



Perpindahan **Panas**



Prof. Dr.ing. Parabelem T.D.Rompas, M.T.
Ir. Charles B. Watuseke, ST, M.Pd, Ipm.

PERPINDAHAN PANAS

Prof. Dr.ing. Parabelem T.D.Rompas, M.T
Ir. Charles B. Watuseke, ST, M.pd, IPM



UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PERPINDAHAN PANAS

Penulis:

Prof. Dr.ing. Parabelem T.D.Rompas, M.T
Ir. Charles B. Watuseke, ST, M.pd, IPM

Desain Cover:

Tahta Media

Editor:

Tahta Media

Proofreader:

Tahta Media

Ukuran:

x, 91, Uk: 15,5 x 23 cm

ISBN: 978-634-262-275-9

Cetakan Pertama:

Agustus 2026

Hak Cipta 2026, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2026 by Tahta Media Group

All Right Reserved

PENERBIT TAHTA MEDIA GROUP

Perumahan Mitra Utama Residence 3 Blok A no 1, Sawahan, Tempel,
Kec. Gatak, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57557

email: tahtaliterasimedia@gmail.com

website: <http://store.tahtamedia.co.id/>

Anggota IKAPI (216/JTE/2021)

KATA PENGANTAR

Perkembangan teknologi industri modern saat ini menuntut penguasaan sistem termal yang jauh lebih efisien, presisi, dan aman. Mulai dari sistem pendinginan komponen mikroelektronika, optimalisasi pembangkit energi, hingga perancangan alat penukar panas skala besar di industri petrokimia, seluruhnya bertumpu pada satu disiplin ilmu inti, yaitu perpindahan panas tingkat lanjut.

Buku teks "Perpindahan Panas" ini hadir di tengah-tengah kita sebagai upaya nyata untuk menyediakan referensi akademik yang kokoh, mutakhir, dan kontekstual bagi dunia pendidikan tinggi teknik di Indonesia. Buku ini secara berani dan sistematis membedah berbagai fenomena termal non-linier dan kompleks, seperti konduksi tak tunak (*transient*), dinamika lapisan batas pada konveksi paksa maupun bebas, mekanisme perubahan fasa uap-cair, hingga perhitungan jaringan radiasi benda abu-abu.

Kelebihan utama dari buku ini terletak pada metodologi penyampaian. Penulis tidak hanya menyajikan penurunan rumus matematika yang rigid, tetapi juga berhasil menjembatani teori abstrak tersebut dengan intuisi fisis yang kuat dan aplikatif. Pendekatan analisis parameter tak berdimensi yang ditekankan di sepanjang bab konveksi akan sangat membantu mahasiswa dalam mereduksi kompleksitas variabel mekanika fluida termal menjadi solusi rekayasa yang praktis dan terukur.

Kehadiran buku teks ini diharapkan dapat memicu standarisasi mutu perkuliahan Perpindahan Panas pada jenjang sarjana, khususnya bagi mahasiswa Teknik Mesin, agar memiliki daya saing yang setara di tingkat global. Buku ini sangat direkomendasikan untuk menjadi buku ajar utama maupun referensi wajib bagi dosen,

mahasiswa, serta peneliti yang bergerak di bidang konversi energi dan termofluid.

Apresiasi yang tinggi kami sampaikan kepada penulis atas dedikasi, komitmen, dan kerja kerasnya dalam merampungkan karya ilmiah yang sangat berharga ini. Semoga sumbangsih pemikiran yang dituangkan dalam buku ini mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap kemajuan iptek serta melahirkan generasi insinyur yang unggul dan inovatif.

Tondano, 2026

Penulis

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, buku teks utama yang berjudul "Perpindahan Panas" ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun secara khusus untuk menjadi panduan komprehensif bagi para mahasiswa teknik, khususnya mahasiswa program studi Teknik Mesin, serta para praktisi yang ingin mendalami analisis rekayasa termal tingkat lanjut.

Buku Perpindahan Panas merupakan kelanjutan logis dari konsep-konsep dasar yang telah diletakkan pada jilid pertama. Jika jilid sebelumnya berfokus pada pengenalan mekanisme dasar, buku ini mengajak pembaca untuk menyelami fenomena perpindahan panas yang lebih kompleks, dinamis, dan aplikatif dalam dunia industri modern.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iv
PRAKATA	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
BAB I PENDAHULUAN PERPINDAHAN PANAS 2.....	1
1.1 Mekanisme Perpindahan Panas.....	1
1.2 Perbedaan Perpindahan Panas 1 dan Perpindahan Panas 2..	7
1.3 Konduktivitas Termal, Koefisien Konveksi, Bilangan Tak Berdimensi, dan Pengaplikasiannya Dalam Dunia Industri	13
1.4 Rangkuman.....	24
1.5 Soal Latihan.....	25
BAB II KONVEKSI PAKSA PADA ALIRAN EKSTERNAL	26
2.1 Aliran Melintasi Pelat Datar (<i>Flat Plate</i>).....	26
2.2 Aliran Melintasi Silinder dan Bola	27
2.3 Aliran Melintasi Bank Tube.....	28
2.4 Korelasi Empiris untuk Berbagai Geometri	29
2.5 Rangkuman.....	30
2.6 Soal Latihan.....	31
BAB III KONVEKSI BEBAS (<i>FREE/NATURAL CONVECTION</i>)	33
3.1 Mekanisme Konveksi Alami dan Fenomena Lapisan Batas	33
3.2 Bilangan Dimensi Utama: Grashof (<i>Gr</i>) dan Rayleigh (<i>Ra</i>)	36
3.3 Korelasi Empiris untuk Pelat Vertikal	38
3.4 Korelasi Empiris untuk Pelat Horizontal dan Miring.....	39
3.5 Konveksi Bebas pada Silinder dan Bola.....	42
3.6 Ruang Tertutup (<i>Enclosures / Cavities</i>).....	44
3.7 Tabel Sifat Fisik Fluida untuk Analisis Konveksi.....	46
3.8 Contoh Soal	48

3.9	Rangkuman.....	49
3.10	Soal Latihan.....	50
BAB IV PERPINDAHAN PANAS DENGAN PERUBAHAN FASE – KONDENSASI		52
4.1	Pendahuluan.....	52
4.2	Konsep Perpindahan Panas pada Kondensasi.....	54
4.3	Jenis-Jenis Kondensasi.....	55
4.4	Analisis Kondensasi pada Permukaan Vertikal	62
4.5	Analisis Kondensasi pada Permukaan Horizontal	66
4.6	Contoh Soal	68
4.7	Rangkuman.....	70
4.8	Soal Latihan.....	71
BAB V PERPINDAHAN PANAS RADIASI ANTAR PERMUKAAN		73
5.1	Pendahuluan.....	73
5.2	Konsep Dasar Radiasi Antar Permukaan	74
5.3	Faktor Bentuk (View Factor).....	76
5.4	Radiasi Antar Permukaan Hitam.....	77
5.5	Radiasi Antar Permukaan Abu-Abu	78
5.6	Metode Jaringan Radiasi	78
5.7	Aplikasi Radiasi dalam Industri	79
5.8	Contoh Soal dan Pembahasan.....	80
5.9	Rangkuman.....	81
5.10	Soal Latihan.....	82
DAFTAR PUSTAKA		84
GLOSARIUM		87
INDEKS.....		90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Perkembangan Lapisan Batas Hidrodinamik, Profil Kecepatan, dan Profil Temperatur pada Konveksi Bebas di Pelat Vertikal Panas.....	33
Gambar 3.2	Rezim Aliran Hidrodinamik dari Laminar, Wilayah Transisi (<i>Incipient Turbulence</i>)	37
Gambar 3.3	Aliran Grafis dan Trajektori Fluida pada Pelat Horizontal untuk Kondisi Permukaan Atas Panas	41
Gambar 3.4	Vektor Percepatan Gravitasi dan Efek Sudut Kemiringan Permukaan terhadap Ketebalan Lapisan Batas Termal Konveksi Bebas	42

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perpindahan Panas dan Massa: Pendekatan Dasar & Penerapan (Edisi 2, Terjemahan).....	12
Tabel 1.2 Perpindahan Kalor (2012)	17
Tabel 1.3 Perpindahan Kalor (2012)	21
Tabel 3.1 Properti Termofisik Udara Kering pada Tekanan standar 1 Atmosfer (101,325 kPa)	46
Tabel 3.2 Properti Termofisik Air Cair pada Kondisi Jenuh	47

BAB I

PENDAHULUAN

PERPINDAHAN PANAS

1.1 MEKANISME PERPINDAHAN PANAS

Perpindahan panas adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi yang terjadi akibat adanya perbedaan suhu antara dua benda atau bagian dari suatu benda. Perpindahan energi ini selalu bergerak dari daerah bersuhu lebih tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah, dan berhenti ketika suhu kedua benda sama (kesetimbangan termal).

Ada tiga mekanisme dasar perpindahan panas, yaitu **Konduksi**, **Konveksi**, dan **Radiasi**. Berikut penjelasan lengkapnya:

1. Konduksi (Perpindahan Panas Konduksi)

Konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi melalui zat perantara, di mana energi berpindah akibat pergerakan molekul-molekul zat tersebut, namun zat perantaranya **tidak ikut berpindah**. Mekanisme ini dominan terjadi pada benda padat, namun juga bisa terjadi pada cairan dan gas.

a. Mekanisme Terjadinya:

- 1) Pada benda padat: Molekul bergetar pada posisi kesetimbangannya. Jika satu bagian dipanaskan, molekul di bagian itu bergetar lebih cepat dan memiliki energi kinetik lebih besar. Energi ini diteruskan ke molekul tetangganya melalui tumbukan, dan seterusnya sampai ke bagian yang lebih dingin. Pada logam, perpindahan

energi juga dibantu oleh pergerakan elektron bebas, itulah sebabnya logam penghantar panas yang baik.

- 2) Pada cairan dan gas: Terjadi akibat tumbukan dan difusi molekul saat bergerak secara acak.

b. Hukum Dasar Konduksi:

Dinyatakan dalam **Hukum Fourier**, yang berbunyi: Laju perpindahan panas konduksi sebanding dengan luas penampang, sebanding dengan perbedaan suhu, dan berbanding terbalik dengan ketebalan benda.

Rumus:

$$q_k = -k \cdot A \frac{dT}{dx}$$

Keterangan:

q_k = Laju perpindahan panas konduksi (Watt)

k = Konduktivitas termal bahan (W/m·K), sifat kemampuan bahan menghantarkan panas

A = Luas penampang melintang (m²)

$dxdT$ = Gradien suhu, perubahan suhu per satuan panjang (°C/m atau K/m)

Tanda negatif (-) menunjukkan panas mengalir ke arah penurunan suhu.

c. Sifat Bahan Berdasarkan Konduktivitas:

- 1) **Konduktor:** Bahan dengan nilai k tinggi, mudah menghantarkan panas. Contoh: Tembaga ($k \approx 401$ W/m·K), Aluminium ($k \approx 237$ W/m·K), Besi.

- 2) **Isolator:** Bahan dengan nilai k rendah, sulit menghantarkan panas, berfungsi menahan aliran panas. Contoh: Kayu, wol, plastik, udara, batu bata tahan api ($k < 1$ W/m·K).

Faktor yang Mempengaruhi:

- 1) Jenis bahan
- 2) Luas permukaan kontak
- 3) Perbedaan suhu
- 4) Ketebalan atau panjang jalur perpindahan

Contoh Kejadian:

- 1) Ujung gagang sendok logam menjadi panas saat ujung satunya dicelupkan ke air mendidih.
- 2) Panas api kompor merambat ke seluruh dasar panci.
- 3) Dinding rumah menjadi hangat di sisi dalam saat matahari menyinari sisi luarnya.

2. Konveksi (Perpindahan Panas Konveksi)

Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi akibat adanya **perpindahan atau pergerakan massa** dari zat perantaranya. Mekanisme ini hanya terjadi pada zat yang dapat mengalir, yaitu **cairan dan gas**. Pada konveksi, perpindahan energi panas disertai dengan perpindahan materi zat itu sendiri. Konveksi sebenarnya merupakan gabungan dua mekanisme:

- a) Perpindahan panas akibat tumbukan molekul (konduksi)
- b) Perpindahan panas akibat perpindahan massa fluida itu sendiri.

1) Jenis-Jenis Konveksi:

a) Konveksi Alami (Bebas):

Pergerakan fluida terjadi secara alami karena adanya perbedaan massa jenis akibat perbedaan suhu. Bagian fluida yang panas memuai, massa jenisnya mengecil, lalu bergerak naik, sedangkan bagian yang dingin massa jenisnya lebih besar dan bergerak turun. Tidak ada tenaga luar yang membantu.

Contoh: Uap air yang naik ke atas, udara hangat di ruangan yang bergerak naik, aliran udara di sekitar benda panas.

b) Konveksi Paksa:

Pergerakan fluida dipaksa atau dibantu oleh alat bantu eksternal seperti kipas angin, pompa, blower, atau aliran angin. Laju perpindahan panas pada jenis ini jauh lebih besar daripada konveksi alamiah.

Contoh: Sistem pendingin mesin mobil (air dipompa), kipas pendingin CPU komputer, aliran udara AC.

c) Konveksi Campuran:

Terjadi ketika gaya alami dan gaya paksa memiliki pengaruh yang hampir sama besar.

2) Hukum Dasar Konveksi:

Dinyatakan dalam **Hukum Newton Pendinginan**, berbunyi: Laju perpindahan panas konveksi sebanding dengan luas permukaan benda dan selisih suhu antara permukaan benda dengan fluida yang mengalir di sekitarnya.

Rumus:

$$q_c = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

Keterangan:

- q_c = Laju perpindahan panas konveksi (Watt)
- h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), nilai ini **tidak tetap**, bergantung pada sifat fluida, kecepatan aliran, bentuk permukaan, dan jenis aliran.
- A = Luas permukaan kontak antara benda dan fluida (m^2)
- T_s = Suhu permukaan benda ($^\circ\text{C}$ atau K)
- T_∞ = Suhu rata-rata fluida jauh dari permukaan ($^\circ\text{C}$ atau K)

Faktor yang Mempengaruhi Nilai h :

- Sifat fisik fluida: Viskositas, kerapatan, panas jenis, konduktivitas termal.
- Kecepatan aliran: Semakin cepat aliran, semakin besar nilai h .
- Bentuk dan posisi permukaan benda.
- Jenis aliran: Laminar (teratur) atau Turbulen (berputar-acak), nilai h pada aliran turbulen jauh lebih besar.

Contoh Kejadian:

- Pemanasan air dalam panci: air di bawah menjadi panas, massa jenis berkurang, bergerak ke atas, digantikan oleh air dingin dari atas.
- Angin darat dan angin laut.
- Pendinginan badan kita saat berangin.

3. Radiasi (Perpindahan Panas Radiasi)

Radiasi adalah perpindahan panas yang berlangsung tanpa zat perantara sama sekali. Energi dipancarkan oleh benda dalam bentuk **gelombang elektromagnetik**, mirip dengan gelombang cahaya, gelombang radio, atau sinar X. Radiasi dapat merambat melewati ruang hampa udara, itulah satu-satunya cara panas matahari sampai ke bumi melewati ruang angkasa.

a. Mekanisme Terjadinya:

Semua benda yang memiliki suhu di atas 0 Kelvin ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) akan memancarkan energi radiasi. Energi ini berasal dari perubahan konfigurasi elektron dan getaran molekul di dalam benda. Semakin tinggi suhu benda, semakin besar energi radiasi yang dipancarkan. Berbeda dengan konduksi dan konveksi yang membutuhkan materi, radiasi justru paling efektif di ruang hampa.

- 1) Sifat Utama Radiasi:
 - a) Merambat lurus seperti cahaya.
 - b) Dapat dipantulkan, diserap, atau diteruskan saat mengenai permukaan benda lain.
 - c) Kecepatan rambat sama dengan kecepatan cahaya (3×10^8 m/detik).
- 2) Istilah Penting:
 - Benda Hitam: Benda ideal yang mampu memancarkan dan menyerap energi radiasi paling maksimal. Nilai emisivitasnya $\epsilon=1$.
 - Emisivitas (ϵ): Kemampuan suatu permukaan memancarkan energi radiasi dibandingkan benda hitam. Nilainya berkisar $0 \leq \epsilon \leq 1$. Benda yang berwarna gelap dan kasar biasanya punya nilai emisivitas tinggi, sedangkan permukaan mengkilap rendah.
 - Absorptivitas (α): Bagian energi radiasi yang diserap benda.
 - Reflektivitas (ρ): Bagian energi radiasi yang dipantulkan benda.
 - **Transmisivitas** (τ): Bagian energi radiasi yang diteruskan benda.

Hubungannya: $\alpha + \rho + \tau = 1$.

- 3) Hukum Dasar Radiasi:

Dinyatakan dalam **Hukum Stefan-Boltzmann**, berbunyi: Jumlah energi radiasi yang dipancarkan oleh satuan luas permukaan benda persatuan waktu sebanding dengan pangkat empat dari suhu mutlak benda tersebut.

Rumus:

$$Q_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4$$

Keterangan:

- q_r = Laju perpindahan panas radiasi (Watt)
- σ = Konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- ε = Emisivitas permukaan ($0 < \varepsilon < 1$)
- A = Luas permukaan pancar (m^2)
- T = Suhu mutlak permukaan benda (**Harus dalam satuan Kelvin, K**)
- Jika ada dua benda saling memancarkan dan menerima panas:
- $q_{\text{pertukaran}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$

Contoh Kejadian:

- Panas matahari sampai ke bumi.
- Panas yang terasa saat berdiri di depan api unggun atau kompor.
- Pemanasan bumi oleh sinar matahari.
- Penggunaan pakaian berwarna terang saat panas (memantulkan radiasi) dan gelap saat dingin (menyerap radiasi).

1.2 PERBEDAAN PERPINDAHAN PANAS 1 DAN PERPINDAHAN PANAS 2

Dalam kurikulum teknik mesin, teknik kimia, atau teknik fisika, materi perpindahan panas dibagi menjadi dua tingkatan. Perbedaan utamanya terletak pada kedalaman materi, kompleksitas masalah, kondisi waktu, dan penerapan kasusnya. Berikut rincian lengkap perbedaannya:

1. Perpindahan Panas 1 (Dasar/Pendahuluan)

a. Fokus Utama:

Mempelajari konsep dasar, prinsip kerja, hukum-hukum utama, dan analisis perpindahan panas pada kondisi **STASIONER (Keadaan Tunak)**. Artinya, suhu di setiap titik dalam sistem **tidak berubah terhadap waktu**, hanya berubah terhadap posisi atau lokasi saja.

b. Lingkup Materi:

1) Konduksi:

- Penurunan persamaan diferensial dasar konduksi.
- Analisis satu dimensi saja.
- Penyelesaian kasus sederhana: Dinding datar, dinding berlapis, silinder berongga, bola berongga.
- Konsep hambatan termal dan rangkaian hambatan panas (seperti rangkaian listrik).
- Penghantar dengan luas penampang berubah (sirip pendingin sederhana).
- Kondisi batas: Suhu konstan, fluks panas konstan, isolasi sempurna.

2) Konveksi:

- Pengenalan konsep dasar, perbedaan konveksi alamiah dan paksa.
- Pengenalan bilangan tak berdimensi: Bilangan Nusselt, Bilangan Prandtl, Bilangan Reynolds, Bilangan Grashof.
- Perhitungan sederhana koefisien perpindahan panas rata-rata.

3) Radiasi:

- Konsep dasar, hukum Stefan-Boltzmann, hukum Planck, hukum Wien.
- Sifat permukaan: emisivitas, absorptivitas, reflektivitas.
- Pertukaran panas radiasi sederhana antar dua permukaan.

c. Karakteristik Masalah:

- Sederhana dan ideal.
- Banyak asumsi penyederhanaan (misal: bahan homogen, sifat bahan tidak berubah dengan suhu).
- Biasanya hanya melibatkan satu atau dua bentuk perpindahan panas sekaligus.
- Tujuannya hanya menghitung **laju perpindahan panas** (q).

d. Tujuan Pembelajaran:

Memahami prinsip dasar, hukum, dan cara menghitung perpindahan panas pada kondisi stabil dan kasus geometri sederhana.

2. Perpindahan Panas 2

a. Fokus Utama:

Mempelajari analisis mendalam, metode penyelesaian matematis yang rumit, dan kasus pada kondisi **TAK STASIONER (Keadaan Tak Tunak)**. Artinya, suhu berubah baik terhadap posisi **maupun terhadap waktu**. Selain itu, membahas kasus geometri kompleks, sistem multi dimensi, dan peralatan teknik nyata.

b. Lingkup Materi:

1) Konduksi:

- a) Analisis dua dimensi dan tiga dimensi.

- b) Konduksi Tak Tunak: Suhu berubah seiring waktu. Contoh: Proses pemanasan atau pendinginan benda, seperti mendinginkan cetakan baja, memasak makanan, memanaskan beton. Metode penyelesaian: Analisis eksak, metode beda hingga, grafik Heisler.
 - c) Konduksi pada bahan dengan sifat yang berubah terhadap suhu.
 - d) Analisis sirip pendingin lanjut dan efektivitas sirip.
- 2) Konveksi:
- a) **Analisis Lapisan Batas:** Penjelasan mendalam mengenai lapisan batas kecepatan dan suhu di dekat permukaan benda.
 - b) Persamaan diferensial gerak dan energi pada fluida.
 - c) Konveksi Paksa Lanjut: Aliran di dalam pipa, aliran melintang silinder/bola/pelat datar, aliran laminar dan turbulen secara rinci.
 - d) Konveksi Alamiah Lanjut: Pada ruang tertutup, pada permukaan miring/vertikal/horisontal.
 - e) Konveksi dengan perubahan fasa: Pendidihan (*boiling*) dan Pengembunan (*condensation*) ini materi yang sangat penting dan sulit.
- 3) Radiasi:
- a) Pertukaran panas radiasi antar banyak permukaan dalam ruang tertutup.
 - b) Konsep Faktor Pandang (bagian energi yang dipancarkan benda 1 dan sampai ke benda 2).
 - c) Radiasi pada media yang menyerap dan memancarkan (gas, asap, api).
 - d) Permukaan pelindung radiasi.

4) Peralatan Penukar Panas:

- a) Ini adalah materi inti Perpindahan Panas 2.
- b) Jenis penukar panas: Shell and Tube, Pelat, Ganda Pipa, dll.
- c) Metode analisis: Metode LMTD (*Log Mean Temperature Difference*) dan Metode Efektivitas - NUT (*Number of Transfer Units*).
- d) Perancangan dan perhitungan ukuran penukar panas, serta analisis efisiensi dan efektivitas.

c. Karakteristik Masalah:

- 1) Kompleks, mendekati kondisi nyata industri.
- 2) Sedikit asumsi penyederhanaan, mempertimbangkan banyak faktor gangguan.
- 3) Melibatkan persamaan diferensial parsial dan matematika tingkat tinggi.
- 4) Tujuannya tidak hanya menghitung q , tapi juga memprediksi **perubahan suhu setiap saat**, mendesain alat, dan menganalisis kinerja sistem.

d. Tujuan Pembelajaran:

Mampu menganalisis fenomena panas yang rumit, merancang alat penukar panas, memprediksi perubahan suhu dalam proses manufaktur atau alam, dan memecahkan masalah rekayasa termal yang nyata.

Tabel ringkasan perbedaan:

Tabel 1. 1 Perpindahan Panas dan Massa: Pendekatan Dasar & Penerapan (Edisi 2, Terjemahan)

Aspek Pembeda	Perpindahan Panas 1	Perpindahan Panas 2
Kondisi Waktu	Stasioner / Tunak (Suhu tidak berubah terhadap waktu)	Tak Stasioner / Tak Tunak (Suhu berubah terhadap waktu)
Dimensi Analisis	Satu Dimensi (1D)	Dua Dimensi (2D), Tiga Dimensi (3D)
Tingkat Kesulitan	Dasar, Sederhana, Banyak asumsi	Lanjut, Kompleks, Sedikit asumsi
Konduksi	Dinding datar, silinder sederhana, hambatan termal	Perubahan suhu seiring waktu, geometri rumit
Konveksi	Dasar, definisi, hitungan koefisien rata-rata	Analisis lapisan batas, pendidihan, pengembunan, aliran dalam pipa
Radiasi	Hukum dasar, pertukaran antar 2 benda	Faktor pandang, pertukaran banyak permukaan, radiasi gas
Materi Utama	Prinsip & Hukum Dasar	Analisis Lanjut & Perancangan Alat Penukar Panas

Aspek Pembeda	Perpindahan Panas 1	Perpindahan Panas 2
Penerapan	Memahami konsep dan menghitung laju panas dasar	Mendesain alat, memprediksi proses industri, analisis efisiensi

Sumber : Cengel, Yunus A. (2009).

1.3 KONDUKTIVITAS TERMAL, KOEFISIEN KONVEKSI, BILANGAN TAK BERDIMENSI, DAN PENGAPLIKASIANNYA DALAM DUNIA INDUSTRI

1. Pendahuluan

Perpindahan panas adalah salah satu aspek fundamental dalam Teknik yang krusial, karena hampir semua proses industri melibatkan transfer energi panas. Dalam konteks industri modern, proses pemanasan dan pendinginan menjadi unsur penting untuk mempertahankan kualitas produk, efisiensi energi, dan kestabilan fungsi peralatan. Oleh sebab itu, pemahaman tentang mekanisme perpindahan panas sangatlah penting dalam bidang teknik mesin, teknik kimia, teknik elektro, teknik industri, serta teknologi pangan.

Menurut *Parabelem T.D. Rompas – Buku Perpindahan Kalor*, perpindahan panas merupakan proses berpindahnya energi termal akibat adanya perbedaan temperatur antara dua sistem. Panas secara alami akan berpindah dari daerah bertemperatur tinggi menuju daerah bertemperatur rendah hingga tercapai keseimbangan termal.

Dalam dunia industri, transfer panas biasanya tidak berlangsung hanya melalui satu cara. Biasanya, proses tersebut melibatkan berbagai kombinasi:

- a. Konduksi
- b. Konveksi
- c. dan radiasi

Namun dalam sistem teknik, proses yang paling dominan adalah konduksi dan konveksi. Oleh karena itu, faktor-faktor seperti konduktivitas termal dan koefisiensi konveksi sangat krusial untuk diperhatikan. Selain itu, analisis perpindahan panas terkini juga memanfaatkan bilangan tak berdimensi.:

- a. Bilangan Reynolds
- b. Bilangan Prandtl
- c. dan Bilangan Nusselt

Bilangan-bilangan tersebut digunakan untuk menentukan karakteristik aliran fluida dan efektivitas perpindahan panas dalam suatu sistem.

Susastriawan (2022) menjelaskan bahwa penguasaan konsep perpindahan panas sangat penting dalam perancangan alat industri karena menentukan:

- a. Efisiensi energi,
- b. Kapasitas pendinginan,
- c. Keamanan operasi,
- d. Serta umur peralatan.

2. Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal adalah karakteristik suatu bahan yang menunjukkan seberapa baik bahan tersebut dapat menghantarkan panas. Dalam proses perpindahan panas melalui konduksi, energi panas bergerak tanpa melibatkan pergerakan massa zat.

Peristiwa ini bisa dilihat ketika suatu ujung batang logam diberi panas. Energi panas akan menyebarkan ke bagian lainnya dari batang logam itu meskipun logam tetap berada diposisi yang

sama. Ini terjadi akibat adanya pemindahan energi di antara partikel-partikel bahan.

Menurut Rompas (2012, Bab II hlm. 12–15), perpindahan panas konduksi terjadi akibat interaksi molekul dan perpindahan energi kinetik antar partikel dalam material.

Pada bahan logam, proses perpindahan panas terjadi dengan sangat cepat disebabkan oleh adanya elektron yang dapat bergerak bebas untuk mengangkut energi panas, Di sisi lain, pada bahan non-logam perpindahan panas hanya berlangsung melalui getaran molekul yang menyebabkan laju perpindahan panas menjadi lebih lambat.

Fenomena ini menggambarkan alasan dibalik:

- a. Sendok logam cepat menjadi panas saat dimasukkan dlam air panas.
- b. Pegangan kayu pada panci tetap cukup dingin

Dengan demikian kita dapat mengerti bahwa setiap jenis material memiliki Tingkat konduktivitas yang tidak sama.

a) Hukum Fourier

Pada perpindahan panas dapat kita ketahui menggunakan rumus hukum fourier:

$$q = kA \frac{dT}{dx}$$

Keterangan:

- q = Laju perpindahan panas (W)
- k = Konduktivitas termal ($\frac{W}{m.K}$)
- A = Luas penampang perpindahan panas (m^2)
- $\frac{dT}{dx}$ = Gradien temperatur

Tanda negative menunjukkan bahwa panas mengalir dari suhu yang lebih tinggi ke yang terendah.

Menurut Rompas (2012, hlm. 18), semakin besar nilai konduktivitas termal suatu material maka semakin cepat panas dapat mengalir melalui material tersebut.

b) Mekanisme konduktivitas termal

Pada material logam, energi panas berpindah melalui getaran atom, dan perpindahan elektron bebas. Elektron bergerak secara cepat sehingga energi panas dapat berpindah dengan efisien. Oleh karena itu material logam seperti tembaga, aluminium, perak memiliki konduktivitas termal yang tinggi.

Sebaliknya pada material non-logam elektron tidak bergerak bebas, perpindahan panas hanya melalui tumbukan molekul sehingga panas merambat lebih lambat.

Menurut Rompas (2012, hlm. 17), logam merupakan penghantar panas terbaik karena struktur atomiknya mendukung transfer energi yang cepat.

c) Faktor yang mempengaruhi konduktivitas termal

(1) Jenis material

Jenis material merupakan faktor utama yang menentukan kemampuan suatu material dalam menghantarkan panas.

(a) Logam

- Memiliki elektron bebas
- Konduktivitas tinggi

(b) Bahan isolator

- Tidak memiliki elektron yang bebas
- Konduktivitas rendah

Contoh :

- Aluminium digunakan pada heatsink dan radiator
- Dan kayu digunakan sebagai isolator panas

(2) Temperatur

Selain jenis material temperatur juga sangat mempengaruhi nilai konduktivitas termal. Menurut Rompas (2012, hlm.20):

- Pada logam kenaikan temperature menyebabkan nilai konduktivitas termal menurun
- Pada gas malah sebaliknya ketika temperature naik maka nilai konduktivitas nya akan naik juga

Fenomena ini terjadi karena pada logam getaran atom meningkat dan pergerakan elektron terganggu. Sedangkan pada gas molekul bergerak lebih cepat dan transfer energinya juga meningkat.

(3) Struktur material

Material yang solid dan tersekat lebih efektif dalam menghantarkan panas dibandingkan dengan material yang berpori mengandung udara yang memiliki konduktivitas rendah, sehingga menghalangi perpindahan panas.

Kasus ini diterapkan pada :

- Glass wool
- Styrofoam
- Ceramic fiber

Material-material tersebut digunakan sebagai isolator panas pada furnace dan boiler pada industri, berikut tabel nilai konduktivitas termal material:

Tabel 1. 2 Perpindahan Kalor (2012)

Material	Konduktivitas Termal $\left(\frac{W}{m.K}\right)$
Perak	429
Tembaga	385
Aluminium	205

Material	Konduktivitas Termal ($\frac{W}{m.K}$)
Baja	50
Kaca	0,8
Kayu	0,1-0,2
Udara	0,026

Sumber Rompas, P.T.D., Bab II hlm. 17–21; Susastriawan (2022).

Tabel tersebut menunjukkan bahwa material logam memiliki konduktivitas termal yang jauh lebih tinggi dibandingkan material non-logam. Oleh karena itu logam umumnya digunakan sebagai penghantar panas, sedangkan material non-logam lebih sering dimanfaatkan sebagai isolator termal karena kemampuan transfer panasnya lebih rendah.

3. Koefisien Konveksi

Konveksi merupakan salah satu perpindahan panas yang terjadi melalui kombinasi perpindahan energi termal dan pergerakan fluida. Fenomena ini dapat kita temukan dalam aktivitas kita sehari-hari, contohnya seperti saat air dipanaskan didalam panci udara panas bergerak keatas, atau kipas yang mempercepat proses pendinginan.

Menurut Rompas (2012,Bab III, hlm. 46), konveksi terjadi karena adanya perpindahan massa fluida yang membawa energi panas dari suatu tempat ketempat lainnya. Koefisien konveksi merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan kemampuan suatu fluida dalam mentransfer panas antara permukaan padat dan fluida disekitarnya.

Jadi, semakin besar nilai koefisien konveksi maka perpindahan panas akan berlangsung semakin cepat sehingga proses pendinginan maupun pemanasan menjadi lebih efektif.

a) Hukum Pendinginan Newton

Perpindahan panas konveksi dapat dijelaskan menggunakan persamaan:

$$q = hA(T_g - T_{\infty})$$

Keterangan:

- q = Laju perpindahan panas
- h = Koefisien konveksi
- A = Luas permukaan
- T_g = Temperatur permukaan
- T_{∞} = Temperatur fluida

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa laju perpindahan panas dapat dipengaruhi oleh luas permukaan, beda temperature, dan koefisien konveksi.

Menurut Rompas (2012, hlm. 50), semakin besar koefisien konveksi maka laju perpindahan panasnya juga akan semakin tinggi.

b) Jenis konveksi

Konveksi dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

(1) Konveksi alami

Konveksi alami terjadi karena adanya gaya apung yang muncul akibat perbedaan massa jenis fluida yang disebabkan oleh perubahan temperatur. Fenomena ini dapat dilihat ketika udara panas disekitar kompor bergerak ke atas atau saat heatsink melepaskan panas secara alami tanpa bantuan perangkat tambahan. Pada konveksi alami, pergerakan fluida berlangsung secara

spontan tanpa menggunakan alat mekanis seperti kipas maupun pompa.

(2) Konveksi paksa

Konveksi paksa terjadi ketika pergerakan fluida dibantu oleh perangkat eksternal seperti kipas, blower, ataupun pada pompa. Jenis konveksi ini banyak diterapkan pada berbagai sistem teknik, misalnya radiator kendaraan, unit pendingin udara(AC), dan sistem pendingin CPU pada komputer. Pada konveksi paksa, fluida dipaksa mengalir dengan kecepatan yang lebih tinggi sehingga laju perpindahan panas meningkat panas dan proses pendinginan maupun pemanasan menjadi lebih efisien.

c) Faktor yang mempengaruhi koefisien konveksi

Ada 3 faktor yang mempengaruhi koefisien konveksi yaitu:

(1) Kecepatan fluida

Semakin tinggi kecepatan aliran fluida, maka lapisan batas termal akan menjadi lebih tipis sehingga laju perpindahan panas meningkat, Fenomena ini dapat diamati pada radiator kendaraan, maupun dimana putaran kipas yang lebih cepat mampu meningkatkan aliran udara dan membuat proses pendinginan bekerja lebih efektif.

(2) Jenis fluida

Fluida cair umumnya memiliki koefisien konveksi yang lebih tinggi dibandingkan gas karena mempunyai massa jenis dan kapasitas panas yang lebih besar. Oleh karena itu, air lebih efektif digunakan sebagai media pendingin dibandingkan udara karena kemampuannya dalam menyerap panas dan memindahkan panas lebih baik.

(3) Jenis aliran

Menurut Rompas (2012, hlm, 77), aliran turbulen mampu menghasilkan perpindahan panas yang lebih efektif dibandingkan aliran laminae, Hal ini disebabkan oleh proses pencampuran fluida yang terjadi lebih intensif sehingga distribusi temperatur didalam fluida menjadi lebih merata.

d) Nilai koefisien konveksi fluida

Berikut tabel nilai-nilai koefisien konveksi fluida:

Tabel 1. 3 Perpindahan Kalor (2012)

Fluida	Nilai $h \left(\frac{W}{m^2.K} \right)$
Udara alami	2-25
Udara paksa	25-250
Air	50-20.000
Kondensasi uap	>10.000

Sumber Rompas, P.T.D., Bab III hlm. 65–80; Incropera et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.

4. Bilangan tak berdimensi

Bilangan tak berdimensi merupakan parameter penting dalam bidang perpindahan panas dan mekanika fluida. Bilangan ini digunakan untuk menyederhanakan hubungan matematis yang rumit menjadi bentuk yang lebih mudah dianalisis dan diterapkan dalam praktik rekayasa teknik.

Menurut Parabelem T.D. Rompas dalam buku *Perpindahan Kalor* (2012), pembahasan mengenai konveksi dan perpindahan kalor empiris sangat erat kaitannya dengan penggunaan “bilangan tanpa dimensi” untuk menentukan karakteristik perpindahan panas serta perilaku aliran fluida. Bilangan tak berdimensi membantu para insinyur dalam:

- mengidentifikasi jenis aliran fluida,
- menghitung koefisien perpindahan panas,
- menyusun korelasi empiris,
- menyederhanakan analisis eksperimen,
- serta merancang heat exchanger dan sistem pendingin.

Selain itu, Susastriawan (2022) menjelaskan bahwa bilangan tak berdimensi digunakan untuk menghubungkan karakteristik perpindahan momentum, perpindahan panas, dan aliran fluida pada proses konveksi serta transfer energi termal.

a) Bilangan Reynolds (Re)

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengetahui apakah aliran fluida bersifat laminar maupun turbulen.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Keterangan:

- ρ = Densitas fluida
- v = Kecepatan aliran
- D = Diameter karakteristik
- μ = Viskositas dinamis

Menurut Rompas (2012, Bab III hlm. 47–50), perilaku aliran viskos dan inviscid sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara gaya inersia dan gaya viskos yang bekerja pada fluida. Perbandingan antara kedua gaya tersebut dinyatakan melalui bilangan Reynolds.

Rompas juga menyatakan bahwa “aliran turbulen menghasilkan pencampuran fluida yang lebih besar” (Bab III, hlm. 77). Pernyataan ini menunjukkan bahwa bilangan Reynolds memiliki peranan penting dalam menentukan efektivitas perpindahan panas secara konveksi.

b) Bilangan Prandtl (Pr)

Bilangan Prandtl menunjukkan hubungan antaran difusi momentum dan difusi panas dalam fluida

Persamaan:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

Atau:

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

Keterangan:

- μ = Viskositas dinamis
- c_p = Kalor jenis
- k = Konduktivitas termal
- ν = Viskositas kinematik
- a = Difusitas termal

Menurut Susastriawan (2022), bilangan Prandtl digunakan untuk menganalisis karakteristik lapisan batas termal pada suatu fluida. Fluida yang memiliki nilai bilangan Prandtl tinggi umumnya mengalami difusi panas yang lebih lambat dibandingkan difusi momentumnya.

c) Bilangan Nusselt (Nu)

Bilangan Nusselt menunjukkan perbandingan perpindahan panas konveksi terhadap konduksi.

Persamaan:

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

Keterangan:

- h = Koefisien konveksi
- L = Panjang karakteristik
- k = Konduktivitas termal fluida

Semakin tinggi nilai bilangan Nusselt, maka proses perpindahan panas secara konveksi akan berlangsung lebih

efektif. Bilangan tak berdimensi ini sering digunakan untuk mengevaluasi kinerja termal berbagai peralatan teknik seperti evaporator, kondensor, dan *heat exchanger*.

1.4 RANGKUMAN

1. Mekanisme Termal Fundamental: Perpindahan panas dibedakan menjadi konduksi molekuler (Hukum Fourier), konveksi yang melibatkan pergerakan makroskopis fluida atau adveksi (Hukum Pendinginan Newton), dan radiasi termal dalam bentuk gelombang elektromagnetik tanpa medium perantara (Hukum Stefan-Boltzmann).
2. Definisi Keadaan Tak Tunak (*Transient State*): Merupakan kondisi di mana temperatur sistem berubah dan berfluktuasi secara dinamis seiring berjalannya waktu, sehingga temperatur merupakan fungsi dari posisi koordinat dan waktu, dituliskan secara matematis sebagai $T = f(x, y, z, t)$.
3. Metode Kapasitas Terpusat (Lumped Capacitance Method): Sebuah pendekatan simplifikasi analitik yang mengasumsikan distribusi temperatur di dalam benda padat bersifat seragam secara spasial (tidak ada gradien suhu internal) selama proses transient berlangsung.
4. Validitas Bilangan Biot (Bi): Metode Kapasitas Terpusat dinyatakan valid secara ilmiah jika dan hanya jika hambatan konduksi internal jauh lebih kecil dibanding hambatan konveksi eksternal, yang ditunjukkan oleh kriteria Bilangan Biot lebih kecil atau sama dengan nol koma satu ($Bi \leq 0,1$).
5. Bilangan Fourier (Fo) sebagai Representasi Waktu: Bilangan Fourier digunakan bersama dengan Bilangan Biot untuk menghitung laju penurunan atau kenaikan temperatur

eksponensial terhadap waktu tak berdimensi, menggambarkan kecepatan rambat panas relatif terhadap kapasitas penyimpanan termal material.

1.5 SOAL LATIHAN

Soal 1

Mengapa material logam memiliki tingkat konduktivitas termal (k) yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan material non-logam? Hubungkan dengan keberadaan elektron bebas.

Soal 2

Tuliskan persamaan rumus Hukum Fourier untuk perpindahan panas konduksi beserta arti fisis dari tanda negatif (-) di depan rumusnya.

Soal 3

Jelaskan perbedaan fokus utama antara mata kuliah Perpindahan Panas 1 dan Perpindahan Panas 2 ditinjau dari aspek kondisi waktu (*steady vs transient*).

Soal 4

Sebutkan 3 faktor fisik fluida atau karakteristik aliran yang dapat memengaruhi besarnya nilai koefisien perpindahan panas konveksi (h).

Soal 5

Tuliskan rumus untuk menghitung Bilangan Reynolds (Re) pada aliran fluida dan jelaskan fungsi utamanya dalam analisis regim aliran.

BAB II

KONVEKSI PAKSA PADA ALIRAN EKSTERNAL

2.1 ALIRAN MELINTASI PELAT DATAR (FLAT PLATE)

Aliran melintasi pelat datar merupakan kasus paling mendasar dalam studi konveksi paksa eksternal. Pada kondisi ini, fluida mengalir sejajar dengan permukaan pelat datar yang memiliki temperatur berbeda dengan fluida. Lapisan batas kecepatan (velocity boundary layer) dan lapisan batas termal (thermal boundary layer) berkembang secara bersamaan dari tepi depan (leading edge) pelat.

1. Lapisan Batas pada Pelat Datar

Pada aliran laminar, ketebalan lapisan batas kecepatan (δ) dan lapisan batas termal (δ_t) berkembang sepanjang pelat mengikuti persamaan berikut:

$$\frac{\delta}{x} = 5 Re_x^{-\frac{1}{2}} ; \quad \frac{\delta_t}{x} = \frac{\delta}{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

di mana x adalah jarak dari tepi depan pelat dan $Re_x = U_\infty x / \nu$ adalah bilangan Reynolds lokal berdasarkan panjang x . Bilangan Nusselt lokal untuk aliran laminar dinyatakan oleh:

$$Nu_x = h_x \cdot \frac{x}{k} = 0.332 Re_x^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Persamaan di atas dikenal sebagai solusi Blasius untuk konveksi paksa laminar pada pelat datar. Korelasi ini berlaku untuk bilangan Prandtl dalam rentang $0,6 \leq Pr \leq 50$ dan bilangan Reynolds lokal $Re_x < 5 \times 10^5$.

2. Transisi Aliran dan Aliran Turbulen

Transisi dari aliran laminar ke turbulen pada pelat datar terjadi pada bilangan Reynolds kritis $Re_c \approx 5 \times 10^5$. Setelah transisi, karakteristik lapisan batas berubah secara signifikan. Bilangan Nusselt lokal untuk aliran turbulen pada pelat datar diberikan oleh:

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{(4/5)} \cdot Pr^{(1/3)} (\text{aliran turbulen}, Re_x > 5 \times 10^5)$$

Untuk pelat yang mengalami kondisi campuran (mixed conditions), di mana transisi terjadi pada panjang tertentu, korelasi rata-rata Nusselt diberikan oleh:

$$Nu_L = \left(0.037 Re_L^{(4/5)} - 871 \right) \cdot Pr^{(1/3)}$$

2.2 ALIRAN MELINTASI SILINDER DAN BOLA

Aliran melintasi silinder dan bola adalah kasus konveksi paksa eksternal yang sangat penting dalam aplikasi industri, seperti pada penukar panas, sensor temperatur, kabel listrik, dan pipa distribusi fluida. Berbeda dengan pelat datar, aliran melintasi silinder mengalami pemisahan lapisan batas (boundary layer separation) yang menyebabkan terbentuknya daerah jejak (wake) di belakang silinder.

1. Aliran Melintasi Silinder Tunggal

Korelasi yang paling banyak digunakan untuk perpindahan panas pada aliran melintasi silinder tunggal adalah korelasi Churchill dan Bernstein (1977):

$$Nu_D = 0.3 + \left[0.62 Re_D^{(1/2)} Pr^{(1/3)} \right] / \left[1 + (0.4/Pr)^{(2/3)} \right]^{(1/4)} \times \left[1 + (Re_D/282000)^{(5/8)} \right]^{(4/5)}$$

Korelasi ini berlaku untuk semua rentang $Re_D \cdot Pr > 0.2$, sehingga bersifat sangat umum dan dapat diaplikasikan pada berbagai kondisi aliran.

Korelasi alternatif yang lebih sederhana adalah korelasi Hilpert, yang menyatakan bahwa $Nu_D = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^{(1/3)}$, dengan

nilai konstanta C dan m yang bergantung pada rentang bilangan Reynolds. Korelasi ini berlaku untuk $0,4 < Re_D < 400.000$ dan $Pr \geq 0,7$.

2. Aliran Melintasi Bola

Untuk aliran melintasi bola, korelasi Whitaker (1972) banyak digunakan:

$$Nu_D = 2 + \left(0.4Re_D^{(1/2)} + 0.06Re_D^{(2/3)} \right) Pr^{0.4} (\mu_\infty/\mu_s)^{(1/4)}$$

Korelasi ini berlaku untuk $3,5 \leq Re_D \leq 7,6 \times 10^4$, $0,71 \leq Pr \leq 380$, dan $1,0 \leq (\mu_\infty/\mu_s) \leq 3,2$. Suku μ_∞/μ_s memperhitungkan variasi viskositas fluida antara kondisi di jauh dari permukaan (μ_∞) dan di permukaan bola (μ_s).

2.3 ALIRAN MELINTASI BANK TUBE

Bank tube (susunan pipa) merupakan konfigurasi yang umum dijumpai dalam heat exchanger tipe shell-and-tube, kondenser, evaporator, dan superheater. Dalam konfigurasi ini, sejumlah pipa disusun dalam baris-baris tertentu dan fluida eksternal dipaksa mengalir tegak lurus terhadap sumbu pipa.

1. Konfigurasi Susunan Pipa

Terdapat dua konfigurasi utama susunan pipa dalam bank tube, yaitu:

- a. **Susunan Sejajar:** Susunan sejajar (in-line arrangement): pipa-pipa disusun dalam baris dan kolom yang lurus. Pitch transversal (ST) dan pitch longitudinal (SL) adalah jarak antarpusat pipa dalam arah tegak lurus dan sejajar aliran.
- b. **Susunan Versatz:** Susunan versatz/zigzag (staggered arrangement): pipa pada baris genap digeser setengah pitch dari baris ganjil. Konfigurasi ini umumnya menghasilkan

DAFTAR PUSTAKA

- Arpaci, Vedat S. (1966). *Conduction Heat Transfer*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing.
- Bejan, Adrian. (2013). *Heat Transfer Handbook*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Burlian, F. *Analisis Pendingin CPU dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Jurnal Rekayasa Mesin, Universitas Sriwijaya.
- Cengel, Yunus A. & Ghajar, Afshin J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications* (5th Edition). New York: McGraw-Hill Education.
- Fluid Mechanics oleh White, F. M. Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill.
- Fluid Mechanics oleh White, F. M. Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill.
- Fundamentals of Fluid Mechanics oleh Munson, B. R. dkk. John Wiley & Sons.
- Fundamentals of Heat and Mass Transfer oleh Incropera, F. P. dkk. John Wiley & Sons.
- Heat Transfer oleh Holman, J. P. Heat Transfer. McGraw-Hill.
- Holman, Jack P. (2010). *Heat Transfer* (10th Edition). New York: McGraw-Hill Companies.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- Incropera, Frank P., DeWitt, David P., Bergman, Theodore L., & Lavine, Adrienne S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass*

- Transfer* (7th Edition). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Ivananda, D., Ahmad, R. D., & Iswara, M. A. I. "Analisis Koefisien Perpindahan Panas Alat Double Pipe Heat Exchanger Berbasis CFD." *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, Politeknik Negeri Malang.
- Kays, William M., Crawford, Michael E., & Weigand, Bernhard. (2005). *Convective Heat and Mass Transfer* (4th Edition). New York: McGraw-Hill.
- Kreith, Frank, Manglik, Raj M., & Bohn, Mark S. (2011). *Principles of Heat Transfer* (7th Edition). Stamford, Connecticut: Cengage Learning.
- McGraw-Hill, Holman, J. P. Heat Transfer.
- McGraw-Hill, Prandtl, L., Boundary Layer Theory. Springer, NASA Glenn Research Center, Wikimedia Commons Boundary Layer Collection, Tec Science Thermal Boundary Layer
- Mekanika Fluida karya Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. Mekanika Fluida. Jakarta: Erlangga.
- Ozisik, M. Necati. (1985). *Heat Transfer: A Basic Approach*. New York: McGraw-Hill
- Rompas, Parabelem T. D. *Perpindahan Kalor*. Manado: Penerbit Akademika, 2012.
- Shah, Ramesh K. & Sekulic, Dusan P. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Son
- Siegel, Robert & Howell, John R. (2002). *Thermal Radiation Heat Transfer* (4th Edition). New York: Taylor & Francis.
- Susastriawan, Anak Agung Putu. *Perpindahan Kalor*. Yogyakarta: Deepublish, 2022.

White, F. M. Fluid Mechanics. McGraw-Hill Education, Çengel, Y. A.,
& Ghajar, A. J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and
Applications.

GLOSARIUM

Absorptivitas (α)	Fraksi atau bagian dari total energi radiasi termal yang datang yang diserap oleh suatu permukaan benda.
Aliran Laminar	Karakteristik aliran fluida yang bergerak secara teratur dalam lapisan-lapisan (lamina) yang sejajar tanpa terjadi pencampuran makroskopis antar lapisan.
Aliran Turbulen	Karakteristik aliran fluida yang ditandai oleh pergerakan partikel secara acak, berputar (eddy), dan tidak teratur, yang menghasilkan pencampuran fluida secara intensif
Bilangan Grashof	Parameter tak berdimensi yang mempresentasikan rasio antara gaya apung (buoyancy force) yang menggerakkan fluida terhadap gaya viskos yang menghambat aliran pada mekanisme konveksi alami.
Bilangan Nusselt	Parameter tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan atau rasio kekuatan antara perpindahan panas konveksi terhadap perpindahan panas konduksi murni pada lapisan fluida yang sama.
Bilangan Prandtl	Parameter tak berdimensi yang menghubungkan ketebalan relatif antara lapisan batas hidrodinamik (momentum) dan lapisan batas termal.

Bilangan Rayleigh	Parameter tak berdimensi yang merupakan hasil perkalian antara Bilangan Grashof dan Bilangan Prandtl ($Ra = Gr \times Pr$).
Bilangan Reynolds	Parameter tak berdimensi yang merepresentasikan perbandingan antara gaya inersia (gaya akibat gerakan fluida) terhadap gaya viskos (gaya gesek internal fluida).
Difusivitas Termal	Laju perambatan panas suatu material melewati medium fisisnya.
Emisivitas (ϵ)	Rasio antara energi radiasi total yang dipancarkan oleh suatu permukaan nyata pada temperatur tertentu
Faktor Bentuk	Parameter geometris tidak berdimensi yang menyatakan fraksi
Kedadaan Tunak	Kondisi perpindahan panas di mana distribusi temperatur di dalam
Koefisien Ekspansi	Sifat termofisika fluida yang menggambarkan sensitivitas
Koefisien Konveksi	Parameter yang menyatakan efektivitas transfer energi termal antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya.
Konduktivitas Termal	Sifat intrinsik material yang menunjukkan tingkat kemampuan bahan tersebut dalam menghantarkan energi panas secara konduksi molekuler murni.
Konveksi Bebas	Mekanisme transfer panas di mana pergerakan atau sirkulasi massa fluida murni dipicu oleh gaya apung alami (buoyancy) yang muncul akibat perbedaan massa jenis

Konveksi Paksa	Mekanisme transfer panas di mana gerakan sirkulasi massa fluida sengaja digerakkan atau dipaksa
Reflektivitas	Fraksi atau bagian dari total radiasi termal yang menumbuk suatu permukaan yang dipantulkan kembali ke medium asalnya.
Suhu Film	Nilai temperatur rata-rata aritmatika antara temperatur permukaan
Transmitivitas	Fraksi dari energi radiasi termal yang datang yang mampu diteruskan melewati medium atau ketebalan material tersebut tanpa mengalami absorpsi maupun refleksi.

INDEKS

A

Absorptivitas, 6, 87
Aliran, vii, ix, 10, 26, 27, 28, 30,
31, 37, 40, 41, 50, 65, 87

B

Bilangan tak berdimensi, 21, 24

C

Cengel, Yunus A, 13, 84

D

definisi, 12
dropwise, 56, 59, 60, 61, 62, 71
Dropwise condensation, 58, 59,
60, 61

E

eksternal, 4, 20, 24, 26, 27, 28,
33, 36
Emisivitas, 6, 7, 88

F

filmwise, 52, 55, 56, 57, 58, 60,
61, 62, 68, 71
Filmwise condensation, 56, 57,
61

G

Grashof (Gr), 49

H

Holman, 84, 85
Hukum, 2, 4, 6, 12, 15, 19, 24,
25, 74, 81, 82

I

internal, 24, 63, 65, 88

K

kinematik, 23, 37
Koefisien, vii, 4, 13, 18, 19, 23,
48, 49, 50, 68, 69, 70, 85, 88
Kondensasi, viii, 21, 52, 53, 54,
55, 56, 62, 66, 70, 71
Konduksi, 1, 2, 8, 9, 10, 12, 14
Konduktivitas termal, 2, 14, 15,
23, 58, 65
Konveksi, vii, ix, 1, 3, 4, 8, 10,
12, 13, 14, 18, 19, 20, 30, 33,
42, 46, 48, 49, 88, 89
Kreith, Frank, 85
kritis, 27, 31, 37, 45

L

Laju perpindahan panas, 2, 4,
7, 15, 19, 49, 68, 70, 80, 81
laminar, 10, 22, 26, 27, 30, 37,
38, 49, 63, 64, 66, 67, 94

N

Nusselt (Nu), 23

O

Ozisik, M. Necati, 85

P

paksa, iv, 4, 8, 20, 21, 26, 27, 29,
30, 35

perpindahan panas konveksi,
4, 23, 25, 29, 35, 36, 38, 51, 87
Prandtl (Pr), 23, 37

R

Rayleigh (Ra), 37, 50
Reflektivitas, 6, 89
Reynolds (Re), 22, 25

S

Stefan-Boltzmann, 6, 7, 9, 24,
74, 81

T

termal, iv, vi, 1, 5, 8, 11, 12, 13,
14, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 24,

25, 26, 29, 30, 33, 34, 35, 36,
37, 38, 40, 42, 43, 44, 53, 55,
56, 58, 61, 62, 63, 64, 67, 68,
70, 71, 73, 74, 81, 87, 88, 89,
94

transisi, 27, 31, 37, 66

Transmitivitas, 89

turbulen, 5, 10, 21, 22, 27, 30,
31, 37, 50, 66, 94

V

Viskositas, 5, 22, 23, 46, 47, 64

Perpindahan Panas

Perkembangan teknologi industri modern saat ini menuntut penguasaan sistem termal yang jauh lebih efisien, presisi, dan aman. Mulai dari sistem pendinginan komponen mikroelektronika, optimalisasi pembangkit energi, hingga perancangan alat penukar panas skala besar di industri petrokimia, seluruhnya bertumpu pada satu disiplin ilmu inti, yaitu perpindahan panas tingkat lanjut.

Buku teks "Perpindahan Panas" ini hadir di tengah-tengah kita sebagai upaya nyata untuk menyediakan referensi akademik yang kokoh, mutakhir, dan kontekstual bagi dunia pendidikan tinggi teknik di Indonesia. Sebagai kelanjutan dari jilid pertama, buku ini secara berani dan sistematis membedah berbagai fenomena termal non-linier dan kompleks, seperti konduksi tak tunak (transient), dinamika lapisan batas pada konveksi paksa maupun bebas, mekanisme perubahan fasa uap-cair, hingga perhitungan jaringan radiasi benda abu-abu.

Kelebihan utama dari buku ini terletak pada metodologi penyampaian. Penulis tidak hanya menyajikan penurunan rumus matematika yang rigid, tetapi juga berhasil menjembatani teori abstrak tersebut dengan intuisi fisis yang kuat dan aplikatif. Pendekatan analisis parameter tak berdimensi yang ditekankan di sepanjang bab konveksi akan sangat membantu mahasiswa dalam mereduksi kompleksitas variabel mekanika fluida termal menjadi solusi rekayasa yang praktis dan terukur.



CV. Tahta Media Group

Sukoharjo, Jawa Tengah

Web : www.tahtamedia.co.id

Ig : tahtamedia group

Telp/WA : +62 896 5427 3996

