 **Innosain**

# **PERPINDAHAN PANAS**

**AGUS HARYANTO**

# **PERPINDAHAN PANAS**



# PERPINDAHAN PANAS

AGUS HARYANTO

 **Innosain**

**PERPINDAHAN PANAS**, oleh Agus Haryanto  
Hak Cipta © 2015 pada penulis

** Innosain**

Ruko Jambusari 7A Yogyakarta 55283

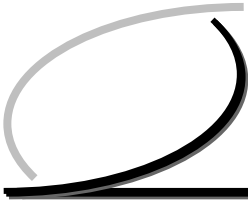
Telp: 0274-889398; 882262 Fax: 0274-889057; E-mail: [info@innosain.com](mailto:info@innosain.com)

Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

ISBN: 978-602-72999-3-1

Cetakan Pertama, tahun 2015

Semua informasi tentang buku ini, silahkan scan QR Code di cover belakang buku ini



## KATA PENGANTAR

Perpindahan Panas (Heat Transfer) merupakan ilmu dasar yang sangat penting bagi para sarjana teknik pada umumnya, termasuk bidang ilmu keteknikan pertanian (*agricultural engineering*). Oleh karena itu, Perpindahan Panas merupakan salah satu mata kuliah wajib bagi mahasiswa program Sarjana (S1) di program-program studi keteknikan, seperti teknik mesin, teknik kimia, teknik sipil, teknik listrik, teknik pertanian dan sebagainya. Beberapa aspek atau praktek yang memerlukan pengetahuan dasar Perpindahan Panas di antaranya adalah kinerja motor bakar (baik motor pembakaran-dalam maupun motor listrik), pengerasan perkakas, penanganan hasil pertanian seperti pengeringan, pendinginan, pembekuan, penyimpanan, dan transportasi produk. Ilmu ini juga penting untuk memahami kinerja perangkat elektronika dan pembangkitan listrik.

Buku ini ditulis dengan tujuan untuk memudahkan proses pembelajaran mata kuliah Perpindahan Panas. Pengalaman mengajar mata kuliah ini menunjukkan bahwa para mahasiswa mengalami kesulitan untuk menggunakan buku pegangan berbahasa Inggris. Selain jumlahnya yang tidak memadai di perpustakaan, tingkat penguasaan bahasa Inggris mahasiswa juga sangat rendah. Sebelumnya, saya telah membuat buku ajar untuk Mata Kuliah Termodinamika. Buku itu ternyata sangat membantu dalam proses pembelajaran. Belajar dari pengalaman itu, maka buku ini dipersiapkan dengan tujuan yang sama.

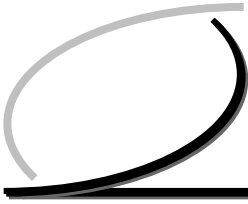
Catatan-catatan kuliah sebenarnya sudah dimulai sejak lama, tetapi penyusunannya menjadi sebuah buku memerlukan kerja keras tersendiri. Meskipun tenaga dan fikiran sudah dicurahkan untuk mempersiapkan buku ini sebaik-baiknya, tetapi kami menyadari masih banyak kekurangannya. Seperti pepatah China kuno yang mengatakan bahwa perjalanan seribu mill harus

dimulai dari langkah pertama. Sekarang! Jadi, ini merupakan langkah awal yang akan disusul dengan langkah-langkah berikutnya untuk terus memperbaiki buku ini.

Semoga bermanfaat.

BL, V-MMXV

AH



## DAFTAR ISI

|  |            |
|--|------------|
| <b>KATA PENGANTAR</b>                              | <b>v</b>   |
| <b>DAFTAR ISI</b>                                  | <b>vii</b> |
| <b>BAGIAN 0: KONDUKSI DUA DIMENSI</b>              | <b>1</b>   |
| <b>BAB 1 KONSEP DASAR PERPINDAHAN PANAS</b>        | <b>3</b>   |
| Pengantar  | 3          |
| Kompetensi   | 3          |
| 1-1 Perpindahan Panas dan Termodinamika            | 3          |
| 1-2 Mekanisme Perpindahan Panas (Tinjauan Singkat) | 6          |
| 1-3 Sifat Termal Bahan                             | 11         |
| 1-4 Konsep Tahanan Termal dan Analogi Listrik      | 18         |
| 1-5 Dimensi dan Satuan                             | 21         |
| Ringkasan  | 24         |
| Bahan Bacaan                                       | 25         |
| Soal-Soal Latihan                                  | 25         |
| <b>BAGIAN 1: KONDUKSI STEDI SATU DIMENSI</b>       | <b>29</b>  |
| <b>BAB 2 KONDUKSI MELALUI SISTEM LAPIS TUNGGAL</b> | <b>35</b>  |
| Pengantar  | 35         |
| Kompetensi   | 35         |
| 2-1 Konduksi Melalui Dinding Datar                 | 35         |
| 2-1-1 Metode Analisis                              | 37         |
| 2-1-2 Metode Pemisahan Variabel                    | 40         |
| 2-2 Konduksi Melalui Tabung dan Bola Berongga      | 44         |
| 2-3 Ringkasan                                      | 48         |



|   |            |
|---|------------|
| Bahan Bacaan 49   |            |
| Soal Latihan  | 49         |
| <b>BAB 3 KONDUKSI 1-D MELALUI DINDING KOMPOSIT</b>                          | <b>53</b>  |
| Pengantar   | 53         |
| Kompetensi  | 53         |
| 3-1 Dinding Datar Komposit  | 54         |
| 3-2 Dinding dengan Batas Konveksi   | 57         |
| 3-3 Konduksi Melalui Silinder Komposit                                      | 62         |
| 3-4 Konduksi Melalui Bola Komposit  | 65         |
| 3-5 Sistem Radial dengan Kondisi Batas Konveksi                             | 66         |
| 3-6 Radius Kritis Isolasi   | 73         |
| 3-7 Tahanan Kontak Termal   | 78         |
| Ringkasan   | 85         |
| Bahan Bacaan  | 86         |
| Soal-Soal Latihan   | 86         |
| <b>BAB 4 PERPINDAHAN PANAS DARI PERMUKAAN BERSIRIP</b>                      | <b>93</b>  |
| Pengantar   | 93         |
| Kompetensi  | 93         |
| 4-1 Pendahuluan   | 93         |
| 4-2 Analisis Sirip  | 96         |
| 4-2-1 Sirip Panjang Tak Berhingga ( $T_{\text{ujung sirip}} = T_{\infty}$ ) | 98         |
| 4-2-2 Ujung sirip diisolasi ( $\dot{Q}_{\text{ujung sirip}} = 0$ )          | 99         |
| 4-2-3 Konveksi (atau Kombinasi Konveksi dan Radiasi) di Ujung Sirip         | 100        |
| 4-2-4 Suhu Ujung Sirip Diketahui  | 100        |
| 4-3 Kinerja Sirip   | 103        |
| 4-3-1 Efisiensi Sirip   | 104        |
| 4-3-2 Efektivitas Sirip   | 108        |
| Ringkasan   | 120        |
| Bahan Bacaan  | 122        |
| Soal Latihan  | 122        |
| <b>BAB 5 KONDUKSI 1-D DENGAN SUMBER KALOR</b>                               | <b>127</b> |
| Pengantar   | 127        |
| Kompetensi  | 127        |
| 5-1 Dinding Datar dengan Sumber Kalor                                       | 127        |
| 5-2 Silinder Pejal dengan Sumber Panas                                      | 133        |
| 5.3 Bola Pejal dengan Sumber Kalor  | 137        |

|  |            |
|--|------------|
| Ringkasan  | 143        |
| Bahan Bacaan   | 143        |
| Soal Latihan   | 143        |
| <b>BAGIAN 2: KONDUKSI DUA DIMENSI</b>                            | <b>147</b> |
| <b>BAB 6 KONDUKSI STEDI DUA DIMENSI</b>                          | <b>149</b> |
| Pengantar  | 149        |
| Kompetensi   | 149        |
| 6-10 Persamaan Umum Konduksi Multi Dimensi                       | 150        |
| 6-1-1 Koordinat Kartesius  | 150        |
| 6-1-2 Koordinat Silinder   | 154        |
| 6-1-3 Koordinat Bola   | 155        |
| 6-2 Penyelesaian Konduksi Dua Dimensi: Metode Pemisahan Variabel | 158        |
| 6-3 Analisis Grafik  | 163        |
| 6-4 Faktor Bentuk Konduksi                                       | 165        |
| Ringkasan  | 173        |
| Pustaka  | 174        |
| Soal-Soal Latihan  | 174        |
| <b>BAGIAN 3: KONDUKSI TRANSIEN</b>                               | <b>179</b> |
| <b>BAB 7 KONDUKSI TRANSIEN (LUMPED SYSTEM)</b>                   | <b>181</b> |
| Pengantar  | 181        |
| Kompetensi   | 182        |
| 7-1 Pendahuluan  | 182        |
| 7-2 Analisis Sistem Tergumpal ( <i>Lumped System</i> )           | 183        |
| 7-3 Kriteria Sistem Kapasitansi Tergabung                        | 186        |
| Ringkasan  | 190        |
| Bahan Bacaan   | 191        |
| Soal-Soal Latihan  | 191        |
| <b>BAB 8 KONDUKSI TRANSIEN PADA BENDA BESAR (CHART HEISLER)</b>  | <b>197</b> |
| Pengantar  | 197        |
| Kompetensi   | 197        |
| 8-1 Konduksi Transien pada Benda Berhingga                       | 197        |
| 8-2 Chart Heisler  | 206        |
| Ringkasan  | 216        |
| Bahan Bacaan 217   |            |
| Soal Latihan   | 217        |

|                           |  |            |
|---------------------------|--|------------|
| <b>BAB 9</b>              | <b>KONDUKSI TRANSIEN PADA BENDA SEMI INFINIT</b>                 | <b>225</b> |
|                           | Pengantar  | 225        |
|                           | Kompetensi   | 225        |
|                           | 9-1 Benda Semi Infnit  | 226        |
|                           | 9-2 Suhu Permukaan Konstan                                       | 227        |
|                           | 9-3 Fluks Tetap  | 233        |
|                           | 9-4 Kondisi Batas Konveksi                                       | 234        |
|                           | Ringkasan  | 238        |
|                           | Bahan Bacaan   | 238        |
|                           | Soal Latihan   | 239        |
| <b>BAGIAN 4: KONVEKSI</b> |  | <b>241</b> |
| <b>BAB 10</b>             | <b>DASAR-DASAR KONVEKSI PANAS</b>                                | <b>243</b> |
|                           | Pengantar  | 243        |
|                           | Kompetensi   | 243        |
|                           | 10-1 Mekanisme Fisik Konveksi Paksa                              | 244        |
|                           | 10-2 Klasifikasi Aliran Fluida                                   | 247        |
|                           | 10-3 Lapisan-Batas Kecepatan                                     | 250        |
|                           | 10-4 Lapisan-Batas Termal  | 255        |
|                           | 10-5 Aliran Eksternal Melintas Silinder Dan Bola                 | 257        |
|                           | 10-6 Aliran dalam Tabung   | 262        |
|                           | 10.7 Aliran Melintas-Silang Rangkuman Pipa ( <i>Tube Banks</i> ) | 270        |
|                           | Ringkasan  | 272        |
|                           | Bahan Bacaan   | 273        |
|                           | Soal-Soal Latihan  | 273        |
| <b>BAB 11</b>             | <b>RUMUS EMPIRIS KONVEKSI PAKSA EKSTERNAL</b>                    | <b>277</b> |
|                           | Pengantar  | 277        |
|                           | Kompetensi   | 277        |
|                           | 11-1 Aliran Di Atas Pelat Rata                                   | 278        |
|                           | 11-2 Aliran Melintas Tabung                                      | 291        |
|                           | 11-3 Aliran Melintas Bola  | 298        |
|                           | 11-4 Aliran Melintas-Silang Rangkuman Pipa ( <i>Tube Banks</i> ) | 301        |
|                           | Ringkasan  | 310        |
|                           | Bahan Bacaan   | 311        |
| <b>BAB 12</b>             | <b>RUMUS EMPIRIS KONVEKSI PAKSA INTERNAL</b>                     | <b>319</b> |
|                           | Pengantar  | 320        |
|                           | Kompetensi   | 320        |
|                           | 12-1 Pendahuluan   | 320        |

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| 12-2             | Nilai Tengah ( <i>Mean</i> ) Kecepatan dan Suhu Tengah ( <i>Mean</i> ) | 320        |
| 12-3             | Rezim Aliran dalam Pipa  | 322        |
| 12-4             | Panjang Entri Hidrodinamik dan Termal                                  | 324        |
| 12-5             | Analisis Termal Umum   | 328        |
| 12-5-1           | Kasus Fluks Panas Permukaan Konstan ( $\dot{q}_s = \text{konstan}$ )   | 329        |
| 12-5-2           | Kasus Suhu Permukaan Konstan ( $T_s = \text{konstan}$ )                | 331        |
| 12-6             | Aliran Laminer dalam Pipa  | 335        |
| 12-7             | Aliran Turbulen dalam Pipa   | 339        |
|                  | Ringkasan  | 348        |
|                  | Bahan Bacaan   | 349        |
|                  | Soal Latihan   | 350        |
| <b>BAB 13</b>    | <b>KONVEKSI ALAMI</b>  | <b>355</b> |
|                  | Pengantar  | 355        |
|                  | Kompetensi   | 356        |
| 13-1             | Mekanisme Fisik Konveksi Alami   | 356        |
| 13-2             | Konveksi Alami Pada Permukaan  | 357        |
| 13-3             | Konveksi Alami Internal  | 365        |
| 13-3-1           | Enclosure Persegi Horizontal   | 366        |
| 13-3-2           | Enclosure Persegi Miring   | 367        |
| 13-3-3           | Enclosure Vertikal   | 368        |
| 13-3-4           | Silinder Konsentrik Horizontal   | 369        |
| 13-3-5           | Bola Konsentrik Isotermal  | 370        |
| 13-4             | Konduktivitas Termal Efektif   | 371        |
| 13-5             | Konveksi Alami dari Permukaan Bersirip                                 | 377        |
| 13-5-1           | Heat Sink Bersirip Isotermal ( $T_s = \text{konstan}$ )                | 377        |
| 13-5-2           | Permukaan PCB Bersirip Isoflux ( $\dot{q}_s = \text{konstan}$ )        | 379        |
|                  | Ringkasan  | 381        |
|                  | Bahan Bacaan   | 383        |
|                  | Soal Latihan   | 384        |
| <b>BAGIAN 5:</b> | <b>KONDUKSI RADIASI</b>  | <b>387</b> |
| <b>BAB 14</b>    | <b>PERPINDAHAN PANAS RADIASI</b>                                       | <b>389</b> |
|                  | Pengantar  | 389        |
|                  | Kompetensi   | 389        |
| 14-1             | Pendahuluan  | 390        |
| 14-2             | Radiasi Termal   | 392        |
| 14-3             | Radiasi Benda-Hitam  | 394        |
| 14-4             | Intensitas Radiasi   | 404        |

|   |            |
|---|------------|
| 14-5 Sifat-sifat Radiasi                          | 412        |
| 14-6 Efek Rumahkaca                               | 421        |
| 14-7 Radiasi Atmosfer dan Radiasi Surya           | 422        |
| Ringkasan   | 429        |
| Bahan Bacaan                                      | 432        |
| Soal Latihan                                      | 432        |
| <b>BAGIAN 6: PENUKARAN PANAS</b>                  | <b>439</b> |
| <b>BAB 15 PENUKAR PANAS</b>                       | <b>441</b> |
| Pengantar   | 441        |
| Kompetensi  | 442        |
| 15-1 Jenis-Jenis Penukar Kalor                    | 442        |
| 15-2 Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh       | 446        |
| 15-3 Analisis Penukar Kalor                       | 455        |
| 15-3-1. Metode Beda Suhu Log Mean (LMTD)          | 457        |
| 15-3-2. Metode Efektivitas-Ntu ( $\epsilon$ -NTU) | 472        |
| Ringkasan   | 482        |
| Bahan Bacaan                                      | 484        |
| Soal Latihan                                      | 484        |
| <b>LAMPIRAN</b>                                   | <b>491</b> |