berhenti, atau untuk mengubah arah gerakan benda. Gaya juga dapat merubah bentuk atau ukuran benda. Sehingga suatu benda dapat dilipat, dibengkok, dan dipampatkan atau dikompresikan.

Satuan gaya adalah newton. Dalam hal ini, newton dinyatakan sebagai gaya, yang bila dikenakan pada suatu benda yang memiliki masa sebesar 1 kg, akan memberikan akselerasi sebesar 1 m/s setiap detik. Bila dinyatakan dalam persamaan matematika adalah

$$F = (m)(a) \quad (1.12)$$

Dalam hal ini  $F$  = gaya dalam Newton (N)  
 $m$  = masa dalam kilogram (kg)  
 $a$  = akselerasi dalam meter per detik ( $m/s^2$ )

**Contoh 1.10** Suatu gaya yang dikenakan pada suatu benda yang memiliki masa 15 kg, menimbulkan akselerasi benda sebesar  $10 \text{ m/s}^2$  searah dengan arah gaya. Tetntukan besarnya gaya tersebut?

*Solusi* Menggunakan formula 1.12, diperoleh

$$F = (15 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 150 \text{ N}$$

## 1.8 Gaya Grafitasi

Gaya grafitasi yang dikenakan pada suatu benda dapat ditentukan dengan mensubtitusikan gaya grafitasi lokal ( $g$ ) ke dalam faktor akselerasi ( $a$ ) dalam persamaan 1.12. Jadi, bila digunakan untuk menghitung gaya grafitasi, maka persamaan 1.12 dapat diubah menjadi,

$$F = (m)(g) \quad (1.13)$$

**Contoh 1.11** Tentukan besarnya gaya gravitasi yang dialami suatu benda yang memiliki masa sebesar 25 kg.

*Solusi* Menggunakan persamaan 1.13, didapat

$$F = (25 \text{ kg})(9,807 \text{ N/kg}) = 245,18 \text{ N}$$

## 1.9 Energi Kinetik Eksternal

Energi yang dimiliki oleh suatu benda dapat bersumber dari dua tipe energi, yaitu energi kinetik dan energi potensial. Energi kinetik merupakan energi yang dimiliki oleh suatu benda sebagai hasil dari adanya pergerakan atau kecepatan. Misalnya benda jatuh, aliran fluida, dan bagian-bagian bergerak dari suatu mesin menimbulkan energi kinetik karena adanya pergerakan. Besarnya energi kinetik eksternal (KE) yang dimiliki oleh suatu benda merupakan fungsi dari masa (m) dan kecepatan (v) benda, sesuai formula berikut:

$$KE = \frac{(m)(v^2)}{(2)} \quad (1.14)$$

Dalam hal ini KE = energi kinetik eksternal yang diukur dalam satuan Joule (J)

m = masa benda dalam kilogram (kg)

v = kecepatan dalam satuan meter per detik (m/s)

**Contoh 1.12** Suatu mobil mempunyai masa 1625 kg bergerak maju dengan rata-rata 50 km/jam. Hitung besar energi kinetik yang dihasilkannya?

*Solusi* kecepatan 50 km/jam sama dengan 13,89 m/detik. Dengan menerapkan persamaan 1-1, diperoleh

$$KE = \frac{(1625 \text{ kg})(13,89 \text{ m/s})^2}{2} = 156,8 \text{ kJ}$$

### 1.10 Energi Potensial Eksternal

Potensial energi merupakan energi yang dimiliki suatu benda karena posisi atau konfigurasinya. Jumlah usaha yang dapat dilakukan oleh benda dari posisi atau kondisi tertentu ke posisi atau kondisi lainnya merupakan ukuran energi potensial yang dimiliki oleh benda tersebut. Misalnya, kepala mesin pemasang tiang pancang memiliki energi potensial bila posisinya dinaikkan hingga mencapai ketinggian tertentu. Contoh lainnya adalah pegas dan air yang mengalir pada pipa pesat di Pusat Listrik Tenaga Air.

Energi potensial grafitasional yang dimiliki oleh benda dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$PE = (m)(g)(z) \quad (1.15)$$

Dalam hal ini PE = energi potensial eksternal yang diukur dalam Joule (J)

m = masa benda dalam satuan (kg)

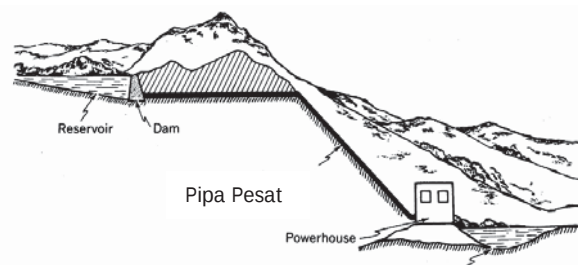
g = gaya grafitasi dalam (N/kg)

z = jarak dalam satuan meter (m)

**Contoh 1.13** air sebanyak 150 meterkubik disimpan di dalam tangki, yang terletak pada 100 meter di atas permukaan tanah. Tentukan energi potensial garfitasional terhadap tanah?

**Solusi** Asumsikan berat jenis air 1000kg/m<sup>3</sup>, jadi masa air total adalah 150.000 kg. Dengan menerapkan formula 1.15, diperoleh

$$PE = (150.000 \text{ kg})(9,807 \text{ N/kg})(100 \text{ m}) = 147,105 \text{ kJ}$$



Gambar 1.1 energi Potensial Eksternal

### 1.11 Energi Eksternal Total

Energi eksternal total yang dimiliki oleh suatu benda merupakan penjumlahan dari energi kinetik dan energi potensial.

**Contoh 1.14** Tentukan besar energi eksternal total per kilogram yang dimiliki air yang mengalir dalam suatu pipa pesat dengan ketinggian 200 m dan kecepatan 50 m/s.

*Solusi* dengan menerapkan formula 1.14, diperoleh

$$KE = \frac{(1\text{kg})(50\text{m/s})^2}{2} = 1,25 \text{ kJ}$$

Dengan menerapkan formula 1.15, diperoleh

$$PE = (1 \text{ kg})(9,807 \text{ N/kg})(200) = 1,96 \text{ kJ}$$

Jadi Energi total adalah  $(1,25 + 1,96) = 3,21 \text{ kJ}$ .

### 1.12 Hukum Konservasi Energi

Hukum Termodinamika pertama menyatakan, bahwa jumlah energi di dalam system termodinamik adalah konstan. Tidak ada satupun kekuatan yang dapat meningkatkan atau mengembangkannya kecuali hanya mengubah dari bentuk satu ke bentuk lainnya.

Energi merupakan usaha yang tersimpan. Sebelum suatu benda memiliki energi, maka suatu usaha harus dilakukan pada benda tersebut. Usaha yang dikenakan pada benda tersebut akan mengubah gerakan, posisi, atau konfigurasi benda dan disimpan sebagai energi. Dalam banyak kasus, energi yang tersimpan sama dengan usaha yang dilakukan.

Di dalam ilmu fisika, disamping diklasifikasikan dalam bentuk energi kinetik dan potensial, maka energi dapat juga muncul dalam bentuk lain yang berbeda-beda, seperti energi mekanik, energi listrik, energi panas, energi kimiawi dan keseluruhannya siap diubah dari bentuk satu ke bentuk lainnya. Misalnya, pada electric toaster, energi listrik diubah menjadi energi panas, pada motor listrik energi

listrik diubah menjadi energi mekanik. Contoh lainnya, pada generator, batere akumulator, thermocouple, energi mekanik diubah menjadi energi listrik.

### 1.13 Energi Internal

Menurut teori molekul, seluruh zat baik yang berwujud cair, gas dan padat terdiri dari jutaan partikel mikroskopik yang disebut molekul. Istilah molekul menjelaskan adanya partikel terkecil yang dimiliki oleh suatu benda yang masih memiliki sifat sama seperti bendanya. Misalnya molekul air memiliki sifat seperti air. Setiap molekul terdiri dari suatu partikel yang lebih kecil lagi yang disebut atom. Sedangkan atom itu sendiri memiliki partikel elemental yang disebut proton yang bermuatan positif, electron yang bermuatan negatif dan neutron.

Pada bab sebelumnya kita sudah mengenal adanya energi eksternal yang diakibatkan oleh adanya pergerakan dan kecepatan. Semua benda juga memiliki energi internal sebagai akibat dari adanya pergerakan dan kecepatan molekul yang ada pada benda tersebut. Adalah Sir Isaac Newton (1642-1727) yang mengemukakan filosofi baru tentang panas. Menurut konsep Newton, panas adalah energi internal yang dimiliki oleh suatu zat karena adanya pergerakan molekul atau lazim disebut sebagai energi kinetic internal dan energi potensial internal.

Molekul yang ada pada setiap benda dapat memiliki energi kinetic dan energi potensial. Energi total internal yang dapat dimiliki oleh suatu benda merupakan penjumlahan dari energi kinetic internal dan energi potensial internal. Hubungan tersebut diperlihatkan pada persamaan berikut ini

$$U = K + P \quad (1.16)$$

Dalam hal ini  $U$  = energi total internal

$K$  = energi kinetic internal

$P$  = energi potensia internal

### 1.14 Energi Kinetik Internal

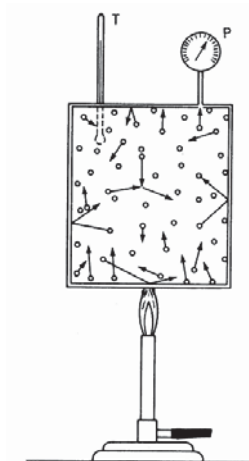
Energi kinetik internal merupakan energi dari pergerakan atau kecepatan molekul. Bila energi lain yang dikenakan pada suatu benda meningkatkan pergerakan dan kecepatan molekul, maka energi kinetik internal benda tersebut juga akan meningkat. Peningkatan energi ini akan direfleksikan melalui peningkatan suhu benda. Sebaliknya, bila energi kinetik internal mengalami penurunan atau kehilangan energi, maka pergerakan dan kecepatan molekul menjadi turun, demikian juga suhunya.

Pada suhu biasa, molekul dipercaya memiliki kecepatan bergerak konstan, tetapi berbeda-beda untuk setiap zat, sehingga energi yang ditimbulkan oleh pergerakan molekul tersebut tidak sama antara zat satu dengan zat lainnya.

### 1.15 Energi Potensial Internal

Energi potensial internal merupakan energi yang timbul akibat adanya pemisahan dalam derajad molekul. Ini merupakan energi yang dimiliki molekul sebagai hasil dari posisi molekul relatif terhadap lainnya. Semakin besar tingkat pemisahan molekularnya semakin besar pula energi potensialnya.

Bila suatu benda berkembang atau berubah status fisiknya karena adanya tambahan energi, maka terjadi penyusunan ulang terhadap susunan molekul yang membuat jarak antar molekul berubah. Energi ini tidak akan berpengaruh terhadap kecepatan gerak molekulnya.



Gambar 1.2 Diagram Skematik menggambarkan Teori Kinetik pada gas. Energi panas meningkatkan gerakan molekul. Kenaikan kecepatan molekul ditandai dengan naiknya suhu Thermometer T dan tekanan P.

Table 1.3 Beberapa Satuan Turunan dan ekuivalennya

| Panjang                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $1 \text{ m} = 39,37 \text{ in} = 3,28 \text{ ft} = 1,094 \text{ yard}$<br>$1 \text{ km} = 0,621 \text{ mil} = 3289 \text{ ft}$<br>$1 \text{ yard} = 0,914 \text{ m}$<br>$1 \text{ ft} = 30,48 \text{ cm} = 0,3048 \text{ m}$<br>$1 \text{ in} = 2,54 \text{ cm} = 25,4 \text{ mm}$<br>$1 \text{ mil} = 1,61 \text{ km} = 5280 \text{ ft}$ |
| Masa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $1 \text{ kg} = 2,205 \text{ lb}$<br>$1 \text{ gr} = 0,0353 \text{ oz}$<br>$1 \text{ lb} = 0,4536 \text{ kg} = 453,6 \text{ gm} = 16 \text{ oz} = 7000 \text{ gr}$<br>$1 \text{ oz} = 28,35 \text{ gm}$<br>$1 \text{ grain (gr)} = 65 \text{ mg} = 0,065 \text{ gm}$<br>$1 \text{ ton} = 907 \text{ kg}$                                   |
| Luas Area                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ inc}^2 = 929 \text{ cm}^2 = 0,093 \text{ m}^2$<br>$1 \text{ yd}^2 = 9 \text{ ft}^2 = 0,836 \text{ m}^2$<br>$1 \text{ m}^2 = 10,76 \text{ ft}^2 = 1550 \text{ in}^2 = 10.000 \text{ cm}^2$                                                                                                                     |
| Volume                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $1 \text{ ft}^3 = 1728 \text{ in}^3 = 7,48 \text{ gal} = 0,0283 \text{ m}^3 = 28,3 \text{ liter}$<br>$1 \text{ m}^3 = 35,3 \text{ ft}^3 = 1000 \text{ liter}$<br>$1 \text{ liter} = 1000 \text{ cm}^3 = 1000 \text{ mliter} = 61,1 \text{ in}^3$<br>$1 \text{ gal} = 231 \text{ in}^3 = 3,785 \text{ liter}$                               |
| Gaya                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $1 \text{ lb} = 4,45 \text{ newton} = 454 \text{ gm.f} = 0,454 \text{ kg-f}$<br>$1 \text{ N} = 0,225 \text{ lb-f} = 0,102 \text{ kg-f} = 102 \text{ gm-f}$<br>$1 \text{ Kn} = 1000 \text{ N}$<br>$1 \text{ kg-f} = 9,81 \text{ N}$                                                                                                         |

### Soal Latihan

1. Udara mempunyai berat jenis  $0,0807 \text{ lb/ft}^3$ . Tentukan volume spesifiknya?
2. Udara mempunyai berat jenis  $1,293 \text{ kg/m}^3$ . Tentukan volume spesifiknya?
3. Sebuah fan menghembuskan udara kering pada suhu  $42^\circ\text{F}$ , sebesar  $3000 \text{ ft}^3$  per menit (cfm) pada tekanan 1 atmosfer. Hitung quantitas udara yang disirkulasikan setiap jam dalam satuan pound dan kilogram?
4. Tembaga mempunyai berat jenis sebesar  $560 \text{ lb/ft}^3$ . Tentukan nilai gravitasi Spesifik
5. Masa air yang mengalir dalam suatu pipa adalah  $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tentukan masa air yang mengalir dalam satuan kilogram per detik ( $\text{kg/s}$ )?
6. Sebuah kompresor refrijerasi memompa gas amonia. Laju aliran gas amonia adalah  $110 \text{ lb/min}$ . Suhu gas amonia adalah  $36^\circ\text{F}$  dan tekanannya 1 atm. Tentukan laju aliran gas amonia dalam satuan cfm dan dalam  $\text{m}^3/\text{s}$ .
7. Suatu peluru bergerak sejauh 1800 meter dalam waktu 4,5 detik. Hitung kecepatan rata-rata dalam satuan  $\text{m/s}$ ?
8. Suatu bola besi, mempunyai masa  $0,40 \text{ kg}$ , jatuh secara bebas dari puncak gedung ke tanah. Bila gesekan udara diabaikan dan waktu yang ditempuh adalah 3,0 detik, tentukan, (a) kecepatan gerak bola besi dan (b) tinggi gedung?
9. Suatu gaya yang dikenakan pada suatu benda yang memiliki masa  $25 \text{ kg}$ , menimbulkan akselerasi benda sebesar  $20 \text{ m/s}^2$  searah dengan arah gaya. Tentukan besarnya gaya tersebut?
10. air sebanyak 200 meterkubik disimpan di dalam tangki, yang terletak pada 150 meter di atas permukaan tanah. Tentukan energi potensial garfitasional terhadap tanah?
11. Tentukan besar energi eksternal total per kilogram yang dimiliki air yang mengalir dalam suatu pipa pesat dengan ketinggian 300 m dan kecepatan  $70 \text{ m/s}$ .

---

# ENERGI PANAS, DAYA, DAN PERUBAHAN WUJUD ZAT

2

---

## Kerangka Isi

- 2.1 Energi Panas dan Daya
- 2.2 Metoda Pemindahan Panas
- 2.3 Perhitungan Energi Panas
- 2.4 Suhu
- 2.5 Thermometer
- 2.6 Suhu Absolut
- 2.7 Tekanan
- 2.8 Perubahan wujud Benda
- 2.9 Saturasi, Panaslanjut, dan Superdingin

Pada Sistem Refrijerasi dan Tata Udara, terjadi proses penambahan atau pengurangan energi panas terhadap refrijeran sebagai fluida penukar kalor dan udara ruang yang dikondisikan. Selama proses perubahan energi itu berlangsung maka akan terjadi pula perubahan wujud pada refrijeran dan udara.

## 2.1 Energi Panas dan Daya

Panas merupakan suatu bentuk energi. Ini merupakan fakta yang tidak dapat diingkari bahwa panas dapat diubah menjadi suatu bentuk energi lainnya demikian juga sebaliknya, bentuk energi lainnya dapat pula diubah menjadi energi panas. Secara prinsip termodinamik, panas dinyatakan sebagai energi yang berpindah dari satu zat ke zat lainnya sebagai akibat dari adanya perbedaan suhu antara kedua zat tersebut. Pada Energi lainnya, perpindahan energi dapat berlangsung karena adanya suatu usaha yang dilakukan pada benda.

Bila suatu benda mengalami kenaikan suhu kita nyatakan bahwa energi panas telah diberikan kepada benda tersebut. Begitu sebaliknya, bila suatu benda mengalami penurunan suhu, maka kita nyatakan bahwa energi panas yang ada pada benda tersebut telah diambil. Perubahan suhu ini berimbas pada perubahan energi internal total yang dimiliki oleh molekul benda tersebut. Dalam hal Kenyatannya, penambahan dan pengurangan energi tidak selalu dibarengi dengan perubahan suhu. Dalam kondisi tertentu penambahan dan pengurangan energi internal yang dikenakan pada suatu benda justru akan merubah wujud benda tersebut. Selama proses perubahan wujud, suhu benda relatif konstan.

Dalam refrijerasi dan tata udara, kita berhubungan secara langsung dengan energi panas berikut perhitungan penambahan dan pengurangan energi panas. Seperti telah diketahui, bahwa besarnya energi yang terkandung dalam molekul benda tidak sama walaupun benda tersebut memiliki suhu yang sama. Oleh karena itu untuk keperluan pengukuran energi diperlukan acuan standard. Air digunakan sebagai acuan standard.

Energi adalah kapasitas untuk melakukan suatu pekerjaan. Energi yang disimbolkan dengan huruf  $w$ , merepresentasikan adanya kondisi pergerakan benda, posisi, atau susunan molekul yang akan dapat menghasilkan suatu pekerjaan dalam kondisi tertentu.

Satuan Energi Panas menurut standard British adalah Btu singkatan British Thermal Unit, dimana

1 Btu = jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu air setiap pound, setiap  $1^{\circ}\text{F}$ .

Dalam sistem metrik, panas diukur dalam satuan kilo kalori (kkal),  
 1 kkal = jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu air setiap 1 kg, setiap 1 °C.

Dalam sistem SI, panas diukur dalam satuan kilo joule (kJ). Dimana  
 1 Btu = 1,055 kJ.

Daya (P) atau Power didefinisikan sebagai laju aliran energi per satuan waktu di mana pekerjaan sedang berlangsung atau kerja yang dilakukan per satuan waktu.

$$P = \frac{w}{t} = \frac{(F)(s)}{t} \quad (2.1)$$

Menurut standar Amerika (US standard), daya dinyatakan dalam satuan Horse Power (HP), atau (ft)(lb)/(sec), di mana,

$$1HP = 550 \frac{(ft)(lb)}{sec} = 33.000 \frac{(ft)(lb)}{min} \quad (2.2)$$

Dalam satuan internasional, satuan daya adalah watt (W) atau setara Joule per detik (J/sec).

Daya listrik juga diekspresikan dalam watt (W) atau kilowatt (kW). Konversi antara satuan HP dan watt, dinyatakan dengan formula sebagai berikut:

$$\begin{aligned} 1 \text{ HP} &= 746 \text{ W} = 0,746 \text{ kW} \\ 1 \text{ kW} &= 1,34 \text{ HP} \end{aligned}$$

**Contoh 2.1** Sebuah pompa yang digunakan dalam mesin tata udara, memompa air menuju *cooling tower* yang terletak di ketinggian 250 feet dari pompa. Laju aliran airnya sebesar 100 galon per menit. Tentukan besarnya daya dalam HP yang diperlukan untuk melakukan kerja tersebut. Bila efisiensinya 100% berapa konsumsi daya listrik yang diperlukan?

**Solusi** Mengacu persamaan 2.1, dan berat jenis air 8,33 lb/gal didapatkan daya mekanik sebesar

$$P = (100) \frac{gal}{min} \times (8,33) \frac{lb}{gal} \times (250) ft = 208.300 \frac{(ft)(lb)}{min}$$

Substitusi dengan persamaan 2.2, didapat

$$HP = \frac{208.300 \frac{(ft)(lb)}{\min}}{330.000 \frac{(ft)(lb)}{\min}} = 6,31 \text{ HP}$$

Setara dengan daya listrik yang diperlukan, yaitu

$$P = 6,31 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 4,71 \text{ kW}$$

### Ekivalen Mekanikal

Prescott Joule (1818-1889), menemukan hubungan antara energi panas dan energi mekanik. Joule telah dapat membuktikan bahwa energi mekanik ( $w$ ) yang nilainya 778 ft-lb setara dengan energi panas ( $Q$ ) 1 Btu. Penemuannya ini diformulasikan sebagai berikut:

$$Q = \frac{w}{j} \quad (2.3)$$

Di mana  $j$  adalah konstanta Joule yang besarnya

$$J = 778 (ft)(lb)/Btu = 4,186 (kJ)/kcal \quad (2.4)$$

## 2.2 Metoda Pemindahan Panas

Energi panas dapat dipindahkan dari satu benda atau substansi ke benda lainnya. Pemindahan energi panas dapat berlangsung dalam tiga cara, yaitu (1) konduksi, (2) konveksi, dan (3) radiasi.

### Cara Konduksi

Pemindahan panas secara konduksi terjadi bila energi panas dipindahkan melalui kontak langsung antara molekul suatu benda atau antara molekul benda satu dengan molekul benda lainnya melalui suatu kontak thermal yang bagus. Dalam kasus ini, molekul yang mempunyai suhu lebih tinggi karena proses pemanasan akan

memberikan energi panasnya kepada molekul yang ada di dekatnya, begitu seterusnya. Pemindahan energi panas antar molekul satu dengan molekul lainnya, berlangsung seperti halnya pergerakan bola-bola bilyard di atas meja bilyard, di mana seluruh atau sebagian energi yang dimiliki oleh satu bola yang mendapat pukulan atau gaya dorong ditransmisikan pada saat itu juga ke bola-bola lainnya.

Bila salah satu ujung suatu batang logam mendapat energi panas dari suatu sumber panas, misalnya api, sebagian energi panas yang diterima oleh ujung logam yang mendapat pemanasan akan mengalir secara konduksi dari molekul ke molekul melalui batang logam hingga ke ujung yang lebih dingin. Kecepatan gerak molekul-molekul logam akan meningkat cepat, sehingga suhu logampun akan meningkat cepat. Batang logam panas akan mengkonduksikan energi panasnya ke udara yang ada disekitarnya, sehingga udara di sekitar logam juga menjadi panas, karena pergerakan molekul-molekul udara yang semakin cepat.

Pemindahan panas yang berlangsung pada boiler atau furnace adalah cara konduksi. Dalam boiler, energi panas dari sumber api dikonduksikan ke air yang ada di dalam pipa-pipa logam. Dalam mesin refrijerator atau freezer, energi panas mengalir dari makanan melalui pipa alumunium atau tembaga hingga ke cairan refrigeran yang ada di dalam pipa alumunium atau tembaga.

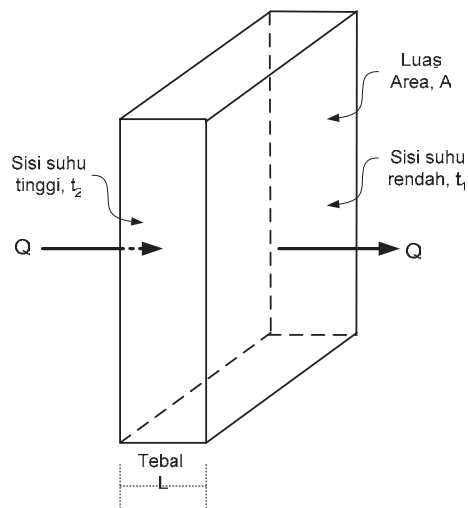
#### Konduktivitas Panas

Zat cair atau liquid dan gas mempunyai konduktivitas panas sangat lambat tetapi konduktivitasnya akan naik cepat bila dilakukan secara konveksi dan secara radiasi.

Logam memiliki konduktivitas panas yang bagus; gelas, dinding bata atau beton, kayu mempunyai konduktivitas panas buruk. Bahan yang mempunyai konduktivitas sangat buruk, misalnya stirofoam, dan glasswool lazim disebut sebagai isolator panas.

Kuantitas atau jumlah energi panas yang dikonduksikan melalui suatu benda tergantung pada beberapa faktor sebagai berikut:

1. Beda suhu antara kedua sisi benda ( $t_2 - t_1$ )
2. Luas penampang benda ( $A$ )
3. Tebal benda ( $L$ )
4. Konduktivitas Panas yang dimiliki benda ( $K$ )
5. Waktu ( $T$ )



Gambar 2.1 Prinsip Pemindahan energi Panas secara Konduksi  
Jumlah energi panas yang dikonduksikan melalui benda adalah berbanding langsung atau proporsional dengan luas area dan beda suhu tetapi berbanding terbalik dengan ketebalan benda.

Hubungan kelima faktor tersebut, dapat diformulasikan sebagai berikut,

$$Q = \frac{(K)(A)(T)(t_2 - t_1)}{(L)} \quad (2.5)$$

Di mana,  
 Q = Jumlah panas dalam Btu atau dalam watt (W)  
 K = Koefisien konduktivitas panas dalam  
 (Btu)/(hr)(ft<sup>2</sup>)(°F/in) atau  
 (W)/(m<sup>2</sup>)(°C/m)  
 A = Luas Area dalam ft<sup>2</sup> atau m<sup>2</sup>  
 T = Waktu dalam detik, menit atau jam  
 T<sub>2</sub>-t<sub>1</sub> = Beda suhu dalam °F atau °C  
 L = tebal benda dalam in atau m

Tabel 2.1 Koefisien Konduktivitas Panas (K)

| Jenis Benda           | Koefisien Konduktivitas Panas (K) |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                       | Satuan SI                         | Satuan British                    |
|                       | W/(m <sup>2</sup> )(°C/m)         | Btu/(hr.ft <sup>2</sup> )(oF/in.) |
| Udara                 | 0,024                             | 0,168                             |
| Alumunium             | 212                               | 1480                              |
| Dinding Bata (rendah) | 0,72                              | 5,0                               |
| Dinding Bata (tinggi) | 1,33                              | 9,2                               |
| Dinding Beton         | 1,72                              | 12,0                              |
| Tembaga               | 378                               | 2640                              |
| Papan Gabus           | 0,05                              | 0,34                              |
| Fiberglass            | 0,037                             | 0,23                              |
| Gelas                 | 0,79                              | 5,5                               |
| Papan isolasi fiber   | 0,04 – 0,05                       | 0,28 – 0,35                       |
| Besi                  | 50,5                              | 350                               |
| Kapok                 | 0,034                             | 0,24                              |
| Glasswool             | 0,037                             | 0,27                              |
| perak                 | 412                               | 2880                              |
| Baja                  | 44,6                              | 312                               |
| Air (liquid)          | 0,61                              | 4,28                              |
| Air (es)              | 2,23                              | 15,6                              |
| Kayu Maple            | 0,17                              | 1,20                              |
| Kayu Oak              | 0,16                              | 1,10                              |
| Kayu Pinus            | 0,12                              | 0,84                              |
| Kayu redwood          | 0,11                              | 0,74                              |

**Contoh 2.1** Sebuah gedung mempunyai luas lantai 1650 ft<sup>2</sup>. Lantai terbuat dari kayu (maple) dengan ketebalan 0,875 inchi. Suhu permukaan lantai bagian atas (di dalam gedung) adalah 70oF dan suhu permukaan lantai bagian bawah adalah 35oF. Hitung jumlah panas yang bocor melalui lantai per jam dalam Btu dan dalam kJ. Gunakan Tabel 2.1, Tabel 1.3 dan Tabel 1.4

Solusi

Jumlah panas yang bocor melalui lantai dalam Btu per jam, adalah

$$Q = \frac{1,2 \frac{\text{Btu}}{(\text{hr} - \text{ft}^2) \frac{^\circ \text{F}}{\text{in}}} \times 1650 \text{ ft}^2 \times (70 - 35) ^\circ \text{F}}{0,875 \text{ in}} = 79.200 \text{ Btu/hr.}$$

Jumlah panas yang bocor melalui lantai dalam kJ per jam, adalah

$$Q = \frac{0,17 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2)(^\circ \text{C} / \text{m})} \times (1650 \times 0,093) \text{ m}^2 \times ((70 - 35) - 32) / 1,8 (^\circ \text{C})}{(0,875 \times 0,0254) \text{ m}} \\ = 1956 \text{ watt}$$

**Contoh 2.2** Sebuah mesin pemanas ruang (Furnace) menghasilkan panas sebesar 54 kW. Panas tersebut disalurkan ke ruangan melalui dinding besi yang memiliki tebal 8,4 mm. Bila besar suhu pada sisi panas dari dinding besi tersebut adalah 135°C dan suhu udara sekitarnya adalah 124°C. Tentukan luas permukaan dinding besinya?

Solusi Gunakan formula sebagai berikut

$$A = \frac{(Q)(L)}{(K)(t_2 - t_1)} \quad (2.6)$$

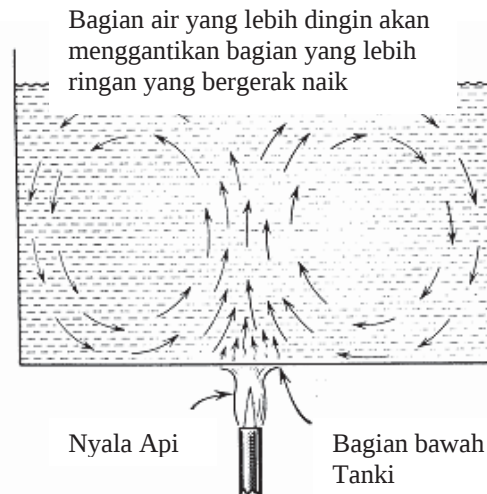
$$A = \frac{(54 \times 10^3) \text{ W} \times (0,0084) \text{ m}}{(50,5) \frac{\text{W}}{(\text{m}^2)(^\circ \text{C} / \text{m})} \times (135 - 124) ^\circ \text{C}} = 0,817 \text{ m}^2$$

### Cara Konveksi

Pemindahan panas secara konveksi terjadi bila panas bergerak dari satu tempat ke tempat lain melalui suatu aliran arus dalam medium liquid atau gas. Aliran arus panas ini disebut arus konveksi sebagai akibat dari perubahan berat jenis liquid atau gas karena menerima panas.

Bila ada bagian fluida yang mendapat energi panas, akan mengembang, volume per satuan masa meningkat. Bagian fluida yang mendapat energi panas akan lebih ringan, sehingga bergerak naik ke puncak, dan ruang yang ditinggalkannya akan langsung

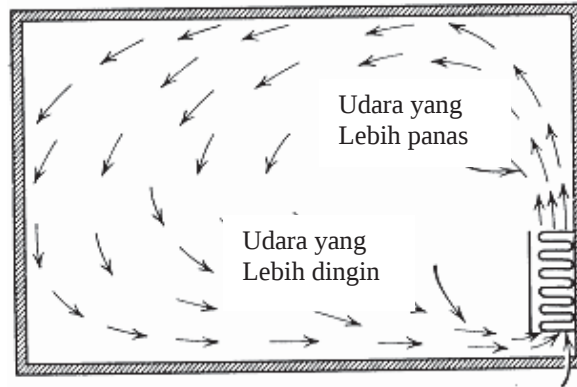
diganti oleh fluida yang lebih dingin. Misalnya, sebuah sejumlah air di dalam tanki metal dipanaskan lewat bagian dasar tanki (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Konduksi

Energi panas dari sumber nyala api dikonduksikan melalui bagian bawah tanki metal. Air yang berada paling dekat dengan sumber panas akan menyerap energi panas, suhunya naik sehingga air mengembang. Bagian air yang mengembang tersebut menjadi lebih ringan dibandingkan air sekitarnya sehingga ia akan bergerak naik dan tempatnya akan segera digantikan oleh bagian air lainnya yang lebih dingin. Bagian air baru tersebut akan mendapat energi dari nyala api, sehingga ia juga akan bergerak naik, begitu seterusnya. Karena proses terus berlanjut, maka energi panas akan didistribusikan ke seluruh masa air secara alami karena adanya arus konveksi.

Arus konveksi juga dapat timbul pada udara yang mendapat energi panas, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Konveksi

### Cara Radiasi

Pemindahan panas secara radiasi tidak dapat dijelaskan dengan konteks pergerakan dan tumbukan molekul secara beranting. Hampir semua energi panas yang ada di permukaan bumi berasal dari radiasi sinar matahari yang jaraknya ratusan juta kilometer dari bumi. Energi panas dari matahari disalurkan ke bumi secara radiasi melalui gelombang elektromagnetik dengan kecepatan rambat sebesar  $3 \times 10^8$  m/s atau setara dengan 186.000 mil/s.

Setiap hari kita menerima energi radiasi matahari dengan besaran rata-rata sekitar  $860 \text{ W/m}^2$  atau setara dengan  $4,5 \text{ Btu}/(\text{min})(\text{ft}^2)$ . Energi sebesar itu diserap langsung oleh atap rumah kita. Marilah kita hitung betapa besarnya energi radiasi matahari ini yang dapat diserap oleh rumah kita. Anggaplah sebuah rumah memiliki luas permukaan sebesar  $50 \text{ m}^2$ . Ini berarti, rumah tersebut akan menerima energi panas dari matahari sebesar  $860 \times 50 = 43.000$  watt atau  $43 \text{ kW}$ . Anggaplah efisiensi alat yang digunakan untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik adalah  $20\%$ . Artinya kita dapat menerima energi Cuma-Cuma setiap hari sebesar  $0,2 \times 43 = 8,6 \text{ kW}$ . Sangat fantastik. Tetapi sayang sebagian besar kita belum memanfaatkan energi pemberian Illahi ini.

### Teori Stefan-Boltzmann

Eksperimen yang dilakukan oleh Stefan dan Boltzmann tentang radiasi panas menghasilkan suatu ketetapan, yakni jumlah panas yang diradiasikan dari suatu permukaan berbanding lurus dengan pangkat empat suhu kelvin. Formula,

$$Q = \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (2.7)$$

Di mana  $Q$  = Jumlah panas yang diradiasikan dalam satuan Kkal/(s)(m<sup>2</sup>)  
 $\sigma$  = konstanta radiasi,  $1,35 \times 10^{-11}$  kkal/(s)(m<sup>2</sup>)(K<sup>4</sup>)  
 Atau  $5,67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>)(K<sup>4</sup>)  
 $T$  = suhu kelvin benda  
 $T_0$  = suhu kelvin udara sekitar benda.

**Contoh 2.3** Radiator uap dengan permukaan warna hitam bekerja dengan suhu permukaan sebesar 180°F. Bila luas permukaan efektif adalah 10 ft<sup>2</sup>. Berapa kapasitas panas dalam Btu/hr yang diradiasikan ke udara ruang, bila suhu ruang 70°F.

Solusi Pertama, konversikan suhunya, sebagai berikut

$$180^\circ\text{F} = 82,2^\circ\text{C} = 355,2\text{ K}$$

$$70^\circ\text{F} = 21,1^\circ\text{C} = 294,1\text{ K}$$

Kemudian disubstitusikan ke persamaan 2.5

$$\begin{aligned} Q &= 1,35 \times 10^{-11} \text{ kkal/(s)(m}^2\text{)(K}^4\text{)} \times (355^4 - 294^4) \text{ K}^4 \\ &= 1,35 \times 10^{-11} \text{ kkal/(s)(m}^2\text{)(K}^4\text{)} \times 84,1 \times 10^8 \text{ K}^4 \\ &= 0,114 \text{ kkal/(s)(m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Dalam satu hari ada 3600 detik (s), dan  $1 \text{ ft}^2 = 0,093 \text{ m}^2$

Dengan menggunakan konversi tersebut, diperoleh

$$\begin{aligned} Q &= 0,114 \text{ kkal/(s)(m}^2\text{)} \times 3600 \text{ (s/hr)} \times 0,093 \text{ (m}^2\text{/ft}^2\text{)} \\ &= 38,2 \text{ kkal/(hr)(ft}^2\text{)} \end{aligned}$$

Karena,  $1 \text{ kkal} = 3,97 \text{ Btu}$ , dan luas area radiator  $10 \text{ ft}^2$ , maka

$$\begin{aligned} Q &= 38,2 \text{ kkal/(hr)(ft}^2\text{)} \times 10 \text{ ft}^2 \times 3,97 \text{ (Btu/kkal)} \\ &= 1520 \text{ Btu/hr.} \end{aligned}$$

### 2.3 Perhitungan Energi Panas

Sifat energi panas yang terkandung dalam suatu benda selain air diekspresikan melalui suatu konsep yang disebut sebagai kapasitas panas spesifik (c). Kapasitas panas spesifik suatu benda adalah besarnya nilai Btu yang harus ditambahkan ke suatu benda atau

diambil dari suatu benda setiap pound untuk menaikkan suhu sebesar  $1^{\circ}\text{F}$ .

Dalam sistem British, kapasitas panas spesifik untuk air adalah  $1 \text{ Btu/lb.}^{\circ}\text{F}$

Dalam satuan metrik, kapasitas panas spesifik diukur dalam satuan kilo kalori (kkal). Kapasitas panas spesifik untuk air adalah  $1 \text{ kkal/kg.}^{\circ}\text{C}$ .

$$1 \text{ Btu} = 0,252 \text{ kkal.}$$

$$1 \text{ kkal} = 3,97 \text{ BTU}$$

Dalam satuan Internasional, kapasitas panas spesifik diukur dalam satuan kilo Joule (kJ). Kapasitas panas spesifik untuk air adalah  $4,19 \text{ kJ/kg K}$ .

Kapasitas panas spesifik untuk benda lain, selalu lebih kecil dari satu. Dengan kata lain air memiliki kapasitas panas spesifik yang paling tinggi. Tabel 2.2 menunjukkan nilai kapasitas panas spesifik untuk beberapa benda.

Tabel 2.2 Kapasitas Panas Spesifik dari beberapa benda pada suhu  $0^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$

| Benda                            | Kapasitas Panas Spesifik (c)                               |                           |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------|
|                                  | Btu/lb. $^{\circ}\text{Fa}$<br>Kkal/kg. $^{\circ}\text{C}$ | kJ/kg. $^{\circ}\text{C}$ |
| Air murni                        | 1,00                                                       | 4,19                      |
| Udara kering                     | 0,24                                                       | 1,01                      |
| Aluminium                        | 0,22                                                       | 0,92                      |
| Tembaga                          | 0,093                                                      | 0,39                      |
| Es                               | 0,50                                                       | 2.09                      |
| Besi                             | 0,115                                                      | 0,48                      |
| Uap                              | 0,48                                                       | 2,01                      |
| Uap air ( $70^{\circ}\text{F}$ ) | 0,45                                                       | 1,88                      |

Definisi British thermal unit (Btu) telah memberi kemudahan bagi cara perhitungan jumlah panas yang diperlukan dalam proses perpindahan panas. Jumlah kuantitas panas yang diperlukan untuk proses pemanasan dan jumlah panas yang diambil untuk proses pendinginan tergantung pada berat atau masa benda, nilai perubahan suhu dan nilai kapasitas panas spesifik. Formula matematikanya sebagai berikut,  
 Dalam sistem British,

$$Q = (m)(c)(t_2 - t_1) \quad (2.8)$$

Dalam hal ini  $Q$  = Kuantitas Panas yang diukur dalam (Btu)  
 $m$  = masa benda dalam pound (lb)  
 $c$  = panas spesifik dalam (Btu/lb.°F)  
 $t_2 - t_1$  = perubahan suhu dalam °F

Dalam sistem Internasional, persamaan 2.4, berubah menjadi

$$Q = (m)(c)(t_2 - t_1) \quad (2.9)$$

Dalam hal ini  $Q$  = Kuantitas Panas yang diukur dalam (kJ)  
 $m$  = masa benda dalam kilogram (kg)  
 $c$  = panas spesifik dalam (kJ/kg.K)  
 $t_2 - t_1$  = perubahan suhu dalam °C.

**Contoh 2.4** Kecepatan laju udara kering bertekanan yang keluar dari fan sebesar 1200 cfm. Besar nilai suhunya adalah 35°F dan nilai volume spesifiknya adalah 13,5 ft<sup>3</sup>/lb. Tentukan besarnya kuantitas panas yang diperlukan per jam, bila suhunya ingin dinaikkan menjadi 120°F.

*Solusi* Pertama-tama, berat masa aktual udara yang akan dipanaskan harus ditetapkan terlebih dahulu. Dalam sesi 1.1 kita telah dapat menentukan jumlah udara yang disirkulasikan oleh fan atau blower, yaitu,

$$m = \frac{1200 \frac{ft^3}{min} \times 60 \frac{min}{hr}}{13,5 \frac{ft^3}{lb}} = 5330 \text{ lb/hr}$$

Substitusi pada persamaan 2.4, untuk  $c$  (udara) = 0,24 Btu/lb.°F. Diperoleh nilai kuantitas panas sebesar

$$Q = 5330 \frac{lb}{hr} \times 0,24 \frac{Btu}{(lb)(^\circ F)} \times (120 - 35)^\circ F = 109.000 \text{ Btu/hr}$$

Dalam sistem metrik, mengekspresikan besarnya energi panas yang disalurkan dalam satuan Joule (J) atau kilo Joule (kJ), dan untuk menyatakan besarnya daya atau kapasitas panas yang disalurkan

per detik dalam satuan watt (W) atau kilowatt (kW). Hubungan antara kkal dan kW adalah,

$$1 \text{ kkal/detik} = 4,186 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 0,239 \text{ kkal/detik}$$

**Contoh 2.5** Sebuah *register discharge* menyalurkan udara kering ke dalam suatu ruangan sebesar  $1,25 \text{ m}^3/\text{detik}$ . Volume spesifik udara kering adalah  $0,895 \text{ m}^3/\text{kg}$  dan suhunya  $42^\circ\text{C}$ . Tentukan kapasitas panas yang disalurkan ke ruang bila suhu ruang  $21^\circ\text{C}$ ?

Solusi Pertama dicari besarnya masa udara yang disalurkan

$$m = \frac{1,25 \frac{\text{m}^3}{\text{detik}}}{0,895 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 1,4 \text{ kg/detik}$$

Dari Tabel 2.2,  $c$  untuk udara  $1,01 \text{ kJ}/(\text{kg})(^\circ\text{C})$ , substitusi ke dalam persamaan 2.5, diperoleh

$$\begin{aligned} Q &= 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{det}} \times 1,01 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg})(^\circ\text{C})} \times (42 - 21)^\circ\text{C} \\ &= 29,7 \text{ kJ/det} \\ &= 29,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

**Contoh 2.6** Pada sebuah ruang pabrik yang dikondisikan udaranya, terdapat sebuah motor listrik yang mempunyai kapasitas sebesar  $2 \text{ kW}$ . Tentukan jumlah panas dalam Btu/hr yang ditambahkan oleh motor ketika sedang bekerja?

Solusi Energi mekanik yang dikeluarkan pompa per jam adalah

$$w = (25 \text{ HP}) \times 33.000 \frac{(\text{ft})(\text{lb})}{1 \text{ HP}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} = 49.500.000 \frac{(\text{ft})(\text{lb})}{\text{hr}}$$

Substitusi dalam persamaan 2.0

$$Q = \frac{w}{j} = \frac{49.500.000 \frac{(ft)(lb)}{hr}}{778 \frac{(ft)(lb)}{Btu}} = 63.600 \text{ Btu/hr}$$

**Catatan** Dalam standar Amerika (engineering system) Laju aliran panas diekspresikan dalam satuan Btu/hr. Dalam sistem metrik dinyatakan dalam kcal/detik, dan dalam dunia refrijerasi dan Tata Udara lazim dinyatakan dalam satuan kJ/detik atau kW

## 2.4 Suhu

Suhu termasuk salah satu sifat yang dimiliki oleh suatu zat atau benda. Suhu merupakan ukuran intensitas atau level dari tekanan thermis yang dimiliki oleh suatu benda. Suhu tinggi menunjukkan adanya tekanan thermis pada level yang tinggi pula. Sebaliknya, suhu rendah menunjukkan adanya tekanan thermis yang rendah pada benda tersebut. Pada kondisi itu, kita menyebut benda itu mengalami pendinginan.

Kini semakin jelaslah, bahwa nilai suhu benda merupakan indek dari kecepatan gerak molekul yang ada pada benda tersebut. Menurut teori kinetik, bila penurunan energi internal pada suatu benda berlangsung terus-menerus sehingga nilai energi kinetik internal turun hingga mencapai *zero* atau nol, maka suhu benda dinyatakan turun ke nilai nol absolut (absolute zero), yaitu sebesar  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , dan pergerakan molekul benda akan berhenti total.

## 2.5 Thermometer

Instrumen untuk mengukur suhu disebut Thermometer. Pada umumnya thermometer beroperasi dengan memanfaatkan sifat fisik yang dimiliki oleh zat cair, yaitu akan mengembang atau menyusut jika suhunya naik atau turun. Karena suhu titik bekunya rendah dan memiliki koefisien muai konstan, maka alcohol dan mercury sering digunakan pada pembuatan thermometer. Thermometer mercury lebih akurat dibandingkan dengan thermometer alcohol, karena

mercury memiliki koefisien muai yang lebih konstan pada rentang yang lebih besar dibandingkan alkohol.

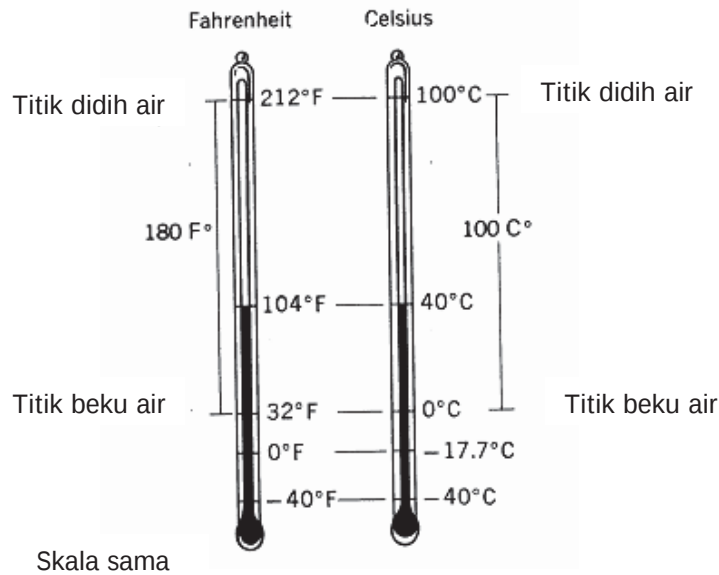
Skala suhu yang lazim digunakan hingga saat ini adalah skala Celcius dan Skala Fahrenheit. Titik suhu di mana air membeku pada tekanan barometer standar atau tekanan atmosfer digunakan sebagai titik nol pada skala Celcius. Dan titik suhu di mana air menguap pada tekanan atmosfer digunakan sebagai titik 100 pada skala Celcius. Kemudian jarak antara titik nol dan titik 100 dibagi menjadi 100 bagian yang sama dan disebut sebagai derajat. Sehingga perbedaan antara titik beku dan titik uap air pada skala Celcius adalah 100 derajat.

Sama seperti pada skala Celcius, Skala Fahrenheit juga menggunakan dua titik pengukuran sebagai ukuran standar, yaitu titik beku dan titik uap air pada tekanan atmosfer standar. Pada skala Fahrenheit, titik beku air ditetapkan pada titik 32 dan titik uap air ditetapkan pada titik 212. Kemudian jarak antara kedua titik tersebut rata menjadi 180 bagian yang sama.

Gambar 1.2 memperlihatkan dua skala suhu yang bersisian untuk memudahkan membandingkannya. Harap dicatat, bahwa 100 derajat Celcius sama dengan 180 derajat Fahrenheit. Jadi  $1^{\circ}\text{C} = 1,8^{\circ}\text{F}$ . Kadangkala, pada prakteknya diperlukan konversi atau perubahan dari satu skala ke skala lainnya. Berikut ini diberikan contoh praktisnya.

**Contoh 2.7** Tentukan nilai ukur dalam skala Celcius bila diketahui nilai ukur dalam skala Fahrenheit adalah  $+14^{\circ}\text{F}$ .

*Solusi* Ingat, bahwa  $+14^{\circ}\text{F}$ , adalah 18 derajat Fahrenheit ( $32-14$ ) di bawah titik beku air. Setiap derajat Fahrenheit sama dengan  $1/1,8$  derajat Celcius, dan  $18/1,8 = 10$  derajat Celcius di bawah titik beku air. Jadi  $+14^{\circ}\text{F} = -10^{\circ}\text{C}$ .



Gambar 2.4 Perbandingan Skala Celcius dan Fahrenheit

**Contoh 2.8** Tentukan nilai ukur dalam skala Fahrenheit bila diketahui nilai ukur dalam skala Celcius adalah  $+40^{\circ}\text{C}$ .

**Solusi**  $40^{\circ}\text{C}$  adalah 40 derajat Celcius di atas titik beku air dan setiap 1 derajat Celcius sama dengan 1,8 derajat Fahrenheit.  $40 \times 1,8 = 72$  derajat Fahrenheit di atas titik beku air. Tetapi karena titik beku air pada skala Fahrenheit adalah  $32^{\circ}\text{F}$ , maka nilai ukur sebenarnya pada skala fahrenheit adalah  $72 + 32 = 104^{\circ}\text{F}$ .

Contoh di atas dipresentasikan sebagai dasar rasionalisasi proses konversi suhu. Selanjutnya, untuk keperluan praktis, dapat digunakan formula sebagai berikut:

Konversi skala Fahrenheit ke Celcius

$$C = \frac{F - 32}{1,8} \quad (2.10)$$

Konversi skala Celcius ke Fahrenheit

$$F = 1,8C + 32 \quad (2.11)$$

## 2.6 Suhu Absolut

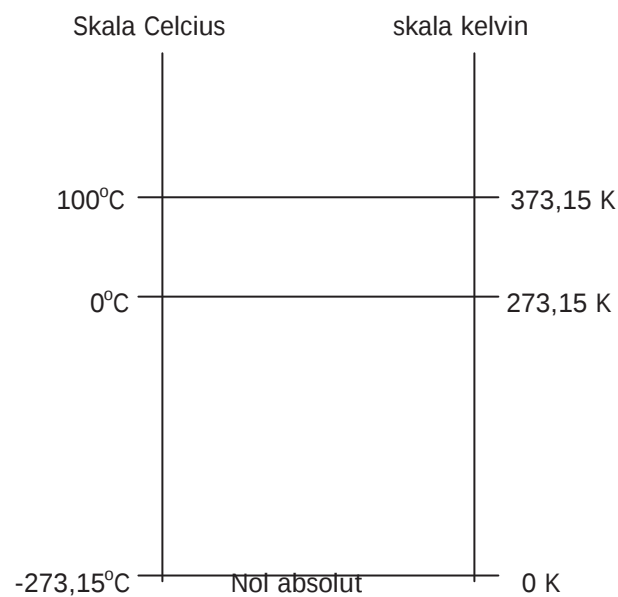
Dari percobaan diketahui bahwa pada suhu  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , pergerakan molekul benda akan berhenti total. Titik suhu di mana pergerakan molekul berhenti total dinyatakan sebagai titik nol absolut (absolute zero).

Secara praktis, Suhu Celcius dapat dikonversi ke suhu absolut dengan menambahkan 273 pada pembacaan skala celcius. Hasil pembacaan suhunya dinyatakan dalam kelvin (K). Interval suhu sebesar 1 K sama dengan interval suhu  $1^{\circ}\text{C}$ .

Konversi dari dan ke suhu absolut, dapat menggunakan formula sebagai berikut:

$$K = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad (2.12)$$

$$^{\circ}\text{C} = K - 273 \quad (2.13)$$



Gambar 2.5 Perbandingan Skala Celcius dan Kelvin

**Contoh 2.9** jika suhu gas adalah 100 oC, berapakah suhu dalam Kelvin?

*Solusi* Dengan menerapkan persamaan 2.10 diperoleh

$$K = 100^{\circ}\text{C} + 273 = 373 \text{ K}$$

**Contoh 2.10** Suhu uap ketika memasuki saluran hisap kompresor adalah -30°C. Tentukan suhu absolut dalam kelvin?

*Solusi* dengan cara yang sama seperti di atas, diperoleh

$$K = -30^{\circ}\text{C} + 273 = 243 \text{ K}$$

## 2.7 Tekanan

Tekanan adalah gaya yang bekerja per satuan luas permukaan. Tekanan dapat dinyatakan sebagai ukuran intensitas gaya pada setiap titik permukaan yang terkena oleh gaya tersebut. Bila gaya didistribusikan ke seluruh permukaan maka besarnya tekanan pada setiap titik di permukaan yang terkena gaya tersebut adalah sama. Besarnya tekanan dapat dihitung dengan membagi gaya total dengan luas permukaan. Hubungan ini diformulasikan sebagai berikut:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.14)$$

Di mana  $P$  = Tekanan dalam satuan newton per meter persegi ( $\text{N/m}^2$ ) atau pascal (Pa)  
 $F$  = Gaya dalam satuan newton (N)  
 $A$  = Luas permukaan dalam meter persegi ( $\text{m}^2$ )

Karena  $F = (m)(a)$ , maka

$$P = \frac{(m)(a)}{A} = \frac{(m)(g)}{A} \quad (2.15)$$

**Contoh 2.11** Sebuah tanki yang lantainya berukuran (2 x 3) meter, diisi air sehingga masa air total mencapai 18.000 kg. Tentukan (a) Gaya grafitasi dalam newton yang diterima dasar tanki, (b) tekanan yang diterima dasar tanki dalam pascal?

Solusi

- (a) gaya grafitasi yang diterima dasar tanki adalah

$$F = (18.000) \text{ kg} \times (9,807) \text{ N/kg} = 176.526 \text{ N}$$

- (b) Luas dasar tanki adalah  $6 \text{ m}^2$ , dengan persamaan 2.14, Tekanan yang diterima dasar tangki adalah

$$P = 176.526 \text{ N} / 6 \text{ m}^2 = 29.421 \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)}$$

Dalam sistem satuan internasional (SI unit), satuan tekanan adalah pascal (Pa) atau kilopascal (kPa). Satu pascal setara dengan satu newton per meter persegi. Ukuran tekanan lain yang masih banyak digunakan adalah bar. Di mana 1 bar setara dengan 100 kilopascal (kPa) atau  $100 \text{ N/m}^2$ . Tekanan juga dapat dinyatakan dalam istilah kolom fluida, biasanya mercury (Hg) atau air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Bila mercury yang digunakan untuk mengukur tekanan, maka ukuran tekanan dinyatakan dalam milimeter mercury (mm.Hg), Bila air yang digunakan, maka dinyatakan dalam milimeter air (mm. $\text{H}_2\text{O}$ ).

#### Tekanan Atmosfir

Bumi kita dilingkupi oleh lapisan atmosfir atau udara mulai dari permukaan bumi hingga puluhan kilometer jaraknya dari permukaan bumi. Karena udara memiliki masa atau berat akibat adanya gaya grafitasi bumi, maka bekerjalah tekanan pada permukaan bumi, yang disebut tekanan atmosfir.

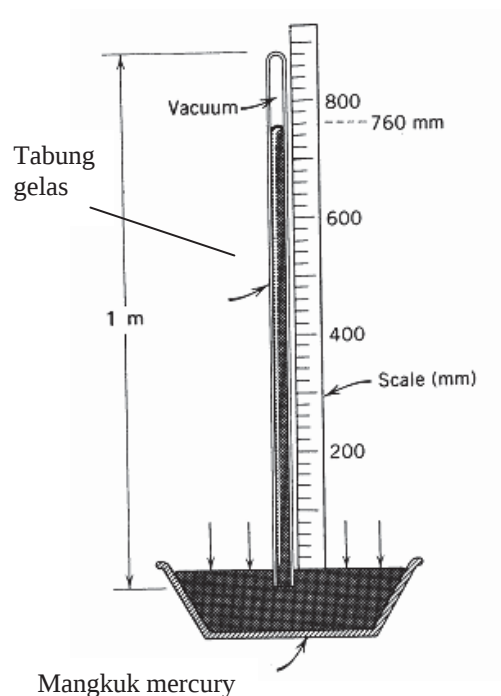
Bayangkan ada satu kolom udara yang mempunyai luas permukaan sebesar  $1 \text{ m}^2$  terletak di atas permukaan laut hingga mencapai batas lapisan atmosfir. Masa udara yang ada dalam kolom tersebut adalah 101.325 N. Karena gaya yang ditimbulkan oleh masa udara tersebut bekerja pada luas permukaan  $1 \text{ m}^2$ , maka tekanan yang bekerja pada permukaan laut, di mana kolom udara itu berdiri adalah  $101.325 \text{ N/m}^2$  atau Pa. Angka tersebut dijadikan patokan

ukuran tekanan atmosfer atau tekanan barometer di atas permukaan laut, yakni satu atmosfer (1 atm).

Tekanan atmosfer tidak selalu konstan tetapi bervariasi terhadap suhu, kelembaban, dan kondisi lainnya. Tekanan atmosfer juga bervariasi terhadap ketinggian (altitude), yaitu akan turun jika tempatnya semakin tinggi.

#### Barometer

Barometer adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur tekanan pada atmosfer bumi. Barometer sederhana untuk mengukur tekanan dalam istilah ketinggian kolom mercury dapat dibuat dengan mengisi mercury ke dalam tabung gelas sepanjang satu meter atau 100 milimeter yang salah satu ujungnya tertutup. Kemudian tabung berisi mercury diletakkan ke dalam mangkuk yang berisi mercury seperti diperlihatkan dalam Gambar 1.6.



Gambar 2.6 Barometer mercury

Tekanan yang bekerja pada permukaan mercury akibat tekanan atmosfer menyebabkan mercury yang ada di dalam tabung tetap

terjaga pada level tertentu. Besarnya tekanan atmosfer akan menentukan tinggi kolom mercury.

Tinggi kolom mercury di dalam tabung merupakan ukuran tekanan yang dihasilkan oleh gaya tekan udara atmosfer pada permukaan mercury (air raksa), dan dibaca dengan menggunakan skala kolom mercury (mm Hg). Tekanan normal atmosfer di atas permukaan laut sebesar 101.325 pascal yang bekerja pada permukaan mercuri, akan menyebabkan tinggi kolom mercury tetap pada tinggi 760 mm.

Bila 760 mm Hg setara dengan 101.325 Pa, maka untuk setiap mm Hg akan setara dengan 133,32 Pa. Dari sini kita dapat membuat hubungan lain sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Cm Hg} &= (\text{Pa})/(1333,2) & (2.16) \\ \text{Mm Hg} &= (\text{Pa})/(133,32) \\ \text{Pa} &= (\text{cm Hg})(1333,2) \\ \text{Pa} &= (\text{mm Hg})(133,32) \end{aligned}$$

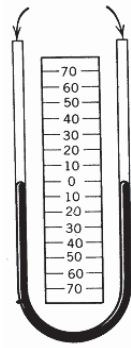
**Contoh 2.12** Sebuah barometer mercury membaca 764 mm Hg. Tentukan tekanan atmosfer yang menyebabkannya dalam Pa?

Solusi menggunakan persamaan 2.16, tekanan atmosfer adalah

$$(764 \text{ mm Hg})(133,32) = 101.856 \text{ Pa} = 101,856 \text{ kPa.}$$

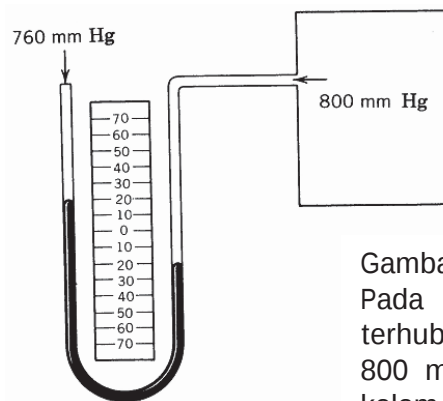
### Manometer

Manometer adalah salah satu jenis meter tekanan (pressure gauge) yang menggunakan kolom mercury untuk mengukur tekanan suatu zat (cair atau gas) yang ada di dalam suatu tabung. Konstruksi manometer mercury yang sederhana diperlihatkan dalam Gambar 2.7 hingga Gambar 2.9.



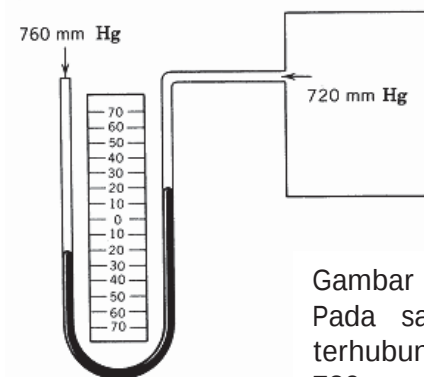
Gambar 2.7 Manometer Tabung-U.

Karena kedua ujung kaki manometer terbuka, maka akan menerima tekanan atmosfer sama pada kedua sisinya, sehingga level kolom mercury sama tinggi.



Gambar 2.8 Manometer mercury sederhana.

Pada salah satu ujung kaki manometer terhubung ke tabung yang bertekanan 800 mm Hg. Tekanan tabung menggeser kolom mercury naik sebesar 40 mm Hg.

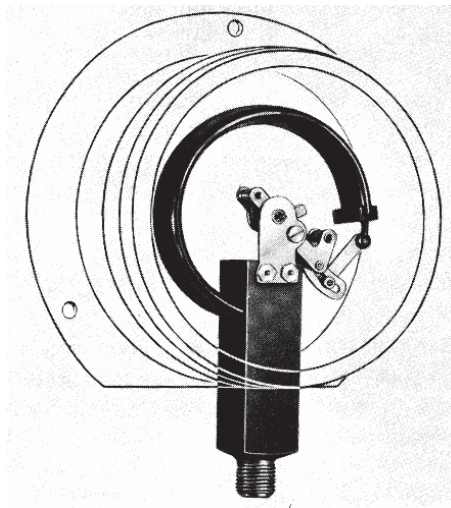


Gambar 2.9 Manometer mercury sederhana.

Pada salah satu ujung kaki manometer terhubung ke tabung yang bertekanan 720 mm Hg. Tekanan atmosfer menggeser kolom mercury turun sebesar 40 mm Hg.

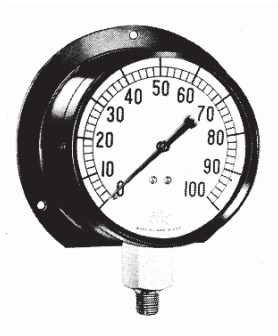
### Tabung Bourdon

Karena konstruksi manometer yang tidak praktis, memerlukan tabung panjang, untuk alasan praktis manometer tidak digunakan untuk mengukur tekanan yang lebih besar dari satu atmosfer. Sebagai gantinya, untuk mengukur tekanan yang lebih besar dari satu atmosfer digunakan Tabung Bourdon. Seperti diperlihatkan dalam Gambar 1.10. Tipikal Tabung Bourdon adalah melengkung cenderung melingkar, bentuk elip, terbuat dari metal yang cenderung bergerak lurus bila tekanan di dalam tabung naik dan kembali melengkung bila tekanan di dalam tabung turun kembali. Kemudian gerakan tabung yang mengembang dan menyusut kembali tersebut ditransmisikan secara mekanik ke jarum penunjuk.

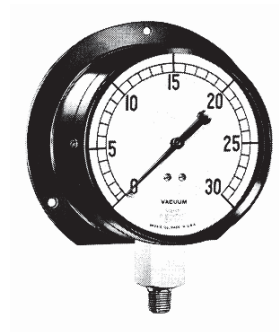


Gambar 2.10 Tipikal Tabung Bourdon

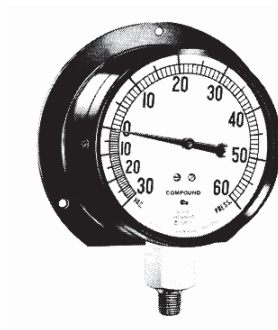
Meter tekanan yang terbuat dari tabung Bourdon sangat kuat dan dapat mengukur tekanan di atas dan di bawah tekanan atmosfer. Tabung Bourdon yang digunakan untuk mengukur tekanan di atas tekanan atmosfer lazim disebut sebagai pressure gauge. (Gambar 1.11). Tabung Bourdon yang didesain untuk mengukur tekanan di bawah tekanan atmosfer disebut vacuum gauge. (Gambar 1.12). Dan bila digunakan untuk dapat mengukur kedua jenis skala, disebut compound gauge. (Gambar 1.13)



Gambar 2.11 Pressure Gauge



Gambar 2.12 Vacuum gauge



Gambar 1.13 Coumpond Gauge

Tabel 2.3 Beberapa Satuan dan Ekuivalennya

| Tekanan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $1 \text{ atm} = 14,7 \text{ psi} = 29,92 \text{ in.Hg} = 760 \text{ mm.Hg}$<br>$= 33,9 \text{ ft.w} = 407 \text{ in.w} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} = 101,3 \text{ kPa}$<br>$1 \text{ psi} = 144 \text{ lb/ft}^2 = 6,9 \times 10^3 \text{ kPa}$<br>$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1,45 \times 10^{-4} \text{ psi}$<br>$1 \text{ kPa} = 0,145 \text{ psi}$<br>$1 \text{ in.Hg} = 3385 \text{ Pa} = 3,385 \text{ kPa}$<br>$1 \text{ mm.Hg} = 1 \text{ torr} = 133,3 \text{ Pa} = 1/760 \text{ atm}$<br>$1 \text{ in.w} = 1,86 \text{ mm.Hg} = 249 \text{ Pa}$ |
| Energi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| $1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal} = 0,252 \text{ kcal} = 1,055 \text{ kJ}$<br>$1 \text{ kcal} = 3,97 \text{ Btu} =$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Daya                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $1 \text{ hp} = 746 \text{ watt} = 550 \text{ ft.lb/sec}$<br>$1 \text{ kW} = 1,34 \text{ hp} = 0,239 \text{ kcal/sec}$<br>$1 \text{ kcal/sec} = 4,186 \text{ kW}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

## 2.8 Perubahan Wujud Benda

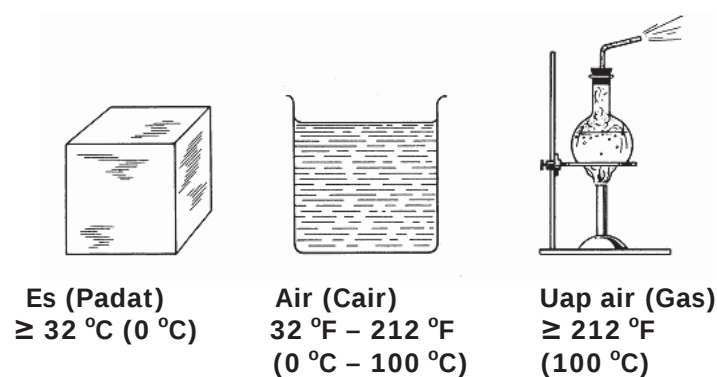
Status benda dapat berwujud dalam tiga fasa yang berbeda, yaitu sebagai zat padat, zat cair dan gas. Misalnya, air berbentuk zat cair, tetapi dapat muncul pula berupa zat padat, yaitu es, dan dapat muncul pula berupa uap air atau gas. (Gambar 2.14). Semua benda atau materi, di bawah kondisi suhu dan tekanan tertentu, dapat muncul dalam salah satu dari ketiga fase tersebut di atas. Penambahan dan penurunan energi yang dikenakan pada suatu benda dapat berpengaruh terhadap suhu dan wujud benda.

Untuk membantu memahami konsep ini, marilah kita tinjau kembali teori molekul. Katakanlah, air pada suhu ruang dan tekanan atmosfer berwujud cair atau likuid. Molekul air bergerak secara random, jarak antar molekul agak jauh, sering terjadi tumbukan elektron. Bila suhu air naik sampai  $100^\circ\text{C}$  ( $212^\circ\text{F}$ ), dan tekanan dijaga tetap 1 atmosfer, maka air akan mendidih dan mengeluarkan uap. Ini adalah proses perubahan wujud dari cair ke gas.

Uap air atau *steam*, adalah air dalam wujud gas. Sifat molekul uap air dalam wujud gas berbeda dengan sifat molekul air dalam wujud

cair. Jarak antar molekul uap menjadi lebih jauh, dan kecepatan gerak molekul menjadi lebih besar dari pada molekul air. Uap juga mudah dipampatkan atau memiliki tingkat kompresibel yang tinggi. Air dalam bentuk cair hampir tidak dapat dipampatkan. Uap air memiliki sifat seperti gas murni.

Dalam kasus berikutnya, bila air dalam wujud cair tersebut, suhunya turun hingga mencapai  $0^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$ ), tekanan tetap konstan 1 atmosfer, maka air akan membeku dan berubah wujud menjadi es yaitu wujud padat dari air. Sifat molekul es seperti sifat molekul zat padat lain, yakni jarak molekul relatif lebih dekat, gerakan molekul menjadi tertahan sehingga energi molekul menjadi lebih rendah dan tidak dapat dipampatkan. Proses perubahan wujud untuk benda lain, sama seperti air tetapi dalam kondisi suhu dan tekanan yang berbeda.



Gambar 2.14 Wujud benda tergantung pada suhu dan tekanannya

### Fasa Padat

Benda dalam fasa padat atau solid, memiliki energi potensial internal relative kecil. Molekul benda tersebut agak sedikit rapat akibat adanya gaya tarik dan gaya grafitasi. Struktur molekulnya menjadi kaku sehingga pergerakan molekul menjadi terbatas. Karena struktur molekulnya kaku (rigid) maka pada fasa padat ini ukuran dan bentuk benda cenderung tetap dan tidak dapat dimampatkan (non compressible).

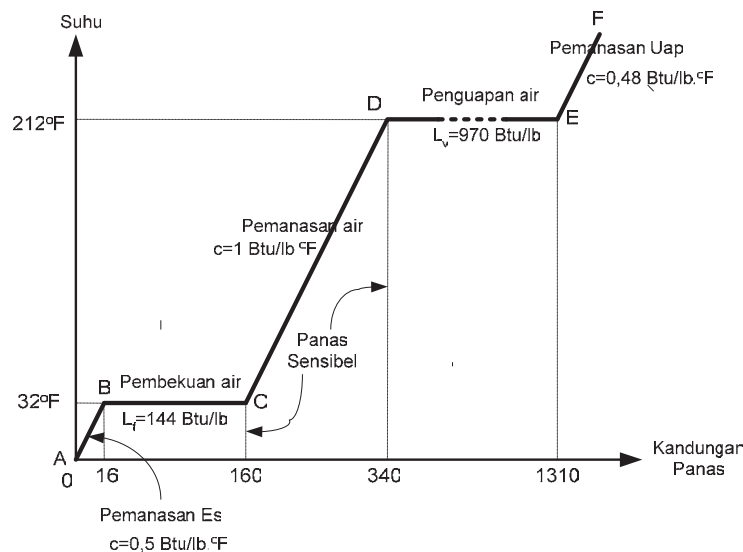
### Fasa Cair

Molekul pada benda yang berada pada fasa cair memiliki energi yang lebih besar daripada ketika berada pada fasa padat. Energi yang lebih besar ini, dapat mengatasi adanya gaya tarik-menarik molekul sehingga dapat lebih bebas bergerak. Molekulnya bebas bergerak kemana saja sehingga zatnya mudah mengalir mengikuti bentuk bejana yang ditempatinya.

### Fasa Gas

Molekul benda dalam fasa gas memiliki energi yang lebih besar daripada energi yang dimiliki ketika berada dalam fasa cair. Ia mempunyai energi yang lebih dari cukup untuk mengatasi adanya gaya yang dapat mengekangnya. Konsekuensinya, mereka dapat terbang dengan kecepatan tinggi. Selalu bertubrukan dengan sesamanya dan juga dinding kontainernya. Oleh karena itu gas akan tetap berada pada ukurannya tetapi tidak pada bentuknya. Gas mudah dikompresi tetapi juga mudah bocor bila kontainernya tidak bagus.

### Kurva T – Q untuk Air



Gambar 2.15 Diagram Kurva T-H

Air satu pound pada tekanan atmosfer. Proses perubahan wujud dan hubungan antara kandungan panas (entalpi) dan suhu diperlihatkan dalam kurva T-H.

Kurva T-H untuk air adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara suhu air ( $T$ ) dan energi panas yang dikandungnya ( $Q$ ). Bila energi panas yang ditambahkan ke air dalam wujud cair mencukupi kebutuhannya, maka air akan mendidih dan mengeluarkan uap. Bila energi panas yang diambil dari air mencukupi kebutuhannya, maka air akan membeku dan berubah menjadi padat atau solid. Hubungan antara besaran suhu dan energi untuk air diperlihatkan dalam Gambar 2.15.

Titik awal diagram kurva T-H dimulai dari satu pound es pada suhu  $0^{\circ}\text{F}$ . Suhu diplot pada sumbu vertical dan kandungan panas (entalpi) diplot pada sumbu horizontal.

Energi panas ditambahkan secara perlahan kepada es, sehingga suhu es naik secara gradual,  $2^{\circ}\text{F}/\text{Btu}$ . Ppanas spesifik ( $c$ ) untuk es adalah  $0,5 \text{ Btu}/\text{lb}$ . Bila panas yang diberikan mencapai  $16 \text{ Btu}$ , suhu es naik menjadi  $32^{\circ}\text{F}$ . Proses pemanasan es ini direpresentasikan dalam garis AB. Energi panas yang diperlukan untuk proses ini disebut panas sensibel ( $Q_s$ ).

Panas sensibel adalah energi panas yang bila ditambahkan atau diambil dari suatu benda akan menimbulkan efek sensibel pada benda tersebut (dapat dideteksi oleh indera kita), yaitu perubahan suhu yang dapat diukur dengan thermometer.

Pada titik B, wujud es masih tetap solid, tetapi suhunya naik menjadi  $32^{\circ}\text{F}$ . Panas sensibel yang diperlukan oleh es untuk menaikkan suhunya dari  $0$  ke  $32^{\circ}\text{F}$  adalah  $16 \text{ Btu}$ .

Bila sekarang kita tambahkan panas ke es, maka suhu es tidak akan naik, tetapi es mulai mencair. Bila energi panas terus ditambahkan hingga mencapai  $144 \text{ Btu}$  ( $160-16$ ), maka seluruh es sudah mencair dan berubah wujud menjadi air. Energi panas sebesar  $144 \text{ Btu}$  hanya digunakan untuk merubah  $1 \text{ pound}$  es pada suhu  $32^{\circ}\text{F}$  menjadi  $1 \text{ pound}$  air pada suhu yang sama,  $32^{\circ}\text{F}$ .

Karena penambahan energi panas selama proses pencairan yang digambarkan dengan garis BC tidak merubah suhu es, namanya bukan panas sensibel. Kita tidak dapat mengukur efek tersebut dengan thermometer. Karena tidak dapat dideteksi oleh indera kita, maka lazim disebut sebagai panas laten ( $Q_L$ ).

Panas laten adalah energi panas yang bila ditambahkan atau diambil dari suatu benda akan menimbulkan perubahan wujud tanpa merubah suhunya.

Panas laten untuk pencairan es pada tekanan atmosfer dan suhu 32°F atau 0°C ( $Q_L$  atau  $L_F$ ) adalah 144 Btu/lb.

Kembali ke percobaan di atas, bila energi panas ditambahkan ke air (titik C), secara gradual suhu air akan naik, 1 °F/Btu. Pada saat suhu air mencapai 212°F (100°C) titik D, maka panas sensibel yang diperlukan adalah 180 Btu (340-160).

Bila energi panas terus ditambahkan ke air yang suhunya telah mencapai 100°C (titik D), secara gradual air mulai mendidih dan mengeluarkan uap. Diperlukan panas laten sebesar 970 Btu (1310-340) untuk merubah wujud air menjadi uap.

Panas laten untuk penguapan air pada tekanan atmosfer dan pada suhu 100°C ( $Q_L$  atau  $L_v$ ) adalah 970 Btu/lb.

Bila penambahan energi panas terus berlanjut, maka suhu uap akan naik. Panas sensibel yang diperlukan untuk merubah suhu uap setiap derajat fahrenheit adalah 0,48 Btu. Nilai ini sesuai dengan besaran panas spesifik untuk uap  $c = 0,48$  Btu/Lb.

Kembali ke keseluruhan bahasan dari sesi ini, yaitu energi panas, daya dan perubahan wujud benda, yang paling penting harus kita pahami berkaitan dengan proses refrigerasi dan tata udara adalah panas sensibel dan panas laten. Pengukuran kandungan panas merupakan hal yang paling penting dalam refrigerasi dan Tata Udara. Analisis yang paling utama adalah perhitungan panas total ( $Q$ ) yaitu penjumlahan panas sensibel dan panas laten. Oleh karena itu dengan mengacu ke Gambar 2.15, pastikan anda sudah paham benar tentang diagram T-H.

$$\text{PanasTotal (entalpi)} = \text{panas sensibel} + \text{panas laten} \quad (2.17)$$

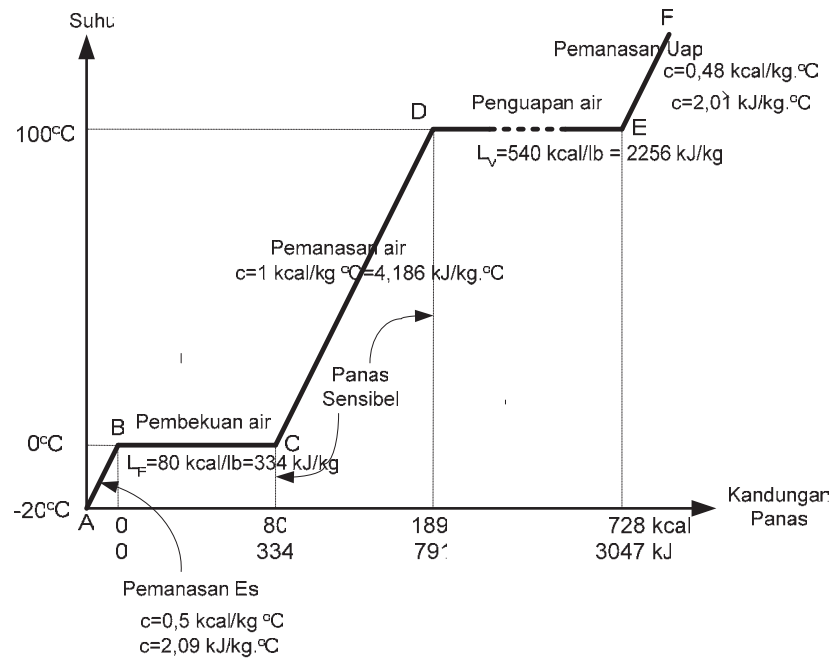
Dalam proses pengkondisian udara, penambahan atau pengambilan energi panas ke atau dari benda, baik udara, refrigeran, produk makanan dan benda lainnya akan selalu berlangsung secara terus menerus.

Sekarang pelajari dengan lebih seksama Gambar 2.16 yang membahas topik sama, tentang proses perubahan wujud air melalui

diagram T-H seperti Gambar 2.15 Tetapi satuan yang digunakan berbeda yakni menggunakan sistem metrik dan sistem internasional. Yaitu:

$$L_F = 80 \text{ kcal/kg} = 334 \text{ kJ/kg}$$

$$L_V = 540 \text{ kcal/kg} = 2256 \text{ kJ/kg}$$



Gambar 2.16 Diagram T-H  
Air satu kilogram pada tekanan atmosfer. Proses perubahan wujud dan hubungan antara kandungan panas (entalpi) dan suhu diperlihatkan dalam kurva T-H.

**Contoh 2.13** Suatu boiler penghasil uap, memanaskan 50 galon air yang suhunya 40°F setiap jam. Suhu uap yang dihasilkan oleh boiler adalah 240°F. Hitung entalpi yang diperlukan?

Solusi Dalam kasus ini diperlukan panas sensibel dan panas laten.

Step 1. Pemanasan air, panas sensibel  $Q_s$ , persamaan 2.8 ,

$$Q_s = (5)gal \times (8,33) \frac{lb}{gal} \times 1 \frac{Btu}{(lb)(^{\circ}F)} \times (212 - 40)^{\circ}F = 71.600 \text{ Btu}$$

Step2. Proses penguapan, panas laten  $Q_L$

$$Q_L = (970) \frac{Btu}{lb} \times (416)lb = 404.000 \text{ Btu}$$

Step 3. Pemanasan uap, panas sensibel

$$Q_s = (416)lb \times 0,48 \frac{Btu}{(lb)(^{\circ}F)} \times (28)^{\circ}F = 5600 \text{ Btu}$$

$$\text{Total panas (entalpi)} = 71.600 + 404.000 + 5600 = 481.200 \text{ Btu/hr}$$

**Contoh 2.14** Suatu koil pendingin dari sistem refrijerasi menerima udara kering dengan laju aliran sebesar 0,944 m<sup>3</sup>/det. Volume spesifik udara kering adalah 0,890 m<sup>3</sup>/kg. Suhu udara yang masuk ke koil adalah 41°C dan suhu keluar dari koil adalah 13°C. Tentukan panas total yang diperlukan untuk pendinginan udara ini?

Solusi Dalam tidak terjadi perubahan wujud, jadi hanya panas sensibel yang diperlukan.

Step 1. Masa udara (m) yang disalurkan ke koil pendingin adalah

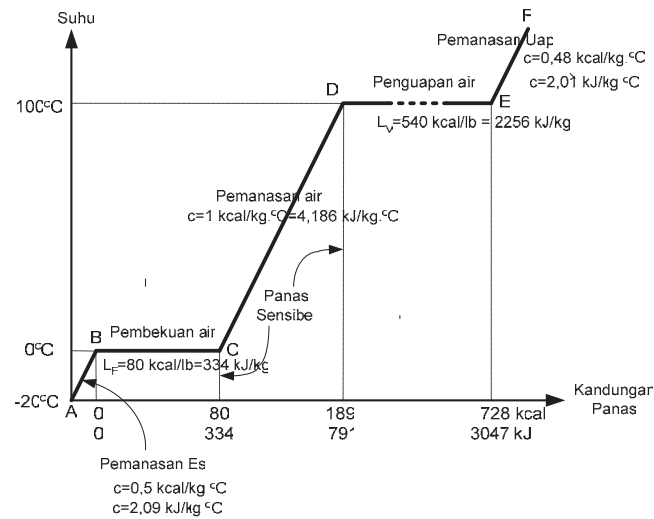
$$m = \frac{(0,944) \frac{m^3}{det}}{(0,89) \frac{m^3}{kg}} = 1,06 \text{ kg/det.}$$

Step 2. Panas sensibel

$$Q_s = (1,06) \frac{kg}{det} \times (1,01) \frac{kJ}{(kg)(^{\circ}C)} \times (41 - 13)^{\circ}C = 30 \frac{kJ}{det} = 30 \text{ kW}$$

## 2.9 Saturasi, Panaslanjut, dan Superdingin

Saturasi (saturation), superlanjut (superheat) dan dingin lanjut atau superdingin (subcooled) adalah istilah untuk kondisi benda ketika berada pada suhu dan tekanan tertentu. Refrijeran yang digunakan sebagai fluida penukar kalor dalam mesin refrijerasi, akan mengalami ketiga kondisi tersebut ketika sedang bersirkulasi di dalam mesin refrijerasi. Untuk memahami konsep ini, marilah kita kembali ke Gambar 2.16.



Kondisi wujud air pada saat berada di garis DE adalah campuran antara bentuk cair dan gas. Mendekati titik D, jumlah air lebih banyak, tetapi mendekati titik E jumlah uap lebih banyak. Kondisi wujud benda yang terdiri dari campuran gas dan cair, lazim disebut sebagai kondisi saturasi (saturation). Air pada titik D disebut likuid saturasi dan Uap pada titik D disebut gas saturasi.

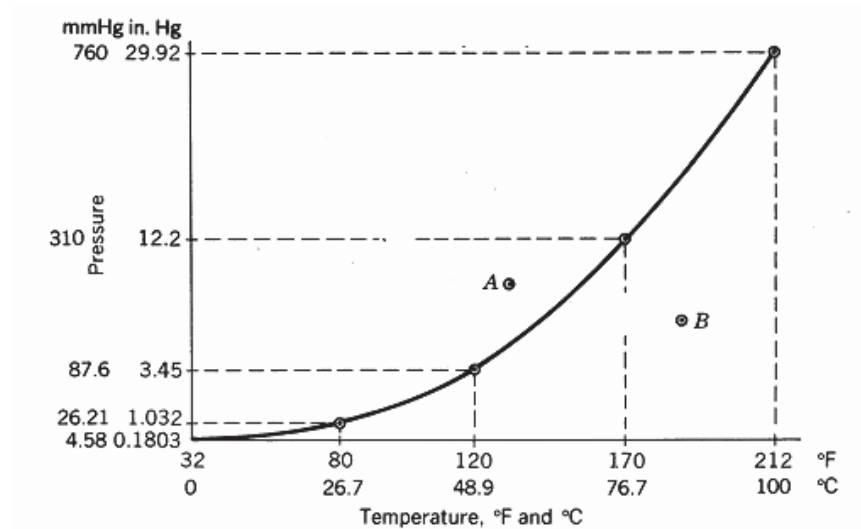
Uap pada titik F, disebut uap panas lanjut (superheat vapour)

Kondisi wujud es pada saat berada di garis BC adalah campuran antara bentuk padat dan cair. Mendekati titik B, jumlah masih bentuk padat, tetapi mendekati titik C, bentuk cair lebih banyak. Es pada titik B, disebut sebagai suhu saturasi es, dan pada titik C, disebut suhu saturasi air.

Es pada suhu  $-20^{\circ}\text{C}$ , titik A, disebut sebagai suhu dinginlanjut es (subcolled) dengan derajat subcooled sebesar 20.

Tabel 2.4 Tekanan saturasi uap air pada berbagai suhu

| Suhu |      | Tekanan |       |
|------|------|---------|-------|
| °F   | °C   | In Hg   | mm Hg |
| 32   | 0    | 0,1803  | 4,58  |
| 50   | 10   | 0,3626  | 9,21  |
| 60   | 15,6 | 0,5218  | 13,25 |
| 70   | 21,1 | 0,7392  | 18,78 |
| 80   | 26,7 | 1,032   | 26,21 |
| 90   | 32,2 | 1,442   | 36,12 |
| 100  | 37,8 | 1,933   | 49,1  |
| 120  | 48,9 | 3,45    | 87,6  |
| 140  | 60   | 5,88    | 149,4 |
| 160  | 71,1 | 9,65    | 245   |
| 170  | 76,7 | 12,2    | 310   |
| 180  | 82,2 | 15,29   | 388   |
| 200  | 93,3 | 23,47   | 596   |
| 212  | 100  | 29,92   | 760   |



Gambar 2.17 Kurva P-T atau Kurva Titik Didih Air

### Soal Latihan

1. Sebuah pompa yang digunakan dalam mesin tata udara, memompa air menuju *cooling tower* yang terletak di ketinggian 300 feet dari pompa. Laju aliran airnya sebesar 90 galon per menit. Tentukan besarnya daya dalam HP yang diperlukan untuk melakukan kerja tersebut. Bila efisiensinya 100% berapa konsumsi daya listrik yang diperlukan?
2. Sebuah mesin pemanas ruang (Furnace) menghasilkan panas sebesar 75 kW. Panas tersebut disalurkan ke ruangan melalui dinding besi yang memiliki tebal 9,5 mm. Bila besar suhu pada sisi panas dari dinding besi tersebut adalah  $135^{\circ}\text{C}$  dan suhu udara sekitarnya adalah  $124^{\circ}\text{C}$ . Tentukan luas permukaan dinding besinya?
3. Kecepatan laju udara kering bertekanan yang keluar dari fan sebesar 1300 cfm. Besar nilai suhunya adalah  $38^{\circ}\text{F}$  dan nilai volume spesifiknya adalah 13,5 ft<sup>3</sup>/lb. Tentukan besarnya kuantitas panas yang diperlukan per jam, bila suhunya ingin dinaikkan menjadi  $140^{\circ}\text{F}$ .
4. Pada sebuah ruang pabrik yang dikondisikan udaranya, terdapat sebuah motor listrik yang mempunyai kapasitas sebesar 3,5 kW. Tentukan jumlah panas dalam Btu/hr yang ditambahkan oleh motor ketika sedang bekerja?
5. Sebuah tanki yang lantainya berukuran (3 x 3) meter, diisi air sehingga masa air total mencapai 20.000 kg. Tentukan (a) Gaya grafitasi dalam newton yang diterima dasar tanki, (b) tekanan yang diterima dasar tanki dalam pascal?
6. Suatu boiler penghasil uap, memanaskan 50 galon air yang suhunya  $40^{\circ}\text{F}$  setiap jam. Suhu uap yang dihasilkan oleh boiler adalah  $240^{\circ}\text{F}$ . Hitung entalpi yang diperlukan?
7. Suatu koil pendingin dari sistem refrijerasi menerima udara kering dengan laju aliran sebesar 0,944 m<sup>3</sup>/det. Volume spesifik udara kering adalah 0,890 m<sup>3</sup>/kg. Suhu udara yang masuk ke koil adalah  $41^{\circ}\text{C}$  dan suhu keluar dari koil adalah  $13^{\circ}\text{C}$ . Tentukan panas total yang diperlukan untuk pendinginan udara ini?

---

# SIFAT UDARA DAN PSIKROMETRI

3

---

## Kerangka Isi

- 3.1 Komposisi Udara
- 3.2 Campuran Uap air dan Udara Kering
- 3.3 Suhu Saturasi
- 3.4 Uap Panaslanjut
- 3.5 Cairan Superdingin
- 3.6 Efek Tekanan pada Suhu Saturasi
- 3.7 Evaporasi
- 3.8 Kondensasi
- 3.9 Suhu Titik Embun
- 3.10 Kandungan Uap air Maksimum
- 3.11 Kelembaban Absolut
- 3.12 Kelembaban relatif
- 3.13 Kelembaban Spesifik
- 3.14 Suhu Bola Basah dan Suhu Bola Kering
- 3.15 Proses Transfer Panas

Tata Udara (air conditioning) dapat didefinisikan sebagai pengontrolan secara simultan semua faktor yang dapat berpengaruh terhadap kondisi fisik dan kimiawi udara dalam struktur tertentu. Faktor-faktor tersebut meliputi : suhu udara, tingkat kelembaban udara, pergerakan udara, distribusi udara dan polutan udara. Di mana sebagian besar dari faktor tersebut di atas dapat berpengaruh terhadap kesehatan tubuh dan kenyamanan.

Udara yang telah dikondisi secara tepat dapat hanya merupakan salah satu atau kombinasi dari berbagai pengaturan faktor-faktor di atas. Sebagai contoh : hanya proses pendinginan atau proses pemanasan saja, atau hanya proses sirkulasi udara saja dengan menggunakan fan atau hanya proses penambahan/pengurangan kelembaban udara, atau proses pemurnian (penyaringan) udara agar bebas dari polutan udara atau bahkan kombinasi dari berbagai proses tata udara seperti yang diuraikan di atas.

### **3.1 Komposisi Udara**

Udara atmosfer merupakan campuran tiga material penting yaitu udara kering (dry air), uap air (water vapour) dan polutan seperti asap rokok, debu dan gas-gas berbahaya lainnya. Setiap material yang terkandung di dalam udara atmosfer mempunyai kontribusi langsung terhadap permasalahan proses pengkondisian udara.

Udara kering itu sendiri merupakan campuran dari beberapa gas. Yang paling penting adalah gas oksigen dan gas nitrogen. Selebihnya berupa gas karbondioksida dan gas-gas ringan lain, yaitu argon, neon, helium dan krypton. Carbon monoksida dapat muncul ke atmosfer bila terjadi pembakaran karbon yang tidak sempurna, misalnya dari tungku atau dapur api dan motor bakar. kandungan gas ini di udara sebesar 1% saja sudah dapat berakibat fatal bagi kehidupan manusia.

Komposisi campuran udara kering tersebut dapat dinyatakan menurut beratnya, seperti diperlihatkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 komposisi Udara kering

| Gas            | Prosentase |
|----------------|------------|
| Nitrogen       | 77%        |
| Oksigen        | 22%        |
| Karbondioksida | 0,04%      |
| Gas lain       | 0,96%      |

Dewasa ini, udara murni yang bebas polutan merupakan komoditi yang sukar didapat, sehingga kegiatan purifikasi dan filtrasi cenderung semakin rumit dan sulit dilakukan. Debu, asap rokok, asap pabrik, asap kendaraan bermotor, bakteri, dan gas ringan lainnya merupakan kontaminan atau polutan yang telah mencemari udara atmosfer, khususnya udara di kota-kota besar. Sistem pengkondisian udara atau sistem tata udara berskala besar biasanya sudah membuang kontaminan tersebut, tetapi untuk kebanyakan sistem berskala rendah, untuk keperluan domestik atau skala rumah tangga belum dilengkapi dengan sistem filtrasi seperti itu.

Dalam sistem tata udara, semua faktor yang berkaitan dengan komposisi udara menjadi pertimbangan utama. Pengontrolan suhu merupakan suatu keniscayaan yang tak dapat dihindari lagi. Debu, kotoran, asap rokok, dan bau tak sedap harus dapat dieliminasi atau dikurangi hingga mencapai titik aman dan nyaman bagi manusia atau produk lainnya. Pengontrolan jumlah kandungan uap air atau tingkat kelembaban udara ruang, merupakan satu hal yang sangat penting karena hal tersebut langsung berkaitan dengan kenyamanan hunian atau dalam proses produksi di industri.

Udara yang terlalu kering, akan berakibat langsung pada dehidrasi, yaitu hilangnya sebagian besar cairan tubuh manusia, kulit menjadi kering dan bersisik. Disamping itu juga dapat merusak material lain seperti sayuran dan buah-buahan. Sedang udara yang terlalu basah, akan menyebabkan kurang nyaman, tidak bagus untuk kesehatan. Pada industri manufaktur tertentu, diperlukan ruang yang sangat bersih, bebas polutan dengan mengontrol secara cermat suhu, kelembaban dan polutan udara. Aktivitas ini lazim disebut sebagai ruang bersih atau clean room.

### 3.2 Campuran Uap air dan Udara Kering

Dari semua sifat-sifat udara yang mempunyai efek langsung terhadap proses pengkondisian udara selain suhu udara adalah kandungan uap air di udara atau kelembaban udara. Kandungan uap air di udara ruang merupakan sifat yang paling penting untuk dipertimbangkan. Uap air selalu ada di dalam setiap udara atmosfer dan jumlahnya dapat berpengaruh langsung terhadap kenyamanan. Suatu studi yang membahas tentang sifat-sifat atau karakteristik campuran udara kering dan uap air disebut Psikrometrik.

Kandungan uap air di udara bervariasi di setiap lokasi atau daerah. Di Daerah yang memiliki empat musim biasanya memiliki udara yang sangat kering artinya jumlah kandungan uap airnya sangat rendah. Di daerah tropis seperti Indonesia, kandungan uap air di udara sangat tinggi sehingga udaranya lembab. Dalam prakteknya, pengaturan jumlah kandungan uap air ini merupakan faktor yang memiliki kesulitan lebih tinggi dibandingkan dengan pengaturan suhu.

Seperti namanya uap air adalah bentuk gas dari air pada suhu di bawah titik uap air, yang nilainya tergantung pada tekanan atmosfer. Pada suhu dan tekanan barometer tertentu, uap air dapat berwujud gas atau liquid. Hal ini dapat dibuktikan dengan adanya formasi awan dan kabut. Kandungan uap air di udara dapat mencapai 1 hingga 3% dari total volume udara. Uap air dapat menguap pada tekanan yang sangat rendah. Misalnya, pada tekanan 29 inchi mercury di bawah nol, uap air akan menguap pada suhu 27 derajat celcius.

Jumlah kandungan uap di udara berpengaruh terhadap kelembaban udara. Kelembaban udara di suatu tempat dapat bertambah tinggi bila konsentrasi uap air di tempat tersebut ditambah. Dan sebaliknya bila konsentrasi uap airnya dikurangi maka tingkat kelembabannya akan turun. Pengurangan dan penambahan kandungan uap air di udara ruang merupakan salah satu kegiatan pengkondisian udara untuk kenyamanan. Karena tingkat konsentrasi uap air yang terkandung di udara ruang dapat berpengaruh terhadap kenyamanan penghuninya.

Untuk mengukur jumlah kandungan uap air di udara digunakan satuan grains per kilogram udara. Di mana 1 grain = 0,065gram.

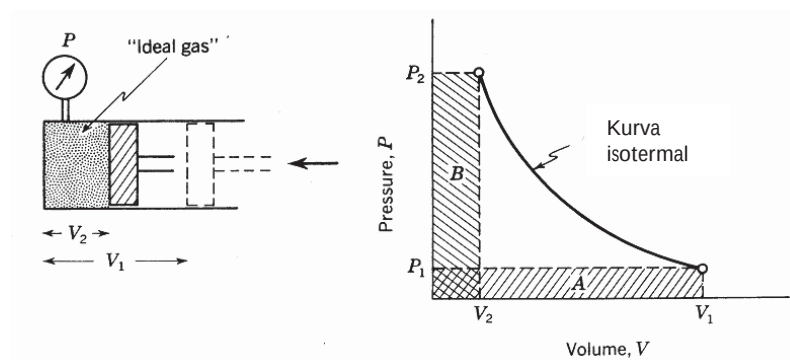
## Hukum Boyle

Hukum Boyle merupakan suatu pernyataan penting yang menyangkut sifat gas, yaitu pada suhu konstan, volume gas berbanding terbalik dengan tekanan absolutnya. Dalam formula matematika Hukum Boyle menjadi seperti berikut,

$$(P_1)(V_1) = (P_2)(V_2) \quad (3.1)$$

$$(P_1)/(V_2) = (P_2)/(V_1) \quad (3.2)$$

Hukum Boyle ini dapat diverifikasi melalui percobaan sederhana seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.1, yaitu percobaan pemampatan gas yang berlangsung pada suhu konstan.



Gambar 3.1 Gas di dalam silinder dikompresi tetapi suhu gas dipertahankan konstan. Dari kurva P-V diketahui, bahwa area yang ada di bawah kurva memiliki luas sama, yaitu  $(P_1)(V_1) = (P_2)(V_2)$ .

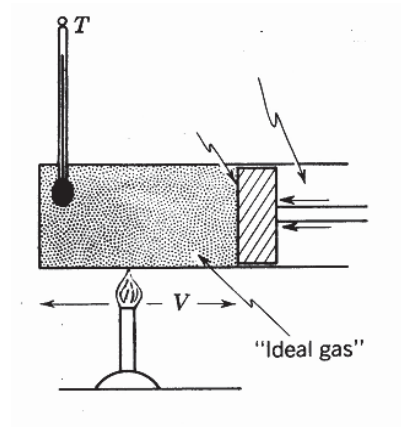
## Hukum Charles

Hukum Charles merupakan suatu pernyataan penting yang menyangkut sifat gas, yaitu pada tekanan konstan, volume gas berbanding lurus dengan suhu absolutnya. Dalam formula matematika Hukum Charles menjadi seperti berikut,

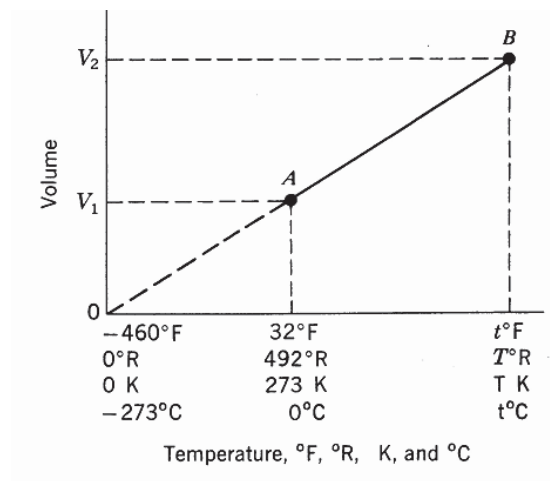
$$(V_1)(T_2) = (V_2)(T_1) \quad (3.3)$$

$$(V_1)/(V_2) = (T_1)/(T_2) \quad (3.4)$$

Hukum Charles ini dapat diverifikasi melalui percobaan sederhana seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.2, yaitu percobaan pemampatan gas yang berlangsung pada tekanan konstan.



Gambar 3.2 Gas di dalam silinder dipampatkan sedemikian sehingga suhu gas tetap konstan.



Gambar 3.3 Kurva V-T. Dari kurva V-T yang merupakan garis lurus diketahui bahwa ratio dua variabel pada titik A dan titik B mempunyai nilai sama, sehingga  $(V_1)/(V_2) = (T_1)/(T_2)$ .

Dari kedua hukum tersebut diperoleh formula baru, yaitu

$$\frac{(P1)(V1)}{T1} = \frac{(P2)(V2)}{T2} \quad (3.5)$$

Persamaan 3.5 menyatakan, untuk besaran masa dan jenis gas tertentu, maka perbandingan tekanan kali volume dengan suhu adalah konstan.

$$\frac{(P)(V)}{T} = \text{konstan} \quad (3.6)$$

Untuk jenis gas tertentu, dengan masa sebesar 1 kg, maka besaran volumenya dapat diganti dengan volume spesifik ( $v$ ), sehingga persamaan 3.6 dapat dituliskan menjadi,

$$\frac{(P)(v)}{T} = R \quad (3.7)$$

Dalam hal ini, R adalah konstanta gas yang besarnya berbeda untuk setiap gas. Tabel 3.2 memperlihatkan besaran R untuk beberapa jenis gas.

Dengan mengalikan kedua sisi persamaan 3.7 dengan masa  $m$ , didapat

$$(m)(P)(v) = (m)(R)(T), \quad \text{karena } (m)(v) = V, \text{ maka}$$

$$(P)(V) = (m)(R)(T) \quad (3.8)$$

Dalam hal ini  $P$  = tekanan absolut gas, dalam pascal (Pa)

$V$  = volume gas, dalam meter kubik ( $m^3$ )

$M$  = masa dalam kilogram (kg)

$R$  = konstanta gas dalam (J/kg.K)

$T$  = suhu absolut, dalam kelvin

$$\text{Suhu kelvin} = {}^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}\text{C}$$

Persamaan 3.8 dikenal dengan sebutan Hukum Gas Umum

Tabel 3.1 Beberapa Sifat Gas

| Gas             | K     | C <sub>p</sub><br>kJ/kg.K | C <sub>v</sub><br>kJ/kg.K | R<br>J/kg.K |
|-----------------|-------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| Udara           | 1,406 | 1,0000                    | 0,711                     | 287         |
| Amonia          | 1,273 | 2,1269                    | 1,6705                    | 487         |
| Karbon-dioksida | 1,28  | 0,8709                    | 0,6783                    | 189         |
| Karbonmonoksida | 1,403 | 1,0174                    | 0,7243                    | 297         |
| Hidrogen        | 1,41  | 14,277                    | 10,132                    | 4124        |
| Nitrogen        | 1,41  | 1,0216                    | 0,7243                    | 297         |
| Oksigen         | 1,4   | 0,9127                    | 0,6531                    | 260         |
| Sulfur-dioksida | 1,26  | 0,6448                    | 0,5150                    | 130         |

**Contoh 3.1** Sebuah tangki untuk kompresor udara mempunyai volume 2 m<sup>3</sup>. Tangki berisi udara dengan suhu 40°C. Bila meter tekanan pada tangki menunjukkan 7,5 bar, tentukan massa udara di dalam tangki?

*Solusi* dari Tabel 3.1, R udara adalah 287 J/kg.K. Tekanan absolut udara adalah 7,5 bar + 1 bar = 8,5 bar = 850.000 pascal, dengan menggunakan persamaan 3.8, didapat

$$m = \frac{(850.000) \text{ Pa} \times (2) \text{ m}^3}{(287) \text{ J / kg.K} \times (40 + 273) \text{ K}} = 18,95 \text{ kg}$$

**Contoh 3.2** 2 kilogram udara mempunyai volume 0,2 m<sup>3</sup>. Bila tekanan absolut udara 8,84 bar, tentukan suhu kelvin untuk udara?

*Solusi*

$$T = \frac{884.000 \text{ (Pa)} \times 0,2 \text{ (m}^3\text{)}}{2 \text{ (kg)} \times 287 \text{ (J / kg.K)}} = 308 \text{ K}$$

### Hukum Dalton tentang Tekanan parsial gas

Hukum Dalton tentang parsial gas, menyatakan bahwa dalam suatu campuran gas dan uap secara mekanik tidak bercampur secara kimiawi, misalnya udara kering dengan uap air, berlaku ketentuan sebagai berikut,

- (1) Total masa campuran merupakan penjumlahan masa dari setiap gas,  $m_t = m_a + m_w$
- (2) Setiap gas mempunyai volume sama,  $V_t = V_a = V_w$
- (3) Suhu absolute setiap gas sama,  $T_t = T_a = T_w$
- (4) Tekanan campuran, merupakan penjumlahan tekanan setiap gas,  $P_t = P_a + P_w$
- (5) Panas total (entalpi) campuran merupakan penjumlahan dari entalpi setiap gas,  $Q_t = Q_a + Q_w$

Dalam hal ini  $P_t$  = Tekanan absolut campuran gas, dalam lb/ft<sup>2</sup>  
 $P_a$  = tekanan parsial udara kering, dalam lb/ft<sup>2</sup>  
 $P_w$  = tekanan parsial uap air, dalam lb/ft<sup>2</sup>  
 $V_a$  = volume udara kering dalam ft<sup>3</sup>  
 $V_w$  = volume uap air dalam ft<sup>3</sup>  
 $m_a$  = masa udara kering, dalam lb  
 $m_w$  = masa uap air, dalam lb

### 3.3 Suhu Saturasi

Suhu di mana suatu fluida atau zat cair merubah dari fasa cair menjadi fasa uap atau gas, atau kebalikannya, yaitu dari fasa gas berubah menjadi fasa cair, disebut suhu saturasi. Ingat kembali proses perubahan wujud dalam Bab 2, Gambar 2.16. Liquid yang berada pada suhu saturasi disebut liquid saturasi dan uap atau gas yang berada pada suhu saturasi disebut uap saturasi. Satu hal penting yang perlu diketahui adalah, suhu saturasi untuk liquid (suhu di mana liquid akan menguap) dan suhu saturasi uap (suhu di mana uap mulai mengembun) adalah sama pada suatu tekanan tertentu.

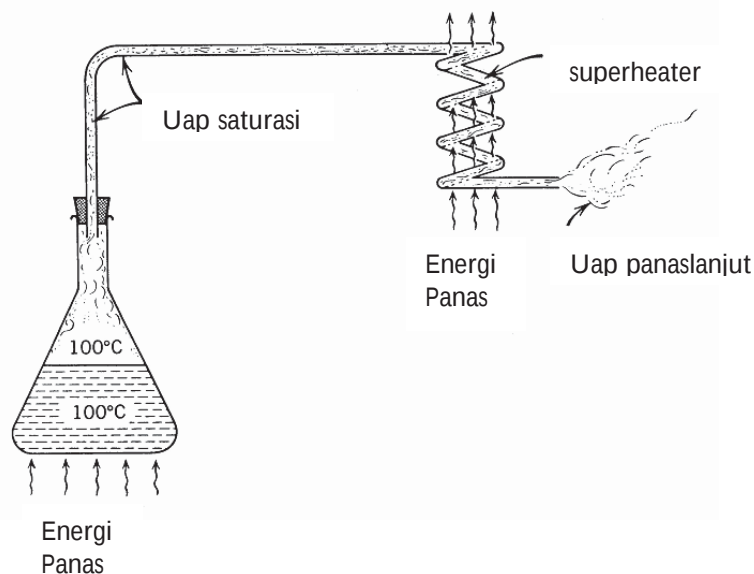
Pada suatu tekanan tertentu, suhu saturasi adalah suhu maksimum liquid dan suhu minimum uap yang dapat dicapai. Adanya usaha untuk menaikkan suhu liquid di atas suhu saturasi hanya akan menyebabkan menguapnya beberapa bagian dari liquid. Halnya yang

sama akan terjadi, bila adanya upaya untuk menurunkan suhu uap di bawah suhu saturasi uap, hanya akan menyebabkan beberapa bagian uap mengembun.

### 3.4 Uap Panas Lanjut

Uap yang berada di atas suhu saturasi uap tetapi tetap pada tekanan saturasi uap dikenal dengan sebutan uap panas lanjut (*superheated vapour*). Begitu fasa liquid telah berubah menjadi fasa uap (menguap), maka suhu uap tersebut dapat dinaikkan lagi dengan menambahkan energi panas kepadanya. Bila suhu uap sudah naik jauh di atas suhu saturasi uap, maka uapnya disebut mengalami pemanasan lanjut, dan energi yang digunakan untuk membuat panas lanjut uap, disebut sebagai panas lanjut (*superheat*).

Sebelum uap dapat dibuat berada dalam fasa panas lanjut, maka uap harus dipisahkan hubungannya dengan penguapan liquid. Demikian juga, uap panas lanjut yang akan diembunkan, pertamanya harus didinginkan hingga mencapai suhu saturasi pada tekanan saturasi liquid. Gambar 3.4 menjelaskan maksud tersebut.



Gambar 3.4 Proses pemanasan lanjut melalui alat pemisah superheater

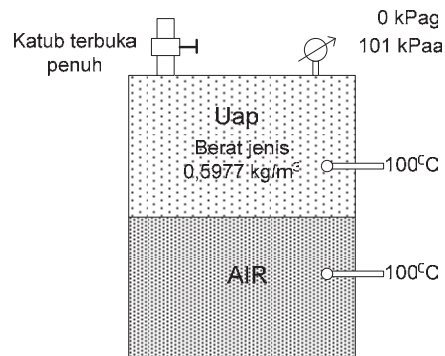
### 3.5 Cairan Superdingin

Bila setelah mengalami kondensasi (pengembunan), liquid hasil pengembunan tersebut dilanjutkan lagi proses pendinginanya sehingga suhu liquid turun di bawah suhu saturasi, liquid tersebut dikatakan menjadi superdingin (subcooled). Konsenskuensinya, suatu liquid pada suhu di bawah suhu saturasi liquid, disebut liquid superdingin.

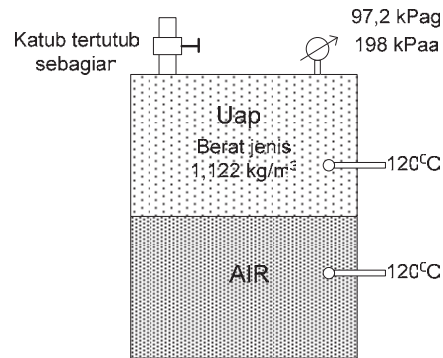
### 3.6 Efek Tekanan pada Suhu Saturasi

Suhu saturasi suatu fluida tergantung pada tekanan yang bekerja pada fluida tersebut. Kenaikan tekanan pada fluida akan menyebabkan naiknya suhu saturasi.

Untuk mengilustrasikan efek tekanan pada suhu saturasi liquid, asumsikan sebuah bejana berisi air seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.5. Meter tekanan pada bejana mengukur tekanan air di dalam bejana dan dua buah thermometer untuk mengukur suhu air dan suhu uap didalam bejana.



Gambar 3.5 Bejana air Katub terbuka penuh sehingga tekanan air di bejana sama dengan tekanan atmosfer 0 kPag. Suhu air dan suhu uap di dalam bejana sama 100°C. Berat jenis uap 0,5977 kg/m³.



Gambar 3.6 Bejana air Katub tertutup sebagian sehingga tekanan air di bejana naik menjadi 97,2 kPag atau 198,2 kPaa. Pada kondisi ini suhu air dan suhu uap naik menjadi 120°C, dan berat jenis uap naik menjadi 1,122 km/m<sup>3</sup>.

Dalam gambar 3.5, laju penguapan tidak berpengaruh terhadap suhu dan tekanan saturasi karena uapnya langsung keluar ke udara bebas sehingga berat jenis dan tekanan uap tidak naik atau turun.

Tetapi pada kasus gambar 3.6, karena katubnya tertutup sebagian, maka uap tidak bebas keluar. Adanya kenaikan laju penguapan, akan menyebabkan kenaikan berat jenis uap dan tekanan uap (naik menjadi 97,2 kPag). Hal ini mengakibatkan suhu saturasinya juga naik menjadi 120°C. Indeks g pada kPag, menyatakan bahwa angka tersebut diperoleh dari pengukuran meter tekanan (gauge) dan indeks a pada kPaa menyatakan tekanan absolut.

Kemudian, bila katub dibuka penuh kembali, maka secara berangsur-angsur uap akan bebas keluar. Tekanan uap akan turun kembali ke 0 kPag demikian juga berat jenis uap.

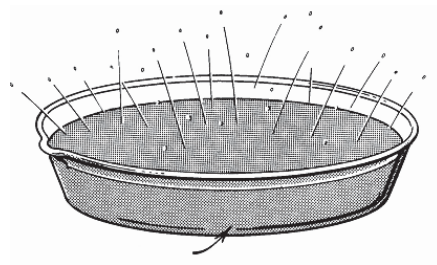
### 3.7 Evaporasi

Dalam contoh-contoh sebelumnya, kita dapat menguapkan air dengan cara menaikkan suhu air sehingga mencapai titik didihnya. Pada kondisi demikian maka secara gradual air berubah menjadi uap. Proses tersebut disebut penguapan atau vaporisasi. Proses penguapannya terjadi pada suhu di atas suhu saturasi. Pada kehidupan sehari-hari kita dapat melihat proses penguapan yang terjadi pada air sungai, air danau, dan pakaian basah. Cukup bukti, bahwa penguapan pada kondisi tersebut dapat terjadi pada suhu di bawah suhu saturasi. Air yang ada di suatu permukaan, misalnya

air yang berada permukaan bodi mobil, dengan mengabaikan suhunya, akan menguap secara gradual diserap oleh udara atmosfer.

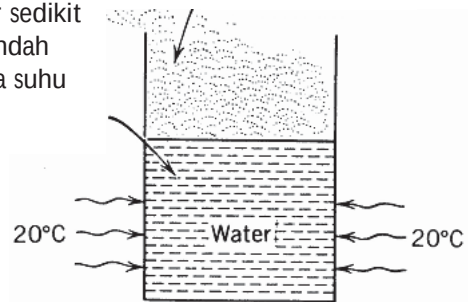
Penguapan air di bawah suhu saturasi dapat dijelaskan sebagai berikut. Molekul air akan berada dalam pergerakan dengan kecepatan konstan. Dalam pergerakannya, molekul akan bertumbukan dengan molekul lainnya, yang mengakibatkan kecepatannya lebih tinggi dari kecepatan rata-rata molekul lainnya. Sehingga energinya pun lebih tinggi dari energi rata-rata molekul lainnya. Bila ini berlangsung pada molekul yang ada dipermukaan air, maka molekul yang memiliki energi ekstra tinggi akan melepaskan diri dan ke udara dan menjadi molekul udara. Keadaan ini akan berlangsung secara terus menerus.

Pada suhu tertentu, beberapa jenis liquid akan menguap lebih cepat dari pada liquid lainnya. Liquid yang mempunyai titik didih paling rendah, yakni suhu saturasi paling rendah, pada tekanan tertentu akan menguap paling cepat. Pada kebanyakan liquid, laju evaporasinya naik bila suhunya juga naik atau bila tekanannya turun.



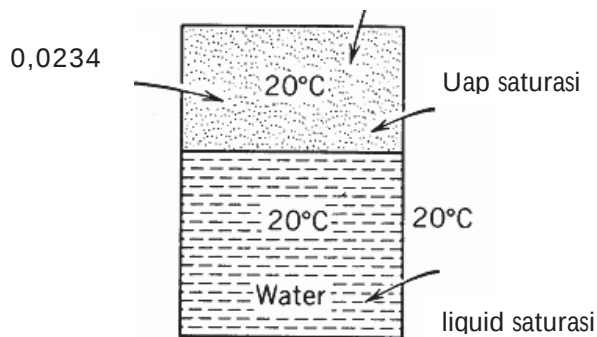
Gambar 3.7 Evaporasi yang berlangsung pada permukaan liquid

Suhu air sedikit  
lebih rendah  
daripada suhu  
udara

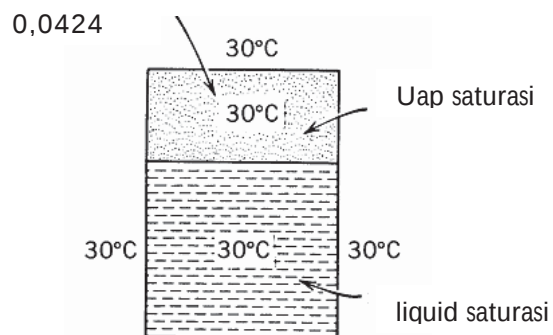


Gambar 3.8 Evaporasi dari permukaan air yang ada di dalam bejana terbuka.

Molekul tidak  
dapat keluar



Gambar 3.9 Molekul yang lepas dari permukaan air tidak dapat keluar dan kembali ke liquid. Suhu liquid dan suhu uap air sama dengan suhu udara, kondisinya menjadi saturasi



### 3.8 Kondensasi

Pada pembahasan sebelumnya sudah dibuktikan bahwa uap saturasi yang mengalami pendinginan akan mengalami proses kondensasi dan berubah fasanya menjadi liquid. Ini dapat terjadi karena uap tidak dapat mempertahankan fasa vapornya pada suhu di bawah suhu saturasi. Bila uap tersebut didinginkan, molekul uap tidak dapat mempertahankan energi dan kecepatannya untuk mengatasi gaya tarik antar molekul sebagai molekul uap, dan berubah menjadi molekul liquid. Bila kondensasi berlangsung, dan volume tetap, maka tekanan dan berat jenis uap turun, sehingga suhu saturasinya juga turun.

### 3.9 Suhu Titik Embun (dew point)

Perlu diketahui, kenyataannya uap air yang terkandung di udara atmosfer adalah uap bertekanan rendah. Seperti halnya dengan uap bertekanan tinggi, uap bertekanan rendahpun akan dapat berada dalam kondisi saturasi pada suhu dan tekanan tertentu. Tekanan dan suhu di mana udara kering dan uap air mencapai kondisi saturasi, disebut tekanan dan suhu saturasi. Tabel 3.2 menunjukkan suhu dan tekanan saturasi udara kering dan uap air.

Dalam kondisi saturasi, campuran air dan uap air menempati volume sama, demikian juga suhu dan tekanannya. Bila udara kering berada pada suhu di atas suhu saturasinya, sesuai dengan tekanan parsial uap air, maka kondisi uap air akan berubah menjadi kondisi *superheat* (panas lanjut). Di lain pihak, bila udara kering berada pada suhu yang sama dengan suhu saturasi sesuai dengan tekanan parsial uap airnya, maka uap air yang ada di udara menjadi saturasi.

Suhu, di mana uap air yang terkandung di udara menjadi saturasi disebut sebagai suhu titik embun dari udara. (dew point temperature). Suhu titik embun udara atmosfer selalu suhu saturasi sesuai dengan tekanan parsial yang diterima uap air. Jadi, bila tekanan saturasi parsial dari uap air diketahui, maka suhu titik embun dari udara atmosfer dapat ditentukan dari Tabel 3.2. Sebaliknya bila suhu titik embun udara diketahui, maka tekanan parsial uap airnya juga dapat diketahui dari Tabel 3.3.

Pada titik suhu tertentu maka uap air yang terkandung di udara ruang akan merubah wujud menjadi liquid atau mengembun. salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam merencanakan pengkondisian ruangan adalah suhu titik embun.

Suhu titik embun adalah suhu udara pada tekanan atmosfer di mana uap air di udara mulai mengembun merubah wujud menjadi titik-titik embun. Penerapan dari fenomena ini dapat ditemukan di almari es. Dengan dipasangnya mullion heater yaitu pemanas yang diletakkan di sepanjang pintu almari es maka dinding almari es tidak menjadi basah akibat mengembunnya uap air yang terkandung di udara sekitarnya.

Tabel 3.3 Sifat Air, saturasi liquid dan saturasi uap

| Suhu<br>°C | Tekanan<br>Saturasi<br>bar | Volume spesifik<br>m <sup>3</sup> /kg |       | Entalpi<br>kJ/kg |        |
|------------|----------------------------|---------------------------------------|-------|------------------|--------|
|            |                            | Liquid                                | uap   | liquid           | uap    |
| 0          | 0,006108                   | 0,0010002                             | 206,3 | 0,04             | 2501,6 |
| 2          | 0,007055                   | 0,0010001                             | 179,0 | 8,39             | 2505,2 |
| 4          | 0,008129                   | 0,0010000                             | 157,3 | 16,8             | 2508,9 |
| 6          | 0,009345                   | 0,0010000                             | 137,8 | 25,21            | 2512,6 |
| 8          | 0,010720                   | 0,0010001                             | 121,0 | 33,6             | 2516,2 |
| 10         | 0,012270                   | 0,0010003                             | 106,4 | 41,99            | 2519,9 |
| 12         | 0,014014                   | 0,0010004                             | 93,84 | 50,38            | 2523,6 |
| 14         | 0,015973                   | 0,0010007                             | 82,90 | 58,75            | 2527,2 |
| 16         | 0,018168                   | 0,0010010                             | 73,38 | 67,13            | 2530,9 |
| 18         | 0,020620                   | 0,0010013                             | 65,09 | 75,5             | 2534,5 |
| 20         | 0,023370                   | 0,0010017                             | 57,84 | 83,86            | 2538,2 |
| 22         | 0,026420                   | 0,0010022                             | 51,49 | 92,23            | 2541,8 |
| 24         | 0,029820                   | 0,0010026                             | 45,93 | 100,59           | 2545,5 |
| 26         | 0,033600                   | 0,0010032                             | 41,03 | 108,95           | 2549,1 |
| 28         | 0,037780                   | 0,0010037                             | 36,73 | 117,31           | 2552,7 |
| 30         | 0,042410                   | 0,0010043                             | 32,93 | 125,66           | 2556,4 |

|    |          |           |       |        |        |
|----|----------|-----------|-------|--------|--------|
| 32 | 0,047530 | 0,0010049 | 29,57 | 134,02 | 2560,0 |
| 34 | 0,053180 | 0,0010056 | 26,6  | 142,38 | 2563,6 |
| 36 | 0,059400 | 0,0010063 | 23,97 | 150,74 | 2567,2 |
| 38 | 0,066240 | 0,0010070 | 21,63 | 159,09 | 2570,8 |
| 40 | 0,073750 | 0,0010078 | 19,55 | 167,45 | 2574,4 |
| 42 | 0,081980 | 0,0010086 | 17,69 | 175,81 | 2577,9 |
| 44 | 0,091000 | 0,0010094 | 16,04 | 184,17 | 2581,5 |
| 46 | 0,10086  | 0,0010103 | 14,56 | 192,53 | 2585,1 |
| 48 | 0,11162  | 0,0010112 | 13,23 | 200,89 | 2588,6 |
| 50 | 0,12335  | 0,0010121 | 12,05 | 209,26 | 2592,2 |
| 52 | 0,13613  | 0,0010131 | 10,98 | 217,62 | 2595,7 |
| 54 | 0,15002  | 0,0010140 | 10,02 | 225,98 | 2599,2 |
| 56 | 0,16511  | 0,0010150 | 9,159 | 234,35 | 2602,7 |
| 58 | 0,18147  | 0,0010161 | 8,381 | 242,72 | 2606,2 |
| 60 | 0,19920  | 0,0010171 | 7,679 | 251,9  | 2609,7 |
| 62 | 0,2184   | 0,0010182 | 7,004 | 259,46 | 2613,2 |
| 64 | 0,2391   | 0,0010193 | 6,469 | 267,84 | 2616,6 |
| 66 | 0,2615   | 0,0010205 | 5,948 | 276,21 | 2620,1 |
| 68 | 0,2856   | 0,0010217 | 5,475 | 284,59 | 2623,5 |
| 70 | 0,3116   | 0,0010228 | 5,046 | 292,97 | 2626,9 |
| 72 | 0,3396   | 0,0010241 | 4,656 | 301,35 | 2630,3 |
| 74 | 0,3696   | 0,0010253 | 4,300 | 309,74 | 2633,7 |
| 76 | 0,4019   | 0,0010266 | 3,976 | 318,13 | 2637,1 |
| 78 | 0,5365   | 0,0010279 | 3,680 | 326,52 | 2640,4 |
| 80 | 0,4736   | 0,0010292 | 3,409 | 334,92 | 2643,8 |
| 82 | 0,5133   | 0,0010305 | 3,162 | 343,31 | 2647,1 |
| 84 | 0,5557   | 0,0010319 | 2,935 | 351,71 | 2650,4 |
| 86 | 0,6011   | 0,0010333 | 2,727 | 360,12 | 2653,6 |
| 88 | 0,6495   | 0,0010347 | 2,536 | 368,53 | 2656,9 |

|     |        |           |       |        |        |
|-----|--------|-----------|-------|--------|--------|
| 90  | 0,7011 | 0,0010361 | 2,361 | 376,94 | 2660,1 |
| 92  | 0,7561 | 0,0010376 | 2,200 | 385,36 | 2663,4 |
| 94  | 0,8146 | 0,0010391 | 2,052 | 393,78 | 2666,6 |
| 96  | 0,8769 | 0,0010406 | 1,915 | 402,20 | 2669,7 |
| 98  | 0,9430 | 0,0010421 | 1,789 | 410,63 | 2672,9 |
| 100 | 1,0133 | 0,0010437 | 1,673 | 419,06 | 2676,0 |

**Contoh 3.3** Asumsikan suatu udara ruang mempunyai suhu  $26^{\circ}\text{C}$  (terukur dengan thermometer), dan tekanan saturasi parsial yang diterima oleh uap air yang terkandung di dalam udara tersebut adalah 0,012270 bar. Tentukan suhu titik embun dari udara tersebut?

*Solusi* Dari Tabel 3.2, diketahui bahwa suhu saturasi uap sesuai tekanan saturasi parsial 0,012270 adalah  $10^{\circ}\text{C}$ . Jadi suhu titik embun udara tersebut adalah  $10^{\circ}\text{C}$ .

**Contoh 3.4** Suhu udara di ruang tertentu terukur dengan thermometer sebesar  $26^{\circ}\text{C}$ . Diketahui suhu titik embun di ruangan tersebut adalah  $16^{\circ}\text{C}$ . Tentukan tekanan saturasi parsial yang diterima oleh uap air yang terkandung di dalam udara ruang tersebut?

*Solusi* Dari Tabel 3.2, diketahui tekanan saturasi pada suhu  $16^{\circ}\text{C}$  adalah 0,018168 bar. Ini adalah tekanan parsial yang diterima oleh uap airnya.

### 3.10 Kandungan Uap air Maksimum

Kandungan uap air yang dapat bercampur dengan udara kering tergantung pada suhu udara. Karena jumlah uap air di udara menentukan tekanan parsial pada uap air, maka sudah pasti, udara akan dapat mengandung uap air maksimum bila uap air di udara menerima tekanan parsial maksimum. Karena tekanan parsial maksimum yang dapat diterima oleh uap air merupakan tekanan

saturasi yang berhubungan langsung dengan suhu saturasi, maka udara akan mengandung uap air maksimum (mempunyai berat jenis uap air maksimum) ketika tekanan yang diterima uap air sama dengan tekanan saturasi pada suhu udara tersebut. Pada kondisi ini, suhu udara dan suhu bola kering menjadi sama, dan udara dikatakan menjadi saturasi. Sebagai catatan, semakin tinggi suhu udara, semakin tinggi pula tekanan parsial maksimum dan semakin tinggi pula kandungan uap air di udara.

### 3.11 Kelembaban Absolut

Kandungan uap air di udara lazim disebut sebagai kelembaban udara. Kelembaban absolut udara pada suatu kondisi adalah masa uap air setiap satuan volume udara pada kondisi tersebut dan dinyatakan sebagai berat jenis uap air. Kelembaban absolut atau berat jenis uap air dinyatakan dalam satuan gram per meter kubik atau kilogram per meter kubik. Kembali ke Hukum Dalton, bahwa masa uap air aktual per satuan volume udara (berat jenis uap air) adalah semata-mata merupakan fungsi dari suhu bola kering udara

Karena tekanan uap air pada udara sangat rendah, maka uap air yang terkandung di udara juga dapat dianggap sebagai gas ideal, sehingga perhitungannya dapat menggunakan formula gas ideal. Persamaan 3.8 dan Tabel 3.3

**Contoh 3.5** Tentukan kelembaban absolut udara sampel yang mempunyai suhu titik embunnya 20°C. Anggaplah nilai konstanta gas adalah 461 J/kg.K

**Solusi** Dari Tabel 3.3, tekanan uap air pada suhu saturasi 20°C adalah 0,02337 bar. Anggaplah volume udara  $V=1 \text{ m}^3$ . Dengan menggunakan formula 3.8 didapat jumlah masa per meter kubik, yaitu:

$$m = \frac{(P)(V)}{(R)(T)} = \frac{2337(\text{Pa}) \times 1(\text{m}^3)}{461(\text{J/kg.K}) \times (20 + 273)\text{K}} = 0,01729 \text{ kg}$$

Jadi tekanan  $P = 0,01729 \text{ kg/m}^3$

Kelembaban absolut dapat juga ditentukan secara langsung dengan menggunakan tabel 3.3. Misalnya pada contoh 3.5, volume spesifik untuk uap saturasi pada suhu 20°C adalah 57,84 m<sup>3</sup>/kg. Jadi kelembaban absolutnya adalah  $1 / 57,84 \text{ m}^3/\text{kg} = 0,017289 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.12 Kelembaban Relatif

Kelembaban relatif (RH), dinyatakan dalam persen (%), adalah perbandingan antara tekanan parsial aktual yang diterima uap air dalam suatu volume udara tertentu dengan tekanan parsial yang diterima uap air pada kondisi saturasi pada suhu udara saat itu. Jadi:

$$RH = \frac{\text{Tekanan parsial aktual}}{\text{Tekanan parsial saturasi}} \quad (3.9)$$

Untuk keperluan praktis, RH seringkali dinyatakan sebagai suatu perbandingan yang dinyatakan dalam persen (%) antara berat jenis uap air aktual dengan berat jenis uap air pada keadaan saturasi.

**Contoh 3.6** Suatu udara sampel mempunyai suhu 26°C. Suhu titik embunnya 10°C. Tentukan %RH.

Solusi Dari Tabel 3.3, tekanan parsial uap air pada suhu titik embun 10°C adalah 0,012270 bar. Tekanan parsial pada titik embun 26°C adalah 0,03360 bar. Dengan formula 3.9, didapat

$$RH = \frac{0,012270(\text{bar})}{0,03360(\text{bar})} \times 100 = 36,5\%$$

**Contoh 3.7** tentukan RH udara dala contoh 3.6, bila suhu udara diturunkan menjadi 16°C.?

*Solusi* Karena kandungan uap di udara tetap konstan, maka suhu titik embunnya juga tetap sama. Dari tabel 3.3, tekanan parsial uap air pada suhu 10°C dan pada suhu 16°C adalah 0,012270 bar dan 0,018168 bar. Sehingga RH adalah

$$RH = \frac{0,012270(\text{bar})}{0,018168(\text{bar})} \times 100 = 67,5\%$$

### 3.13 Kelembaban Spesifik

Kelembaban spesifik atau ratio kelembaban ( $w$ ), dinyatakan dalam besaran masa uap air yang terkandung di udara per satuan masa udara kering yang diukur dalam gram per kilogram dari udara kering (gr/kg) atau kg/kg.

Pada tekanan barometer tertentu, kelembaban spesifik merupakan fungsi dari suhu titik embun. Tetapi karena penurunan tekanan barometer menyebabkan volume per satuan masa udara naik, maka kenaikan tekanan barometer akan menyebabkan kelembaban spesifik menjadi turun. Hal ini dinyatakan dengan formula:

$$w = \frac{(0,622) \times (P_w)}{(P) - (P_w)} \quad (3.10)$$

Dalam hal ini,  $w$  = ratio kelembaban dalam kg/kg

$P_w$  = tekanan parsial uap air

pada suhu titik embun, dalam pascal

$P$  = Tekanan barometer, dalam pascal

**Contoh 3.8** Tentukan ratio kelembaban suatu udara sampel yang mempunyai suhu 26°C pada tekanan barometer standar. Suhu titik embunnya adalah 10°C.

*Solusi* Dari Tabel 3.3, tekanan parsial uap air pada suhu titik embun 10°C adalah 0,012270 bar dan tekanan atmosfer normal adalah 101.000 pascal. Dengan formula 3.10, didapat

$$w = \frac{0,622(kg / kg)(1227(Pa))}{101.000(Pa) - 1227(Pa)} = 0,00762 \text{ kg/kg atau}$$

$$w = 7,62 \text{ g/kg}$$

**Contoh 3.9** Tentukan ratio kelembaban ( $w$ ) dari uadar sampel pada contoh 3.8, jika uap air di udara mengalami saturasi pada suhu udara tersebut.

Solusi dari tabel 3.3, tekanan parsial pada suhu titik embun 26oC adalah 3360 Pa. Dengan formula 3.10 didapat

$$w = \frac{0,622(kg / kg)(3360(Pa))}{101.000(Pa) - 3360(Pa)} = 0,02133 \text{ kg/kg}$$

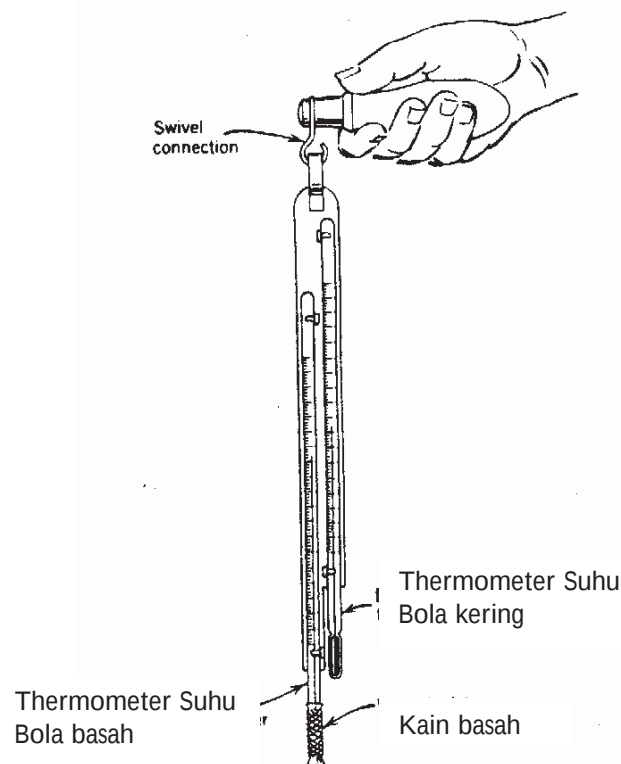
### 3.14 Suhu Bola Kering dan Suhu Bola Basah

Thermometer yang lazim digunakan untuk mengukur suhu adalah thermometer bola kering. Bila sensor panas (bulb) Thermometer yang digunakan untuk mengukur suhu dijaga dalam kondisi kering maka thermometernya disebut sebagai thermometer bola kering.

Hasil pengukuran suhu dengan alat ini disebut sebagai : Suhu Bola Kering. Dalam keadaan biasa , bila ukuran suhu tersebut tidak diberi penjelasan khusus maka dianggap sebagai ukuran bola kering. Sebagai contoh : 20 °C bola kering atau cukup dengan : 20 °C.

Bila sensor panas (bulb) thermometer yang digunakan sengaja dikondisikan menjadi basah, yaitu sengaja ditutup oleh kain yang higroskopis maka ukuran suhu yang diperoleh disebut sebagai ukuran suhu bola basah. Dalam kondisi biasa maka adanya cairan yang melingkupi sensor panas ini maka penunjukan skala suhu bola basah akan lebih rendah dengan penunjukan suhu bola kering. Tetapi bila kandungan uap air di udara mencapai titik maksimalnya (titik jenuh) maka penunjukkan kedua jenis thermometer tersebut menjadi sama.

Dalam keadaan jenuh maka cairan yang ada disekeliling bulb thermometer tidak dapat menguap lagi sehingga penunjukkan thermometer basah menjadi sama dengan thermometer bola kering. Tetapi bila kondisi udara ruang belum mencapai saturasi maka penunjukkan thermometer bola basah selalu lebih rendah dari bola kering, akibat adanya efek penguapan cairan yang terjadi pada thermometer bola basah. Alat khusus dapat digunakan untuk mengukur bola basah dan bola kering disebut Sling Psychrometer.



Gambar 3.10 Sling Psychrometer

Psychrometer terbuat dari dua thermometer, satu bola kering dan satu lagi bola basah yang dipasang berdampingan pada suatu papan dan dilengkapi dengan handel pemutar, sehingga susunan tersebut mudah diputar. Dalam penggunaannya sling diputar selama satu menit, kemudian di baca penunjukan kedua thermometer bola kering dan bola basah.

Presedur Menggunakan Slink Psikrometer:

1. Periksa pembacaan kedua thermometer sebelum digunakan.
2. Basahi selongsong higroskopis dengan air
3. Putar Slink psikrometer kurang lebih selama 20 detik dengan kecepatan putar sekitar 150 rpm.
4. Baca skala Wet Bulb terlebih dahulu segera setelah pemutaran selesai dilakukan. Kemudian baru membaca skala dry Bulb thermometernya.
5. Dapatkan minimal tiga kali pembacaan untuk dapat memperoleh hasil yang lebih akurat. Setiap kali pembacaan pastikan selongsong kain senantiasa dalam keadaan basah.
6. Catat hasil pembacaan dan plot-kan pada chart psikrometrik untuk memperoleh data-data lain yang diperlukan.

### 3.15 Proses Transfer Panas

Dilihat dari prosesnya maka tata udara merupakan proses transfer panas. Proses transfer panas ini berlangsung melalui suatu medium yaitu udara. Misalnya untuk menurunkan suhu udara suatu ruang maka udara yang bersuhu lebih dingin disalurkan ke dalam ruang tersebut. Udara dingin diperoleh dengan menyalurkan udara yang bersuhu lebih panas melalui koil pendingin.

Dalam hal ini energi panas yang ada di udara yang bersuhu lebih tinggi tersebut dipindahkan ke fluida pendingin melalui kontak langsung dengan permukaan koil pendingin yang dingin. Akibatnya udara yang telah melewati coil pendingin menjadi dingin, sebaliknya fluida yang ada di dalam coil pendingin menjadi lebih hangat.

Karena proses tata udara berkaitan erat dengan proses pemindahan panas, maka marilah kita ulangi lagi fenomena-fenomena fisik dan termis berikut ini :

- (a) Panas adalah suatu bentuk energi yang aktif, seperti energi listrik.
- (b) Panas dapat dipindahkan melalui 3 cara, yaitu : Konduksi, konveksi dan radiasi.
- (c) Konduksi adalah pemindahan panas melalui benda padat, di mana energi panasnya dipindahkan dari satu molekul ke

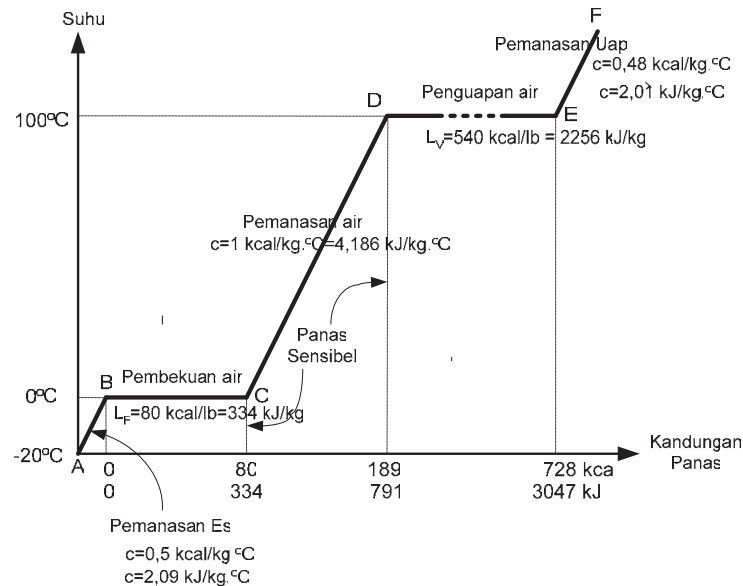
molukul lain dari benda tersebut. Contoh, pemindahan panas melalui sepotong besi.

- (d) Konveksi adalah pemindahan panas melalui benda cair dan gas. Di mana molukul-molukul benda membawa energi panas dari satu titik ke titik lainnya. Contoh, pemindahan panas di dalam air.
- (e) Radiasi adalah pemindahan panas melalui gerakan gelombang cahaya dan gelombang elektromagnetik melalui medium transparan tanpa berpengaruh terhadap pemanasan mediumnya. Contoh Sinar matahari.
- (f) Panas Sensibel, adalah jumlah energi panas (dalam satuan BTU) yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan suhu benda. Jadi untuk menaikkan atau menurunkan suhu suatu benda dibutuhkan sejumlah energi panas.
- (g) Panas Spesifik, yaitu energi panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu benda sebesar satu derajat fahrenheit untuk setiap pound berat benda. Tabel 3.4 memperlihatkan tabel panas spesifik beberapa benda berikut panas latennya.
- (h) Panas laten, yaitu jumlah energi panas yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan wujud benda. Misalnya, bila air diubah wujudnya menjadi gas atau uap, maka diperlukan sejumlah panas yang disebut sebagai panas laten. Dalam hal ini dibedakan panas laten penguapan dan panas laten pengembunan. Selama proses perubahan wujud tersebut maka suhu benda tidak berubah.

Tabel 3.4 Panas Spesific dan Panas Laten

| Nama Benda     | Panas Spesific   | Panas Laten      |
|----------------|------------------|------------------|
| 1. Air         | 4,19 (evaporasi) | 335 (kondensasi) |
| 2. Air         |                  | 2257 (evaporasi) |
| 3. Daging sapi | 3,14 (segar)     |                  |
| 4. Daging sapi | 1,67 (beku)      | 228              |
| 5. Brokoli     | 3,77 (segar)     |                  |
| 6. Brokoli     | 2,01 (beku)      | 314              |
| 7. Melon       | 3,81 (segar)     |                  |
| 8. Melon       | 1,92 (beku)      | 267              |

Untuk lebih mendalami permasalahan tersebut, kembali kita bahas kurva T-H



#### PENJELASAN :

Garis A-B memperlihatkan proses pemanasan es hingga mencapai titik cair es pada tekanan atmosfer. Dalam proses ini panas yang diambil hanya untuk merubah suhu sehingga disebut : panas sensibel. (A-B)

Garis B-C memperlihatkan proses pencairan es untuk merubah wujud es menjadi air. Oleh karena itu energi panas yang diambil disebut : panas laten. (BC). Selama proses perubahan wujud energi panas yang diserap semata-mata hanya untuk perubahan wujud, sehingga suhu air tidak berubah. Pada titik C disebut liquid saturasi.

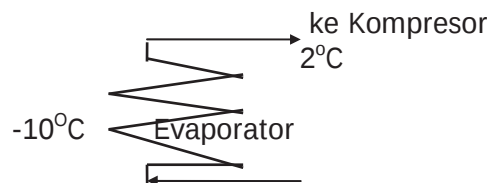
Garis C-D memperlihatkan proses pemanasan air, untuk menaikkan suhu air hingga mencapai suhu titik didih 100°C. Energi panas yang hanya digunakan untuk merubah suhu air. Energi panas yang diserap merupakan panas sensibel.

Garis D-E memperlihatkan proses penguapan air untuk merubah wujud air menjadi uap. Oleh karena itu energi panas yang

diambil disebut : panas laten. Selama proses perubahan wujud energi panas yang diserap semata-mata hanya untuk perubahan wujud, sehingga suhu air tidak berubah. Pada titik E ini disebut uap saturasi.

Garis E-F memperlihatkan proses pemanasan uap lanjut, untuk menaikkan suhu uap hingga mencapai suhu di atas suhu saturasi. Energi panas yang hanya digunakan untuk merubah suhu uap. Energi panas yang diserap merupakan panas sensibel.

- (i) Superheat, adalah istilah yang lazim digunakan pada pengaturan katub ekspansi thermostatik. Secara fisik superheat adalah panas sensibel yang diserap oleh liquid refrigeran untuk menaikkan suhunya tanpa perubahan tekanan yang berarti pada saat ia berubah wujud menjadi gas. Bila suhu evaporasi sebesar 10 derajat dibawah nol dan suhu gas refrigeran hasil evaporasi sebesar 2 derajat di atas nol berarti refrigerannya mempunyai superheat sebesar 12 derajat.



- (j) Hubungan Tekanan dan Suhu Gas, merupakan fenomena yang sangat menarik seperti yang dinyatakan dalam Hukum Charles. Bahwa Tekanan dan suhu gas mempunyai hubungan positif artinya bila suhu gas naik maka tekanannya juga naik demikian pula sebaliknya.

Tetapi pada suhu 455 derajat fahrenheit di bawah nol, hubungan itu tidak berlaku lagi. Oleh karena itu suhu sebesar  $-455^{\circ}\text{F}$ , disebut sebagai titik nol absolut untuk skala Fahrenheit. Hal ini dilakukan agar tidak bertentangan dengan hukum konservasi energi yang menyatakan bahwa suatu materi tidak dapat dibuat atau dilenyapkan. Bila ditransfer ke skala Celcius maka titik nol absolut menjadi  $-273^{\circ}\text{C}$ .

## Permasalahan

1. Sebuah tangki untuk kompresor udara mempunyai volume  $2,5 \text{ m}^3$ . Tangki berisi udara dengan suhu  $40^\circ\text{C}$ . Bila meter tekanan pada tangki menunjukkan 7 bar, tentukan masa udara di dalam tangki?
2. Asumsikan suatu udara ruang mempunyai suhu  $28^\circ\text{C}$  (terukur dengan thermometer), dan tekanan saturasi parsial yang diterima oleh uap air yang terkandung di dalam udara tersebut adalah 0,012270 bar. Tentukan suhu titik embun dari udara tersebut?
3. Suhu udara di ruang tertentu terukur dengan thermometer sebesar  $30^\circ\text{C}$ . Diketahui suhu titik embun di ruuag tersebut adalah  $16^\circ\text{C}$ . Tentukan tekanan saturasi parsial yang diterima oleh uap air yang terkandung di dalam udara ruang tersebut?
4. Tentukan kelembaban absolut udara sampel yang mempunyai suhu titik embunnya  $18^\circ\text{C}$ . Anggaplah nilai konstanta gas adalah  $461 \text{ J/kg.K}$
5. Tentukan ratio kelembaban suatu udara sampel yang mempunyai suhu  $29^\circ\text{C}$  pada tekanan barometer standar. Suhu titik embunnya adalah  $12^\circ\text{C}$

---

# PSIKROMETRIK CHART

4

---

## Kerangka Isi

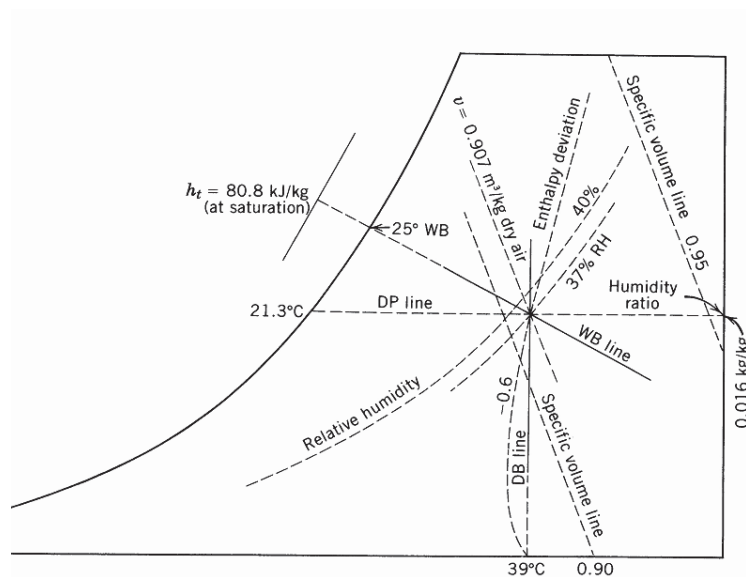
- 4.1 Pemetaan Psikrometrik Chart
- 4.2 Pengenalan letak Garis Skala pada chart
- 4.3 Definisi Istilah dan Pemetaan (plotting) pada Chart
- 4.4 Cara Membaca Chart
- 4.5 Perubahan Kondisi Udara Ruang
- 4.6 Pemanasan udara tanpa Penambahan Uap Air
- 4.7 Pemanasan dengan Penambahan Uap Air
- 4.8 Pendinginan tanpa Pengurangan Uap Air
- 4.9 Pendinginan dengan Pengurangan Uap air
- 4.10 Percampuran Udara

*Psychrometric Chart* atau Chart psikrometrik merupakan hasil karya jenius peninggalan kakek moyang kita yang berhubungan dengan karakteristik udara. Dengan adanya chart ini maka perencanaan tata udara menjadi lebih sederhana, karena tidak perlu menggunakan hitungan matematis yang rumit. Chart psikrometrik merupakan tampilan secara grafikal sifat termodinamik udara antara lain suhu, kelembaban, enthalpi, kandungan uap air dan volume spesifik. Dalam chart ini dapat langsung diketahui hubungan antara berbagai parameter udara secara cepat dan persisi, baik yang berkaitan dengan sifat fisik udara maupun sifat termiknya.

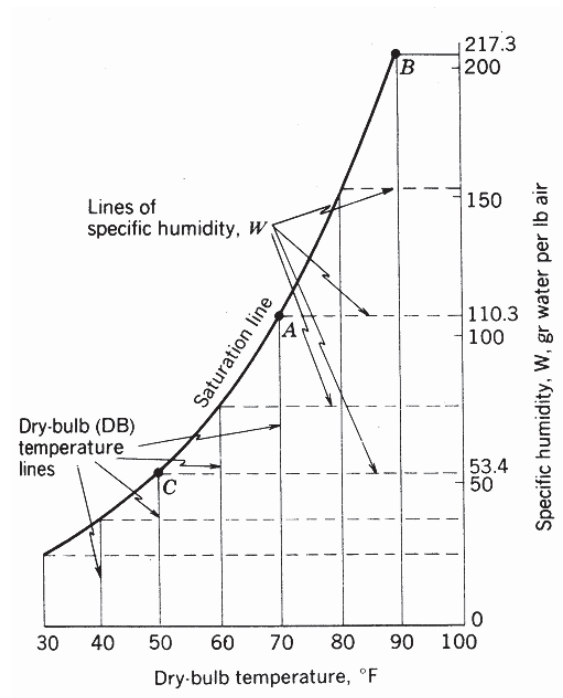
#### 4.1 Pemetaan Psikrometrik Chart

Cara terbaik memahami psikrometrik chart adalah mengobservasi bagaimana letak dan posisi setiap garis kurva diletakkan atau dipetakan pada psikrometrik chart. Psikrometrik chart menyatakan hubungan antara suhu bola kering, suhu bola basah, suhu titik embun, kelembaban relatif, panas total (entalpi), volume spesifik, kelembaban spesifik, panas sensibel dan panas laten. Anda akan memerlukan banyak fotokopi psikrometrik chart untuk menyelesaikan masalah-masalah pendinginan dan pemanasan yang ada di buku ini.

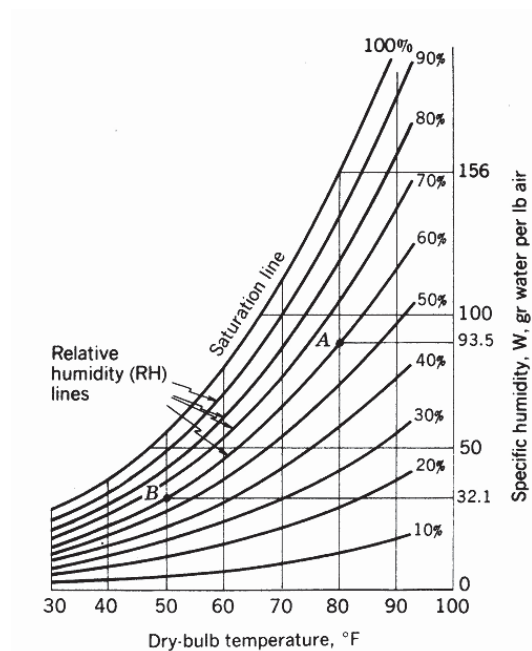
#### 4.2 Pengenalan letak garis skala pada Chart



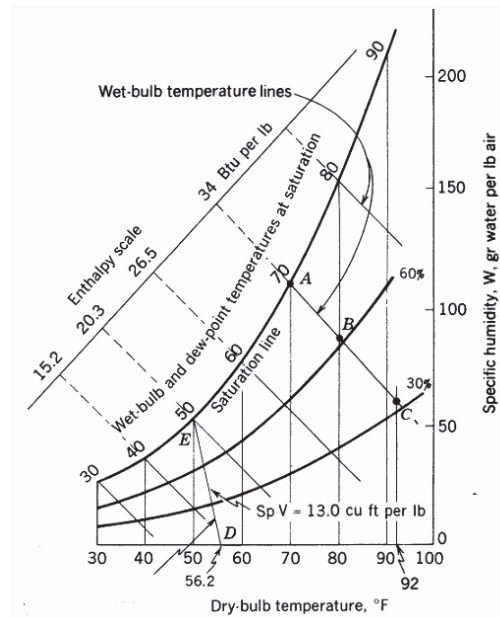
Gambar 4.1 Tipikal pemetaan garis skala Psikrometrik chart



Gambar 4.2 Tipikal pemetaan garis skala Suhu bola kering (DB), Kelembaban Spesifik (specific humidity,  $w$ ), dan garis saturasi (saturation line)



Gambar 4.3 Tipikal Pemetaan garis skala kelembaban relatif atau relative humidity (RH).



Gambar 4.4 Tipikal Pemetaan garis skala volume spesifik yang segaris dengan suhu bola basah (wet bulb), suhu titik embun (dew point temperature) dan entalpi.

### 4.3 Definisi Istilah dan Plotting pada Chart

Berikut ini dijelaskan tujuh parameter udara terpenting yang digunakan untuk keperluan perancangan air conditioning. Chart yang digunakan sebagai acuan adalah chart psikrometrik yang disusun oleh Carrier dengan mengacu pada kondisi atmosfer normal.

#### Dry-bulb Temperature (DB)

DB adalah suhu udara ruang yang diperoleh melalui pengukuran dengan Slink Psikrometer pada thermometer dengan bulb kering. Suhu DB diplotkan sebagai garis vertikal yang berawal dari garis sumbu mendatar yang terletak di bagian bawah chart. Suhu DB ini merupakan ukuran panas sensibel. Perubahan suhu DB menunjukkan adanya perubahan panas sensibel.

#### Wet-bulb Temperature (WB)

WB adalah suhu udara ruang yang diperoleh melalui pengukuran dengan Slink Psikrometer pada thermometer dengan bulb basah. Suhu WB diplotkan sebagai garis miring ke bawah yang berawal dari garis saturasi yang terletak di bagian samping kanan chart. Suhu WB ini merupakan ukuran panas total (enthalpi). Perubahan suhu WB menunjukkan adanya perubahan panas total.

#### Dew-point temperature (DP)

Suhu DP adalah suhu di mana udara mulai menunjukkan aksi pengembunan ketika didinginkan. Suhu DP ditandai sebagai titik sepanjang garis saturasi. Pada saat udara ruang mengalami saturasi (jenuh) maka besarnya suhu DB sama dengan suhu WB demikian pula suhu DP. Suhu DP merupakan ukuran dari panas laten yang diberikan oleh sistem. Adanya perubahan suhu DP menunjukkan adanya perubahan panas laten atau adanya perubahan kandungan uap air di udara.

#### Specific Humidity (W)

Specific humidity adalah jumlah kandungan uap air di udara yang diukur dalam satuan grains per pound udara. ( 7000 grains = 1 pound) dan diplotkan pada garis sumbu vertikal yang ada di bagian samping kanan chart.

#### Relative Humidity (% RH)

% RH merupakan perbandingan jumlah actual dan jumlah maksimal (saturasi) dari uap air yang ada pada suatu ruang atau lokasi tertentu. 100% RH berarti saturasi dan diplotkan menurut garis saturasi. Untuk ukuran yang lebih kecil diplotkan sesuai arah garis saturasi.

#### Enthalpi (H)

Enthalpi adalah jumlah panas total dari campuran udara dan uap air di atas titik nol. Dinyatakan dalam satuan Btu/lb udara. Harga enthalpi dapat diperoleh sepanjang skala di atas garis saturasi

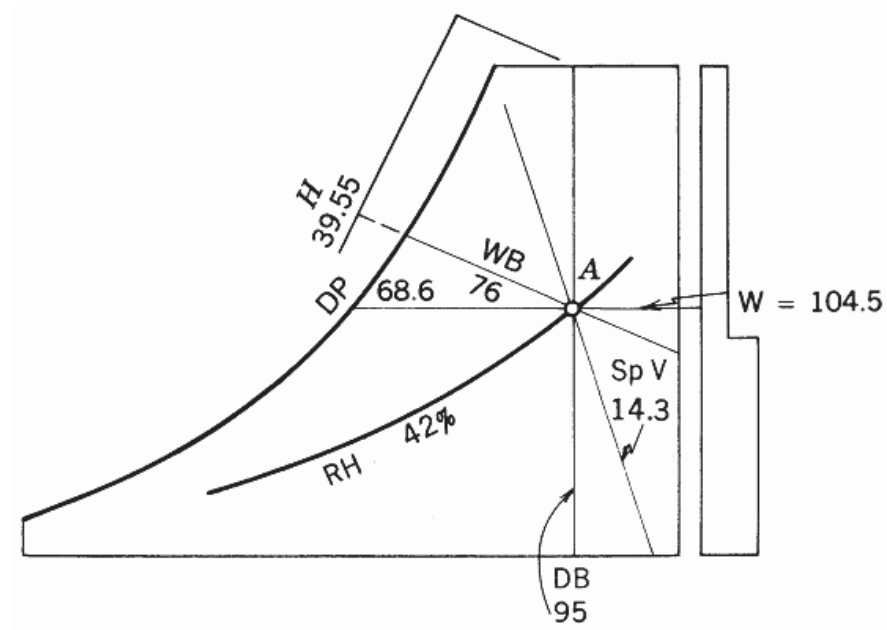
#### Specific volume (SpV)

Specific volume atau volume spesifik adalah kebalikan dari berat jenis, dinyatakan dalam  $\text{ft}^3/\text{lb}$ . Garis skalanya sama dengan garis skala bola basah (wet bulb)

#### 4.4 Cara membaca Chart

Gambar 4.5 memperlihatkan suatu kondisi udara (titik P) yang parameternya di-*plot*-kan pada chart psikrometrik yang disederhanakan untuk mempermudah.

Bila ada dua parameter yang diketahui maka kedua parameter tersebut diplotkan pada chart sehingga ketemu titik potongnya (misalnya titik P). Kemudian dari titik potong tersebut dapat ditentukan parameter lainnya. Misalkan diketahui suhu bola kering 95oF, dan suhu bola basah 76oF. Dari kedua data ini kita dapatkan titik potong di titik P. Dengan diketahuinya titik potong ini maka data lain yang diperlukan dapat diketahui. Besarnya kelembaban relatif (RH) adalah 42%. Kelembaban psesifik (w) adalah 104,5 g/lb. Volume spesifik (SpV) adalah 14,3 ft<sup>3</sup>/lb. Suhu titik embun (DP) adalah 68,6°F. Enthalpy (H) adalah 39,55 Btu/lb.



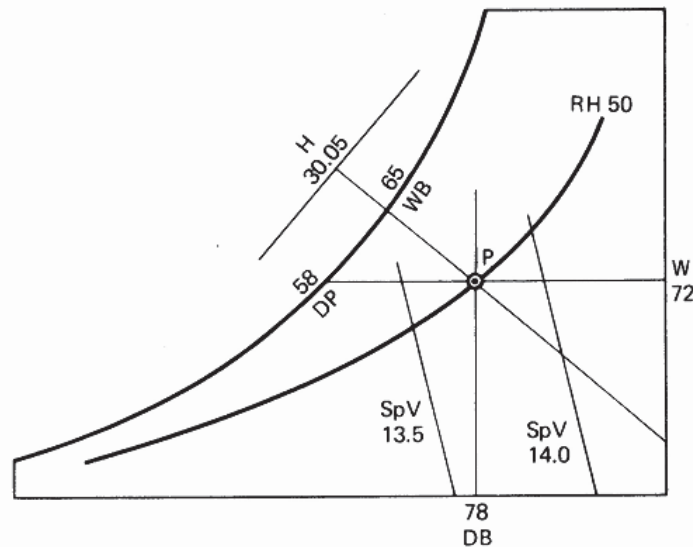
Gambar 4.5 Pembacaan Psikrometrik Chart

**Contoh 4.1** Hasil pengukuran kondisi suatu ruangan dengan sling psychrometer memberikan data sebagai berikut:  
 suhu bola kering  $78^{\circ}\text{F}$  DB, suhu bola basah  $65^{\circ}\text{F}$  WB. Tentukan parameter udara lainnya dengan menggunakan psikrometrik chart.

*Solusi* Mengacu ke Gambar 4.6, pertama-tama tentukan titik potong antara garis  $78$  DB dan garis  $65$  WB. Titik tersebut adalah titik P. Dari titik P ikuti garis horizontal ke arah kanan, yaitu skala kelembaban spesifik  $w = 72$  gr/lb. Ikuti garis kelembaban relatif,  $\text{RH} = 50\%$ . Ikuti garis horizontal ke kiri hingga memotong garis saturasi, diperoleh suhu DP =  $58^{\circ}\text{F}$ . Dan ikuti garis entalpi,  $H = 30,05$  Btu/lb. Yang terakhir tentukan volume spesifik, SpV. Titik P berada diantara garis  $13,5$  dan  $14,0$ , dapat diperkirakan  $\text{SpV} = 13,75$  ft<sup>3</sup>/kg.

Dari hasil pem-plot-an kita dapatkan:

$\text{RH} = 50\%$   
 $W = 72\text{gr/lb}$   
 $\text{DP} = 58^{\circ}\text{F}$   
 $H = 30,05$  Btu/lb  
 $\text{SpV} = 13,75$  ft<sup>3</sup>/lb



Gambar 4.6 Hasil pemetaan pada Psikrometrik chart contoh 4.1

#### 4.5 Perubahan Kondisi Udara Ruang

Sistem Tata Udara dapat terdiri dari beberapa proses pengkondisian udara, yaitu proses pemanasan (heating), proses pendinginan (cooling), proses penambahan uap air (humidifying), dan proses pengurangan uap air (dehumidifying). Pengkondisian udara akan merubah kondisi udara, dari kondisi awal menjadi kondisi akhir.

Dalam prakteknya, ada enam proses yang lazim dilaksanakan dalam sistem tata udara, yaitu:

1. Proses dengan Panas Sensibel Konstan
2. Proses dengan Panas Laten Konstan
3. Proses dengan Panas Total (entalpi) Konstan atau proses Adiabatik
4. Proses dengan Kelembaban relatif konstan
5. Proses tata udara lengkap, kombinasi
6. Proses Pencampuran udara dalam kondisi berbeda

Perlu dicatat, bahwa:

1. Garis DB merupakan garis panas sensible konstan
2. Garis DP merupakan garis panas laten konstan
3. Garis WB merupakan garis entalpi (panas total) konstan

Berikut ini akan diberikan beberapa tipikal proses pengkondisian udara yang lazim dilakukan melalui ilustrasi contoh-contoh masalah. Perlu diketahui, bahwa psikrometrik chart bukan merupakan instrumen yang memiliki kepresisian tinggi. Ada kemungkinan hasil plotting-nya berbeda antara satu orang dengan orang lainnya. Tetapi dalam banyak kasus, dengan bantuan psikrometrik chart, orang dapat melakukan banyak hal, berkaitan dengan penanganan sistem refrigerasi dan tata udara.

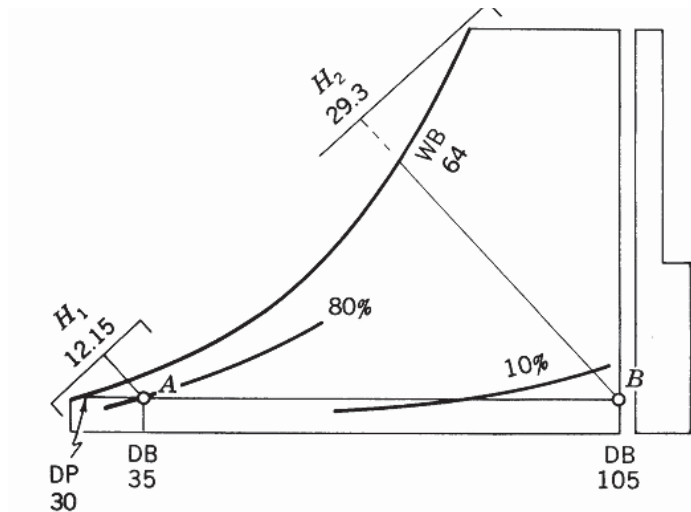
#### 4.6 Pemanasan Udara tanpa Penambahan Uap Air

Pemanasan udara ruang tanpa menambah kandungan uap air, berarti proses pengkondisian udara ruang dengan panas laten konstan atau proses atau proses dengan kandungan uap air konstan. Dalam hal ini hanya panas sensibel yang ditambahkan ke udara ruang. Proses ini dapat berupa penggunaan pemanas ruang dengan air atau uap panas yang disalurkan melalui koil pemanas,

baik dengan blower ataupun tanpa blower. Proses ini lazim disebut sebagai proses pemanasan-sensibel yang direpresentasikan dengan garis horisontal pada psikrometrik chart, karena kelembaban spesifik udara ruang tidak berubah.

**Contoh 4.2** Udara ruang dengan kondisi awal 35°F DB dan 80% RH dipanaskan hingga kondisi berubah menjadi 105°FDB. Tentukan WB, DP, RH, dan panas total yang ditambahkan ke dalam udara ruang tersebut?

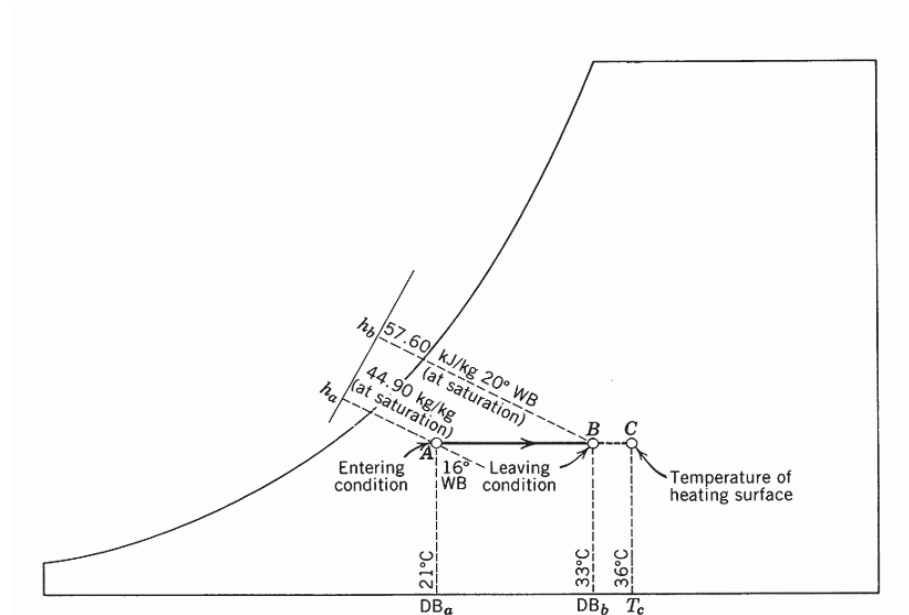
**Solusi** Lihat Gambar 4.7. Suhu 35 DB di-plot pada titik A dan suhu 105 DB dipetakan pada titik B. Entalpi pada titik A 12,15 Btu/lb dan entalpi pada titik B adalah 29,3 Btu/lb. Dari titik B, diperoleh WB 64°F, dan DP 30°F, dan RH 8% (kira-kira). Untuk menghitung panas total yang diperlukan dalam proses pemanasan ini adalah dengan mengurangi besaran 29,3 Btu/lb dengan 12,16 Btu/lb dan diperoleh  $H = 17,15$  Btu/lb.



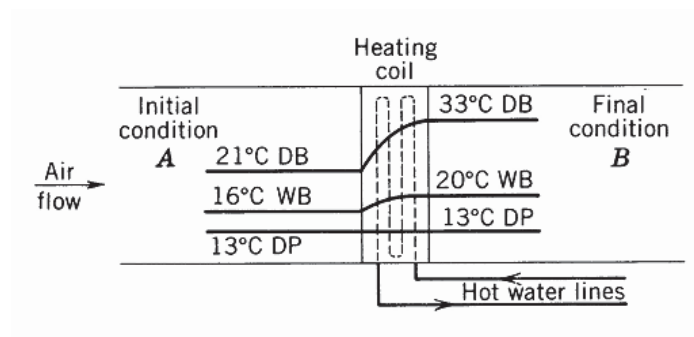
Gambar 4.7 Hasil Pemetaan pada Psikrometrik Chart Contoh 4.2

**Contoh 4.3** Kondisi awal, udara yang masuk melewati koil pemanas (heating Coil), adalah  $^{\circ}\text{C}$  DB,  $16^{\circ}\text{C}$  WB, melaju dengan volume rata-rata  $2\text{kg/detik}$ . Kondisi akhir suhu udara naik menjadi  $33^{\circ}\text{C}$  DB. Petakan proses tersebut pada psikrometrik chart dan tentukan (a) suhu akhir WB, (b) panas sensibel yang dipindahkan dan (c) panas total yang dipindahkan.

*Solusi* Gambar 4.8 memperlihatkan hasil pemetaan prosesnya, Gambar 4.9 merupakan sketsa proses pemanasan sensibel.



Gambar 4.8 Pemetaan Proses Pemanasan Sensibel



Gambar 4.9 Sketsa Proses Pemanasan Sensibel

Dari hasil pemetaan prosesnya (Gambar 4.9), dapat diketahui

- (a) Kondisi suhu akhir WB adalah 20oC
- (b) Karena proses pemanasan sensibel maka besaran panas sensibel dan panas total sama, dan dapat ditentukan dengan dua cara, yaitu

$$Q_s = (2 \text{ kg/det})(1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C})(33-21)^\circ\text{C} = 24 \text{ kJ/det} = 24 \text{ kW}$$

Dari chart diketahui, besarnya panas sensibel yang dipindahkan per kilogram adalah  $57,6 - 4,9 = 12,7 \text{ kJ/kg}$ , Jadi untuk  $2 \text{ kg/s}$  udara, adalah

$$Q_s = 2 \text{ kg/det} \times 12,7 \text{ kJ/kg} = 25,4 \text{ kJ/s} = 25,4 \text{ kW}.$$

Karena adanya deviasi entalpi, maka hasil kedua cara ada sedikit perbedaan. Tetapi bila deviasi entalpi ikut diperhitungkan maka perhitungan kedua cara tersebut akan mendekati sama.

$$\begin{aligned} Q_s &= 2 \text{ Kg/det} \times \{(57,6 - 0,45) - (4,9 - 0,14)\} \text{ kJ/kg} \\ &= 24,78 \text{ kJ/det} = 24,78 \text{ kW} \end{aligned}$$

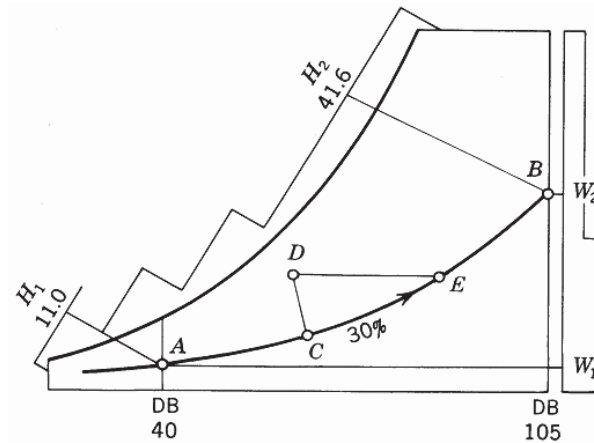
#### 4.7 Pemanasan dengan Penambahan Uap Air

Pada musim dingin didaerah empat musim, disamping suhu udara rendah kelembaban absolut atau kandungan uap air di udara juga rendah. Sehingga membutuhkan sistem pengkondisian udara, untuk menaikkan suhu dan kelembaban udara pada tingkat yang nyaman. Peralatan Pemanas (heater) yang bagus dilengkapi dengan piranti penambah kelembaban udara (humidifier). Pada peralatan itu memungkinkan menambah uap air secukupnya ke udara ruang untuk mempertahankan kelembaban relatif pada level 20 – 40% RH.

**Contoh 4.3** Udara ruang 40°F DB dan kelembaban relatif 30%RH, dipanaskan hingga mencapai 105°F DB dan ditambahkan uap air untuk mempertahankan kelembaban relatif tetap berada pada level 30% RH. Tentukan besaran panas yang ditambahkan ke udara per pound dan volume uap air yang harus ditambahkan per pound udara kering.

Solusi Mengacu pada Gambar 4.8. dengan memetakan kondisi awal udara ruang pada chart, diperoleh titik A, dengan  $H_1=11,0$  Btu/lb;  $w_1=11$  gr/lb. Pemetaan kondisi akhir dengan mengikuti garis 30% RH, diperoleh titik B,  $H_2=41,6$  Btu/lb;  $w_2=102$  gr/lb.

Jadi Panas yang ditambahkan =  $41,6 - 11 = 30$ , Btu/lb  
 Uap air yang ditambahkan =  $102 - 11 = 91$  gr/lb.



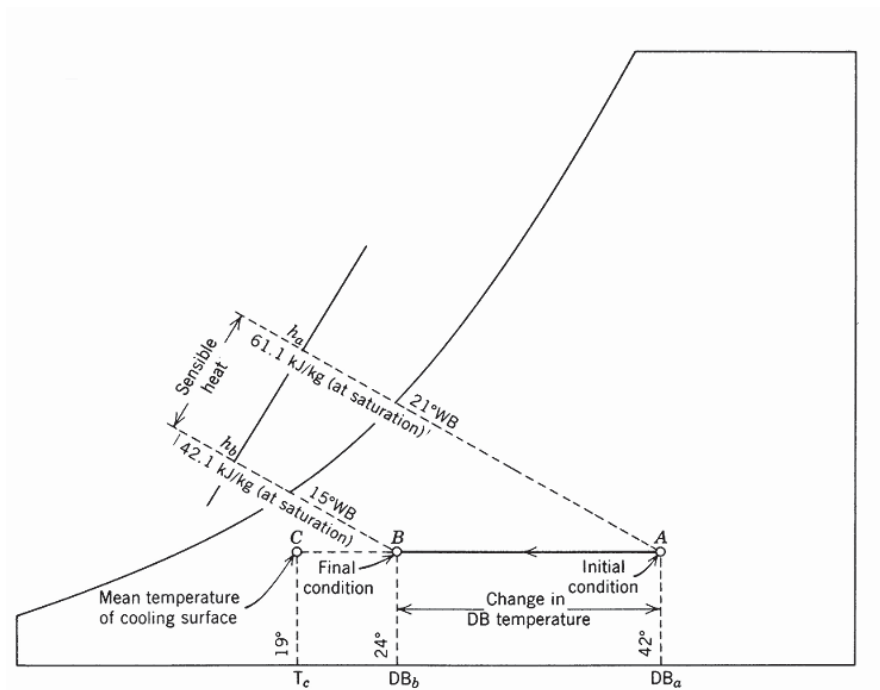
Gambar 4.8 Hasil Pemetaan Pada psikrometrik chart Contoh 4.3

#### 4.8 Pendinginan tanpa Pengurangan Uap Air

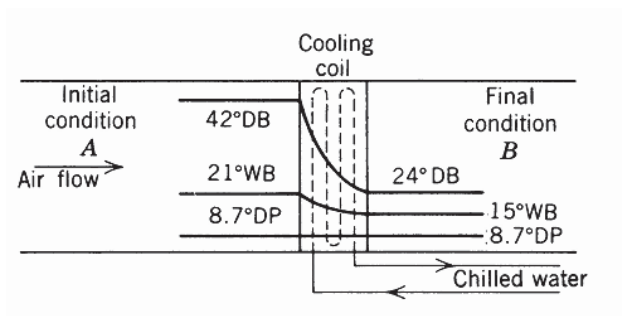
Proses pendinginan tanpa pengurangan uap air disebut proses pendinginan sensibel. Proses ini dapat dilakukan dengan menggunakan koil pendingin yang suhunya di atas suhu titik embun udara DP, tetapi di bawah suhu bola kering DB.

**Contoh 4.4** Udara mempunyai suhu awal 42oC DB dan 21oC WB, mengalir melalui koil pendingin dengan jumlah 2 kg/detik. Suhu akhir menjadi 24oC DB. Bila suhu koil pendingin 19oC, tentukan panas sensibel yang ditransfer

Solusi Gambar 4.9 adalah hasil pemetaan prosesnya pada chart dan gambar 4. 10 adalah sketsa proses pendinginan sensibel



Gambar 4.9 Sketsa Proses Pendinginan Sensibel



Gambar 4.10 Pemetaan proses pendinginan sensibel

Panas sensibel yang ditransfer adalah

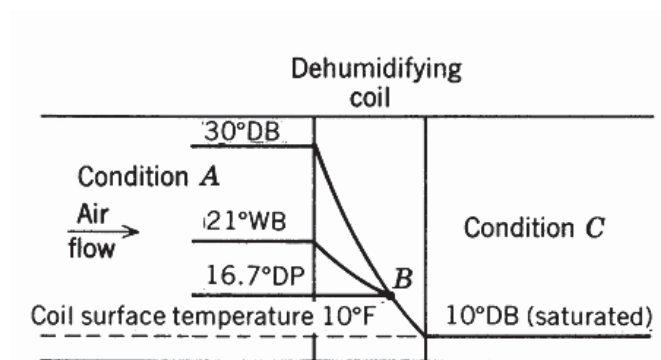
$$Q_s = (2 \text{ kg/detik})(1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(42-24)^\circ\text{C} = 36 \text{ kJ/det.}$$

#### 4.9 Pendinginan dengan Pengurangan Uap Air

Pendinginan dan proses pengurangankandungan uap air berlangsung secara simultan dalam suatu proses pengkondisian udara, ketika udara yang akan dikondisi disalurkan lewat koil pendinginan yang mempunyai suhu permukaan di bawah suhu titik embun (DP) udara.

**Contoh 4.5** 4 kilogram udara, suhu awal  $30^{\circ}\text{C}$  DB dan  $21^{\circ}\text{C}$  WB, disalurkan ke koil pendingin, di mana suhu efektif permukaan koil adalah  $10^{\circ}\text{C}$ . Anggaplah semua bagian udara mengalami kontak langsung dengan permukaan koil sehingga udara yang meninggalkan koil mengalami saturasi pada suhu permukaan koil. Petakan proses tersebut pada chart, dan tentukan; (a) Panas total yang diambil dari udara per kilogram udara kering, (b) panas sensibel yang diambil dari udara kering per kilogram, (c) panas laten yang diambil dari udara kerin per kilogram, (d) masa uap air di udara yang mengembun dalamkilogram per detik.

*Solusi* Gambar 4.11 adalah sketsa proses pendinginan dengan pengurangan uap air, dan gambar 4.12 adalah pemetaan prosesnya pada chart.

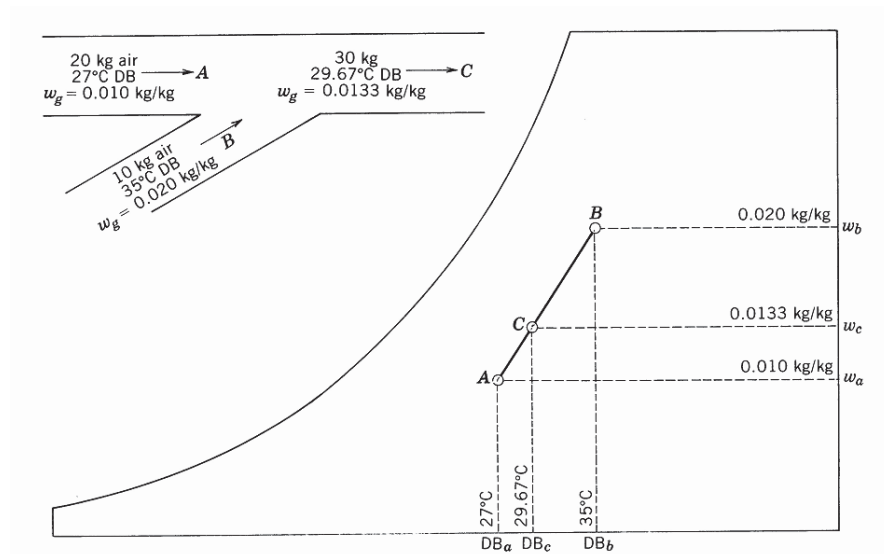


Gambar 4.11 Sketsa Proses Pendinginan dan pengurangan uap air



#### 4.10 Pencampuran Udara

Salah satu proses sering dijumpai dalam proses psikrometrik adalah pencampuran dua atau lebih aliran udara yang mempunyai kondisi berbeda. Dalam kasus ini, kondisi akhir campuran udara ini ditentukan oleh keseimbangan masa-energi. Sebagai contoh, perhatikan Gambar 4.13. Sejumlah udara, satu dengan kondisi A dan satu lagi dengan kondisi B, dicampur sehingga kondisinya berubah menjadi C.



Gambar 4.13 Ilustrasi Pencampuran Udara

Sudah dapat dipastikan, dalam pencampuran udara ini maka masa total yang dimiliki oleh kondisi C, yaitu pencampuran kondisi A dan kondisi B, adalah  $m_c = m_a + m_b$ , demikian juga entalpinya,  $H_c = H_a + H_b$ , dan  $(m_c)(w_c) = (m_a)(w_a) + (m_b)(w_b)$ .

Panas sensibel pada setiap kondisi, adalah

$$H_{sc} = (m_c)(c_p)(T_c)$$

$$H_{sa} = (m_a)(c_p)(T_a)$$

$$H_{sb} = (m_b)(c_p)(T_b)$$

Di dapatkan,

$$(m_c)(c_p)(T_c) = (m_a)(c_p)(T_a) + (m_b)(c_p)(T_b)$$

$$T_c = \frac{(m_a)(T_a) + (m_b)(T_b)}{m_c} \quad \text{atau} \quad w_c = \frac{(m_a)(w_a) + (m_b)(w_b)}{m_c} \quad (4)$$

**Contoh 4.6** Dua puluh kilogram udara, 27°C DB mempunyai ratio kelembaban 0,010 kg/kg dicampur dengan sepuluh udara lainnya, 35°C DB yang memiliki ratio kelembaban 0,020 kg/kg. Tentukan kondisi akhir hasil percampuran udara tersebut.

Solusi

$$T_c = \frac{(10)kg(35)^{\circ}C + (20)kg(27)^{\circ}C}{(20+10)kg} = 29,67^{\circ}C$$

$$w_c = \frac{(10)kg(0,020)kg/kg + (20)kg(0,010)kg/kg}{(20+10)kg} = 0,0133 kg/kg$$

### Soal Latihan

1. Tentukan besarnya suhu titik embun, suhu bola basah dan kandungan uap air nya bila diketahui Suhu bola kering di suatu ruang : 30 derajat dan kelembabannya 60% RH.
2. Tentukan besarnya suhu titik embun, suhu bola basah dan kandungan uap air nya bila diketahui Suhu bola kering di suatu ruang : 30 derajat dan kelembabannya 90% RH
3. Tentukan besarnya kandungan uap air dalam gr/kg pada suatu ruang yang mempunyai suhu Suhu bola kering di suatu ruang : 30 derajat dan kelembabannya 60% RH.
4. Tentukan besarnya kandungan uap air dalam grain/kg pada suatu ruang yang mempunyai suhu Suhu bola kering di suatu ruang : 30 derajat dan kelembabannya 90% RH
5. Suatu ruang mempunyai data sebagai berikut : suhu bola kering 83 Db dan suhu bola basah 60 WB. Tentukan : (a) Enthalphy, (b) Ratio Humiditas, (c) Suhu titik embun, (d) kelembaban relatif (e) Derajat saturasi

---

# REFRIJERAN DAN SISTEM KOMPRESI GAS

5

---

## Kerangka Isi

- 5.1 Masalah Lingkungan
- 5.2 Klasifikasi Refrijeran
- 5.3 Refijeran yang Ramah Lingkungan
- 5.4 Sistem Refrijerasi
- 5.5 Pengontrolan Suhu Penguapan Refrijeran
- 5.6 Evaporasi Terus-menerus
- 5.7 Siklus Ulang Refijeran
- 5.8 Tipikal Sistem Kompresi Gas
- 5.9 Service Valve
- 5.10 Pembagian Sistem
- 5.11 Kondensing Unit
- 5.12 Pengaruh Tekanan liquid terhadap Suhu Evaporasi
- 5.13 Pengaruh Tekanan gas terhadap Suhu Kondensasi
- 5.14 Siklus Refrijen
- 5.15 Tipikal Proses Aktual

Proses pendinginan atau refrigerasi pada hakekatnya merupakan proses pemindahan energi panas yang terkandung di dalam ruangan tersebut. Sesuai dengan hukum kekekalan energi maka kita tidak dapat menghilangkan energi tetapi hanya dapat memindahkannya dari satu substansi ke substansi lainnya. Untuk keperluan pemindahan energi panas ruang, dibutuhkan suatu fluida penukar kalor yang selanjutnya disebut Refrigeran.

Untuk keperluan mesin refrigerasi maka refrigeran harus memenuhi persyaratan tertentu agar diperoleh performa mesin refrigerasi yang efisien. Disamping itu refrigeran juga tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Oleh karena itu, pada masa lalu pemilihan refrigeran hanya didasarkan atas sifat fisik, sifat kimiawi dan sifat termodinamik. Sifat-sifat tersebut dapat memenuhi persyaratan refrigerant, yaitu :

- Titik penguapan yang rendah
- kestabilan tekanan
- Panas laten yang tinggi
- Mudah mengembun pada suhu ruang
- Mudah bercampur dengan oli pelumas dan tidak korosif
- Tidak mudah terbakar
- Tidak beracun

## 5.1 Masalah Lingkungan

Diantara berbagai jenis refrijeran yang ada, jenis yang paling terkenal adalah refrigeran yang dikenal dengan nama CFC ( klorofluorokarbon) yang ditemukan oleh seorang peneliti berkebangsaan Amerika yang bernama "Thomas Midgely" dari General Motor pada tahun 1928. Pada awalnya CFC tersebut digunakan sebagai bahan pendingin generator sebagai pengganti amonia. Tetapi pada tahap berikutnya digunakan sebagai refrigeran.

Sebagai refrijeran CFC merupakan bahan kimia yang unik dan ajaib. Karena disamping mempunyai sifat termodinamik yang bagus juga tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Oleh karena itu pemakaian CFC lebih menguntungkan dibandingkan dengan jenis lainnya. Tetapi setelah mengabdikan pada kehidupan manusia selama lebih setengah abad, CFC harus menerima kenyataan dihapuskan dari peredarannya karena terbukti tidak ramah lingkungan yakni merusak lapisan ozon di stratosfir dan mempunyai kontribusi tinggi terhadap efek pemanasan global.

Karena kerusakan lapisan ozon dirasa semakin membesar, maka pada tahun 1989 diadakan kesepakatan untuk mempercepat penghapusan pemakaian CFC melalui kesepakatan internasional yang diratifikasi oleh 36 negara di acara besar yang dikenal dengan : "Protokol Montreal". Selanjutnya pada tahun 1990 pada pertemuan di London, disepakati untuk menghapus CFC hingga tahun 2005. Indonesia termasuk salah satu dari 137 negara yang ikut meratifikasi Protokol Montreal pada tahun 1992 dengan bersedia menghapus konsumsi CFC mulai tahun 1997.

Sejak itu dimulailah era perburuan refrigeran alternatif yang dapat menggantikan CFC. Dengan bantuan dana dari MMF yaitu dana multilateral dari Protokol Montreal, mulai 1992 dicanangkan program penghapusan CFC.

Pada tahap pertama (tahun 1992/1993), MMF telah dapat merekomendasikan dua jenis refrigeran yaitu : HCFC-22 dan HFC-134a. Pada tahap berikutnya periode 1993/94 penggunaan isobutan atau yang dikenal dengan HC-600a sebagai blowing agent diusulkan sebagai refrigeran alternatif dan akhirnya usulan ini mendapat rekomendasi oleh MMF.

## 5.2 Klasifikasi Refrigeran

Menurut sifat penyerapan dan ekspansi panas yang dapat dilakukannya maka refrigeran dapat di bagi menjadi 2 klasifikasi yaitu :

Kelas 1 :

Refrigeran yang termasuk dalam klasifikasi ini adalah refrigeran yang dapat memberikan efek pendinginan dengan menyerap panas laten dari substansi yang didinginkan. Refrigeran yang termasuk dalam kelas ini ada beberapa jenis yang diperlihatkan dalam tabel 1. Refrigeran ini banyak digunakan pada unit refrigerasi kompresi uap.

Kelas 2 :

Refrigeran yang termasuk dalam klasifikasi ini adalah refrigeran yang hanya dapat menyerap panas sensibel dari substansi yang didinginkan. Yang termasuk dalam klasifikasi ini antara lain : udara, cairan kalsium klorida , cairan sodium klorida dan alkohol.

Tabel 5.1 Karakteristik Refrigeran klasifikasi 1

| Jenis Refrigeran | Titik penguapan<br>Dalam °F | Panas laten<br>penguapan BTU/lb |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| sulfur Dioksida  | 14                          | 172,3                           |
| Metil klorida    | - 10,6                      | 177,8                           |
| Ethil Klorida    | 55,6                        | 177,0                           |
| amonia           | -28,0                       | 554,7                           |
| Carbon Dioksida  | -110,5                      | 116,0                           |
| Isobutan         | 10,0                        | 173,5                           |
| CFC - 11         | 74,8                        | 78,31                           |
| CFC - 12         | -21,7                       | 71,04                           |
| CFC - 13         | -114,6                      | 63,85                           |
| CFC - 21         | 48,0                        | 104,15                          |
| HCFC - 22        | -41,4                       | 100,15                          |
| CFC - 113        | 117,6                       | 63,12                           |
| CFC - 114        | 38,4                        | 58,53                           |
| CFC - 115        | -37,7                       | 54,1                            |
| HCFC - 502       | -50,1                       | 76,46                           |

Sifat yang dimiliki oleh refrigerant klas 1:

- Sulfur Dioksida, tidak direkomendasikan sebagai refrigeran karena beracun dan mempunyai bau yang menyengat.
- Metil Klorida, mudah terbakar dan sedikit beracun.
- Amonia, banyak digunakan pada mesin refrigerasi berskala besar karena sifat panas latennya yang sangat tinggi, 555 BTU/Lb. Sehingga dengan dengan ukuran mesin yang kecil tetapi dapat menghasilkan efek refrigerasi yang besar. Amonia tidak berwarna tetapi mempunyai bau menyengat, tetapi mudah larut dalam air. Disamping itu mudah terbakar dan meledak bila bercampur dengan udara dalam proporsi tertentu. Oleh karena itu diperlukan sistem pemipaan yang kuat dan kokoh. Tekanan kerja kondensing unitnya dapat mencapai 115 sampai 200 Psi dari jenis water cooled condenser. Untuk mendeteksi adanya kebocoran gas biasanya digunakan kertas khusus yang disebut : Phenolphathalein paper. Kertas ini bila terkena gas amonia akan berubah warna menjadi pink.

- Carbon Dioksida, banyak digunakan pada keperluan industri dan kapal laut. Meskipun berbahaya bila terhirup oleh manusia, tetapi gas ini mempunyai tekanan kondensing yang tinggi (1000 Psi) maka menguntungkan dari segi penyediaan kompresornya, yakni ukuran kompresornya menjadi kecil disamping itu tidak mudah terbakar, tidak beracun dan tidak mudah terbakar.
- Keluarga CFC, merupakan keluarga refrigeran yang paling banyak pemakainya. Mulai untuk keperluan rumah tangga sampai keperluan komersial dan industrial. Refrigeran ini mempunyai segala sifat yang disyaratkan di atas kecuali satu yaitu tidak ramah lingkungan, karena merusak ozon dan mempunyai kontribusi tinggi terhadap pemanasan global.

CFC-11, digunakan pada mesin yang bertekanan rendah dengan kompresor sentrifugal, untuk keperluan water chiller.

CFC-12, digunakan untuk keperluan domestik sampai komersial.

HCFC-22, digunakan khusus untuk keperluan AC ruang, karena sifat termodinamikanya yang bagus sehingga dapat memperkecil ukuran mesinnya.

HCFC-502, merupakan campuran azeotropika antara : 48% CFC-12 dan 52% CFC-115. Banyak digunakan pada instalasi supermarket untuk display cabinet dan pengawetan makanan.

### **5.3 Refrigeran Alternatif yang Ramah Lingkungan**

Sebenarnya keluarga hidrokarbon seperti propane dan isobutane sudah diperkenalkan sebagai refrigeran sejak tahun 1916, karena senyawa ini memiliki sifat termodinamik yang sangat bagus tetapi sayangnya ia mudah terbakar. Oleh karena itu pamornya langsung saja tenggelam ditelan masa dengan ditemukannya keluarga CFC pada tahun 1930. Keluarga CFC-refrigeran yang ditemukan 60 tahun silam, merupakan refrigeran yang mempunyai sifat unik. Disamping mempunyai sifat termodinamik yang bagus juga tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Tetapi setelah mengabdikan pada kehidupan manusia selama setengah abad lebih, dominasi keluarga CFC di pasaran refrigeran, harus menerima kenyataan pahit, yaitu dihapuskan dari peredarannya karena telah terbukti bahwa kandungan klorin mempunyai kontribusi tinggi terhadap perusakan lapisan ozon dan pemanasan global. Oleh karena

itu perlu difikirkan penggunaan refrigeran alternatif yang ramah lingkungan.

Saat ini telah ditemukan beberapa refrigerant yang dapat digunakan sebagai pengganti CFC. Refrigeran alternatif tersebut diambilkan dari keluarga HFC (hidrofluorokarbon) dan HC (hidrokarbon) serta carbondioksida. Dari hasil penelitian para ahli kita yang sudah dipublikasikan, dapat diketahui bahwa keluarga HFC mempunyai sifat termodinamik yang sama dengan keluarga CFC. Disamping itu HFC mempunyai kandungan toksisitas (racun tubuh) yang juga rendah dan juga tidak mudah terbakar.

Karena memerlukan penelitian yang mendalam dalam pengembangan produknya tentu saja memerlukan biaya yang besar. Oleh karena itu harga keluarga HFC menjadi mahal bila dibandingkan dengan CFC. Selain itu walaupun kontribusi terhadap perusakan ozon nihil (0), tetapi HFC masih memiliki kontribusi terhadap pemanasan global sebesar 0,285. Oleh karena itu HFC tidak dapat diharapkan menjadi refrigeran masa depan. Sebenarnya HCFC-22 atau R22 sebagai refrigeran alternatif juga memberikan peluang cukup besar karena kontribusi terhadap perusakan ozon relatif sangat kecil (0,05) dan kontribusinya terhadap efek rumah kaca sebesar 0,37. Tetapi pemakaian bahan ini sebagai refrigeran masa depan juga tidak dapat direalisasikan.

Tabel 5.2 Karakteristik CFC, HFC dan HC Refrigeran

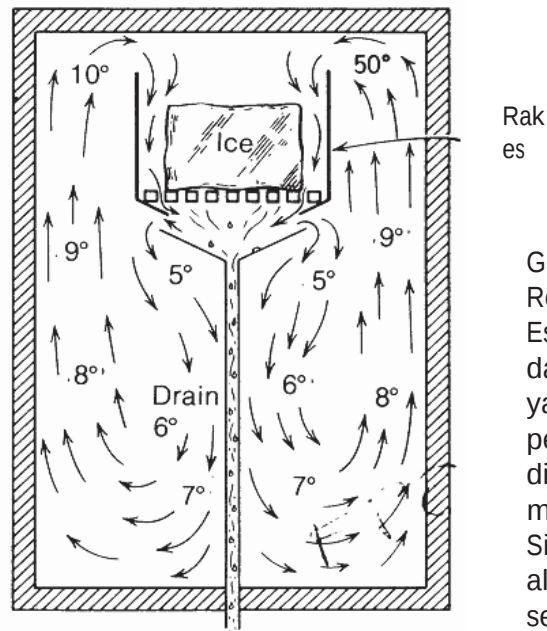
| Jenis    | Suhu uap °C | Tekanan Uap Bar (55°C) | Tekanan Uap Bar (-25°C) | Enthalpi KJ/kg |
|----------|-------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| CFC-12   | - 29,8      | 13,7                   | 1,24                    | 120,9          |
| HFC-134a | - 26,2      | 14,8                   | 1,06                    | 153            |
| HCFC22   | - 40,7      | -                      | -                       | 159,8          |
| HC-600   | - 0,5       | 5,6                    | 0,36                    | 306            |
| HC-600a  | - 11,7      | 7,8                    | 0,59                    | 209,6          |
| HC-290   | - 42,1      | 19,1                   | 2,0                     | 290            |

**Soal Latihan**

1. Apa fungsi refrigerant di dalam sistem refrgerasi kompresi uap?
2. Sebutkan kelebihan sistem kompresi uap dibandingkan dengan sistem absorpsi?
3. Jelaskan maksud refrigeran yang ramah lingkungan?
4. Jelaskan sifat thermodinamik R12 dan R134a
5. Jelaskan arti saturasi, super heat dan sub cooled?
6. Sebutkan jenis refrigeran yang mudah terbakar?
7. Bagaimana bila tangan kita terkena semprotan refrigerant dalam wujud liquid?
8. Tindakan apa yang harus segera dilakukan bila kita terkena liquid refrigerant
9. Jelaskan arti dari istilah ODP
10. Identifikasi wujud refrigerant dalam kondisi berikut:
  - R12, suhu  $6^{\circ}\text{C}$ , tekanan 40 psi :
  - R12, suhu  $9^{\circ}\text{C}$ , tekanan 40 psi :
  - R12, suhu  $44^{\circ}\text{C}$ , tekanan 125 psi :
  - R22, suhu  $10^{\circ}\text{C}$ , tekanan 535 psi :
  - R22, suhu  $-10^{\circ}\text{C}$ , tekanan 37 psi :

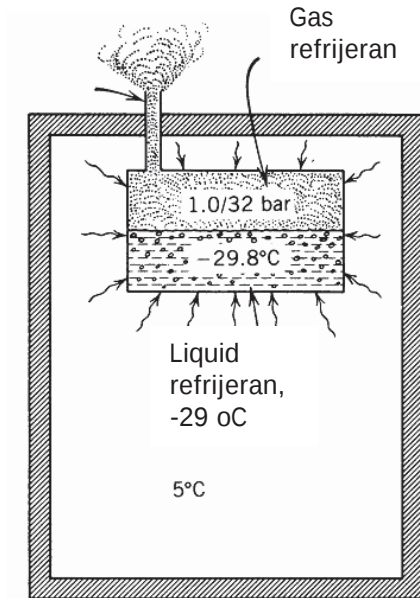
#### 5.4 Sistem Refrijerasi

Untuk memperoleh efek refrigerasi atau pendinginan dapat dilakukan dengan mudah yaitu dengan menggunakan es. Pendinginan dengan es sudah dilakukan orang sejak jaman dahulu. Gambar 5.1 memperlihatkan suatu cara sederhana untuk mendapatkan efek pendinginan pada suatu kabinet.



Gambar 5.1 Sebuah Refrigerator sederhana. Es balok ditempatkan dalam suatu rak khusus yang dilengkapi dengan pembuangan air, digunakan sebagai medium pendinginan. Sirkulasi udara di dalam almari berlangsung secara alami.

Proses pemindahan panas berlangsung antara es dan udara yang ada di dalam refrijerator. Es menerima energi panas dari udara, suhu udara turun. Es mengalami pemanasan sehingga suhunya naik dan mencair menjadi air, dan dibuang ke luar melalui saluran pembuangan.



Gambar 5.2 Sebuah Refrigerator sederhana. Liquid refrigeran ditempatkan dalam suatu kontainer khusus yang dilengkapi dengan lubang angin untuk menyalurkan gas refijeran ke udara luar.. Sirkulasi udara di dalam almari berlangsung secara alami.

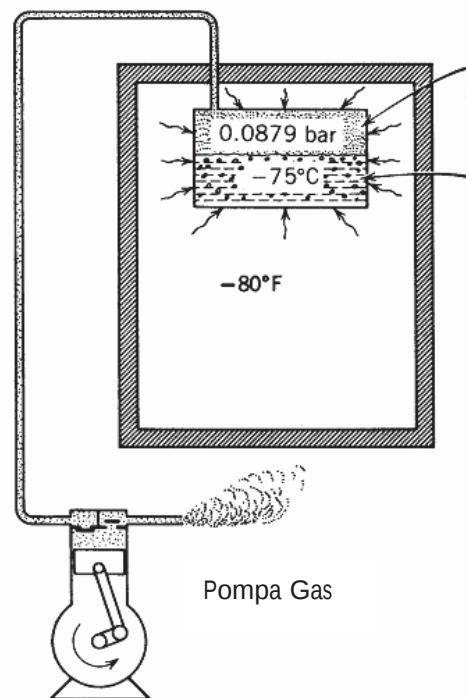
Efek refrigerasi diperoleh dengan cara menguapkan liquid refrigeran yang ditempatkan di dalam refrijerator. Karena refrijeran (R134a) berada di bawah tekanan atmosfer normal (1,0132 bar), maka kondisi saturasi refrijeran dicapai pada suhu  $-29,8^{\circ}\text{C}$ . Penguapan pada suhu rendah ini, menyebabkan refrijeran dapat menyerap panas udara ruang dengan cepat. Panas yang diserap melalui penguapan liquid refrijeran akan dibuang keluar ruang melalui lubang angin oleh gas refrijeran. Efek pendinginan akan berlangsung terus hingga liquid refrijeerannya habis. Kontainer yang digunakan untuk menyimpan liquid refrijeran disebut evaporator. Evaporator adalah salah satu bagian penting dalam sistem refrijerasi kompresi mekanikal.

### 5.5 Pengontrolan Suhu Penguapan Refrijeran

Suhu penguapan refrijeran cair di dalam evaporator dapat diatur dengan mengontrol tekanan refrijeran gas yang berada dibagian atas refrijeran cair, atau dengan kata lain mengontrol laju kecepatan refrijeran gas yang keluar dari evaporator. Sebagai contoh, perhatikan Gambar 5.3. Katakanlah sebuah katub manual dipasang pada lubang atau saluran pengeluaran gas dan ditutup sebagian, sehingga refrijeran gas tidak dapat bebas keluar dari evaporator. Refrijeran gas akan terkumpul di atas refrijeran cair, menyebabkan tekanan pada evaporator naik

sehingga tekanan saturasi refrijeran juga naik, misalnya menjadi 3,0861 bar dan suhu saturasi refrijeran dicapai pada suhu  $0^{\circ}\text{C}$ . Dengan mengatur posisi katub untuk mengatur laju aliran refrijeran gas dari evaporator, memungkinkan mengontrol tekanan refrijeran gas yang ada di atas refrijeran cair. Dengan demikian suhu penguapan refrijeran cair dapat diatur mulai dari suhu  $-29,8^{\circ}\text{C}$  hingga ke suhu ruang. Bila suhu penguapan refrijeran cair sama dengan suhu ruang, misalnya  $5^{\circ}\text{C}$ , maka penguapan refrijeran cair berhenti, dan efek pendinginan juga berhenti.

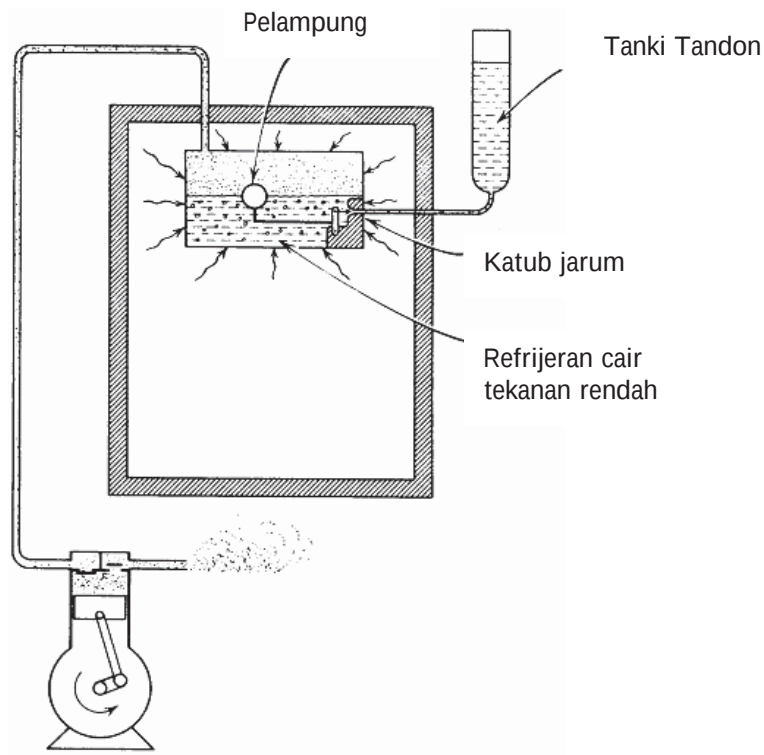
Bila dikehendaki suhu penguapan refrijeran cair berada di bawah suhu saturasi pada tekanan atmosfer, maka perlu menurunkan tekanan pada evaporator di bawah tekanan atmosfer. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan pompa gas seperti diperlihatkan Gambar 5.3. Dengan cara ini, penguapan refrijeran cair dapat berlangsung pada suhu sangat rendah. sesuai dengan hubungan tekanan-suhu yang diberikan pada Tabel 5.



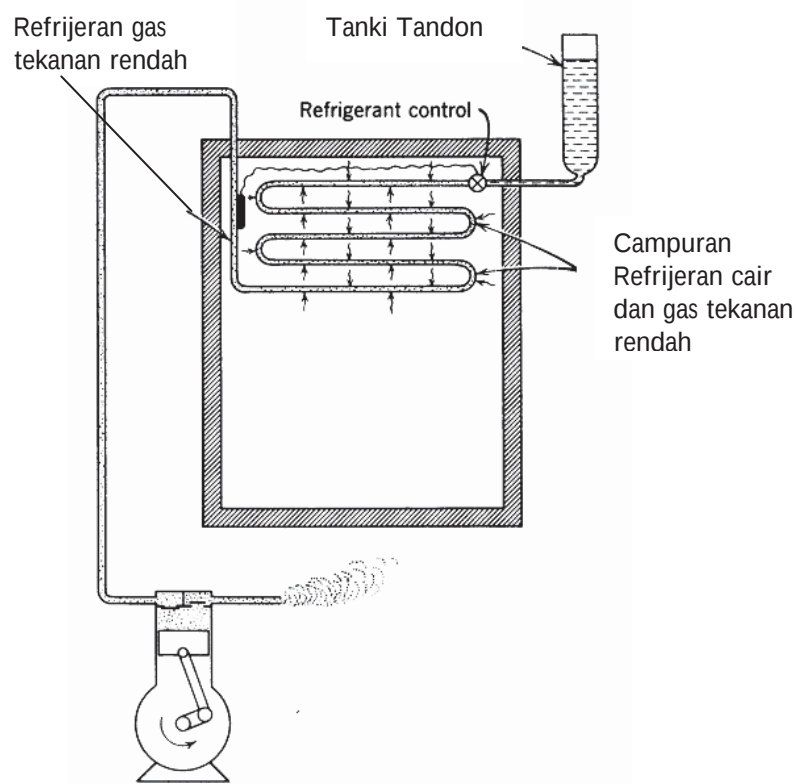
Gambar 5.3 Tekanan refrijeran di evaporator diturunkan hingga mencapai tekanan di bawah atmosfer, dengan menggunakan pompa gas.

### 5.6 Evaporasi Terus-menerus

Untuk memperoleh evaporasi refrijeran cair di evaporator secara terus-menerus, maka diperlukan catu refrijeran cair ke evaporator secara terus-menerus pula. Salah satu cara untuk mendapatkan catu refrijeran cair secara terus-menerus ke evaporator dengan menggunakan katub pelampung, seperti yang diperlihatkan pada gambar 5.4. Aksi katub pelampung adalah menjaga level refrijeran cair di evaporator tetap konstan dengan mengatur jumlah refrijeran cair yang masuk ke evaporator dari tangki tandon, disesuaikan dengan laju penguapan refrijeran. Bila laju penguapan berlangsung lebih cepat maka katub pelampung juga akan membuka lebih besar, sehingga semakin banyak refrijeran cair masuk ke evaporator.



Gambar 5.4 Pasangan katub pelampung, akan menjaga level refrijeran cair di evaporator tetap konstan.



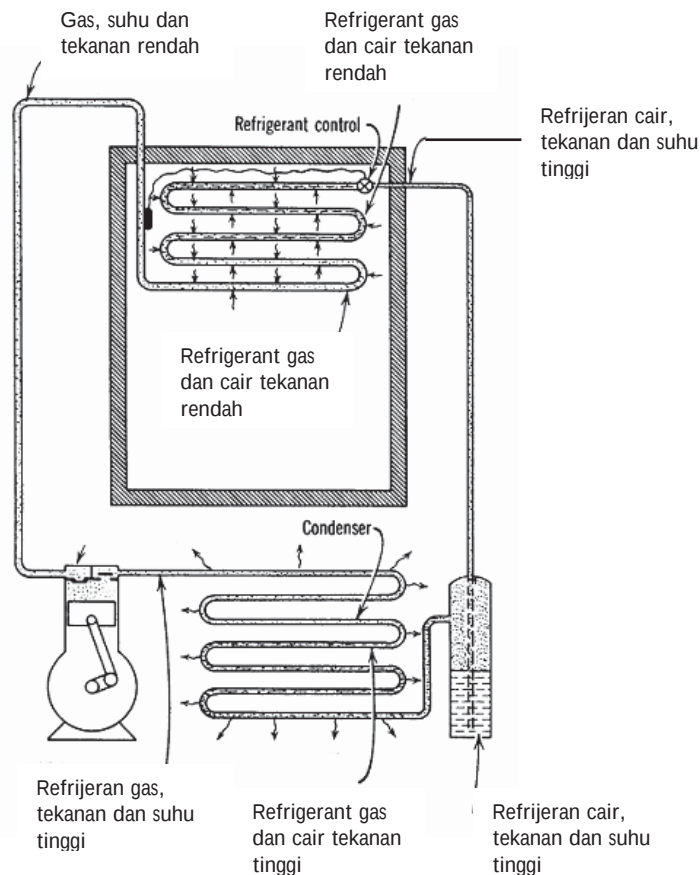
Gambar 5.5 Tipikal koil evaporator yang dilengkapi dengan katub ekspansi thermal atau thermostatic expansion valve

Piranti pengatur aliran refrijeran seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5.4, disebut pengontrol aliran refrijeran (*Refrigerant flow control*). *Refrigerant control* ini merupakan bagian penting dalam sistem refrijerasi mekanik.

Refrigerant control seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5.4, yaitu tipe pelampung, jarang digunakan orang karena alasan kepraktisan. Jenis yang banyak dipakai hingga saat ini adalah katub ekspansi thermal. Diagram alir dari katub ekspansi thermal diperlihatkan dalam gambar 5.5.

### 5.7 Siklus Ulang Refrijeran

Untuk alasan ekonomi, maka tidak praktis membuang refrijeran gas ke udara bebas. Disamping boros, cara membuang refrijeran gas ke udara bebas juga dapat mencemari udara atmosfer. Untuk mengatasi hal itu, maka refrijeran yang menguap (evaporasi) di evaporator tidak langsung dibuang ke udara atmosfer, tetapi dikumpulkan lagi, dihisap oleh kompresor dan selanjutnya dipampatkan atau dinaikkan tekanannya agar suhu refrijeran gas mencapai titik tertentu (di atas suhu lingkungan) dan kemudian diembunkan (kondensasi) kembali agar kembali ke wujud cair dan siap diuapkan lagi di evaporator. Dengan cara ini, tidak diperlukan lagi tanki tandon untuk mencatu refrijeran cair dan disamping itu diperoleh penghematan yang sangat luar biasa. Untuk keperluan proses kondensasi refrijeran gas, diperlukan satu kontainer khusus untuk mengembunkan refrijeran gas, yaitu condenser.

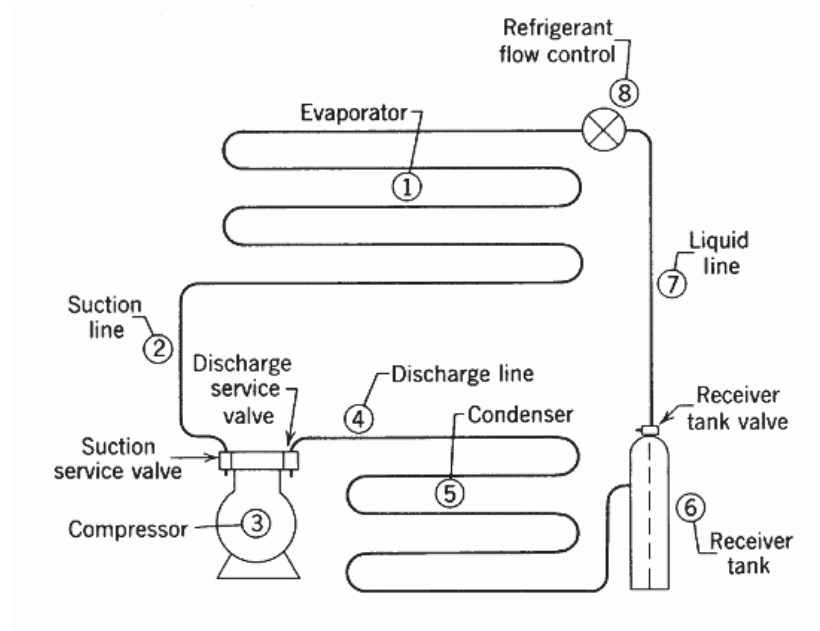


Gambar 5.6 Siklus Ulang refrijeran di dalam Sistem mekanik

### 5.8 Tipikal Sistem Kompresi Gas

Sistem Kompresi Gas merupakan mesin refrigerasi yang berisi fluida penukar kalor (refrigeran) yang bersirkulasi terus menerus. Selama bersirkulasi di dalam unitnya maka refrigeran tersebut akan selalu mengalami perubahan wujud dari gas ke liquid dan kembali ke gas. Proses tersebut berlangsung pada suhu dan tekanan yang berbeda, yaitu tekanan tinggi dan pada tekanan rendah. Tekanan tinggi diperoleh karena adanya efek kompresi, yang dikerjakan oleh kompresor. Oleh karena itu sistem refrigerasi ini lazim disebut sebagai sistem kompresi gas.

Gambar 5.7 memperlihatkan diagram alir suatu sistem kompresi gas sederhana. Sesuai dengan proses yang terjadi di dalam siklus refrigeran maka sistem refrigerasi kompresi gas mempunyai 4 komponen utama yang saling berinteraksi satu sama lain, yaitu : Evaporator untuk proses evaporasi liquid refrigeran. Kompresor untuk meningkatkan tekanan gas refrigeran. Kondenser untuk proses kondensasi gas refrigeran. Katub ekspansi untuk menurunkan tekanan liquid refrigeran yang akan di masuk ke evaporator. Adanya gangguan pada salah satu komponen dapat menggagalkan efek refrigerasi.



Gambar 5.7 Diagram Alir sistem Kompresi Gas

Evaporator (1), menyediakan transfer panas melalui luas permukaannya, sehingga panas yang terkandung di udara dan produk makanan yang ada di dalam ruang dapat diserap oleh penguapan refrigeran cair yang mengalir di dalam koil evaporator. Suction line (2) adalah saluran yang terletak pada sisi tekanan rendah kompresor, untuk menyalurkan refrigeran gas bertekanan rendah dari evaporator menuju ke katub hisap kompresor. Compressor (3) merupakan jantung sistem refrigerasi kompresi gas, berfungsi menghisap refrigeran gas dari evaporator dan menaikkan suhu dan tekanan refrigeran ke suatu titik di mana refrigeran gas akan mengembun dengan mudah pada kondisi normal media kondensasinya. Discharge line (4) adalah saluran yang terletak pada sisi tekanan tinggi kompresor, untuk menyalurkan refrigeran gas bertekanan dan bersuhu tinggi dari katub tekan kompresor menuju ke kondenser. Condensor (5) menyediakan transfer panas melalui luas permukaannya, sehingga energi panas yang terkandung dalam refrigeran dapat dipindahkan ke media kondensasi. Receiver Tank (6), sebagai tempat penyimpanan atau pengumpulan refrigeran cair yang sudah mengembun di kondensor, sehingga cairan refrigeran ke evaporator dapat dijaga konstan sesuai keperluan. Liquid line (7) adalah saluran yang terletak pada sisi masuk katub ekspansi, untuk menyalurkan refrigeran cair dari receiver tank ke refrigerant control. Refrigerant control (8) berfungsi untuk mengatur jumlah refrigeran cair yang akan diuapkan di evaporator dan untuk menurunkan tekanan refrigeran cair yang masuk ke evaporator, sehingga refrigeran cair dapat diuapkan pada suhu rendah sesuai yang diinginkan.

### **5.9 Service Valve**

Pada sisi hisap (suction) dan sisi tekan (discharge) kompresor biasanya dilengkapi dengan katub khusus untuk keperluan pemeliharaan atau service operation. Demikian juga pada sisi keluar (outlet) dari tanki tandon (receiver tank). Sesuai dengan letaknya, disebut Suction Service valve (SSV), discharge service valve (DSV), dan Liquid receiver service valve (LRSV). Receiver pada sistem yang besar, biasanya dilengkapi dengan shut-off valve pada kedua sisinya.

### **5.10 Pembagian Sistem**

Sesuai dengan tekanan operasi pada sistem bekerja, Sistem refrigerasi kompresi gas dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian sisi tekanan rendah dan sisi tekanan tinggi. Sisi tekanan rendah meliputi evaporator,

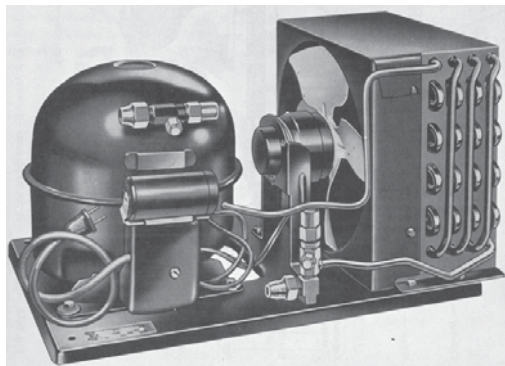
katub ekspansi dan saluran suction. Tekanan yang diterima oleh refrijeran yang berada pada sisi ini adalah tekanan rendah, di mana refrijeran akan menguap di evaporator. Tekanan pada sisi ini lazim disebut sebagai tekanan evaporasi, tekanan suction dan tekanan balik. Pada saat dilakukan pekerjaan service, tekanan rendah ini biasanya diukur dengan menggunakan compound gauge yang dipasang pada suction service valve.

Sedang sisi tekanan tinggi, mencakup kompreosr, kondensor, saluran gas panas dan receiver tank. Tekanan yang diterima oleh refrijeran yang berada pada sisi ini adalah tekanan tinggi, di mana refrijeran akan mengembun di kondenser. Tekanan pada sisi ini lazim disebut sebagai tekanan kondensasi, discharge pressure dan head pressure. Pada saat dilakukan pekerjaan service, tekanan tinggi ini biasanya diukur dengan menggunakan pressure gauge yang dipasang pada discharge service valve.

Titik pembagi antara tekanan tinggi dan tekanan rendah adalah katub ekspansi, di mana tekanan refrijeran akan diturunkan dari tekanan kondensasi ke tekanan evaporasi.

### 5.11 Condensing unit

Dalam prakteknya, untuk memudahkan dalam hal desain dan perakitan sistem refrijerasi kompresi gas, susunan kompresor, hot gas line, kondensor dan receiver tank serta penggerak kompresor biasanya motor listrik satu fasa atau tiga fasa, disusun dalam satu kesatuan unit, dan lazim disebut sebagai condensing unit. Gambar 5.8 memperlihatkan tipikal condensing unit, dengan kompresor hermetik.



Gambar 5.8  
Tipikal Air  
Cooled  
Condensing  
Unit, system  
hermetic

### **5.12 Pengaruh Tekanan Liquid terhadap Suhu Evaporasi Refrigeran**

Besarnya tekanan liquid refrigeran pada sistem kompresi gas akan menentukan besarnya suhu liquid mencapai titik penguapannya. Oleh karena itu dalam sistem kompresi gas penentuan besarnya tekanan liquid refrigeran yang disalurkan ke bagian evaporator memegang peranan penting dalam upaya memperoleh suhu evaporasi yang diinginkan. Dalam sistem kompresi gas pengaturan tekanan liquid refrigeran yang akan diuapkan di evaporator dilakukan melalui katub ekspansi. Untuk mengetahui hubungan tekanan dan suhu refrigeran dalam kondisi saturasi dapat dilihat dalam Tabel 1.

Dalam sistem kompresi gas, biasanya suhu evaporasi normal dibuat dengan ketentuan sebagai berikut  $9^{\circ}\text{C}$  di bawah suhu ruang yang diinginkan. Sebagai contoh, suatu ruang pendingin (coldroom) diinginkan mampu memelihara suhu konstan sebesar  $0^{\circ}\text{C}$ , maka suhu evaporasinya harus diatur agar dapat mencapai  $-9^{\circ}\text{C}$ .

Dalam kasus tersebut tekanan liquid refrigeran jenis R-12 di evaporator harus dapat mencapai 1.27 bar gauge. Bila menggunakan R-502 maka tekanan liquid refrigerannya harus dapat mencapai 3,32 bar gauge. Bila suhu ruang diinginkan mencapai  $-18^{\circ}\text{C}$ , maka tekanan liquid refrigeran R-502 adalah 1.25 psi gauge. Oleh karena itu karakteristik tekanan-suhu masing-masing refrigeran yang ada di tabel 1 harus dipahami dengan benar. Untuk mendeteksi tekanan evaporasi dapat dilakukan melalui pengukuran tekanan pada sisi suction kompresor.

Tabel 5.1 Hubungan antara Suhu dan Tekanan Refrigeran dalam kondisi Jenuh

| Suhu<br>OC | R12<br>PSI | R22<br>PSI | R502<br>PSI |
|------------|------------|------------|-------------|
| - 30       | -0,3       | 9          | 14          |
| - 20       | 7,2        | 21         | 28          |
| - 18       | 9,0        | 24         | 31          |
| - 16       | 11         | 27         | 34          |
| - 14       | 13         | 30         | 38          |
| - 12       | 15         | 33         | 41          |
| - 10       | 17         | 37         | 45          |
| - 6        | 29         | 44         | 50          |
| 0          | 30         | 57         | 68          |
| 5          | 38         | 70         | 82          |
| 6          | 40         | 73         | 85          |
| 7          | 41         | 75         | 88          |
| 10         | 47         | 84         | 97          |
| 15         | 57         | 100        | 114         |
| 20         | 68         | 117        | 133         |
| 25         | 80         | 137        | 154         |
| 30         | 93         | 158        | 177         |
| 36         | 111        | 187        | 207         |
| 40         | 125        | 208        | 229         |
| 45         | 146        | 242        | 264         |
| 50         | 162        | 267        | 290         |
| 55         | 188        | 308        | 332         |
| 60         | 207        | 337        | 363         |

### 5.13 Pengaruh tekanan Gas terhadap Suhu Kondensasi Refrigeran

Bila gas refrigeran didinginkan maka akan terjadi perubahan wujud atau kondensasi ke bentuk liquid. Tetapi yang perlu mendapat perhatian kita adalah titik suhu embun atau kondensasi gas refrigeran tersebut juga ditentukan oleh tekanan gasnya. Pada sistem kompresi gas, maka gas refrigeran dari sisi hisap dikompresi hingga mencapai tekanan discharge pada titik tertentu dengan tujuan bahwa gas panas lanjut (superheat)

tersebut dapat mencapai titik embunnya dengan pengaruh suhu ambien di sekitarnya. Misalnya almari es. Untuk sistem yang berskala besar maka untuk mendinginkan gas superheat ini digunakan air atau campuran air dan udara paksa. dari pengalaman, agar diperoleh performa yang optimal dari mesin refrigerasi kompresi gas maka suhu kondensasinya diatur agar mempunyai harga 6 sampai 17 derajat celsius di atas suhu ambien, tergantung dari suhu evaporasinya. Tabel 2 memperlihatkan penentuan tekanan kondensasi untuk berbagai kondisi suhu evaporasi.

Tabel 5.2. Patokan Penentuan Suhu Kondensasi

| Suhu Evaporasi                                                      | Suhu Kondensasi<br>(Air Cooled Condenser)                                               | Suhu Kondensasi<br>(Water Cooled<br>Condenser)                             |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| - 18 sampai -23<br>- 10 sampai -17<br>- 4 sampai - 9<br>di atas - 3 | Suhu ambien + 9 °C<br>Suhu ambien + 11 °C<br>Suhu ambien + 14 °C<br>Suhu ambien + 17 °C | Suhu air + 6 °C<br>Suhu air + 8 °C<br>Suhu air + 11 °C<br>Suhu air + 14 °C |

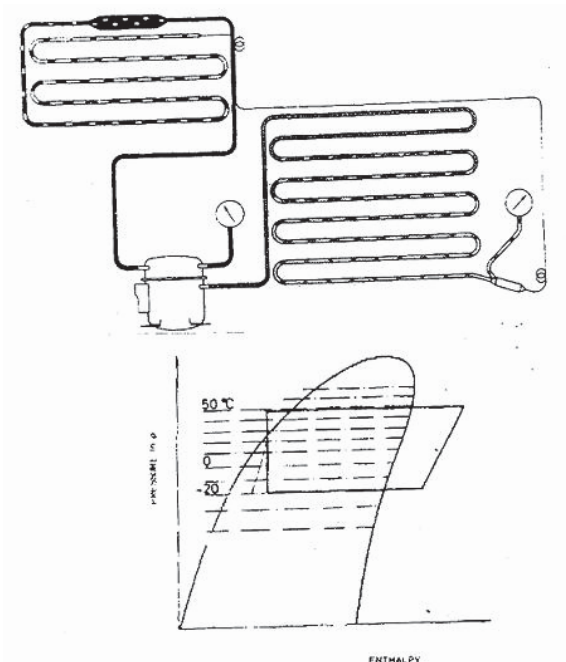
Berdasarkan patokan di atas, maka suhu dan tekanan kondensasi dapat ditentukan dengan cepat dan akurat.

**Contoh 5.1** Suatu frozen cabinet dengan R-12, mempunyai suhu evaporasi  $-18^{\circ}\text{C}$ . Suhu ambiennya  $25^{\circ}\text{C}$ . Maka berdasarkan tabel 2, suhu kondensasinya harus dapat mencapai  $25^{\circ}\text{C} + 9^{\circ}\text{C} = 34^{\circ}\text{C}$ . Sehingga tekanan kondensasinya harus dapat mencapai 7,05 barg.

### 5.14 Siklus Refrigeran

Dalam sistem kompresi uap refrigeran bersirkulasi di dalam sistem pemipaan secara tertutup. Dalam satu siklus terdapat 4 proses utama yaitu :

1. Proses Evaporasi
2. Proses Kompresi
3. Proses Kondensasi
4. Proses Ekspansi

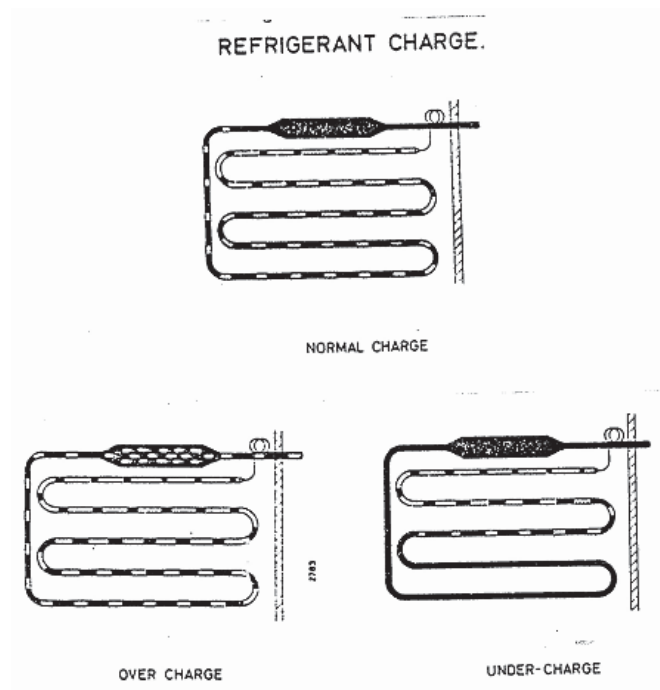


Gambar 5.9. Siklus Refrigeran

### Evaporator dan Efek Evaporasi

Liquid refrigeran yang dialirkan ke evaporator mempunyai suhu titik uap yang sangat rendah pada tekanan atmosfer, sehingga memungkinkan menyerap panas pada suhu yang sangat rendah. Koil evaporator menampung liquid refrigeran yang kemudian menguap walaupun suhu udara sekitarnya sangat rendah. Proses penguapan refrigeran di evaporator ini akan menyerap energi panas dari substansi dan udara

yang ada di sekitarnya sehingga menimbulkan efek pendinginan. Selanjutnya gas refrigeran ini dihisap oleh kompresor.



Gambar 5.10 Efek Evaporasi di Evaporator

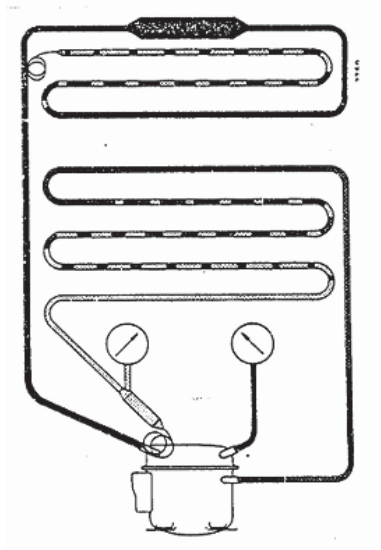
### Kompresor dan Efek Kompresi

Sistem refrigerasi kompresi gas merupakan siklus tertutup, maka kondisi keseimbangan akan selalu tercipta setiap saat. Refrigeran yang menguap di evaporator yang bersuhu rendah tidak dibuang tetapi langsung dihisap lagi oleh kompresor dan selanjutnya dikompresi hingga suhu dan tekanannya dinaikkan pada titik tertentu sesuai jenis refrigerannya. Bila kompresor menghisap lebih cepat daripada persediaan gas yang tersedia di dalam evaporator maka tekanan pada sisi hisap akan turun. Sebaliknya bila beban panas evaporator naik dan penguapan liquid refrigeran berlangsung secara lebih cepat maka tekanan sisi hisap akan naik.

Untuk keperluan praktis, berikut ini diberikan patokan harga untuk menentukan tekanan kerja kompresor pada sisi tekanan tingginya.

Pedoman yang dapat digunakan untuk keperluan praktis adalah :

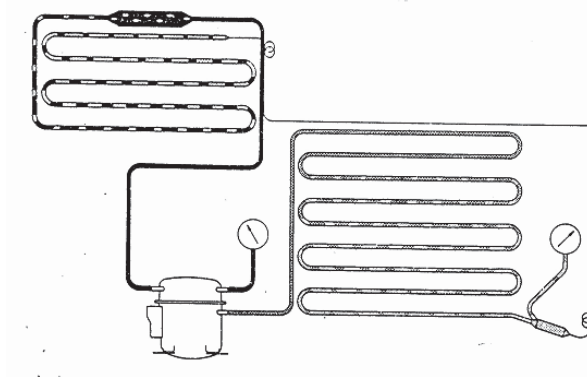
Untuk R12 : 120 - 180 psi  
Untuk R22 : 160 - 260 psi  
Untuk R134a : 100 - 165 psi  
Untuk R600a : 120 - 180 psi



Gambar 5.11 Efek Kompresi

### Kondenser dan Proses Kondensasi

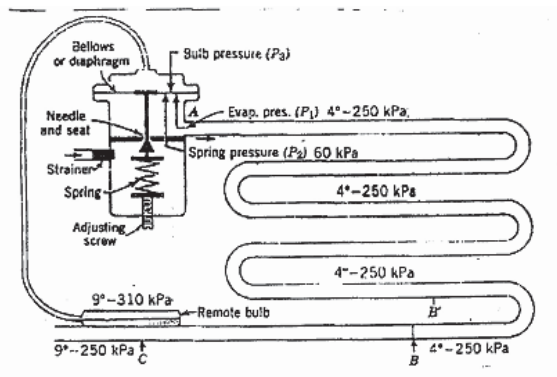
Gas refrigeran yang keluar dari sisi tekan kompresor disalurkan ke kondenser. Gas tersebut mempunyai suhu dan tekanan tinggi dalam kondisi superheat. Selanjutnya saat berada di kondenser gas panas lanjut tersebut mengalami penurunan suhu akibat adanya perbedaan suhu antara gas dan medium lain yang ada disekitarnya, yang dapat berupa udara atau air. Penurunan suhu gas refrigeran tersebut diatur sampai mencapai titik embunnya. Akibatnya refrigerannya akan merubah bentuk dari gas menjadi liquid yang masih bertekanan tinggi.



Gambar 5.12 Efek Kondensasi di Kondenser

### Katub Ekspansi dan Proses Ekspansi

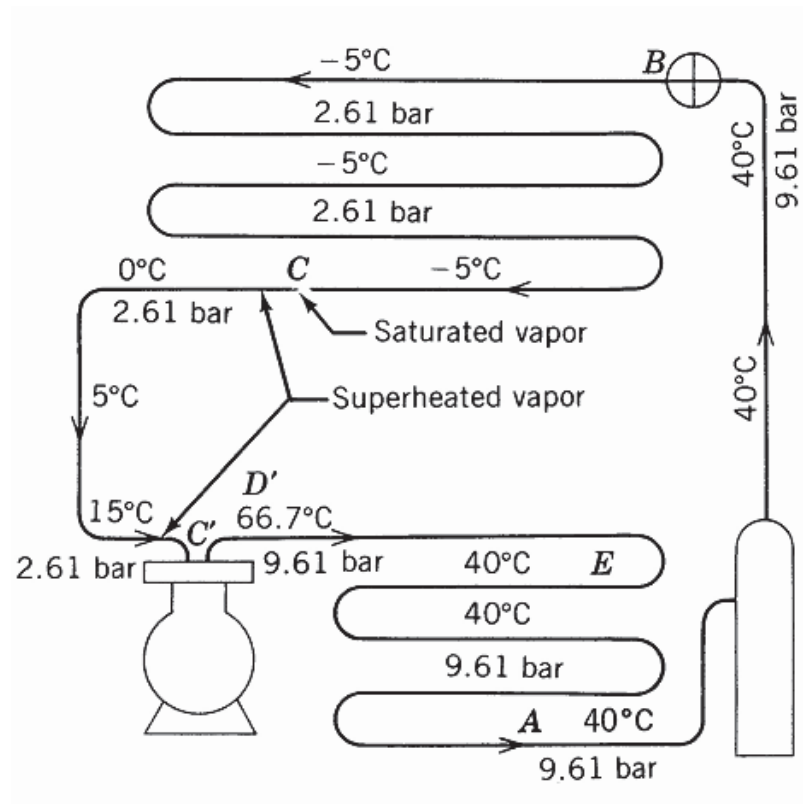
Liquid refrigeran bertekanan tinggi dari kondenser disalurkan ke katub ekspansi. Dalam keadaan yang sederhana katub ini berupa pipa kapiler dan untuk pemakaian unit yang berskala besar biasanya digunakan katub ekspansi thermostatik. Karena adanya perubahan diameter yang cukup besar maka laju refrigeran yang mengalir melalui katub ekspansi ini akan mengalami penurunan tekanan yang cukup tajam. Akibatnya akan terjadi ekspansi panas. Hasil ekspansi panas ini berupa penurunan suhu liquid refrigeran yang keluar dari katub ekspansi. Selanjutnya liquid refrigeran yang bersuhu dan bertekanan rendah tersebut disalurkan ke evaporator untuk menghasilkan efek pendinginan.



Gambar 5.13. Efek Ekspansi di Katub Ekspansi

### 5.15 Tipikal Proses Aktual

Tipikal proses refrijerasi kompresi gas yang actual diperlihatkan dalam Gambar 5.14. Seluruh data yang dipetakan dalam siklus tersebut didapatkan dari pengukuran.



Gambar 5.14 Tipikal actual Proses

#### Data Pengukuran

- Tekanan kondensasi :  $9.61\text{ bar}$
- Tekanan evaporasi :  $2.61\text{ bar}$
- Suhu Kondensasi :  $40^{\circ}\text{C}$
- Suhu Evaporasi :  $-5^{\circ}\text{C}$
- Suhu gas panas lanjut (D) :  $66.7^{\circ}\text{C}$  (sisi tekanan tinggi)
- Suhu gas panas lanjut (C') :  $15^{\circ}\text{C}$  (sisi tekanan rendah)

**Soal Latihan**

1. Jelaskan fungsi komponen utama pada mesin refrigerasi kompresi uap?
2. Jelaskan pengaruh tekanan uap terhadap suhu kondensasi?
3. Jelaskan siklus refrigerant di dalam mesin refrigerasi kompresi uap
4. Jelaskan bagaimana uap panas lanjut yang masuk ke kondenser dapat berubah wujud menjadi cairan?
5. Jelaskan bagaimana cairan refrigerant yang masuk ke evaporator dapat berubah wujud menjadi uap?
6. Bagaimana cairan refrigerant bertekanan tinggi dari liquid receiver yang masuk ke katub ekspansi dapat turun suhunya pada saat keluar dari katubnya?
7. Apa yang terjadi bila kompresor bekerja dengan tekanan evaporasi berada pada kondisi vacuum tinggi?
8. Mengapa mesin refrigerasi sering disebut sebagai mesin penukar kalor?
9. Apa pengaruh suhu lingkungan terhadap operasi mesin refrigerasi?
10. Bagaimana menentukan tekanan condensing yang optimal?

## TUGAS PRAKTEK

Topik : Mengoperasikan Sistem Refrigerasi

Alat / Bahan :

1. Trainer Light Commercial Refrigeration
2. Trainer Commercial Refrigeration

Prosedur Pelaksanaan Praktikum :

1. Meminta Ijin pada pelatih / instruktur
2. Mengidentifikasi komponen sistem refrigerasi
3. Mengoperasikan sistem refrigerasi
4. Mencatat data-data unjuk kerja / operasi sistem refrigerasi
5. Melakukan re-setting untuk mengoptimalkan unjuk kerja sistem refrigerasi
6. Membuat kesimpulan

Petunjuk :

1. Gunakan Format isian yang telah disediakan
2. Utamakan Keselamatan dan Kesehatan Kerja.

### Format 1. Identifikasi Komponen Sistem Refrigerasi

[illegible]

Format 2. Data Operasi / Unjuk Kerja Sistem Refrigerasi

| Peralatan                      | Data Pengamatan                                                                                                     | Seeting/Re-setting |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Light Commercial Refrigeration | Suhu ambien:<br>Tekanan Suction :<br>Tekanan Discharge :<br>Suhu Kabinet :<br>Suhu Evaporasi :<br>Suhu Kondensing : |                    |
| Commercial Refrigeration       | Suhu ambien:<br>Tekanan Suction :<br>Tekanan Discharge :<br>Suhu Kabinet :<br>Suhu Evaporasi :<br>Suhu Kondensing : |                    |

Komentar / Kesimpulan :

---

# DIAGRAM SIKLUS REFRIJERASI

6

---

## Kerangka Isi

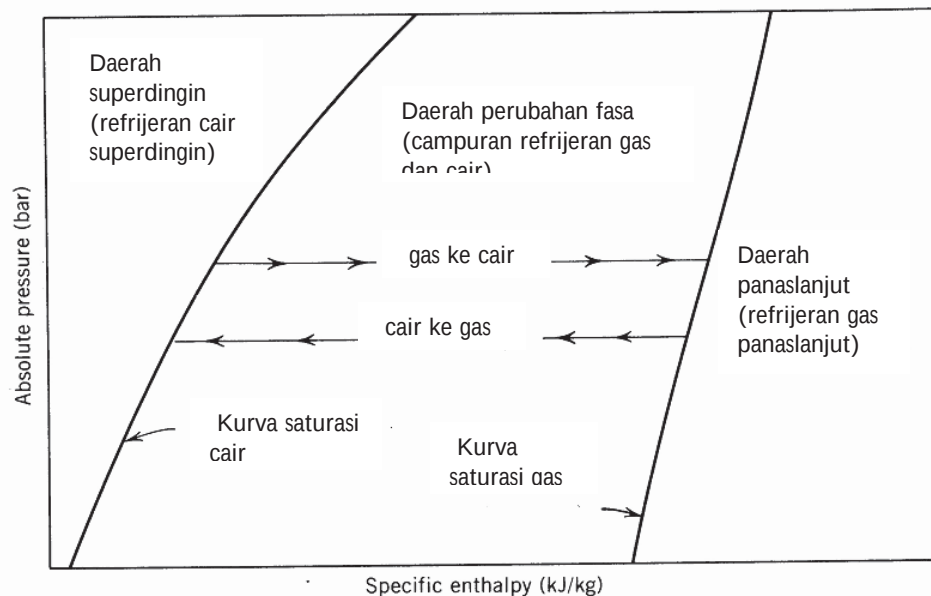
- 6.1 Diagram Siklus
- 6.2 P-H Diagram
- 6.3 Pengaruh susu evaporasi terhadap efisiensi siklus
- 6.4 Pengaruh susu kondensasi terhadap efisiensi siklus
- 6.5 Siklus Refrijerasi Aktual

### 6.1 Diagram Siklus

Untuk dapat lebih mendalami pengetahuan tentang mesin refrigerasi kompresi gas diperlukan studi yang lebih intensif tidak hanya proses individual yang menghasilkan suatu siklus tetapi juga tentang hubungan antara berbagai proses yang terjadi, dan efek yang ditimbulkan oleh perubahan satu proses terhadap proses lainnya di dalam siklus. Misalnya, perubahan pada proses kompresi, pasti akan berpengaruh terhadap proses kondensasi, ekspansi dan evaporasi. Untuk memahami hubungan antar proses tersebut digunakan suatu chart dan diagram untuk memperlihatkan siklus lengkap secara grafikal.

Representasi secara grafikal tentang siklus refrijrasi ini memungkinkan kita untuk dapat mempertimbangkan secara simultan semua perubahan yang dapat terjadi pada refrijeran dan akibat yang dapat ditimbulkannya selama proses berlangsung.

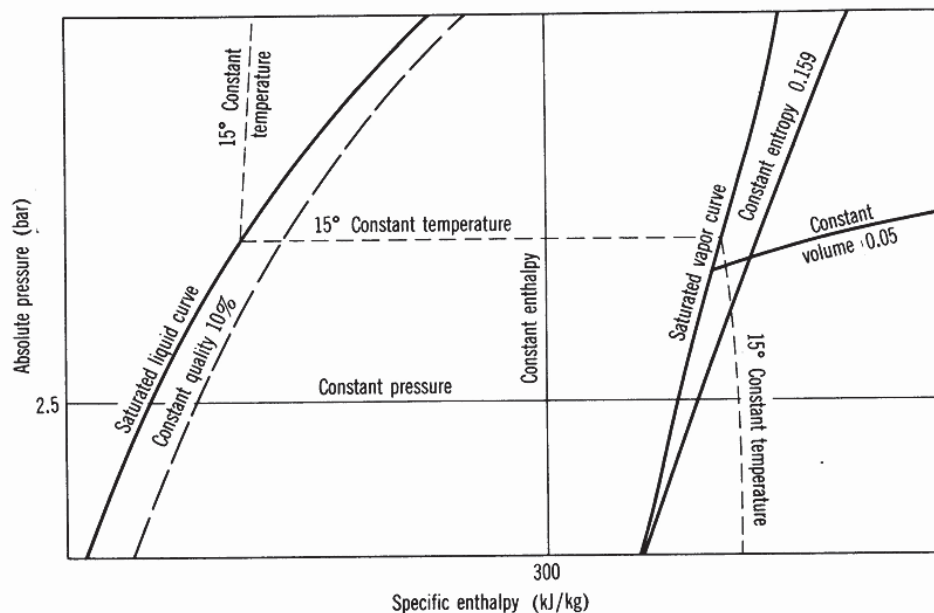
Diagram yang sering digunakan dalam menganalisa siklus refrijerasi adalah diagram tekanan versus entalpi atau lazim disebut sebagai ph Diagram.



Gambar 6.1 Pemetaan tiga daerah penting pada ph Diagram

## 6.2 P-H Diagram

Pressure-enthalpy chart atau lazim disebut ph chart adalah diagram yang menampilkan kondisi refrijeran dalam berbagai status termodinamik sebagai titik atau garis yang dipetakan pada ph diagram. Titik pada ph diagram yang menampilkan kondisi refrijeran pada satu status termodinamik dapat dipetakan bila ada 2 sifat refrijeran yang diketahui. Begitu status titik sudah terpetakan, maka sifat lainnya dapat ditentukan pada diagram. Gambar 6.1 memperlihatkan peta ph diagram. Peta ph diagram tersebut memetakan 3 pembagian daerah yang dipisahkan oleh kurva saturasi cair dan kurva saturasi gas, yaitu daerah saturasi (saturated region), superdingin (subcooled region) dan panaslanjut (superheated region).



Gambar 6.2 Pemetaan tekanan, suhu dan entalpi pada ph-chart

Daerah tengah yang dibatasi oleh kurva saturasi cair (*saturated liquid curve*) dan kurva saturasi gas (*saturated vapor curve*) disebut daerah saturasi. Pada daerah ini refrijeran mengalami perubahan fasa. Perubahan fasa dari cair ke gas berlangsung secara progresif dari arah kiri ke kanan dan perubahan dari gas ke cair, berlangsung secara progresif dari arah kanan ke kiri. Tepat pada garis kurva saturasi cair maka wujud refrijerannya adalah cair. Begitu juga tepat pada garis kurva saturasi gas, maka wujud refrijerannya adalah gas. Tepat

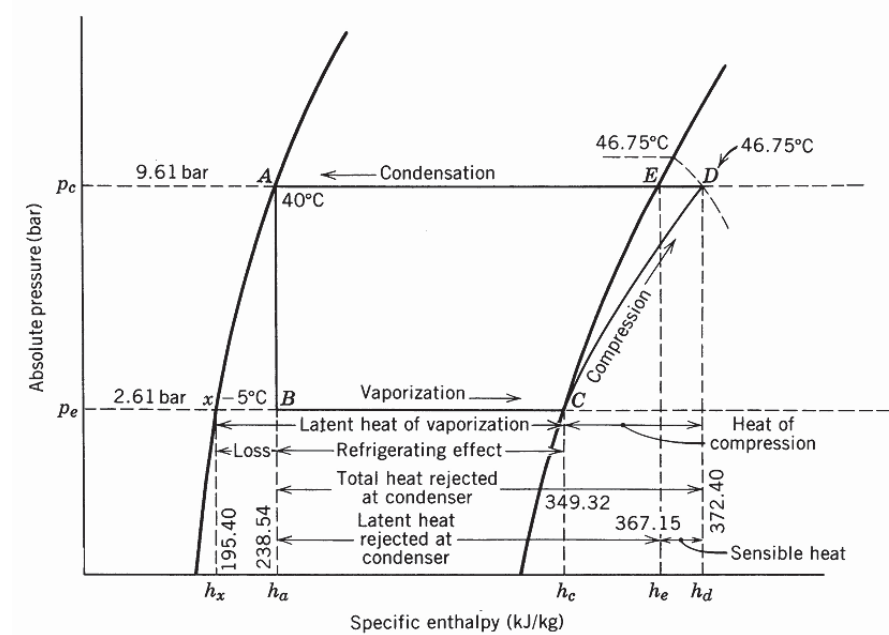
ditengah daerah saturasi, merupakan daerah campuran antara refrijeran gas dan cair dengan perbandingan sama. Pada daerah yang dekat dengan garis kurva saturasi cair, persentasi cairan lebih banyak dari pada gas. Begitu sebaliknya, pada daerah dekat garis saturasi gas, persentasi gas lebih banyak dibandingkan refrijeran cair. Perbandingan jumlah refrijeran cair dan gas ini ditunjukkan dengan garis skala yang disebut garis *constant quality* (Gambar 6.2).

Garis *constant quality* ini membentang dari atas ke bawah melalui bagian tengah chart dan hampir parallel dengan garis saturasi cair dan gas. Pada gambar 6.2 telah terpetakan garis *constant quality* 10%. Sebagai contoh, setiap titik pada garis *constant quality* dekat dengan garis saturasi cair, maka kualitas campuran refrijeran cair dan gas adalah 10%. Artinya, 10% masa refrijeran berupa gas dan 90% masa refrijeran berupa cairan atau liquid. Demikian juga untuk garis lainnya sama. Misalnya garis *constant quality* yang berada di dekat garis saturasi gas adalah 90%. Artinya, 90% masa refrijeran berupa gas dan 10% berupa liquid.

Garis horizontal yang membentang dari kiri ke kanan melalui bagian tengah chart adalah garis tekanan konstan (*constant pressure*), dan garis vertikal yang membentang dari atas ke bawah melalui bagian tengah chart adalah garis entalpi konstan (*constant enthalpy*). Semua titik pada garis *constant pressure* mempunyai tekanan yang sama. Demikian juga semua titik pada garis *constant enthalpy* mempunyai entalpi sama.

Garis suhu konstan atau *constant temperature* pada daerah *subcooled region* dinyatakan dengan garis vertical memotong garis *saturated liquid* dan parallel dengan garis *constant enthalpy*. Pada bagian tengah, karena perubahan fasa refrijeran berlangsung pada suhu dan tekanan konstan, maka garis *constant temperature* parallel dan segaris dengan garis *constant pressure*. Pada garis *saturated vapor*, maka garis *constant temperature* berbelok arah lagi dan pada daerah *superheated region*, kurva garis *constant temperature* menurun curam ke bagian dasar chart. Pada gambar 6.2, diberikan contoh sebuah garis *constant temperature* pada skala 15°C.

Selanjutnya, pada daerah *superheated region*, dipetakan garis *constant entropy*, berupa garis diagonal hampir tegak dan garis *constant volume*, yang dipetakan dengan garis lengkung ke atas melalui garis *saturated vapor*.

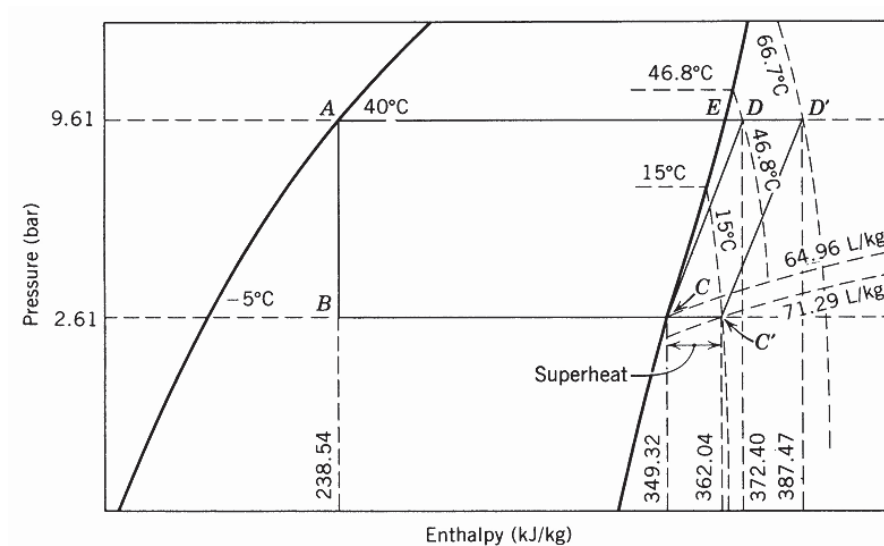


Gambar 6.3 Pemetaan Proses Refrijerasi pada ph-Chart

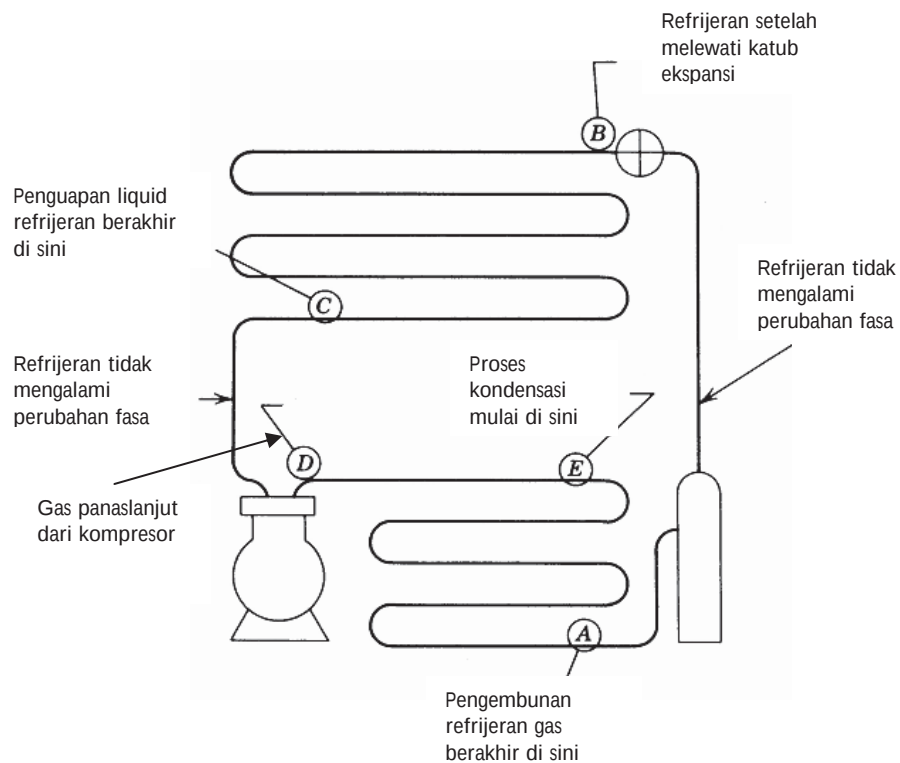
Besaran atau nilai dari berbagai sifat refrijerasi penting yang diperlukan dalam siklus refrijerasi dapat langsung dibaca dengan mudah melalui ph-chart. Untuk menyederhanakan chart, maka jumlah garis skala pada ph-chart dibuat seminimum mungkin. Oleh karena itu, bila hasil pemetaan siklus tidak berada tepat pada garis skalanya, perlu dilakukan interpolasi untuk menentukan nilai yang sebenarnya. Dalam buku ini, ph-chart perhitungannya didasarkan pada asumsi sebagai berikut: masa refrijerasi dinyatakan dalam 1 kg, spesifik volume dalam satuan  $\text{m}^3/\text{kg}$ , entalpi dalam  $\text{kJ}/\text{kg}$ , dan entropi dalam  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ . Skala entalpi dapat ditemukan pada garis horisontal di bagian bawah chart.

Gambar 6.4 memperlihatkan contoh pemetaan siklus refrijerasi pada ph-chart. Pada chart dapat dibaca berbagai kondisi refrijerasi selama siklusnya berlangsung. Titik A, B, C, D pada chart sesuai dengan titik A, B, C, dan D pada gambar 6.4. Dari chart dapat diketahui, misalnya Suhu evaporasi adalah  $-5^\circ\text{C}$ , suhu kondensasi adalah  $40^\circ\text{C}$ . Tekanan kondensasi adalah 9,61 bar, tekanan evaporasi adalah 2,61 bar. Suhu refrigerant gas pada sisi discharge kompresor adalah  $46,80^\circ\text{C}$  (D) atau  $66,70^\circ\text{C}$  (D'). Panas sensible dan panas laten yang ditambahkan atau diambil dari refrijerasi juga dapat langsung diketahui. Demikian juga

Entalpinya. Setiap Proses yang berlangsung dapat juga diketahui secara pasti.



Gambar 6.4 Contoh Pemetaan Siklus Refrijerasi pada ph-chart



Gambar 6.5 Diagram Aliran Siklus Refrijerasi Sederhana

**Proses ekspansi**

Pada kasus gambar 6.4, diasumsikan, refrijeran tidak mengalami perubahan saat keluar dari condenser menuju ke katub ekspansi, jadi Tekanan refrijeran saat mencapai katub ekspansi sama dengan kondisi di titik A, yaitu 9,61 bar. Setelah melewati katub ekspansi (titik B) tekanan refrijeran cair langsung turun karena mengalami proses ekspansi adiabatic, yaitu entalpi tidak berubah. Garis ekspansi adiabatic A-B merupakan garis lurus, Karena entalpinya tidak berubah. Pada titik B tekanan refrijeran cair adalah 2,61 bar, Suhu  $-5^{\circ}\text{C}$ , entalpi 238,535 kJ/kg.

**Proses Evaporasi**

Titik B hingga ke titik C adalah proses evaporasi, yaitu penguapan refrijeran cair di evaporator. Karena penguapan terjadi pada suhu dan tekanan konstan, maka proses B-C lazim disebut sebagai isothermal dan isobar, dan dinyatakan dengan garis lurus horizontal dari titik B ke titik C. Pada titik C penguapan refrijeran selesai, sehingga kondisinya disebut saturasi pada suhu dan tekanan penguapan. Pada titik C ini, kondisi tekanan refrijeran adalah 2,61 bar, suhu  $-5^{\circ}\text{C}$ , entalpi 349,32 kJ/kg. Garis BC lazim disebut sebagai efek refrijerasi (*refrigerating effect*) atau  $q_e$ . Besarnya  $q_e$  adalah  $(349,32 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 110,78 \text{ kJ/kg}$ .

**Proses Kompresi**

Proses refrijerasi yang ditunjukkan dalam gambar 6.3 disebut proses refrijerasi saturasi, karena kompresor menghisap saturasi gas hasil evaporasi di evaporator. Garis CD menyatakan proses kompresi yang dilakukan oleh kompresor, yaitu meningkatkan tekanan dan suhu refrijeran gas yang dihisap oleh katub suction dan kemudian mengkompresi hingga tekanan tertentu, yang disebut tekanan kondensasi, titik D. Dalam kasus ini, proses kompresi yang dilakukan oleh kompresor, lazim disebut sebagai proses kompresi isentropik, yaitu proses kompresi yang berlangsung pada entropi konstan atau *constant entropy*. Karena tidak ada perubahan entropi selama proses kompresi dari titik C ke titik D, maka entropi refrijeran pada titik C sama dengan entropi refrijeran pada titik D. Oleh karena itu titik D dapat dipetakan pada ph-chart mengikuti garis *constant entropy* dari titik C hingga memotong garis constant pressure, yaitu tekanan kondensasi, di titik D.

Pada titik D, kondisi refrijeran gas disebut gas panaslanjutan pada tekanan kondensasi 9,61 bar, pada suhu saturasi kondensasi 40°C. Garis CD lazim disebut sebagai Energi panas untuk kompresi atau kerja kompresi, atau  $q_w$ . Besarnya  $q_w$  adalah  $(372,4 - 349,32) \text{ kJ/kg} = 23,08 \text{ kJ/kg}$ .

Hasil penyerapan panas yang dilakukan kompresor, menyebabkan kondisi refrijeran gas yang dipampatkan oleh kompresor menjadi gas panaslanjutan, yang suhunya di atas suhu saturasi pada tekanan kondensasi. Suhu gas panaslanjutan ini mencapai 46,75°C, sedang suhu saturasi pada tekanan 9,61 adalah 40°C. Sebelum gas dapat diembunkan (kondensasi) maka suhu gas panaslanjutan harus diturunkan hingga ke suhu saturasi sesuai tekanan kondensasinya. Panas yang dipindahkan adalah panas sensibel (garis DE).

### Proses kondensasi

Biasanya, proses DE (panas sensibel) dan proses kondensasi EA (panas laten), berlangsung di kondensor, yaitu gas panaslanjutan dari kompresor didinginkan hingga mencapai suhu kondensasi dan kemudian mengembun. Proses DE berlangsung di bagian atas kondensor dan saluran gas panas. Pada titik E, kondisi refrijeran adalah gas saturasi pada suhu dan tekanan kondensasi. Sifat-sifatnya sebagai berikut: tekanan 9,61 bar, suhu 40°C, entalpi 367,146 kJ/kg.

Proses EA adalah proses kondensasi gas saturasi di kondensor. Karena kondensasi berlangsung pada suhu dan tekanan konstan, maka garis EA segaris dengan garis constant pressure dan constant temperature dari titik E ke titik A. Panas yang dibuang ke media kondensasi adalah  $q_c$  adalah  $(372,4 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 133,86 \text{ kJ/kg}$ .

Atau  $q_c = q_e + q_w = 110,78 + 23,08 = 133,86 \text{ kJ/kg}$ .

Bila kapasitas refrijerasi dikehendaki sebesar 1 kW, maka masa refrijeran yang harus disirkulasi di dalam sistem kompresi gas ini adalah

$$m = \frac{Q_e}{q_e} = \frac{1(\text{kW})}{110,78(\text{kJ} / \text{kg})} = 0,00903 \text{ kg/det.} = 9,03 \text{ g/det.}$$

Kapasitas kondensasi  $Q_c$  adalah

$$Q_c = (m)(q_c) = 0,00903(\text{kg} / \text{det}) \times 133,86(\text{kJ} / \text{kg}) = 1,209 \text{ kJ/det.}$$

Kapasitas kompresi  $Q_w$  adalah

$$Q_w = (m)(q_w) = 0,00903(\text{kg} / \text{det}) \times 23,08(\text{kJ} / \text{kg}) = 0,20841 \text{ kJ/kg}$$

### **Coefficient of Performance (COP)**

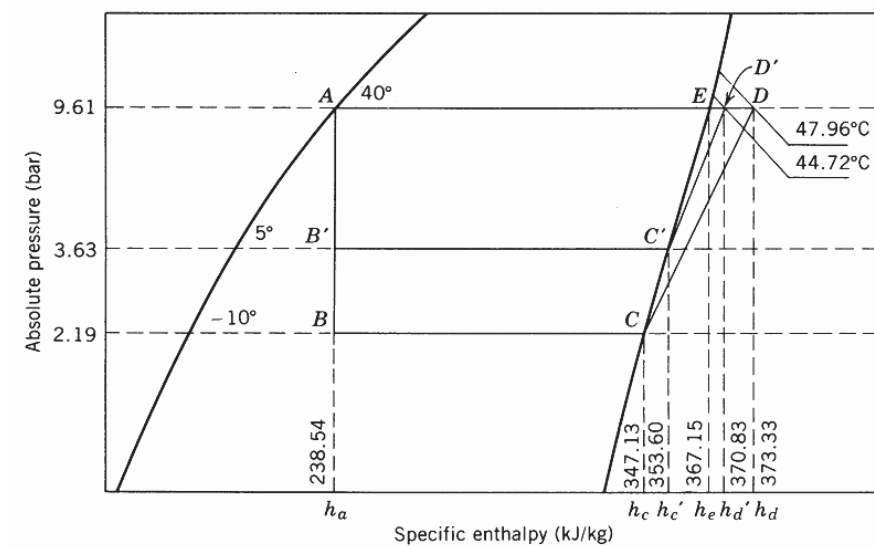
Kualitas unjuk kerja suatu sistem refrijerasi dapat dinyatakan dengan suatu angka hasil perbandingan antara energi yang diserap dari udara ruang dan energi yang digunakan untuk mengkompresi gas di kompresor. Perbandingan kedua energi tersebut lazim disebut sebagai Koefisien unjuk kerja dari siklus refrijerasi atau Coefficient of performance (cop).

$$COP = \frac{110,78(\text{kJ} / \text{kg})}{23,08(\text{kJ} / \text{kg})} = 4,8$$

### **6.3 Pengaruh Suhu Evaporasi terhadap Efisiensi Siklus**

Efisiensi siklus refrijerasi kompresi uap bervariasi terhadap suhu evaporasi dan suhu kondensasi. Tetapi pengaruh suhu evaporasi terhadap efisiensi siklus lebih besar dibandingkan suhu kondensasi.

Gambar 6.5 memberikan ilustrasi bagaimana pengaruh suhu evaporasi terhadap efisiensi siklus refrijerasi. Gambar tersebut menunjukkan hasil pemetaan pada ph-chart dari dua siklus refrijeasi yang mempunyai suhu evaporasi berbeda. Siklus pertama, dengan suhu evaporasi  $-10^{\circ}\text{C}$  ditandai melalui titik A, B, C, D, E dan siklus kedua dengan suhu  $5^{\circ}\text{C}$ , ditandai dengan titik A, B', C', D', dan E.



Gambar 6.6 Pemetaan Dua suhu Evaporasi yang berbeda  
Untuk memperlihatkan perbedaannya, marilah kita hitung entalpinya.

(a) untuk siklus dengan suhu  $-10^{\circ}\text{C}$

$$q_e = h_c - h_a = (347,13 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 108,59 \text{ kJ/kg}$$

$$q_w = h_d - h_c = (373,33 - 347,13) \text{ kJ/kg} = 26,2 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = h_d - h_a = (373,33 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 134,79 \text{ kJ/kg}$$

(b) untuk siklus dengan suhu  $5^{\circ}\text{C}$

$$q_e = h_{c'} - h_a = (353,6 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 115,06 \text{ kJ/kg}$$

$$q_w = h_{d'} - h_{c'} = (370,83 - 353,6) \text{ kJ/kg} = 17,23 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = h_{d'} - h_a = (370,83 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 132,29 \text{ kJ/kg}$$

Kenaikan Efek refrijerasi terhadap keanikan suhu evaporasi adalah

$$115,06 \text{ kJ/kg} - 108,59 \text{ kJ/kg} = 6,47 \text{ kJ/kg} \text{ Atau}$$

$$(6,47 / 108,59) \times 100 = 5,96\%.$$

Jadi semakin tinggi suhu evaporasi semakin besar pula efek refrijerasinya.

Sekarang marilah kita tinjau perbedaan masa refrijeran terhadap kenaikan suhu evaporasi.

- (a) untuk siklus dengan suhu  $-10^{\circ}\text{C}$ , besaran masa refrijeran per kilowatt kapasitas refrijerasi adalah:

$$\frac{1(\text{kW})}{108,59(\text{kJ} / \text{kg})} = 0,00921 \text{ kg/det.}$$

- (b) untuk siklus dengan suhu  $5^{\circ}\text{C}$ , besaran masa refrijeran per kilowatt kapasitas refrijerasi adalah:

$$\frac{1(\text{kW})}{115,06(\text{kJ} / \text{kg})} = 0,00869 \text{ kg/det}$$

Pada kenaikan suhu evaporasi, jumlah masa refrijeran yang disirkulasikan mengalami penurunan. Penurunannya sebesar:

$$\frac{0,00921(\text{kg} / \text{det}) - 0,00869(\text{kg} / \text{det})}{0,00921(\text{kg} / \text{det})} \times 100 = 5,65\%$$

Sekarang kita tinjau perbedaan daya teoritis yang digunakan untuk kompresi refrijeran.

- (a) untuk siklus dengan suhu  $-10^{\circ}\text{C}$ , besaran daya teoritis kompresi adalah:

$$P_t = m \times q_w = 0,00921(\text{kg/det}) \times 26,2(\text{kJ/kg}) = 0,2413 \text{ kW}$$

- (b) untuk siklus dengan suhu  $5^{\circ}\text{C}$ , besaran daya teoritis kompresi adalah:

$$P_t = m \times q_w = 0,00869(\text{kg/det}) \times 17,23(\text{kJ/kg}) = 0,1497 \text{ kW}$$

Dari sini dapat dinyatakan, bahwa kenaikan suhu evaporasi akan menurunkan daya kompresi teoritis sebesar:

$$\frac{0,2413 - 0,1497}{0,2413} \times 100 = 36,7\%$$

Terakhir, marilah kita tinjau efisiensi siklus refrijerasinya. Untuk membandingkan efisiensi siklusnya, dapat dilakukan dengan membandingkan COP antara kedua siklus tersebut.

(a) untuk siklus dengan suhu  $-10^{\circ}\text{C}$ , besaran COP adalah:

$$\frac{108,59(\text{kJ} / \text{kg})}{26,20(\text{kJ} / \text{kg})} = 4,14$$

(b) untuk siklus dengan suhu  $5^{\circ}\text{C}$ , besaran COP adalah:

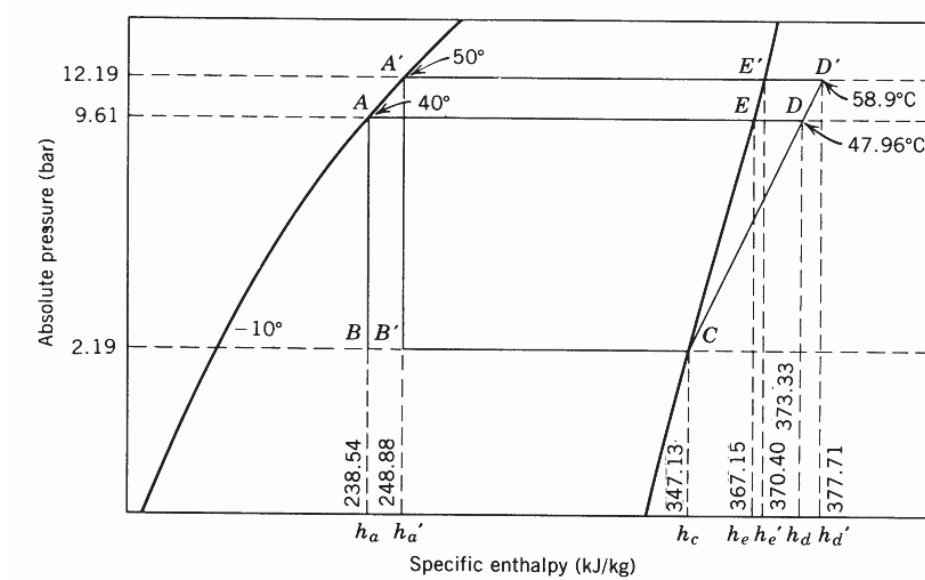
$$\frac{115,06(\text{kJ} / \text{kg})}{17,23(\text{kJ} / \text{kg})} = 6,68$$

Sudah dapat dipastikan, bahwa COP dan juga efisiensi siklus akan ikut naik bila suhu evaporasinya juga naik. Disini, kenaikan suhu evaporasi dari  $-10^{\circ}\text{C}$  ke  $5^{\circ}\text{C}$ , menyebabkan kenaikan efisiensi sebesar:

$$\frac{6,68 - 4,14}{4,14} \times 100 = 61,4\%$$

#### 6.4 Pengaruh Suhu Kondensasi terhadap Efisiensi Siklus

Walaupun pengaruh perbedaan suhu kondensasi terhadap efisiensi siklus tidak sebesar suhu evaporasi, tetapi pengaruh perbedaan suhu kondensasi terhadap efisiensi tetap tidak boleh diabaikan. Gambar 6.6 memberikan ilustrasi bagaimana pengaruh suhu kondensasi terhadap efisiensi siklus refrijerasi. Gambar tersebut menunjukkan hasil pemetaan pada ph-chart dari dua siklus refrijeasi yang mempunyai suhu kondensasi berbeda. Siklus pertama, dengan suhu evaporasi  $40^{\circ}\text{C}$  ditandai melalui titik A, B, C, D, E dan siklus kedua dengan suhu  $50^{\circ}\text{C}$ , ditandai dengan titik A' B', C, D' , dan E'.



Gambar 6.7 Pemetaan dua Suhu Kondensasi yang berbeda

Untuk memperlihatkan perbedaannya, marilah kita hitung entalpinya.

(a) untuk siklus dengan suhu evaporasi  $-10^{\circ}\text{C}$  dan suhu kondensasi  $40^{\circ}\text{C}$  sudah dihitung pada contoh kasus sebelumnya, yaitu

$$q_e = h_c - h_{a'} = (347,13 - 248,88) \text{ kJ/kg} = 98,25 \text{ kJ/kg}$$

$$q_w = h_{d'} - h_c = (377,71 - 347,13) \text{ kJ/kg} = 30,58 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = h_{d'} - h_{a'} = (377,71 - 248,88) \text{ kJ/kg} = 128,83 \text{ kJ/kg}$$

(b) untuk siklus dengan suhu kondensasi  $50^{\circ}\text{C}$

$$q_e = h_{c'} - h_a = (353,6 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 115,06 \text{ kJ/kg}$$

$$q_w = h_{d'} - h_{c'} = (370,83 - 353,6) \text{ kJ/kg} = 17,23 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = h_{d'} - h_a = (370,83 - 238,54) \text{ kJ/kg} = 132,29 \text{ kJ/kg}$$

Penurunan Efek refrijerasi terhadap kenaikan suhu kondensasi adalah

$$108,58 \text{ kJ/kg} - 98,25 \text{ kJ/kg} = 10,33 \text{ kJ/kg} \text{ Atau}$$

$$(10,33 / 108,59) \times 100 = 9,51\%.$$

Jadi semakin tinggi suhu kondensasi semakin kecil efek refrijerasinya.

Sekarang marilah kita tinjau perbedaan masa refrijeran terhadap kenaikan suhu evaporasi.

- (c) untuk siklus dengan suhu 40°C, besaran masa refrijeran per kilowatt kapasitas refrijerasi adalah:

$$\frac{1(kW)}{108,59(kJ / kg)} = 0,00921 \text{ kg/det.}$$

- (d) untuk siklus dengan suhu 50°C, besaran masa refrijeran per kilowatt kapasitas refrijerasi adalah:

$$\frac{1(kW)}{98,25(kJ / kg)} = 0,01018 \text{ kg/det}$$

Pada kenaikan suhu evaporasi, jumlah masa refrijeran yang disirkulasikan mengalami kenaikan. kenaikannya sebesar:

$$\frac{0,01018(kg / \text{det}) - 0,00921(kg / \text{det})}{0,00921(kg / \text{det})} \times 100 = 10,53\%$$

Sekarang kita tinjau perbedaan daya teoritis yang digunakan untuk kompresi refrijeran.

- (c) untuk siklus dengan suhu 40°C, besaran daya teoritis kompresi adalah:

$$P_t = m \times q_w = 0,00921(kg/\text{det}) \times 26,2(kJ/kg) = 0,2413 \text{ kW}$$

- (d) untuk siklus dengan suhu 50°C, besaran daya teoritis kompresi adalah:

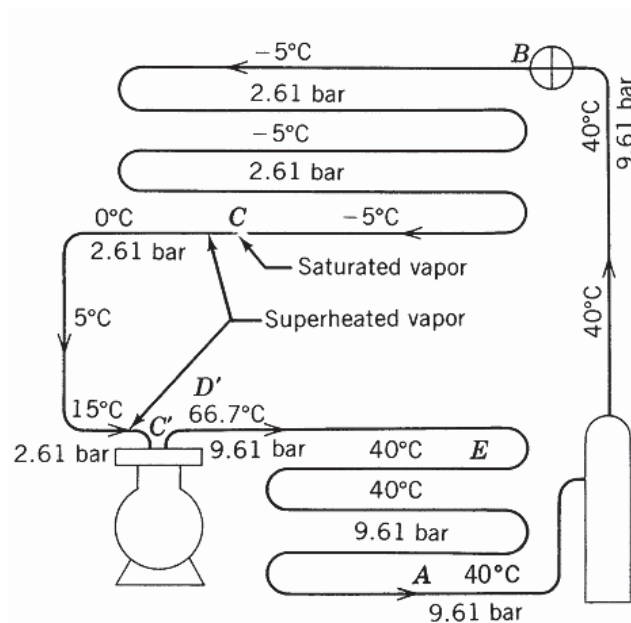
$$P_t = m \times q_w = 0,01018(kg/\text{det}) \times 30,58(kJ/kg) = 0,3313 \text{ kW}$$

Dari sini dapat dinyatakan, bahwa kenaikan suhu kondensasi akan meningkatkan daya kompresi teoritis sebesar:

$$\frac{311,3 - 241,3}{241,3} \times 100 = 29\%$$

## 6.5 Siklus Refrigerasi Aktual

Gambar 6.7 memperlihatkan diagram aliran dari suatu sistem refrigerasi kompresi uap. Dalam Proses ini, refrijerannya mengalami kondisi panaslanjutan. Dalam sesi ini, marilah kita tinjau pengaruh panaslanjutan yang dialami oleh refrijeran gas yang dihisap oleh kompresor.



Gambar 6.8 Diagram aliran untuk proses gas panaslanjutan.

Data yang diperlukan untuk keperluan pemetaan siklus pada Diagram mollier meliputi:

1. Suhu Kondensasi, meliputi saturated vapor (E), liquid-vapor mixture (E-A) dan saturated liquid (A) mempunyai suhu sama, yaitu  $40^{\circ}\text{C}$ .
2. Suhu Evaporasi, meliputi liquid-vapor mixture (B), dan saturated vapor (C) mempunyai suhu sama, yaitu  $-5^{\circ}\text{C}$ .
3. Suhu gas refrigerant yang keluar dari saluran discharge kompresor, atau superheated vapor (D), yaitu  $46,8^{\circ}\text{C}$ , D'  $66,7^{\circ}\text{C}$
4. Suhu liquid refrigerant yang akan masuk ke katub ekspansi, saturated liquid (A) yaitu  $40^{\circ}\text{C}$ .
5. Suhu gas refrigeran yang akan masuk ke sisi hisap kompresor, titik C saturasi gas  $-5^{\circ}\text{C}$ , dan titik C', superheat vapor, yaitu  $15^{\circ}\text{C}$ .

Data yang telah kita tetapkan dengan bantuan titik-titik lokasi tersebut di atas untuk memudahkan kita mem-plot data pada diagram mollier. Dengan berbekal data tersebut marilah kita petakan data pada setiap titik pada diagram Mollier, sebagai berikut.

1. Tentukan lokasi titik suhu kondensasi  $40^{\circ}\text{C}$  pada diagram mollier, kemudian tarik garis lurus secara horisontal hingga

memotong skala tekanan absolut pada sisi kiri diagram dan tandai titik tekanan absolutnya, dalam hal ini didapatkan 9,61 bar absolut.

2. Tentukan lokasi titik suhu evaporasi  $-5^{\circ}\text{C}$  pada diagram mollier, kemudian tarik garis lurus secara horisontal hingga memotong skala tekanan absolut pada sisi kiri diagram dan tandai titik tekanan absolutnya, dalam hal ini didapatkan 2,61 bar absolut.
3. Tentukan lokasi titik Suhu gas refrigeran yang akan masuk ke sisi hisap kompresor, atau superheat vapor (C'), yaitu  $15^{\circ}\text{C}$ .
4. Tentukan lokasi titik suhu Suhu gas refrigerant yang keluar dari saluran discharge kompresor, atau superheated vapor (D'), yaitu  $66.7^{\circ}\text{C}$ .
5. Tentukan lokasi titik suhu liquid refrigerant yang akan masuk ke katub ekspansi, saturated liquid (A), yaitu  $40^{\circ}\text{C}$ .
6. Kemudian Tarik garis lurus, dari titik C' ke titik D'.
7. Selanjutnya tarik dari titik A garis lurus kebawah hingga memotong garis isobar 2,61 bar.

Bila pemetaan data tersebut dilakukan dengan benar maka akan diperoleh suatu chart siklus aktual dari mesin refrigerasi yang sedang diperiksa unjuk kerjanya. Dengan bantuan ph-chart, fungsi dan performansi mesin refrigerasi dapat diketahui. Kegiatan pemeriksaan siklus aktual pada suatu mesin refrigerasi unit komersial dan industrial harus dilakukan secara periodik, untuk mengetahui fungsi dan performansi mesin setiap saat. Dalam hal ini diharapkan mesin harus selalu dalam kondisi operasi yang optimal.

Gambar 6.9 memperlihatkan hasil pemetaan data dari kasus di atas.

Dari chart di atas dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dengan asumsi mesin refrigerasinya type air cooled condenser, suhu ambient sebesar  $27^{\circ}\text{C}$ , dan suhu evaporasi sebesar  $-5^{\circ}\text{C}$ , Suhu kondensasi sebesar  $40^{\circ}\text{C}$ , dapat dianggap telah mencapai suhu optimal. Dalam hal ini beda suhu ambient dan suhu kondensasi sebesar  $13\text{K}$ . Artinya proses kondensasi mencapai titik optimalnya, sehingga produksi liquid refrigeran juga optimal.
2. Beda suhu antara suhu evaporasi  $-5^{\circ}\text{C}$ , (titik B) dan suhu refrigeran yang masuk ke sisi hisap kompresor (titik C') sebesar  $15^{\circ}\text{C}$ , berarti proses ekspansi dan proses evaporasi juga berlangsung secara optimal. Dalam hal ini kompresor hanya menghisap gas refrigeran dalam kondisi superheated vapor, dengan derajat superheat sebesar  $20\text{K}$ .

### Menentukan Kapasitas Sistem Refrigerasi

Dengan bekal gambar pemetaan pada ph-chart seperti diperlihatkan pada gambar 6.9 di atas, maka kapasitas sistem refrigerasi dapat ditentukan dengan mudah, sebagai berikut:

1. Menentukan nilai entalpi untuk setiap kondisi refrigeran, yaitu titik A, B, C, D, C', dan D'.
  - 1.1 Dari titik A, tarik garis lurus ke bawah, hingga memotong skala enthalpy. Sehingga dapat diperoleh nilai entalpinya, yaitu  $h_a = 238,54 \text{ kJ/kg}$ . Titik B mempunyai entalpi sama dengan titik A.
  - 1.2 Demikian juga dari titik C, tarik garis lurus ke bawah, hingga memotong skala enthalpy. Sehingga dapat diperoleh nilai entalpinya, yaitu  $h_c = 349,32 \text{ kJ/kg}$ .
  - 1.3 Dari titik D, tarik garis lurus ke bawah, hingga memotong skala enthalpy. Sehingga dapat diperoleh nilai entalpinya, yaitu  $h_d = 372,4 \text{ kJ/kg}$ .
  - 1.4 Demikian juga dari titik C', tarik garis lurus ke bawah, hingga memotong skala enthalpy. Sehingga dapat diperoleh nilai entalpinya, yaitu  $h_{c'} = 362,04 \text{ kJ/kg}$ .
  - 1.5 Dari titik D', tarik garis lurus ke bawah, hingga memotong skala enthalpy. Sehingga dapat diperoleh nilai entalpinya, yaitu  $h_{d'} = 387,47 \text{ kJ/kg}$ .
2. Menentukan nilai kapasitas sistem
  - 2.1 Kapasitas efek refrigerasi untuk siklus saturasi (titik C) dapat ditentukan dengan mencari selisih antara  $h_c$  dan  $h_a$ , yaitu  $349,32 \text{ kJ/kg} - 238,54 \text{ kJ/kg} = 110,78 \text{ kJ/kg}$ . Artinya bila masa refrigeran yang diuapkan di evaporator sebesar 2 kg, maka kapasitas efek refrigerasi mencapai 221,56 kJ.
  - 2.2 Kapasitas efek refrigerasi untuk siklus panaslanjut (titik C') dapat ditentukan dengan mencari selisih antara  $h_{c'}$  dan  $h_a$ , yaitu  $362,04 \text{ kJ/kg} - 238,54 \text{ kJ/kg} = 123,50 \text{ kJ/kg}$ . Artinya bila masa refrigeran yang diuapkan di evaporator sebesar 2 kg, maka kapasitas efek refrigerasi mencapai 247 kJ.
  - 2.3 Kapasitas kompresi saturasi dapat ditentukan dengan mencari selisih antara  $h_d$  dan  $h_c$ , yaitu  $372,4 \text{ kJ/kg} - 349,32 \text{ kJ/kg} = 23,08 \text{ kJ/kg}$ .
  - 2.4 Kapasitas kompresi panaslanjut dapat ditentukan dengan mencari selisih antara  $h_{d'}$  dan  $h_{c'}$ , yaitu  $387,47 \text{ kJ/kg} - 362,04 \text{ kJ/kg} = 25,43 \text{ kJ/kg}$ .

- 2.5 Kapasitas kondensasi siklus saturasi dapat ditentukan dengan mencari selisih antara  $h_d$  dan  $h_a$ , yaitu  $372,4 \text{ kJ/kg} - 238,54 \text{ kJ/kg} = 133,86 \text{ kJ/kg}$ .
- 2.6 Kapasitas kondensasi siklus panaslanjutan dapat ditentukan dengan mencari selisih antara  $h_d'$  dan  $h_a$ , yaitu  $387,47 \text{ kJ/kg} - 238,54 \text{ kJ/kg} = 148,93 \text{ kJ/kg}$ .

Dari perhitungan di atas dapat diambil kesimpulan, sebagai berikut:

1. Panas kompresi per kilogram pada siklus panaslanjutan sedikit lebih besar daripada siklus saturasi, yaitu sebesar 10%. Di mana daya kompresi siklus saturasi  $23,08 \text{ kJ/kg}$  sedang daya kompresi siklus panaslanjutan adalah  $25,43 \text{ kJ/kg}$ .

$$\frac{25,43 - 23,08}{23,08} \times 100 = 10\%$$

2. Pada suhu dan tekanan kondensasi sama, suhu gas panas yang keluar dari katub discharge kompresor pada siklus panaslanjutan sedikit lebih tinggi daripada siklus saturasi, yaitu  $66,7^\circ\text{C}$  untuk siklus panaslanjutan dan  $46,8^\circ\text{C}$  untuk siklus saturasi.
3. Pada siklus panaslanjutan, panas yang dibuang di kondenser lebih besar daripada siklus saturasi. Pada siklus panaslanjutan  $q_c = 148,93 \text{ kJ/kg}$ , pada siklus saturasi  $q_c = 133,86 \text{ kJ/kg}$ . Kenaikannya sebesar

$$\frac{148,93 - 133,86}{133,86} \times 100 = 11,26\%$$

4. COP pada siklus saturasi adalah

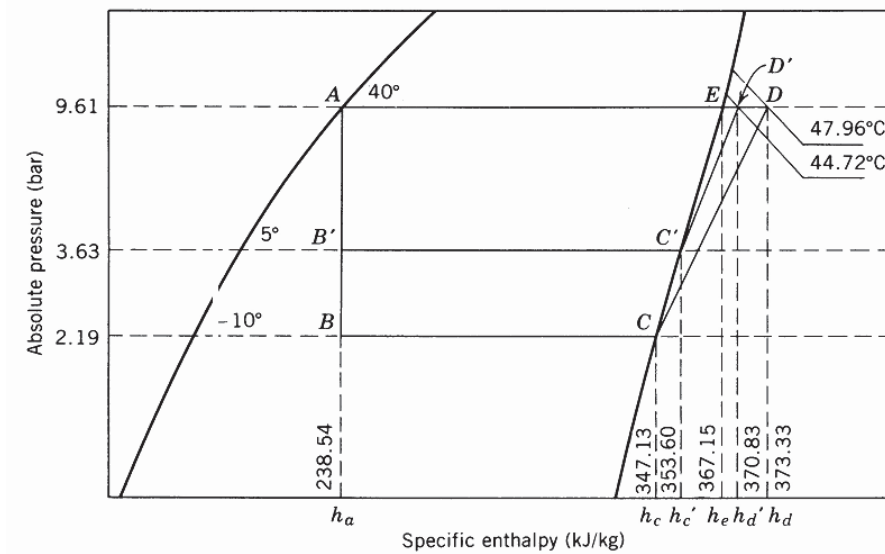
$$\frac{110,79}{23,08} = 4,8$$

5. COP pada siklus panaslanjutan adalah

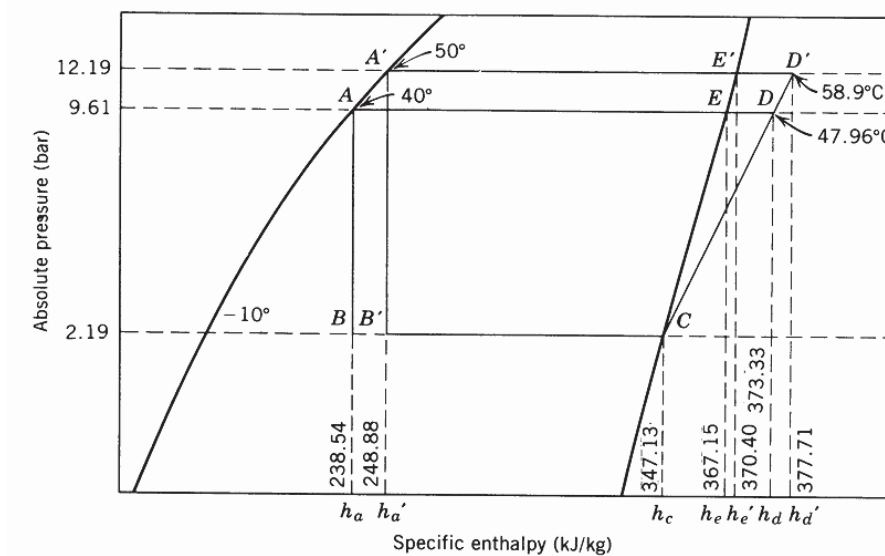
$$\frac{123,5}{25,43} = 4,85$$

## Permasalahan

1. Pelajari hasil pemetaan siklus refrijerasi pada gambar berikut ini, berikan kesimpulanmu.



2. Pelajari juga hasil pemetaan siklus refrijerasi pada gambar berikut ini, berikan kesimpulanmu.



---

# Aplikasi Sistem Refrijerasi Mekanik

7

---

## Kerangka Isi

- 7.1 Ruang Lingkup Industri
- 7.2 Klasifikasi
- 7.3 Pengawetan Makanan
- 7.4 Gudang Pendinginan
- 7.5 Cara Pembekuan

## 7.1 Ruang Lingkup Industri

Pada awal produksinya, peralatan refrijerasi mekanik berbadan besar, mahal dan tidak begitu efisien. Penggunaanya pun masih sangat terbatas, yaitu sebagai Mesin Pembuat Es, Penyimpanan dan Pengemasan Daging dan sebagai Gudang Pendinginan.

Hanya dalam beberapa dekade, industri refrijerasi mengalami perkembangan yang sangat cepat, hingga sekarang. Ada beberapa faktor yang menyebabkannya. Pertama, dengan telah dikembangkannya metoda atau cara manufaktur yang presisi, menjadikan peralatan refrijerasi modern menjadi semakin kecil dan kompak dan menjadi semakin efisien. Kemajuan ini seiring dengan kemajuan yang dicapai dalam bidang motor listrik, sebagai penggerak utama kompresor, sehingga memungkinkan mendesain peralatan refrijerasi dalam skala kecil untuk keperluan domestik dan komersial serta untuk keperluan lainnya misalnya transportasi, kenyamanan hunian, dan proses produksi di industri.

## 7.2 Klasifikasi

Untuk keperluan studi dan pembelajaran, industri refrijerasi dapat dikelompokkan ke dalam enam kategori umum, yaitu (1) refrijerasi domestik, (2) refrijerasi komersial, (3) refrijerasi industri, (4) Refrijerasi transportasi dan Kapal Laut, (5) Tata Udara untuk kenyamanan Hunian, dan (6) Tata Udara untuk keperluan proses produksi di industri.

### Refrijerasi Domestik

Refrijerasi domestik memiliki ruang lingkup yang agak terbatas, ditujukan pada refrigerator dan freezer untuk keperluan rumah tangga. Walaupun ruang lingkungannya terbatas, tetapi industri refrijerasi domestik ini mengambil porsi yang cukup signifikan pada industri refrijerasi secara keseluruhan.

Peralatan refrijerasi domestik, biasanya berkapasitas kecil, konsumsi daya input antara 35 watt hingga 375 watt, dengan menggunakan kompresor sistem hermetic. Tidak banyak masalah yang dijumpai pada Refrijerasi domestik, hanya memerlukan sedikit pemeliharaan.

## Refrijerasi Komersial

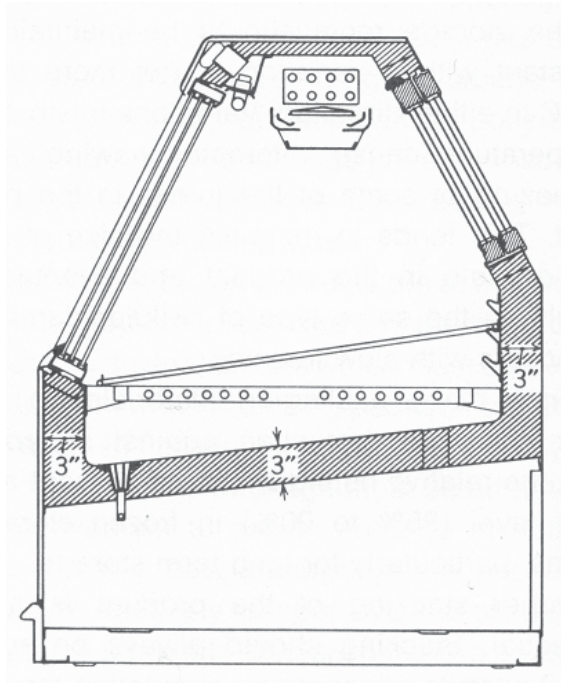
Ada banyak masalah yang dihadapi oleh dunia Refrijerasi komersial, antara lain perencanaan atau desain, pemasangan atau instalasi, dan pemeliharaan. Aplikasi refrijerasi komersial telah merambah di banyak bidang usaha, antara lain pasar ritel, restoran, hotel dan industri lainnya yang berkaitan dengan penyimpanan, pengolahan dan pengawetan makanan.

Sesuai dengan fungsinya, ada banyak jenis dan tipe yang tersedia di pasaran untuk memenuhi kebutuhan komersial, misalnya reach-in refrigerator, single-duty service case, double-duty service case, high multishelf produce sales case, dan open type display.



Gambar 7.1 Reach-in Refrigerator

Reach-in Refrigerator merupakan peralatan yang paling banyak pemakainya untuk keperluan komersial. Beberapa pengguna peralatan ini dapat disebutkan di sini, toko ritel, toko sayuran dan buah-buahan, toko daging, toko roti, toko obat, restoran dan warung makan, toko bunga dan hotel. Biasanya peralatan ini digunakan sebagai tempat penyimpanan dan sebagian lagi digunakan sebagai tempat pajangan (display). Sebagai tempat pajangan, pintunya terbuat dari kaca.

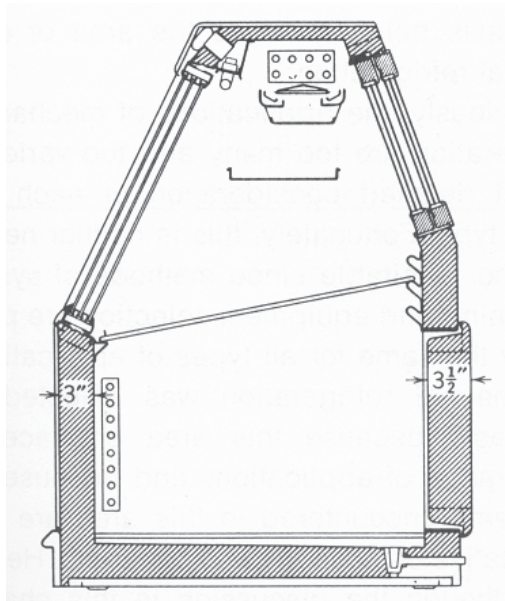


Gambar 7.2 Display Case, single duty.

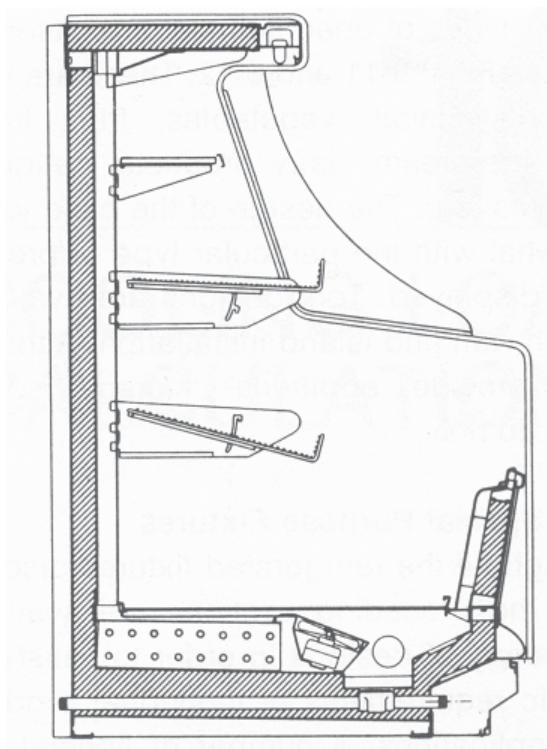
#### Display Case

Sesuai dengan namanya, display case adalah peralatan refrigerasi komersial yang berfungsi sebagai tempat pajangan produk atau komoditi yang akan dijual. Tampilan display case ini sengaja didesain dengan sangat atraktif, untuk menimbulkan minat dan ketertarikan para konsumen agar dapat menstimulasi penjualan produk. Sehubungan dengan fungsinya tersebut, maka penampilan dan pajangan komoditi merupakan pertimbangan utama dalam mendesain display case. Pada display case, tidak begitu memperhatikan kondisi penyimpanan yang optimal, sehingga lama penyimpanan komoditi di dalam display case sangat terbatas, dengan rentang waktu hanya beberapa jam untuk produk tertentu hingga beberapa minggu, untuk produk tertentu pula, dan biasanya paling lama 3 minggu.

Ada dua tipe display case, yaitu single duty, seperti Gambar 7.2 dan double duty seperti gambar 7.3



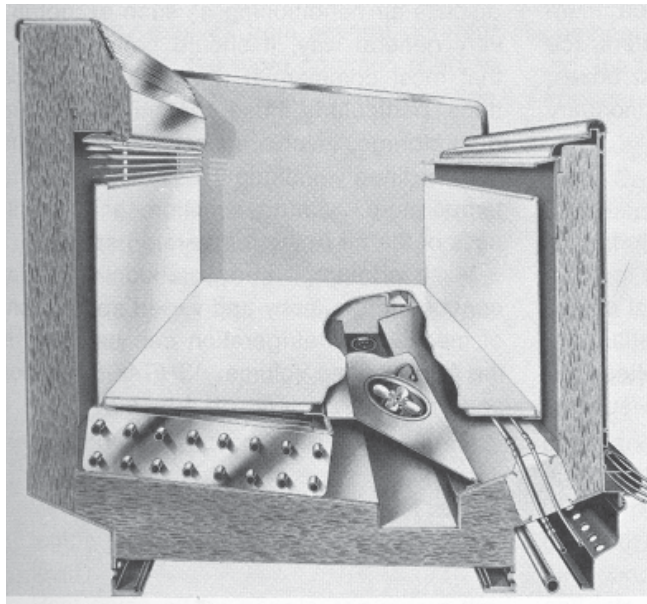
Gambar 7.3 Service case, Double duty.



Gambar 7.4 Multishef

Multishelf display case, seperti yang diperlihatkan dalam gambar 7.4 digunakan untuk tempat pajangan komoditi seperti daging, sayuran, buah-buahan, makanan beku, es krim dan komoditi lainnya.

Display case dapat digunakan untuk berbagai komoditi karena dilengkapi dengan pengontrol suhu dan kelembaban udara. Suhu dan kelembaban udara diatur sesuai dengan komoditi yang disimpan di dalamnya.



Gambar 7.5 Open type display case, untuk penyimpanan makanan beku dan es krim.

### **Refrijerasi Industri**

Refrijerasi industri berbeda dengan refrijerasi komersial. Masih banyak yang beranggapan, bahwa refrijerasi industri dan refrijerasi komersial adalah sama, karena pembatasan antara keduanya tidak dinyatakan dengan jelas. Tetapi yang sudah pasti, kapasitas refrijerasi industri jauh lebih besar daripada kapasitas refrijerasi komersial dan mempunyai fitur yang berbeda, khususnya dalam hal pelayanan dan pengoperasiannya. Pengoperasian refrijerasi industri memerlukan personil yang bersertifikat atau mempunyai lisensi.

Tipikal refrijerasi industri adalah pabrik es, cold storage, pengepakan makanan, pabrik tekstil, pabrik kimia, pabrik ban dll.

### **Refrijerasi Transportasi Darat dan Kapal Laut**

Yang termasuk dalam kategori ini adalah container yang dilengkapi dengan system refrijerasi (refrigerated container) untuk mengawetkan komoditi yang ada di dalamnya. Komoditi yang disimpan dalam container seperti ini adalah komoditi ekspor/impor, misalnya daging dan buah-buahan.

Refrijerasi kapal laut (marine refrigeration) mengacu pada refrijerasi pada angkutan laut atau ekspedisi muatan kapal laut, meliputi cargo dan pengapalan barang-barang atau komoditi lainnya.

### **Tata Udara**

Sesuai dengan namanya, tata udara atau pengkondisian udara berkaitan dengan kondisi udara di dalam suatu ruang tertentu. Tata udara tidak hanya berkaitan dengan pengaturan suhu udara melainkan juga pengaturan kelembaban dan pergerakan udara ruang termasuk penyaringan udara untuk mendapatkan udara ruang yang bersih bebas polutan.

Dalam prakteknya, dibedakan menjadi dua, yaitu pengkondisian udara untuk kenyamanan dan pengkondisian udara untuk keperluan proses produksi di industri. Pengkondisian udara untuk kenyamanan adalah pengkondisian udara yang diterapkan pada rumah tangga, sekolah, kantor, hotel, restoran, mobil, bus, kereta api, pesawat terbang, kapal laut dan bangunan lainnya yang ditujukan untuk memperoleh kenyamanan hunian.

Dengan kata lain, pengkondisian udara yang tidak ada hubungannya dengan kegiatan pengkondisian udara untuk kenyamanan seperti yang disebutkan di atas, disebut Tata Udara industri. Pengkondisian udara untuk keperluan industri antara lain (1) mengontrol kandungan uap air pada bahan-babahn hidrokopis, (2) mengatur laju reaksi kimiawi dan biokimia, (3) membatasi thermal expansion dan constraction, dan (4) meyediakan udara bersih bebas polutan, untuk keperluan operasi bedah di rumah sakit atau untuk keperluan produksi chip di industri elektronika.

### 7.3 Pengawetan Makanan

Salah satu aplikasi terbesar peralatan refijerasi adalah untuk keperluan Pengawetan komoditi khususnya produk makanan. Dalam fase kehidupan modern, masalah penyimpanan dan pengawetan makanan menjadi satu hal yang sangat penting dibandingkan dengan fase kehidupan jaman dulu. Ketimpangan antara populasi penduduk di perkotaan dan pedesaan menjadi pemicunya. Dengan semakin banyaknya urbanisasi, penduduk kota menjadi semakin banyak, yang berarti memerlukan persediaan makanan yang semakin banyak pula. Di lain pihak, makanan di hasilkan dan diolah di daerah pedesaan. Jadi, makanan tersebut harus dikirimkan dan kemudian disimpan sebelum dikonsumsi. Proses pengiriman dan penyimpanan ini dapat berlangsung dalam hitungan harian, mingguan, bulanan bahkan tahunan. Khususnya komoditi sayuran dan buah-buahan, yang tidak dapat diproduksi setiap saat, memerlukan penyimpanan yang bagus agar dapat dikonsumsi setiap saat sepanjang tahun.

#### **Kerusakan dan Pembusukan Makanan**

Pada hakekatnya, pengawetan makanan adalah kegiatan pencegahan agar makanan tidak cepat rusak atau busuk atau basi. Karena pengawetan makanan berkaitan dengan pembusukan maka pengetahuan tentang proses pematangan dan pembusukan makanan menjadi suatu yang dominan.

Produk makanan yang mengalami kerusakan dan pembusukan akan menurunkan harga jualnya. Makanan yang mengalami kerusakan berat, akan berubah warna, dan menimbulkan bau tak sedap. Makanan yang mengalami kerusakan ringan, walaupun masih dapat dimakan, tetapi akan kehilangan kandungan gizi dan vitaminnya. Oleh karena itu diupayakan agar makanan tersebut tetap berada pada kondisi awal ketika masih segar.

Kerusakan dan pembusukan makanan disebabkan oleh karena adanya proses kimiawi di dalam makanan tersebut. Proses kimiawi tersebut dapat dipicu oleh unsur yang ada di dalam makanan itu sendiri atau unsur dari luar.

### **Enzim**

Enzim adalah suatu unsur kimiawi yang sangat kompleks, susah dimengerti. Enzim dapat dianggap sebagai unsur pengikat (katalisator) kimiawi, yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan kimiawi di dalam zat organik. Terdapat banyak jenis enzim, setiap enzim akan menghasilkan satu jenis reaksi kimia. Sebagai contoh, enzim laktose, dikenal karena ia dapat mengubah laktose (kadar gula dalam susu) menjadi asam laktasik, dalam proses fermentasi.

Setiap zat organik pasti mempunyai enzim. Enzim yang terkandung dalam zat organik berfungsi untuk membantu aktivitas kehidupan sel-sel yang ada di dalam zat tersebut, misalnya pernafasan (respirasi), pencernaan, pertumbuhan dan reproduksi pada hewan dan manusia. Enzim juga membantu proses pematangan pada buah-buahan.

Untuk alasan pengawetan makanan, maka perkembangan enzim harus dihambat, agar produk makan tidak cepat rusak, basi dan membusuk. Pada suhu tinggi aktivitas enzimisasi akan berlangsung sangat cepat. Ingat bila kita menginginkan pisang yang baru dipetik dari pohonnya cepat matang maka harus dibungkus kain, untuk menaikkan suhunya. Dalam kondisi suhu yang lebih tinggi, maka pisang akan cepat matang. Sebaliknya, pada suhu rendah proses enzimisasi juga akan terhambat.

Aksi enzimisasi juga akan berlangsung dengan cepat dalam kondisi banyak oksigen. Dalam kondisi kekurangan oksigen maka proses enzimisasi juga terhambat. Oleh karena itu dalam, makanan yang akan diawetkan harus dikemas dengan baik sehingga bebas dari oksigen.

### **Mikro-organisme**

Yang termasuk mikroorganisme dalam konteks pengawetan makanan adalah (1) bakteri, (2) ragi, dan (3) jamur. Zat mikroorganik ini terdapat di mana-mana, di udara, air, tanah, di tubuh hewan dan di tanaman. Bila enzim adalah zat yang mendorong pertumbuhan maka zat mikro-organisme ini cenderung mendorong terjadinya fermentasi, putrefikasi dan pembusukan.

### Bakteri

Bakteri berkembang biak melalui pemecahan sel. Satu sel bakteri dapat pecah menjadi dua, kemudian masing-masing pecahannya juga dapat memecahkan diri, begitu seterusnya. Perkembangan sel bakteri ini dapat dihambat dengan menurunkan suhunya. Misalnya, kasus perkembangan bakteri yang hidup di susu. Tabel 7.1 memperlihatkan pertumbuhan bakteri pada susu pada berbagai kondisi suhu.

Seperti bakteri, Ragi juga akan terhambat pertumbuhannya pada suhu rendah. Jamur juga akan terhambat pertumbuhannya pada suhu rendah. Tetapi jamur akan semakin terhambat pertumbuhannya pada udara kering atau tidak lembab.

Tabel 7.1 Pertumbuhan bakteri pada susu

| Suhu<br>°C | Waktu pertumbuhan dalam jam |            |           |           |
|------------|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
|            | 24                          | 48         | 96        | 168       |
| 0          | 2.400                       | 2.100      | 1.850     | 1.400     |
| 4          | 2.500                       | 3.600      | 218.000   | 4.200.000 |
| 8          | 3.100                       | 12.000     | 1.480.000 |           |
| 10         | 11.600                      | 540.000    |           |           |
| 16         | 180.00                      | 28.000.000 |           |           |
| 30         | 1.400.000.000               |            |           |           |

## 7.4 Gudang Pendinginan

Gudang pendinginan, dapat dibedakan ke dalam tiga kategori, yaitu (1) Penyimpanan Jangka pendek (temporer), (2) penyimpanan jangka panjang, dan (3) Penyimpanan bahan makanan beku. Untuk keperluan penyimpanan jangka pendek dan jangka panjang, makanan didinginkan dan disimpan pada suhu di atas suhu titik beku. Untuk keperluan penyimpanan makanan beku, maka makanan harus dibekukan terlebih dahulu, kemudian disimpan pada suhu  $-12^{\circ}\text{C}$  hingga  $-23^{\circ}\text{C}$ .

Penyimpanan jangka pendek, berkisar antara satu atau dua hari untuk produk tertentu. Untuk produk lain, dapat tahan hingga maksimal 15 hari.

Penyimpanan jangka panjang biasa dilakukan untuk keperluan komersial di gudang-gudang pendinginan. Lama penyimpanan tergantung jenis produk. Untuk produk makanan sensitif seperti tomat, kantalop dan brokoli hanya dapat disimpan selama tujuh sampai sepuluh hari pada suhu tertentu. Untuk produk makanan yang lebih kuat, seperti bawang, dan daging asap dapat disimpan hingga delapan bulan. Untuk produk makanan yang cepat busuk, bila diinginkan dapat disimpan dalam waktu lama, harus dibekukan dan disimpan di gudang pembekuan. Tetapi untuk tomat tidak dapat dibekukan.

Suhu dan kelembaban udara gudang penyimpanan harus diatur dan disesuaikan dengan jenis produk. Tabel 7.2 menyajikan penjelasan yang lebih rinci.

## **7.5 Cara Pembekuan**

Ada dua cara pembekuan makanan yang dapat dilakukan, yaitu pembekuan lamban dan pembekuan cepat. Pembekuan lambat dapat dilakukan dengan meletakkan makanan yang akan dibekukan pada suatu tempat yang bersuhu rendah, dan dibiarkan membeku secara perlahan-lahan. Makanan yang akan dibekukan biasanya dikemas dalam suatu pengepakan kedap udara, dalam besaran 5 sampai 15 kilogram per kemasan. Kemasan produk tersebut disimpan di ruang dengan suhu  $-18^{\circ}\text{C}$  hingga  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Pembekuan secara cepat dilakukan dalam tiga cara, yaitu (1) pencelupan, (2) kontak tidak langsung, dan (3) air blast. Pembekuan dengan pencelupan produk, dilakukan dengan merendam produk ke dalam cairan sodium klorida. Sodium klorida mempunyai daya hantar tinggi, sehingga proses pembekuan dapat berlangsung dengan cepat. Pembekuan dengan kontak tidak langsung, dapat dilakukan dengan meletakkan produk di atas plat pembekuan. Karena produk yang akan dibekukan mempunyai kontak thermal langsung dengan plat pembekuan, maka permukaan kontak akan menentukan kecepatan proses pembekuan.

Pembekuan dengan sistem air blast, adalah kombinasi pembekuan melalui suhu rendah dan kecepatan udara dingin yang dihembuskan ke arah produk.

---

# EVAPORATOR

8

---

## Kerangka Isi

- 8.1 Jenis Evaporator
- 8.2 Konstruksi evaporator
- 8.3 Bare tube evaporator
- 8.4 Plate surface evaporator
- 8.5 Finned Evaporator
- 8.6 Kapasitas evaporator

## 8.1 Jenis Evaporator

Evaporator adalah media pemindahan energi panas melalui permukaan agar refrijeran cair menguap dan menyerap panas dari udara dan produk yang ada di dalam ruang tersebut. Karena, begitu banyaknya variasi kebutuhan refrijerasi, maka evaporator juga dirancang dalam berbagai tipe, bentuk, ukuran dan desain. Evaporator dapat dikelompokkan dalam berbagai klasifikasi, misalnya, konstruksi, cara pencatuan refrijeran cair, kondisi operasi, cara sirkulasi udara dan jenis katub ekspansinya.

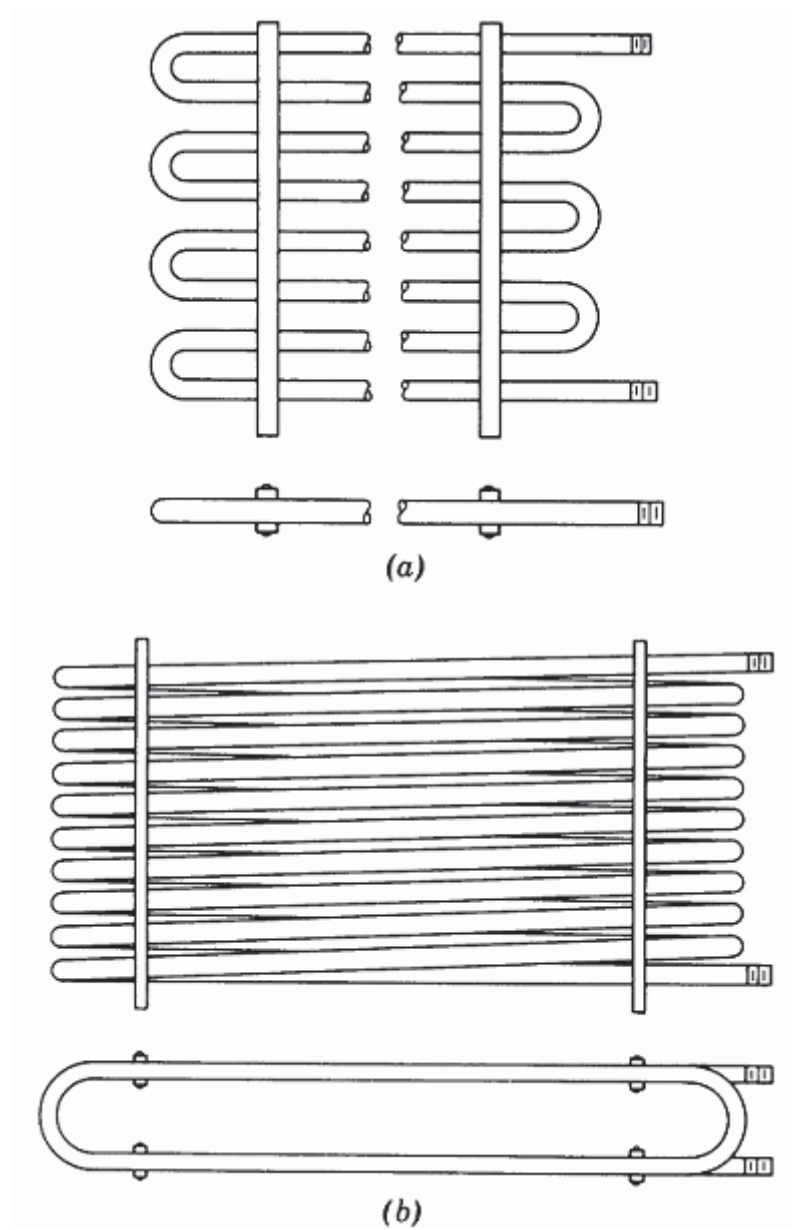
## 8.2 Konstruksi Evaporator

Dilihat konstruksinya, evaporator dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu (1) bare-tube, (2) plate-surface, dan (3) finned. Evaporator jenis Bare tube dan plate-surface dapat dikelompokkan sebagai evaporator permukaan primer, di mana permukaan untuk transfer panas mempunyai kontak langsung dengan refrijeran cair yang menguap di dalamnya. Kalau evaporator jenis finned, maka hanya pipa refrijeran yang disebut permukaan primer, sedangkan finned-nya disebut sebagai evaporator permukaan sekunder. Finned hanya berfungsi menangkap udara disekitarnya dan mengubungkannya ke pipa refrijeran.

Evaporator Bare-tube dan plate-surface lazim digunakan untuk keperluan pendinginan air dan pendinginan udara yang suhunya di bawah 10C. Akumulasi bunga es pas permukaan evaporator tidak dapat dicegah. Oleh karena itu perlu diupayakan untuk menghilangkan bunga es di permukaan evaporator.

## 8.3 Bare tube Evaporator

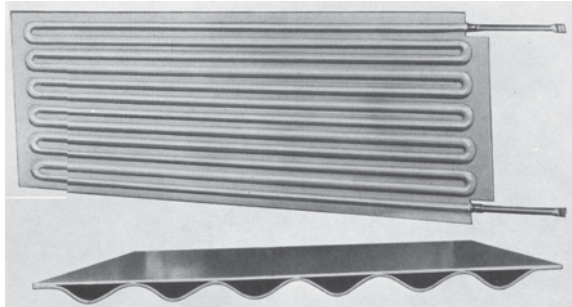
Evaporator jenis bare-tube, terbuat dari pipa baja atau pipa tembaga. Penggunaan pipa baja biasanya untuk evaporator berkapasitas besar yang menggunakan ammonia. Pipa tembaga biasa digunakan untuk evaporator berkapasitas rendah dengan refrijeran selain ammonia. Gambar 8.1 memperlihatkan evaporator jenis bare-tube.



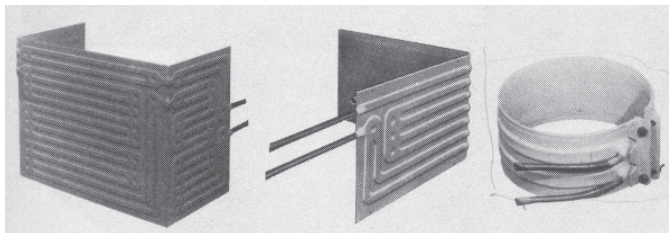
Gambar 8.1 Desain Evaporator Bare-tube.  
 (a) Flat zigzag coil, (b) oval trombone coil

#### 8.4 Plate Surface Evaporator

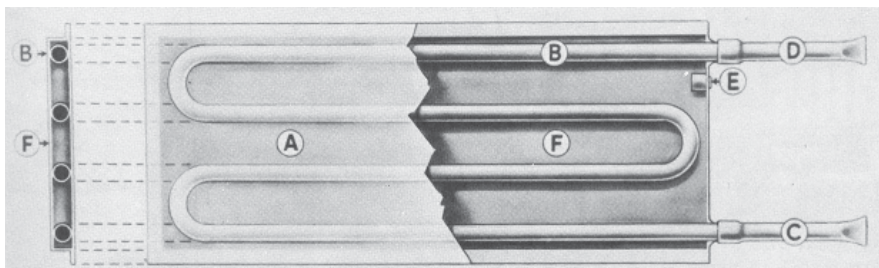
Evaporator permukaan plat atau plate-surface dirancang dengan berbagai jenis. Beberapa diantaranya dibuat dengan menggunakan dua plat tipis yang dipres dan dilas sedemikian sehingga membentuk alur untuk mengalirkan refrijean cair. Gambar 8.2. Cara lainnya, menggunakan pipa yang dipasang diantara dua plat tipis kemudian dipress dan dilas sedemikian seperti gambar 8.3.



Gambar 8.2 Desain Evaporator Permukaan Plat



Gambar 8.3 Desain evaporator Permukaan plat untuk refrigerator Domestik

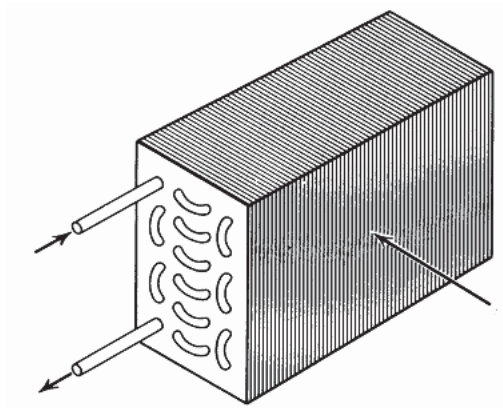


Gambar 8.4 Desain evaporator permukaan plat dengan pipa

### 8.5 Finned Evaporator

Evaporator jenis finned adalah evaporator bare-tube tetapi dilengkapi dengan sirip-sirip yang terbuat dari plat tipis alumunium yang dipasang disepanjang pipa untuk menambah luas permukaan perpindahan panas. Sirip-sirip alumunium ini berfungsi sebagai permukaan transfer panas sekunder. Jarak antar sirip disesuaikan dengan kapasitas evaporator, biasanya berkisar antara 40 sampai 500 buah sirip per meter.

Evaporator untuk keperluan suhu rendah, jarak siripnya berkisar 80 sampai 200 sirip per meter. Untuk keperluan suhu tinggi, seperti room AC, jarak fin berkisar 1,8 mm.



### 8.6 Kapasitas Evaporator

Kapasitas evaporator biasanya dinyatakan dalam watt. Agar dapat memindahkan energi panas sesuai dengan keinginan, maka permukaan perpindahan panas evaporator harus mempunyai kapasitas perpindahan panas yang cukup, agar semua refrijeran yang akan diuapkan di dalam evaporator dapat berlangsung dengan optimal dan menghasilkan pendinginan yang maksimum pula.

Pemindahan panas yang berlangsung di evaporator dapat terjadi dalam dua cara, yaitu konveksi, dan konduksi. Besarnya kapasitas perpindahan panas pada evaporator tergantung pada lima variable sebagai berikut:

- (1) Luas area perpukaan

- (2) Beda suhu
- (3) Faktor konduktivitas panas
- (4) Ketebalan material yang digunakan
- (5) Waktu

Secara matematika, jumlah panas yang dipindahkan dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$Q = A \times U \times TD$$

Di mana       $Q$  = jumlah panas yang dipindahkan dalam W  
                   $A$  = Permukaan luar evaporator dalam m<sup>2</sup>  
                   $U$  = Faktor konduktansi panas dalam W/m<sup>2</sup> K  
                   $TD$  = Beda suhu refrijeran dan udara luar

#### Luas Permukaan Luar Evaporator

Untuk menghitung luas permukaan luar evaporator, yang perlu kita pertimbangkan mencakup:

- (1) Luas permukaan sirip
- (2) Luas permukaan pipa
- (3) Luas permukaan bengkokan pipa

**Contoh**      Hitung luas permukaan area luar evaporator berukuran 8 x 6 inchi. Panjang pipa 10 feet. Tebal sirip fin 0,025 inchi, jarak antar pipa 4 inchi, diameter pipa 5/8 inchi. Jarak antar sirip 0,5 inchi.

#### Solusi

Luas area setiap sirip adalah  $8 \text{ in} \times 6 \text{ in} = 48 \text{ in}^2$

Karena ada dua permukaan, luas fin seluruhnya adalah  $96 \text{ in}^2$ .

Karena ada lubang untuk pipa 5/8 in, maka luas efektif fin harus dikurangi luas lubang.

Luas area lubang untuk pipa adalah  $0,25 \times 3,14 \times (5/8)^2 = 0,307 \text{ in}^2$ .

Karena setiap lubang ditempati dua permukaan fin, maka luas total lubang pipa menjadi  $0,614 \text{ in}^2$ . Setiap fin terdapat dua lubang, jadi luas seluruhnya menjadi  $1,228 \text{ in}^2$ .

Jadi luas perpindahan panas efektif setiap fin adalah

$$96 \text{ in}^2 - 1,228 \text{ in}^2 = 94,8 \text{ in}^2$$

Jumlah total sirip fin adalah

$10 \text{ ft} \times 12 \text{ in/ft} = 120 \text{ in}$ . Setiap inchi ada 2 fin, jadi jumlah fin total adalah  $120 \times 2 \text{ fin} = 240 \text{ fin}$ , bila ditambah ekstra fin paling pinggir menjadi 241 buah sirip fin.

Jadi luas area seluruh fin adalah

$$94,8 \times 241 = 22.846,8 \text{ in}^2.$$

Luas area permukaan pipa ,panjang 10 ft dan diameter 5/8 in, adalah  $10 \text{ ft} \times 12 \text{ ft/in} = 120 \text{ in}$ , karena ada 2 pipa sehingga panjang total pipa adalah 240 in.

Keliling pipa adalah

$$3,14 \times 5/8 \text{ in} = 1,9635 \text{ in}$$

Luas pipa total adalah

$$240 \text{ in} \times 1,9635 \text{ in} = 471,24 \text{ in}^2.$$

Luas permukaan efektif pipa harus dikurangi dengan luas kontak pipa dengan fin. Luas kontak pipa dengan fin adalah

$$5/8 \times 3,14 \times 0,25 \times 241 = 11,83 \text{ in}^2.$$

Jadi luas permukaan efektif pipa adalah

$$471,24 - 11,83 = 459,41 \text{ in}^2.$$

Luas area bengkokan pipa adalah panjang bengkokan x keliling bengkokanx jumlah bengkokan

Panjang bengkokan adalah

$$3,14 \times 4 \text{ in} = 12,5664 \text{ in}$$

Tetapi hanya setengah lingkaran , jadi panjang bengkokan menjadi 6,2832 in

Keliling bengkokan adalah

$$5/8 \times 3,14 = 1,96 \text{ in}$$

$$\text{Jadi luas total bengkokan adalah } 6,2832 \times 1,96 = 12,3 \text{ in}^2.$$

Luas permukaan seluruhnya adalah

$$22.846,8 + 459,4 + 12,3 = 23.318,5 \text{ in}^2 = 161,9 \text{ ft}^2.$$

---

# PENGONTROLAN LAJU ALIRAN REFRIJERAN CAIR

9

---

## Kerangka Isi

- 9.1 Pengontrolan Laju Aliran Refrijeran
- 9.2 Hand Expansion Valve
- 9.3 Automatic Expansion Valve
- 9.4 Thermostatatic Expansion Valve
- 9.5 Pipa Kapiler

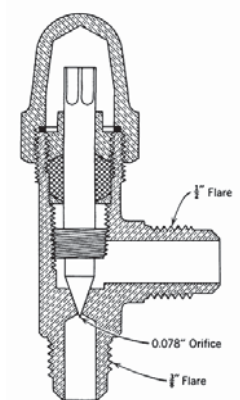
### **9.1 Pengontrolan Laju Aliran Refrijeran**

Refrijeran cair dari condenser yang akan diuapkan di evaporator dikontrol oleh katub ekspansi. Pada kenyataannya, pengontrolan laju refrijeran cair ini dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai alat. Ada enam jenis alat pengontrol laju aliran refrijeran, yaitu (1) hand expansion valve, atau katub ekspansi manual, (2) automatic expansion valve atau katub ekspansi otomatis, (3) thermostatic expansion valve atau katub ekspansi thermostatik, (4) pipa kapiler, (5) low pressure float atau katub apung tekanan rendah, dan (6) high pressure float atau katub apung tekanan tinggi.

Apapun jenis katubnya, fungsi utama alat pengontrol laju refrijeran ini sama yaitu: (1) untuk menarik refrijeran cair dari saluran liquid line ke evaporator pada jumlah yang tepat sesuai kapasitas evaporator, dan (2) untuk menjaga perbedaan tekanan antara tekanan kondensasi dan tekanan evaporasi tetap konstan, agar supaya refrijeran cair yang diuapkan di evaporator selalu berada pada tekanan rendah sesuai yang diinginkan dan sekaligus menjaga tekanan tinggi di sisi kondensor.

### **9.2 Hand Expansion Valve**

Hand expansion valve adalah katub ekspansi yang diatur secara manual. Laju aliran refrijeran yang melalui katub tergantung pada beda tekanan pada mulut katub dan bukaan katub jarumnya. Bila beda tekanan pada mulut katub jarum konstan, maka laju aliran refrijeran cair juga konstan tidak terpengaruh oleh tekanan operasi evaporator.

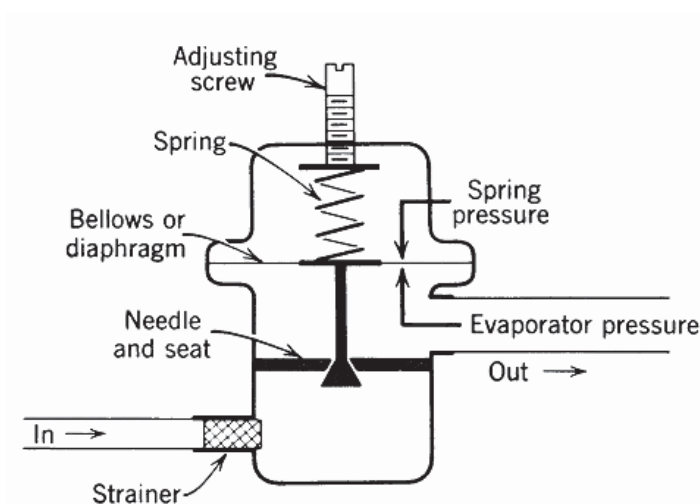


Gambar 9.1 Hand expansion valve.

Kelemahan hand expansion valve adalah tidak responsive terhadap perubahan beban pendinginan yang diterima oleh evaporator. Oleh karena itu harus diatur setiap saat disesuaikan dengan beban evaporator

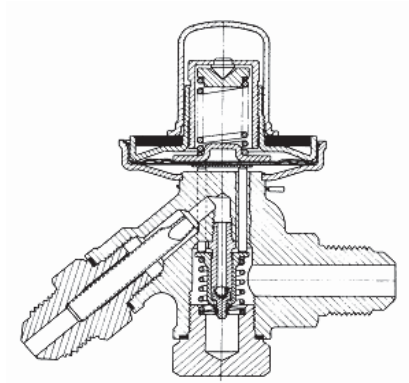
### 9.3 Automatic Expansion Valve

Gambar 9.2 menunjukkan diagram skematik automatic expansion valve. Katub ini terdiri dari katub dan dudukan katub jarum, diafragma, filter dan pegas yang dapat diatur tensinya melalui sebuah sekrup pengatur.



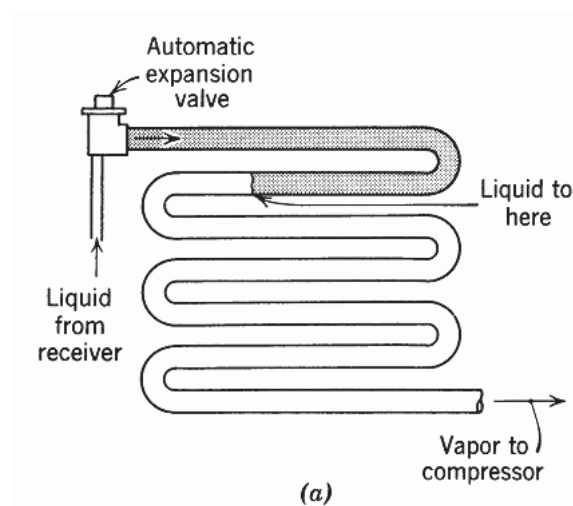
Gambar 9.2 Diagram skematik automatic expansion valve

Saringan atau filter biasanya dipasang pada sisi masuk katub untuk menyaring atau mencegah kotoran agar tidak menghalangi kerja katub. Gambar 9.3 memperlihatkan konstruksi katub otomatis ini.

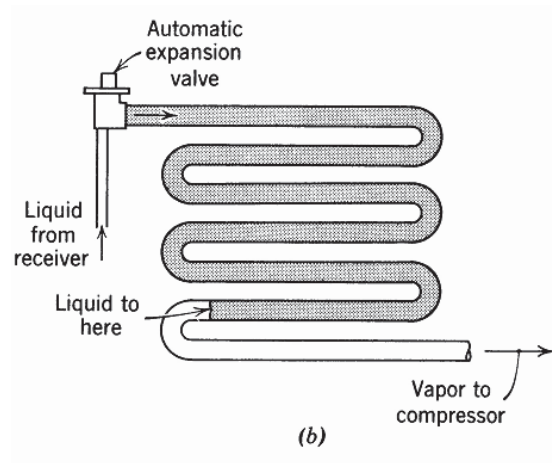


Gambar 9.3 Konstruksi automatic expansion valve

Perhatikan Gambar 9.2, tekanan evaporasi menekan diafragma dari satu sisi yang cenderung untuk menutup katub sedang tekanan pegas menekan diafragma dari sisi lainnya yang cenderung membuka katub. Pada saat kompresor bekerja, katub berfungsi menjaga tekanan evaporasi seimbang dengan tekanan pegas.



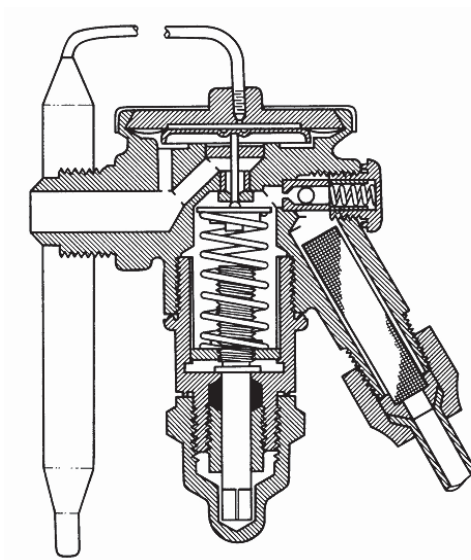
Gambar 9.4 Kondisi refrijeran pada saat beban evaporator tinggi



Gambar 9.5 Kondisi refrijeran pada saat beban evaporator minimum

#### 9.4 Thermostatatic Expansion Valve

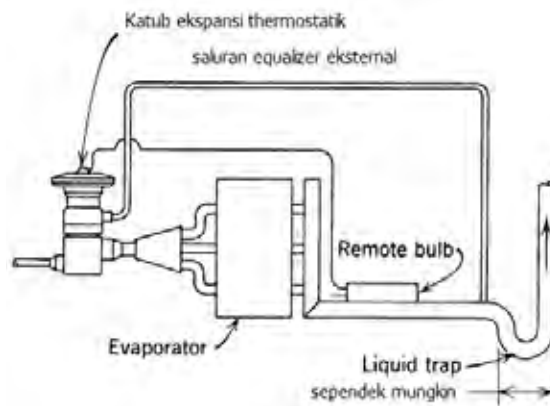
Katub ekspansi thermostatik adalah jenis katub yang paling banyak digunakan, karena efisiensinya tinggi dan mudah diadaptasikan dengan berbagai aplikasi refrijerasi. Bila pada katub ekspansi otomatis pengaturannya berbasis pada tekanan evaporator, maka katub ekspansi thermostatik pengaturannya berbasis pada suhu gas panas lanjut di bagian keluaran evaporator selalu konstan untuk memastikan refrijeran yang dihisap kompresor selalu dalam fasa gas. Karena sifatnya tersebut, katub ekspansi thermostatik sangat tepat digunakan pada sistem refrijerasi yang mempunyai beban bervariasi. Gambar 9.6 memperlihatkan konstruksi katub ekspansi thermostatik.



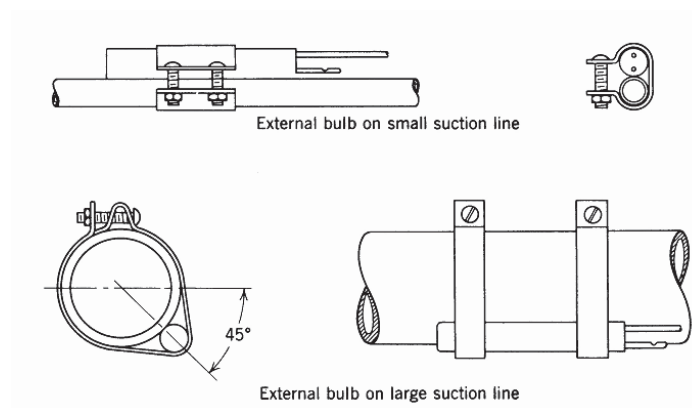
Gambar 9.6 Ilustrasi konstruksi katub ekspansi thermostatik

Bagian utama katub ekspansi thermostatik adalah (1) katub jarum dan dudukannya, (2) diafragma, (3) remote bulb yang berisi refrijeran cair, dilengkapi dengan pipa kapiler yang langsung terhubung ke diafragma, dan (4) pegas yang dapat diatur tekanannya melalui sekrup pengatur tekanan. Seperti semua piranti kontrol laju aliran refrijeran lainnya, katub ekspansi thermostatik juga dilengkapi dengan filter dari kasa baja yang diletakkan di sisi masukan katub.

Remote bulb dipasang pada sisi keluaran evaporator dicekam atau diklem kuat pada saluran outlet evaporator agar dapat mendeteksi atau merespon langsung suhu refrijeran yang mengalir pada sisi outlet evaporator. Walaupun dalam prakteknya ada sedikit perbedaan antara suhu gas pada saluran suction di mana remote bulb dipasang dan suhu refrijeran saturasi yang ada di dalam remote bulb, tetapi untuk hal ini dapat diabaikan. Sehingga dapat dianggap tekanan yang diberikan oleh refrijeran saturasi yang ada di dalam remote bulb selalu berhubungan dengan suhu gas refrijeran yang ada di saluran outlet evaporator dimana remote bulb dipasang.

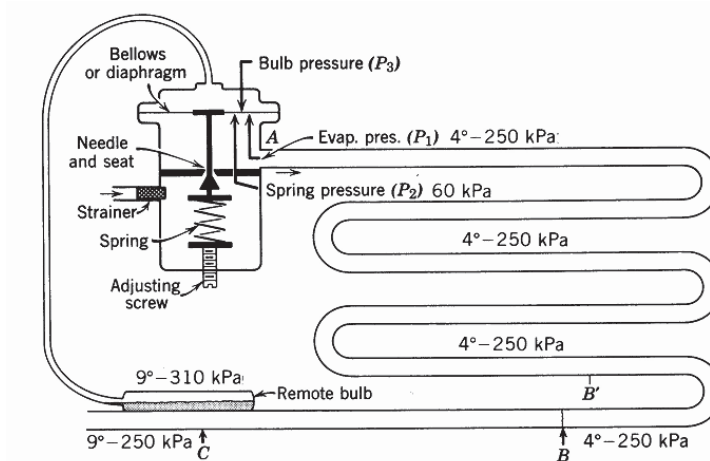


Gambar 9.7 Lokasi pemasangan remote bulb pada sisi outlet evaporator



Gambar 9.8 Detail contoh pemasangan remote bulb

Kerja katub ekspansi thermostatik merupakan hasil interaksi tiga jenis tekanan yang bekerja pada diafragma, yaitu tekanan pegas dan tekanan evaporasi yang akan menekan diafragma sehingga cenderung menutup katub dan tekanan yang dihasilkan oleh refrigeran saturasi yang ada di dalam remote bulb bila refrigerannya mengembang yang melawan tekanan pegas dan tekanan evaporasi, sehingga cenderung membuka katub. Gambar 9.9 memperlihatkan gambar skema prinsip kerja katub ekspansi thermostatik.



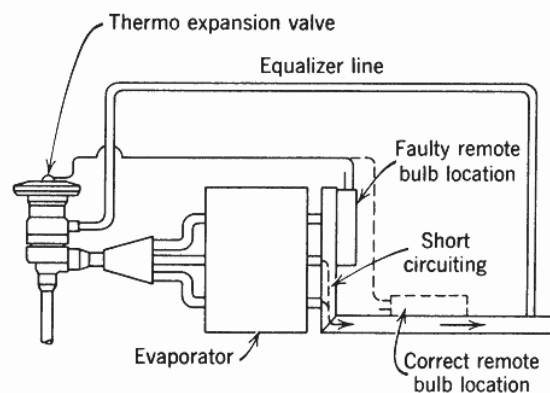
Gambar 9.9 Ilustrasi prinsip kerja katub ekspansi thermostatik

Asumsikan refrigeran cair yang ada di evaporator menguap pada suhu  $4^\circ\text{C}$  sehingga tekanan saturasi evaporasinya adalah  $250 \text{ kPa}$ . Asumsikan pula, tekanan yang diberikan oleh pegas adalah  $60 \text{ kPa}$ , sehingga tekanan total yang diterima diafragma adalah  $(150 + 60) = 310 \text{ kPa}$ . Bila rugi tekanan diabaikan maka suhu dan tekanan pada semua titik di evaporator adalah sama. Tetapi refrigeran yang berada setelah titik B hingga ke saluran outlet evaporator menguap sehingga suhunya naik dan refrigeran saturasi berubah menjadi gas panas lanjut (superheat vapor), pada tekanan saturasi  $250 \text{ kPa}$ . Pada sisi ini suhu refrigeran naik  $5\text{K}$  dari  $4^\circ\text{C}$ , menjadi  $9^\circ\text{C}$ . Refrigeran saturasi yang ada di dalam remote bulb akan merasakan langsung perubahan suhu ini sehingga suhunya juga naik menjadi  $9^\circ\text{C}$  dan menghasilkan tekanan pada diafragma sebesar  $310 \text{ kPa}$  yaitu tekanan saturasi pada suhu  $9^\circ\text{C}$ . Karena kedua tekanan yang bekerja pada diafragma mempunyai besaran yang sama, sehingga bukaan katub jarumnya akan dipertahankan konstan.

Selama suhu refrigeran gas pada sisi outlet evaporator tetap konstan  $9^\circ\text{C}$ , atau derajat panas lanjut gas refrigeran tetap  $5\text{K}$ , maka keseimbangan laju aliran refrigeran ke evaporator akan tetap terjaga. Tetapi jika suhu gas panas lanjut pada outlet evaporator turun lebih kecil dari  $5\text{K}$ , maka tekanan yang dihasilkan oleh remote bulb turun sehingga katub jarum sedikit menutup karena tekanan pegas dan tekanan evaporasinya menjadi lebih besar. Laju aliran refrigeran agak tersendat, hingga akhirnya suhu gas panas lanjut pada sisi outlet evaporator naik kembali ke besaran  $5\text{K}$ .

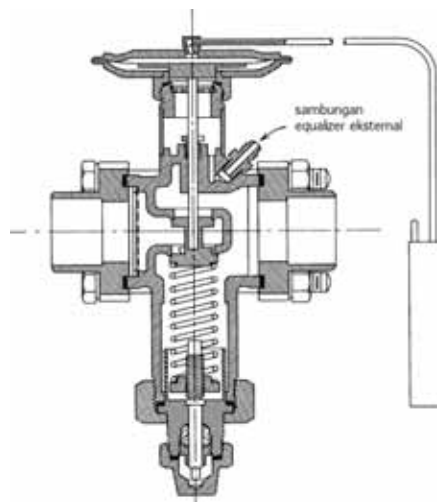
Kebalikannya, jika suhu gas panalanjut pada outlet evaporator turun lebih besar dari 5K, maka tekanan yang dihasilkan oleh remote bulb naik sehingga bukaan katub jarum menjadi lebih besar karena tekanan pegas dan tekanan evaporasinya menjadi lebih kecil. Laju aliran refrijeran agak naik, hingga akhirnya suhu gas panaslanjutan pada sisi outlet evaporator naik kembali ke besaran 5K.

Pengaturan tekanan pegas melalui baut pengatur sering disebut sebagai 'setting superheat'. Jika setting tekanan pegas dinaikkan, akan menaikkan derajat panaslanjutan, dan kebalikannya bila tekanan pegas diturunkan akan menurunkan derajat panaslanjutnya. Biasanya besaran derajat panaslanjutan (setting superheat) yang lazim dilakukan oleh pabrikan berkisar antara 4K hingga 5K.

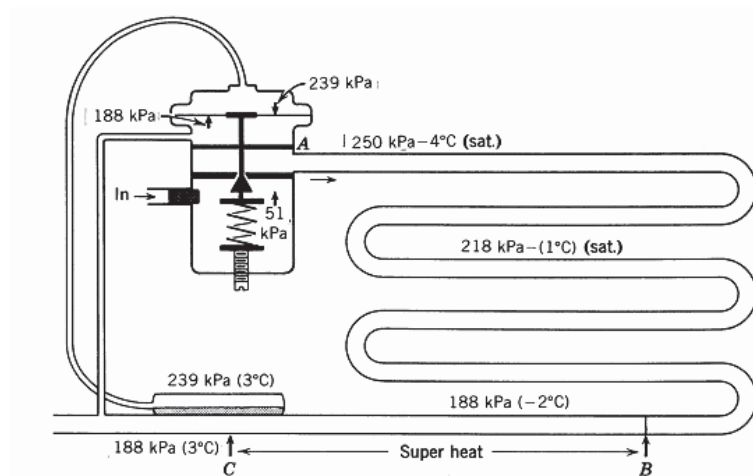


Gambar 9.10 Lokasi pemasangan remote bulb yang salah dan yang benar

Seperti telah dikemukakan di atas, karena adanya rugi tekanan pada pipa maka tekanan pada sisi masuk dan sisi keluar evaporator tidak sama. Jika rugi tekanan yang timbul cukup besar, maka dapat berakibat pada setting superheat-nya. Untuk mengatasi hal ini maka pada katub ekspansi thermostatik ditambah asesori yang disebut sebagai equalizer eksternal. Gambar 9.11 memperlihatkan konstruksi katub ekspansi thermostatik yang dilengkapi dengan equalizer sedang gambar 9.12 memperlihatkan prinsip kerjanya.



Gambar 9.12 Konstruksi katub ekspansi dengan equalizer eksternal



Gambar 9.12 Konstruksi katub ekspansi dengan equalizer eksternal

Dari gambar 9.12 dapat dilihat bahwa tekanan pegas 51 kPa ditambah dengan tekanan outlet evaporator 188 kPa. Tekanan total yang diberikan ke diafragma adalah  $(188 + 51) = 239$  kPa. Tekanan yang diberikan oleh remote bulb adalah 239 kPa. Keadaan seimbang ini akan terus dipertahankan selama derajat pemanasan lanjut refrijeran gas sebesar 5K.

### 9.5 Pipa Kapiler

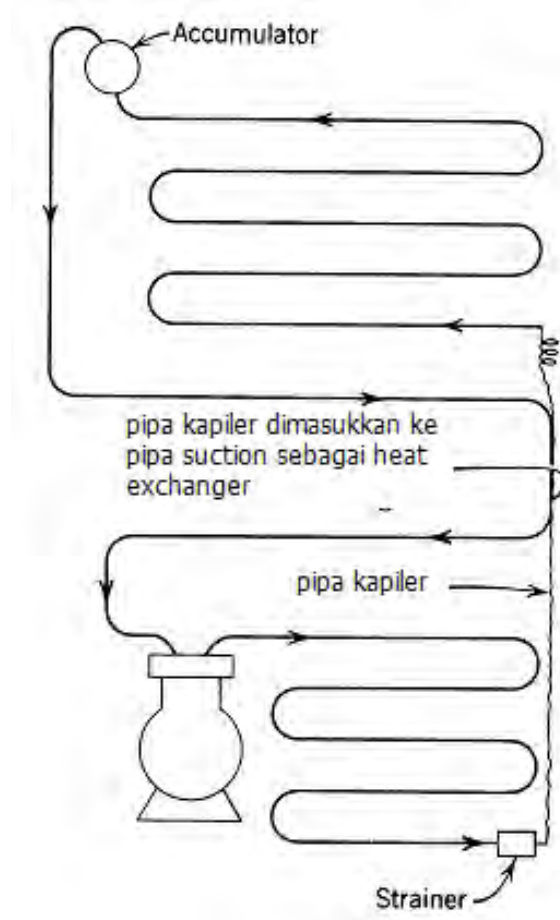
Sistem pengontrol laju refrijeran yang paling sederhana adalah pipa kapiler. Seperti namanya pipa kapiler terdiri dari pipa panjang dengan diameter yang sangat kecil. Diameter pipa kapiler antara 0,26 in sampai 0,4 inci. Gambar 9.13 memperlihatkan sistem refrijerasi dengan pipa kapiler.

Pada ukuran panjang dan diameter tertentu, pipa kapiler memiliki tahanan gesek yang cukup tinggi sehingga dapat menurunkan tekanan kondensasi yang tinggi ke tekanan evaporasi yang rendah. Pipa kapiler berfungsi menakar jumlah refrijeran cair ke evaporator dan untuk menjaga beda tekanan anatara tekanan kondensasi dan tekanan evaporasi tetap konstan.

Karena pemasangan pipa kapiler terhubung seri di dalam sistem refrijerasi, maka ukuran kapasitas penyaluran refrijeran cair yang dihasilkan oleh pipa kapiler harus sesuai dengan kapasitas kompresi dari kompresor. Oleh karena itu untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi, maka kapasitas pipa kapiler harus sama dengan kapasitas kompresi kompresor.

Bila hambatan gesek pipa kapiler terlalu besar, karena pipa kapilernya terlalu panjang atau terlalu kecil, maka kapasitas pipa untuk menyalurkan refrijeran cair dari kondenser ke evaporator menjadi lebih kecil dibandingkan dengan kapasitas kompresi. Akibatnya evaporator kekurangan refrijeran cair, tekananya turun. Di lain pihak refrijeran cair di kondensor naik, sehingga tekanan kondensasinya naik. Efek pendingian kurang. Sebaliknya, jika hambatan gesek pipa kapiler terlalu kecil, karena pipa kapilernya terlalu pendek atau terlalu besar, maka kapasitas pipa untuk menyalurkan refrijeran cair dari kondenser ke evaporator menjadi lebih besar dibandingkan dengan kapasitas kompresi. Akibatnya evaporator kelebihan refrijeran cair, tekanannya naik. Tidak semua refrijeran cair dapat menguap di evaporator. Kompresor menghisap liquid refrijeran.

Untuk meningkatkan unjuk kerja sistem dengan pipa kapiler, maka sebagian pipa kapiler direkatkan pada pipa suction, atau sebagian pipa kapiler dimasukkan ke dalam pipa suction, seperti yang dilakukan pabrikan lemari es untuk keperluan rumah tangga.



Gambar 9.13 Sistem Pipa Kapiler

## DAFTAR PUSTAKA

Althouse, Turnquist, Bracciano, 2003, *Modern Refrigeration & Air Conditioning, Instructor Manual with answer Key*, The Goodhard-Willcox Company, USA

Althouse, Andrew D., 2003, *Modern Refrigeration & Air Conditioning*, The Goodhard-Willcox Company, USA

Dossat, Roy J., 1980, *Principles of Refrigeration, Second Edition, SI Version*, John Wiley & Son Inc., New York, USA

Goliber, Paul F., 1986, *Refrigeration Servicing*, Bombay, D.B. Taraporevala Son & Co Private L.td

Harris, 1983, *Modern Air Conditioning Practice, Third Edition*, Mc.Graw - Hill International Book Company

John Tomczyk, *Troubelshooting & Servicing Modern Refrigeration & Air Conditioning System*.

McQuiston, Parker and Spitler, *Heating Ventitalting, and Air Conditioning: Analysis and Design*, 2005, 6th Ed., John Wiley & Sons, Inc.

....., *Basic Servicing*, 1986, Box Hill College, Melbourne, Australia

["http://en.wikipedia.org/wiki/Refrigerator"](http://en.wikipedia.org/wiki/Refrigerator)

### DAFTAR ISTILAH

|                     |                                                                                                                                      |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Refrijerasi         | Pendinginan (refrigeration)                                                                                                          |
| Tata Udara          | Proses pengkondisian udara ruang (air conditioning)                                                                                  |
| Refrijeran          | Fluida penukar kalor yang digunakan pada sistem refrijerasi                                                                          |
| Sistem Absorpsi     | Refrijerasi yang diperoleh melalui penyerapan refrijeran oleh suatu zat kimiawi                                                      |
| Sistem Kompresi Uap | Sistem refrijerasi mekanik, menggunakan kompresor untuk memampatkan uap refrijeran.                                                  |
| Kelembaban Absolut  | Kandungan uap air di udara yang dinyatakan dalam satuan gr/kg.                                                                       |
| Kelembaban Relatif  | Perbandingan (ratio) antara jumlah kandungan uap air di udara dan jumlah uap air maksimal yang mungkin terjadi pada suhu yang sama   |
| Tekanan Absolut     | Tekanan gauge ditambah dengan tekanan atmosfer                                                                                       |
| Tekanan gauge       | Tekanan yang diperoleh dari pengukuran menggunakan meter tekanan (gauge)                                                             |
| Kompresor Hermetik  | kompresor dan motor penggeraknya dikemas dalam suatu kontainer yang kedap udara.                                                     |
| Condensing Unit     | Istilah yang dikenakan pada susunan kompresor, kondensor dan liquid receiver yang dikemas menjadi satu kesatuan atau unit yang utuh. |
| Udara kering        | kandungan udara atmosfer yang tidak dapat dikondensasikan di dalam sistem refrijerasi.                                               |

|                    |                                                                                                                                            |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Uap air            | kandungan udara atmosfer yang dapat dikondensasikan atau diembunkan.                                                                       |
| Gas Panaslanjut    | kondisi refrijeran dalam fasa gas, dengan suhu diatas suhu saturasi (superheat vapor)                                                      |
| Cairan Superdingin | kondisi refrijeran dalam fasa cair, dengan suhu di bawah suhu saturasi (subcooled liquid)                                                  |
| Kompresor Hermetik | gabungan kompresor yang langsung dikopel dengan motor penggeraknya dan ditempatkan dalam satu kontainer kedap udara.                       |
| Kenyamanan Hunian  | kondisi udara yang bagus untuk kesehatan dan kenyamanan kerja manusia.                                                                     |
| Evakuasi           | Mengeluarkan udara dari dalam sistem dengan menggunakan pompa vaccum.                                                                      |
| Dehidrasi          | Mengeringkan uap air yang ada di dalam sistem, dengan menurunkan tekanan sampai vacuum tinggi, agar uap air dapat menguap pada suhu kamar. |
| Service Manifold   | Peralatan ukur tekanan yang didesain khusus untuk keperluan service                                                                        |

ISBN 978-979-060-032-4  
ISBN 978-979-060-033-1

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk digunakan dalam Proses Pembelajaran.

HET (Harga Eceran Tertinggi) Rp. 17.314,00