

PERPINDAHAN PANAS I

Penulis:

- Sallolo Suluh
- Rianto Wibowo
- Yafid Effendi
- Frid Forghanjaya
- Haryanto



PERPINDAHAN PANAS I

**Sallolo Suluh
Rianto Wibowo
Yafid Effendi
Frid Forghanjaya
Haryanto**



GET PRESS INDONESIA

PERPINDAHAN PANAS I

Penulis :
Sallolo Suluh
Rianto Wibowo
Yafid Effendi
Frid Forghanjaya
Haryanto

ISBN: 978-634-255-673-3

Editor : Mila Sari, M.Si.

Desain Sampul dan Tata Letak : Yuli Hardina, S.Si.

PENERBIT GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id

email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku **Perpindahan Panas I** ini dapat disusun dengan baik. Buku ini disusun sebagai untuk membantu mahasiswa dan pembaca memahami konsep dasar hingga analisis lanjutan dalam bidang perpindahan panas, yang meliputi mekanisme perpindahan panas, analogi aliran panas dan jaringan tahanan termal, persamaan umum serta kondisi batas konduksi panas, analisis konduksi satu dimensi pada berbagai geometri, hingga pembangkitan panas internal dan variabel konduktivitas termal.

Penulis berupaya menyajikan materi secara sistematis, ringkas, dan mudah dipahami tanpa mengurangi kedalaman konsep ilmiah yang dibahas. Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat sebagai referensi dalam pembelajaran dan pengembangan ilmu teknik termal.

Padang, Oktober 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR GAMBAR	v
BAB I DASAR-DASAR DAN MEKANISME PERPINDAHAN PANAS.....	1
1.1 Konsep Dasar Perpindahan Panas	1
1.2 Mekanisme Perpindahan Panas	2
1.3 Sifat Termal Material	7
1.4 Aplikasi Perpindahan Panas	8
DAFTAR PUSTAKA.....	12
BAB 2 ANALOGI ALIRAN PANAS dan JARINGAN TAHANAN TERMAL.....	13
2.1 Analogi Hambatan Thermal dan Listrik.....	15
2.2 Rangkaian Hambatan Thermal Berbagai Sistem.....	19
DAFTAR PUSTAKA.....	28
BAB 3 PERSAMAAN UMUM DAN KONDISI BATAS KONDUKSI PANAS.....	29
3.1 Hukum Forier sebagai Dasar Konduksi Panas	31
3.2 Kondisi Batas pada Konduksi Panas.....	32
3.3 Kondisi Awal dalam Analisis Tak Tunak.....	41
DAFTAR PUSTAKA	44
BAB 4 ANALISIS KONDUKSI SATU DIMENSI PADA GEOMETRI TERATUR.....	45
4.1 Konduksi Panas pada Dinding Datar (<i>Plane Wall</i>)	45

4.2 Konduksi Panas pada Geometri Silinder (<i>Cylindrical System</i>).....	60
4.3 Konduksi Panas pada Geometri Bola (Spherical Sistem).....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	84
BAB 5 PEMBANGKITAN PANAS INTERNAL DAN VARIABEL KONDUKTIVITAS TERMAL	85
5.1 Mekanisme Pembangkitan Panas Internal.....	87
5.2 Penurunan Matematis pada Dinding Datar (<i>Plane Wall</i>).....	95
5.3 Sistem Radial: Silinder dan Bola.....	99
5.4 Variabel Konduktivitas Termal ($k = k(T)$).....	103
5.5 Dampak Lanjutan: Tegangan Termal	105
5.6 Perbandingan Geometri.....	107
5.7 Aplikasi Industri pembangkitan energi internal dan dinamika sifat material.....	109
DAFTAR PUSTAKA.....	131
BIODATA PENULIS.....	133

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Perbandingan Sistem Termal dan Sistem Listrik.....	50
Tabel 5. 1 Matriks Geometri Ideal.....	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Alokasi temperature untuk konduksi keadaan stedi melalui dinding datar.....	3
Gambar 1. 2	Konveksi alami pada udara	4
Gambar 1. 3	Konveksi Paksa.....	4
Gambar 1. 4	Perpindahan Panas Radiasi.....	6
Gambar 1. 5	Proses Kerja Dari System Pendingin Udara AC	9
Gambar 2. 1	Analogi Rangkaian Listrik dan Thermal.....	16
Gambar 2. 2	Hambatan Thermal Konveksi	18
Gambar 2. 3	Hambatan Thermal Konduksi Dinding Datar	20
Gambar 2. 4	Hambatan Thermal Konduksi Dinding Datar.....	21
Gambar 2. 5	Hambatan Thermal Konduksi Dinding Datar Seri.....	22
Gambar 2. 6	Rangkaian Hambatan Thermal	22
Gambar 2. 7	Hambatan Thermal Konduksi dan Konveksi Dinding Datar.....	23
Gambar 2. 8	Hambatan Thermal Konduksi dan Konveksi Sistem Silinder.....	25
Gambar 4.1	Ilustrasi distribusi temperatur linier untuk konduksi 1 dimensi pada dinding datar.....	52
Gambar 4.2	Ilustrasi Aplikasi Konsep Konduksi 1 Dimensi pada Dinding Datar.....	54
Gambar 4. 3	Ilustrasi laju perpindahan panas yang terjadi pada sebuah dinding datar	56
Gambar 4.4	Ilustrasi Gambaran mendasar Analisis 1 Dimensi pada Geometri Silinder	64
Gambar 4. 5	Ilustrasi untuk sebuah <i>Heat Exchanger</i>	67
Gambar 4.6	Ilustrasi konduksi pada silinder berongga	68
Gambar 4.7	Ilustrasi Konduksi 1 Dimensi pada Geometri Bola	77
Gambar 4. 8	Perhitungan Konduksi 1 Dimensi pada Geometri Bola	81

Gambar 5. 1 Perbandingan (a) Media Perantara Konduksi Biasa dan (b) Media dengan Sumber Pembangkit Panas Internal	85
Gambar 5. 2 Proses Pembangkitan Panas Internal secara Volumetrik	86
Gambar 5. 3 Pemanasan Ohmik	92
Gambar 5. 4 Reaksi Kimia Eksotermik	93
Gambar 5. 5 Reaksi Nuklir	94
Gambar 5. 6 Penyerapan Radiasi	94
Gambar 5. 7 Distribusi Suhu Dinding Datar	95
Gambar 5. 8 Batas Konveksi Fluida	98
Gambar 5. 9 Sistem Radial Silinder Pejal	100
Gambar 5. 10 Sistem Radial Bola Pejal	102
Gambar 5. 11 Variabel Konduktivitas Termal ($k = k(T)$)	104
Gambar 5. 12 Dampak Fatal Tegangan Termal	106

BAB I

DASAR-DASAR DAN MEKANISME PERPINDAHAN PANAS

Oleh Sallolo Suluh

Perpindahan panas (*heat transfer*) merupakan cabang ilmu teknik yang mempelajari proses perpindahan energi dalam bentuk panas akibat adanya perbedaan temperatur. Fenomena ini sangat penting dalam berbagai aplikasi teknik, seperti sistem pendingin, mesin pembakaran, penukar kalor, hingga desain bangunan hemat energi.

Panas akan selalu mengalir dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah hingga tercapai kesetimbangan termal. Proses ini tidak dapat dihentikan, tetapi dapat dikendalikan atau diperlambat melalui rekayasa teknik.

1.1 Konsep Dasar Perpindahan Panas

1.1.1 Definisi Panas dan Temperatur

Panas (*heat*) adalah energi yang berpindah karena adanya perbedaan temperatur.

Temperatur (*temperature*) adalah ukuran tingkat energi kinetik rata-rata partikel dalam suatu zat.

Satuan panas dalam SI adalah Joule (J), sedangkan temperatur dinyatakan dalam Kelvin (K) atau derajat Celsius (°C).

1.1.2 Sistem, Lingkungan, dan Batas

Dalam analisis perpindahan panas, dikenal beberapa istilah:

- a. Sistem: bagian yang menjadi objek kajian
- b. Lingkungan: segala sesuatu di luar sistem
- c. Batas sistem: permukaan yang memisahkan sistem dan lingkungan

1.1.3 Keseimbangan Termal

Keseimbangan termal terjadi ketika dua benda dengan temperatur berbeda bersentuhan dan mencapai temperatur yang sama sehingga tidak ada lagi aliran panas.

1.2 Mekanisme Perpindahan Panas

Perpindahan panas terjadi melalui tiga mekanisme utama: (Mursadin & Subagyo, 2016)

1.2.1 Konduksi (*Conduction*)

Konduksi adalah proses kalor berpindah dari suhu yang tinggi ke suhu yang rendah pada satu bentuk (padat, cair atau gas) atau antara medium - medium yang tak berbeda yang berkaitan secara langsung tanpa adanya perpindahan partikel yang cukup tinggi. Adapun persamaan dasar konduksi dpada kondisi tunak (stedi) : (Kumar *et al.*, 2022)

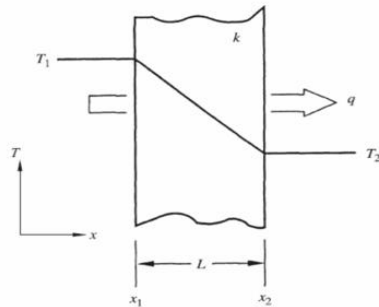
$$q_k = -kA \frac{dT}{dx}$$

Keterangan q_k = perpindahan panas konduksi (kW)

k = konduktivitas termal (W/m.°C)

dT = gradien suhu (kelvin)

dX = gradien jarak (m)



Gambar 1. 1 Alokasi temperature untuk konduksi keadaan stedi melalui dinding datar

Contoh soalnya

Sebuah batang logam panjang 2,5 m memiliki luas penampang 0,02 m². Ujung kiri bersuhu 120°C dan ujung kanan 30°C. Jika konduktivitas termal logam 200 W/m·K, berapa laju perpindahan panasnya?

Penyelesain :

Dik : $x = 2.5 \text{ m}$

$A = 0,02 \text{ m}^2$

$T_w = 120^\circ\text{C}$

$T_\infty = 30^\circ\text{C}$

$k = 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Dit : q_k?

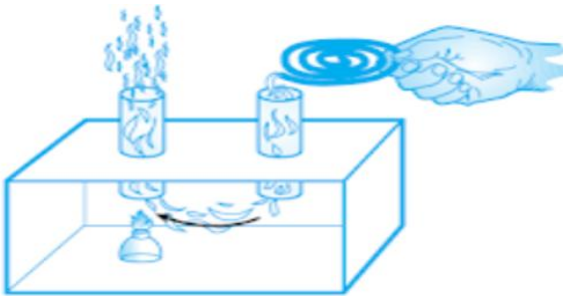
Penyelesaian.

$$\begin{aligned} q_k &= kA \frac{dT}{dX} \\ &= 200 \times 0,02 \times \left(\frac{120-30}{2.5} \right) \\ &= 144 \text{ W} \end{aligned}$$

1.2.2 Konveksi (Convection)

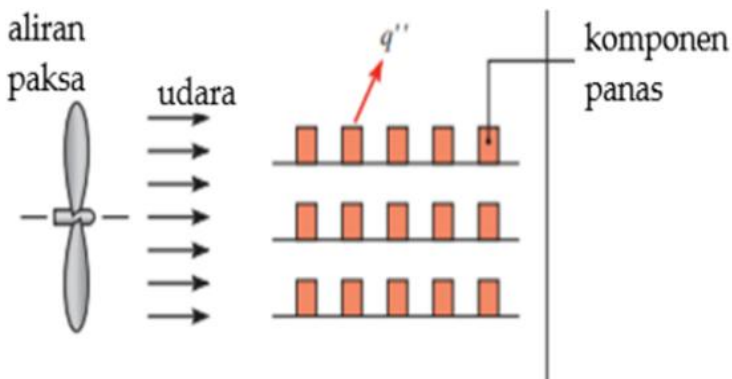
Konveksi adalah peralihan energi dengan kombinasi kerja dari konduksi panas, proses penyimpanan serta gerakannya. Klasifikasinya terbagi atas dua yaitu : (Dr. I Gede Bawa Susana, 2020)

1. Bebas atau alamiah terjadi bila kombinasi gerakannya berlangsung semata-mata karena adanya perbedaan massa jenis yang diakibatkan oleh gradien temperatur.



Gambar 1. 2 Konveksi alami pada udara

2. Paksa, terjadi karena adanya gaya luar seperti pompa dan kipas.



Gambar 1. 3 Konveksi Paksa

Adapun persamaan yang digunakan dalam perpindahan konveksi ini adalah sebagai berikut :

$$q = h \cdot A (\Delta T)$$

Dimana : q = Perpindahan konveksi (kW)

h = koefisien (

A = luas penampang (m^2)

ΔT = perbedaan temperature ($^{\circ}C$)

Contoh soal :

Diketahui daya listrik yang diberikan pada kawat yang berdiameter 1,5 mm sebesar 25 W dengan suhu tetap yang mengalir pada permukaan kawat tersebut adalah $120^{\circ}C$. Dalam hal ini koefisien konveksinya $5000 \text{ W}/m^2 \cdot ^{\circ}C$ dengan suhu air $110^{\circ}C$. Hitunglah panjang kawat yang dialiri arus listrik. Penyelesain.

Persamaan yang digunakan :

$$q = hc \times A \times (T_w - T_{\infty})$$

$$25 = 5000 \times A \times (120 - 110)$$

$$25 = 50000 A$$

$$A = \frac{25}{50000} = 0,0005 \text{ m}^2$$

Dimana : $A = \pi dL$

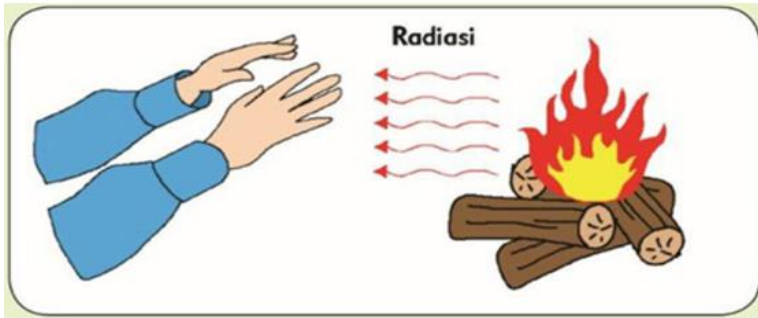
$$0,0005 = 3,14 \times 10^{-3} \times L$$

$$L = \frac{0,0005}{3,14 \times 10^{-3}}$$

$$L = 0,159 \text{ m}$$

1.2.3 Radiasi (*Radiation*)

Radiasi adalah Transfer kalor dengan menggunakan gelombang elektronmagnetik tanpa perantara seperti sinar matahari sampai ke bumi melalui ruang hampa.



Gambar 1. 4 Perpindahan Panas Radiasi

Radiator sempurna atau benda hitam (black body) memancarkan energi radiasi dari permukaannya laju q_r yang diberikan oleh :

$$q_r = \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4$$

Keterangan : σ = tetapan boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^2$)

Bila semua energi radiasi yang datang pada, maka persamaan lainnya seperti :

$$q_r = \sigma \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Jika suhu yang sama dengan benda hitam memancarkan sebagian yang konstan dari pancaran benda hitam panjang gelombang yaitu :

$$q_r = \sigma \cdot A_1 \cdot \epsilon_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Contoh soal :

Sebuah benda bersuhu 700 K berada di lingkungan bersuhu 350 K. Jika emisivitasnya 0,8 dan luas 2 m^2 , hitung kalor bersih yang dipancarkan.

Penyelesaian

$$\begin{aligned} q_r &= 5,67 \times 10^{-8} \times 2 \times 0,8 \times (700^4 - 350^4) \\ &= 9,1 \times 10^{-9} \times (2,4 \times 10^{11} - 1,5 \times 10^{11}) \\ &= 20,42 \text{ kW} \end{aligned}$$

1.3 Sifat Termal Material

Definisinya adalah ciri atau respon Sifat termal adalah karakteristik atau respon suatu bahan terhadap paparan panas atau perubahan suhu. Saat bahan menyerap energi panas, sifat termal menentukan bagaimana bahan tersebut berubah suhu, dimensi (ukuran), atau wujudnya.

Berikutnya ini ada beberapa sifat material yang mempengaruhi perpindahan panas :

1. Kapasitas/Kalor Spesifik (c_p) adalah kemampuan untuk menyerap panas dari lingkungan. Kapasitas panas spesifik menentukan seberapa besar energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu bahan dalam jumlah tertentu seperti air memiliki kapasitas panas yang tinggi.
2. Expansi termal (pemuai) adalah perubahan dimensi (volume atau panjang) bahan akibat tingginya temperatur, contohnya sambungan rel kereta api diberikan celah agar tidak melengkung saat memuai
3. Konduktivitas termal (k): kemampuan bahan mentransferkan panas. Adapun aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari seperti : (Muhammad Azwar Annas, 2023)
 - ✓ Pendingin Komponen (Heat Sink): Aluminium dan tembaga digunakan pada prosesor

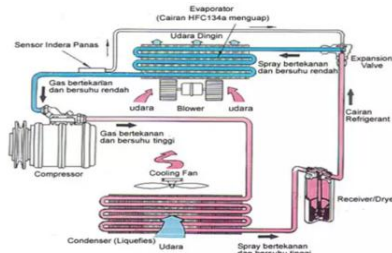
komputer atau thermal paste untuk memindahkan panas keluar dengan cepat.

- ✓ Isolasi Bangunan/Industri: Bahan seperti styrofoam, wol kaca, atau kayu digunakan untuk mencegah panas masuk atau keluar ruangan.
 - ✓ Alat Masak: Panci logam (konduktor) mempercepat pemanasan, sementara gagang kayu/plastik (isolator) mencegah tangan terbakar.
4. Difusivitas termal (α): kecepatan penyebaran panas dalam material. Rasionya adalah konduktivitas termal berbanding dengan kalor spesifik.
 5. Kalor laten transisi fase adalah energi yang diserap atau dilepaskan oleh bahan saat berubah wujud (misalnya cair ke gas) tanpa adanya perubahan suhu selama proses perubahan wujud tersebut berlangsung.

1.4 Aplikasi Perpindahan Panas

Perpindahan panas memiliki banyak aplikasi dalam kehidupan sehari-hari dan industri, seperti:

1. Sistem pendingin udara (AC) adalah rangkaian komponen yang berfungsi mengatur suhu, kelembapan, dan kebersihan udara dengan menyerap panas dari dalam ruangan dan melepaskannya ke luar menggunakan refrigeran. Siklus utamanya melibatkan kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi untuk memindahkan panas secara terus-menerus. Proses kerjanya dapat dilihat dibawah ini



Gambar 1. 5 Proses Kerja Dari System Pendingin Udara AC

2. Mesin kendaraan yang menggunakan aplikasi perpindahan panas bertujuan untuk menjaga suhu kerja optimal, meningkatkan efisiensi, dan menangani limbah energi panas. Ada beberapa komponen utama diantara : eberapa contoh utama meliputi:
 - ✓ Radiator: Alat penukar kalor utama pada kendaraan bermotor yang berfungsi membuang panas dari cairan pendingin mesin ke udara luar.
 - ✓ Intercooler: Penukar panas yang digunakan untuk mendinginkan udara setelah dikompresi oleh turbocharger atau supercharger sebelum masuk ke ruang bakar.
 - ✓ Oil Cooler (Pendingin Oli): Sistem yang menurunkan suhu oli mesin atau transmisi agar pelumasan tetap efektif.
 - ✓ Kondensor AC: Bagian dari sistem tata udara kendaraan yang melepaskan panas dari refrigeran ke lingkungan.
 - ✓ Thermoelectric Generator (TEG): Teknologi yang mulai diterapkan untuk mengonversi panas

terbuang dari gas buang (exhaust) mesin menjadi energi listrik.

- ✓ Sistem Manajemen Termal Baterai (Kendaraan Listrik): Aplikasi perpindahan panas untuk memastikan baterai bekerja pada rentang suhu yang aman.
 - ✓ Exhaust Gas Recirculation (EGR) Cooler: Alat yang mendinginkan gas buang sebelum disirkulasikan kembali ke mesin untuk mengurangi emisi NO
3. Penukar kalor (heat exchanger adalah suatu alat yang memungkinkan perpindahan panas berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai uap lewat panas (super heated steam) dan air biasa sebagai air pendingin (cooling water). Penukar panas dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung begitu saja.
 4. Isolasi termal pada bangunan adalah penerapan material dengan konduktivitas termal rendah untuk mengurangi perpindahan panas antara dalam dan luar ruangan. Ini menjaga suhu stabil, meningkatkan kenyamanan, dan menghemat energi (listrik) dengan menghambat masuknya panas matahari.
 5. Proses industri kimia Proses industri kimia sangat bergantung pada perpindahan panas untuk pemanasan, pendinginan, dan kontrol suhu, menggunakan mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi. Aplikasi utamanya mencakup heat exchanger

(penukar panas), evaporator, reaktor, dan distilasi untuk memindahkan energi panas dari fluida ke fluida lain secara efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Dr. I Gede Bawa Susana, I. B. A. (2020). *Perpindahan Panas Konveksi*.
- Kumar, S., Kumar, S., & Siddh, M. M. (2022). *A REVIEW ON THE PROPERTIES AND COMPOSITE MATERIALS FOR BRAKE PAD Abstract: 9(4), 2348–2350.*
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/3/032103>
- Muhammad Azwar Annas, U. C. *et al.* (2023). Pengukuran Konduktivitas Termal Pada Bahan Kayu, Kapur, Dan Besi. *Jurnal Pendidikan Dan Sains*, 3(4), 728–736.
- Mursadin, A., & Subagyo, R. (2016). Perpindahan Panas I HMKK 453. *Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat*, 1–51.

BAB 2

ANALOGI ALIRAN PANAS dan JARINGAN TAHANAN TERMAL

Oleh Rianto Wibowo

Perpindahan kalor merupakan salah satu fenomena fundamental dalam bidang teknik mesin dan energi yang berperan penting dalam berbagai aplikasi, seperti sistem pendingin, pembangkit energi, proses manufaktur, hingga teknologi energi terbarukan. Mekanisme perpindahan kalor yang meliputi konduksi, konveksi, dan radiasi sering kali melibatkan persamaan matematis yang kompleks serta interaksi multi-parameter yang tidak mudah dipahami secara intuitif, khususnya bagi mahasiswa pada tahap awal pembelajaran. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan konseptual yang mampu menyederhanakan pemahaman tanpa menghilangkan esensi fisiknya (Çengel & Ghajar, 2020).

Salah satu pendekatan yang terbukti efektif adalah penggunaan analogi antara perpindahan kalor dan aliran listrik. Analogi ini didasarkan pada kemiripan bentuk matematis antara hukum-hukum dasar dalam perpindahan panas dan rangkaian listrik, seperti kesetaraan antara Hukum Fourier dan Hukum Ohm. Dalam konteks ini, laju

perpindahan kalor dianalogikan sebagai arus listrik, beda temperatur sebagai beda potensial (tegangan), dan hambatan termal sebagai resistansi listrik. Pendekatan ini memungkinkan sistem perpindahan kalor direpresentasikan dalam bentuk jaringan tahanan termal (*thermal resistance network*) yang serupa dengan rangkaian listrik (Incropera *et al.*, 2017).

Keunggulan utama dari pendekatan analogi ini terletak pada kemampuannya dalam menyederhanakan analisis sistem yang kompleks menjadi model yang lebih intuitif dan mudah divisualisasikan. Dengan menggunakan konsep rangkaian seri dan paralel pada tahanan termal, analisis distribusi temperatur dan laju perpindahan kalor dapat dilakukan dengan metode yang relatif sederhana. Selain itu, pendekatan ini juga sangat membantu dalam memahami interaksi antar lapisan material, sistem berlapis (*multilayer*), serta kombinasi berbagai mekanisme perpindahan kalor dalam satu sistem (Holman, 2010).

Analogi aliran listrik dapat diterapkan secara luas pada berbagai jenis perpindahan kalor, terutama pada kondisi tunak (*steady-state*). Pada perpindahan kalor secara konduksi satu dimensi, analogi ini sangat kuat dan langsung dapat digunakan untuk menyusun model tahanan termal. Dalam kasus konveksi, konsep hambatan termal juga dapat diterapkan dengan memperkenalkan koefisien perpindahan panas sebagai parameter yang setara dengan konduktivitas efektif. Sementara itu, untuk radiasi, meskipun sifatnya non-linear, pendekatan analogi masih dapat digunakan dengan melakukan linearisasi pada kondisi tertentu, seperti pada perbedaan temperatur yang tidak terlalu besar (Incropera *et al.*, 2017).

Namun demikian, penerapan analogi ini memiliki keterbatasan. Analogi aliran listrik kurang tepat digunakan pada kondisi perpindahan kalor tak tunak (*transient*), terutama jika melibatkan perubahan sifat termofisik material terhadap temperatur atau adanya efek penyimpanan energi (kapasitansi termal). Dalam kasus tersebut, diperlukan pendekatan lanjutan seperti analogi dengan rangkaian listrik yang melibatkan elemen kapasitif (*thermal capacitance*), sehingga membentuk model yang lebih kompleks menyerupai rangkaian RC dalam sistem listrik (Çengel & Ghajar, 2020).

Dengan demikian, penggunaan analogi antara perpindahan kalor dan aliran listrik tidak hanya memberikan kemudahan dalam analisis matematis, tetapi juga meningkatkan pemahaman konseptual terhadap fenomena perpindahan panas. Pendekatan ini menjadi salah satu fondasi penting dalam pembelajaran perpindahan panas tingkat dasar hingga lanjut, serta sangat relevan dalam analisis dan perancangan sistem teknik modern.

2.1 Analogi Hambatan Thermal dan Listrik

Pemahaman konsep perpindahan panas, khususnya pada kondisi tunak (*steady-state*), dapat dipermudah melalui pendekatan analogi dengan sistem kelistrikan. Analogi ini didasarkan pada kesamaan bentuk matematis antara persamaan perpindahan panas dan hukum dasar dalam rangkaian listrik, terutama Hukum Ohm. Dalam pendekatan ini, laju perpindahan kalor dianalogikan sebagai arus listrik, perbedaan temperatur sebagai beda potensial (tegangan),

dan hambatan termal sebagai resistansi listrik (Incropera *et al.*, 2017).

Secara umum, hubungan analogi tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

- Laju perpindahan panas (q) $\leftrightarrow$ Arus listrik (I)
- Perbedaan temperatur (ΔT) $\leftrightarrow$ Tegangan (V)
- Hambatan termal (R_{th}) $\leftrightarrow$ Hambatan listrik (R)

Sehingga secara matematis dapat dituliskan dalam bentuk analogi:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{th}} \leftrightarrow I = \frac{V}{R}$$



Gambar 2. 1 Analogi Rangkaian Listrik dan Thermal
(Sumber : Cengel,2020)

Pendekatan ini memungkinkan sistem perpindahan panas dianalisis menggunakan konsep rangkaian seri dan paralel, sebagaimana pada rangkaian listrik.

2.1.1 Hambatan Termal pada Konduksi

Pada perpindahan panas secara konduksi, hambatan termal diturunkan dari Hukum Fourier. Berdasarkan uraian dalam book chapter yang Anda unggah, hambatan termal untuk dinding planar dinyatakan sebagai:

$$R_{th} = \frac{L}{k \cdot A}$$

di mana:

- (L) = ketebalan material
- (k) = konduktivitas termal

- c. (A) = luas penampang

Persamaan ini menunjukkan bahwa hambatan termal berbanding lurus dengan ketebalan dan berbanding terbalik dengan konduktivitas serta luas area. Semakin besar nilai R_{th} , maka semakin kecil laju perpindahan panas yang terjadi.

Dengan mensubstitusikan ke dalam bentuk analogi, diperoleh:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

yang identik dengan persamaan arus listrik dalam hukum Ohm. Analogi ini sangat kuat untuk kasus konduksi satu dimensi pada kondisi tunak tanpa pembangkitan panas, sebagaimana dijelaskan dalam sistem dinding planar dan silinder pada referensi buku tersebut

2.1.2 Hambatan Termal pada Konveksi

Pada perpindahan panas secara konveksi, mekanisme perpindahan melibatkan interaksi antara permukaan padat dan fluida yang bergerak. Berdasarkan hukum pendinginan Newton, laju perpindahan panas dinyatakan sebagai:

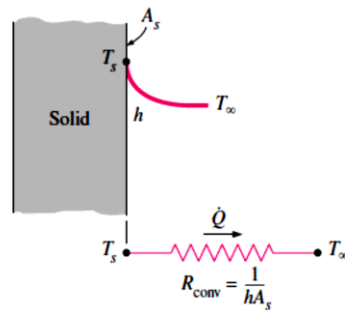
$$q = h A (T_s - T_\infty)$$

Sehingga hambatan termalnya dapat dituliskan sebagai:

$$R_{th} = \frac{1}{h \cdot A}$$

di mana:

(h) = koefisien perpindahan panas konveksi



Gambar 2. 2 Hambatan Thermal Konveksi
(sumber : Cengel,2020)

Dalam analogi listrik, hambatan konveksi ini setara dengan resistor yang terhubung seri dengan hambatan konduksi, sehingga total hambatan termal dapat dinyatakan sebagai:

$$R_{total} = R_{konduksi} + R_{konveksi}$$

Pendekatan ini sangat berguna dalam analisis sistem multilayer seperti dinding komposit atau heat exchanger.

2.1.3 Hambatan Termal pada Radiasi

Perpindahan panas radiasi memiliki karakteristik non-linear karena bergantung pada pangkat empat temperatur absolut (hukum Stefan-Boltzmann). Secara umum dinyatakan sebagai:

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A (T_1^4 - T_2^4)$$

Namun, untuk keperluan analisis analogi listrik, persamaan ini sering dilinearisasi dengan memperkenalkan koefisien perpindahan panas radiasi ekuivalen (h_r), sehingga diperoleh bentuk:

$$q = h_r \cdot A (T_1^4 - T_2^4)$$

Dengan demikian, hambatan termal radiasi dapat dituliskan sebagai:

$$R_{th} = \frac{1}{h_r \cdot A}$$

Pendekatan ini memungkinkan radiasi dimasukkan ke dalam jaringan tahanan termal bersama konduksi dan konveksi, meskipun dengan batasan tertentu (Nurmalasari dkk., 2022).

2.1.4 Jaringan Hambatan Termal (Thermal Resistance Network)

Dalam sistem nyata, perpindahan panas sering melibatkan kombinasi beberapa mekanisme sekaligus. Dengan menggunakan analogi listrik, seluruh sistem dapat direpresentasikan sebagai jaringan hambatan termal yang terdiri dari:

- a. Hambatan seri → untuk lapisan berurutan
- b. Hambatan paralel → untuk jalur perpindahan panas simultan

Sebagai contoh pada sistem dinding komposit, total hambatan termal dinyatakan sebagai penjumlahan seluruh hambatan individu:

$$R_{total} = \sum R_{th}$$

dan laju perpindahan panas menjadi:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}}$$

2.2 Rangkaian Hambatan Thermal Berbagai Sistem

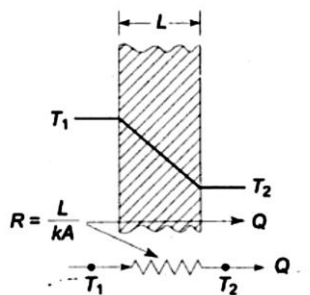
Pendekatan analogi antara perpindahan kalor dan rangkaian listrik memungkinkan sistem termal direpresentasikan sebagai jaringan hambatan (thermal

resistance network). Dalam pendekatan ini, laju perpindahan panas dianalogikan sebagai arus listrik dan beda temperatur sebagai tegangan sesuai prinsip Hukum Ohm (Milss., 1999).

2.2.1 Konduksi Pada Sistem Dinding Rata

Pada sistem dinding rata tunggal dengan kondisi tunak dan aliran panas satu dimensi, hambatan termal hanya berasal dari konduksi.

Model ini identik dengan satu resistor dalam rangkaian listrik sederhana. Semakin besar ketebalan material, semakin besar hambatan termalnya, sehingga laju perpindahan panas semakin kecil.



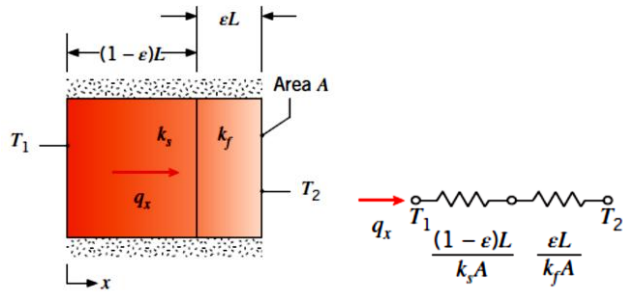
Gambar 2.3 Hambatan Thermal Konduksi Dinding Datar
(sumber : JP Holman, 2010)

Penyelesaian persoalan diatas, untuk mendapatkan besarnya nilai laju aliran kalor (Q) adalah :

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k.A}}$$

Pada berbagai aplikasi perpindahan kalor konduksi 1 dimensi, kadang ditemui rangkaian material atau bahan yang akan dilewati oleh kalor, sehingga jika dianalogikan

dengan rangkaian hambatan seperti aliran arus listrik yang melewati rangkaian seri hambatan listrik.



Gambar 2. 4 Hambatan Thermal Konduksi Dinding Datar
(sumber : Incropera, 2017)

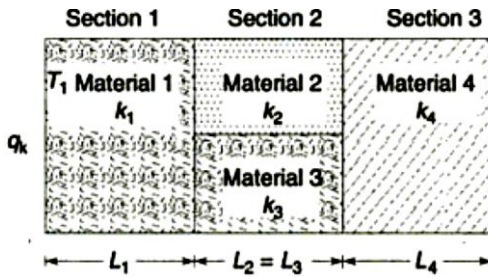
Penyelesaian rangkaian diatas membutuhkan nilai hambatan thermal total dari rangkaian yaitu :

$$R_{total} = \frac{(1-\epsilon)L}{K_s A} + \frac{\epsilon L}{K_f A}$$

Selanjutnya besarnya nilai laju perpindahan kalor pada sistem dinding rata rangkaian seri hambatan thermal adalah:

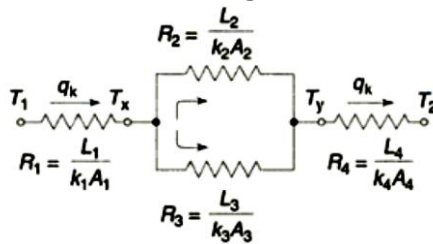
$$q_x = \frac{T_1 - T_2}{R_{total}}$$

Selain material yang tersusun secara seri, adakalanya juga akan didapatkan konstruksi material yang berbeda jenis dengan susunan parallel atau gabungan seri dan parallel (komposit)



Gambar 2. 5 Hambatan Thermal Konduksi Dinding Datar Seri
(sumber : JP Holman,2010)

Pada gambar material diatas, dapat digambarkan rangkaian hambatan thermal dengan analogi penggambaran rangkaian hambatan listrik sebagai berikut :



Gambar 2. 6 Rangkaian Hambatan Thermal

Berdasarkan gambar rangkaian hambatan thermal diatas, dapat dihitung nilai hambatan thermal total dan laju aliran kalor dengan analogi penyelesaian hambatan listrik sebagai berikut :

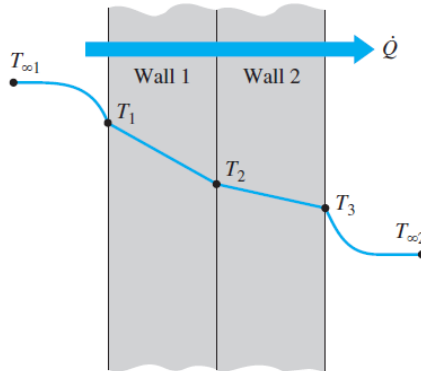
$$R_{\text{total}} = \frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2 + k_3 A_3} + \frac{L_4}{k_4 A_4}$$

Selanjutnya nilai besarnya laju perpindahan kalornya adalah :

$$q_x = \frac{T_1 - T_2}{R_{total}}$$

2.2.2 Konduksi dan Konveksi Pada Sistem Dinding Rata

Pada beberapa aplikasi perpindahan panas, pada dinding rata tidak hanya berupa perpindahan kalor secara konduksi namun merupakan gabungan antara perpindahan kalor konduksi dan konveksi. Fluida pada sisi dalam dan sisi luar dinding rata akan mengalami perpindahan panas secara konveksi, seperti terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hambatan Thermal Konduksi dan Konveksi Dinding Datar

(sumber : Cengel, 2020)

Berdasarkan gambar 2.7 diatas, maka rangkaian hambatan thermal untuk penyelesaian laju perpindahan panas sebagai berikut :

$$R_{total} = R_{konveksi_1} + R_{konduksi_1} + R_{konduksi_2} + R_{konveksi_2}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A}$$

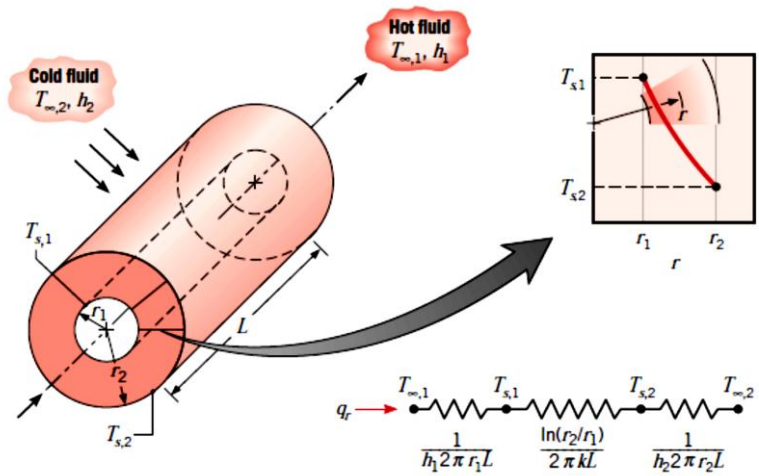
Selanjutnya untuk mendapatkan besarnya laju aliran panas yang mengalir dari $T_{\infty 1}$ hingga $T_{\infty 2}$ didapatkan dengan persamaan :

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}}$$

2.2.3 Konduksi dan Konveksi Pada Sistem Silinder

Aplikasi teknik pada aliran fluida umumnya adalah fluida yang mengalir pada saluran tertutup atau pipa dengan bentuk silinder. Fluida yang mengalir dalam pipa akan mengalirkan panas pada dinding pipa dengan arah radial, jika temperatur fluida lebih tinggi dari temperatur lingkungan. Sebaliknya, jika temperatur fluida lebih rendah maka aliran panas dari luar menuju ke pusat fluida secara radial juga.

Bentuk aliran panas pada sistem silinder terlihat seperti pada gambar 2.8 berikut :



Gambar 2.8 Hambatan Thermal Konduksi dan Konveksi Sistem Silinder
(*sumber : Incropera, 2017*)

Pada gambar 2.8 terlihat laju aliran panas ($\dot{Q}$) dari fluida di dalam silinder menuju fluida di lingkungan. Proses perpindahan panasnya berupa gabungan antara konveksi dan konduksi. Konveksi pertama terjadi antara $T_{\infty 1}$ ke T_1 , selanjutnya perpindahan panas secara konduksi dari T_1 ke T_2 . Tahap akhir berupa perpindahan panas secara konveksi dari T_2 ke $T_{\infty 2}$.

Nilai hambatan total berdasar rangkaian hambatan thermal sistem silinder ini adalah :

$$R_{total} = R_{konveksi_1} + R_{konduksi} + R_{konveksi_2}$$

$$R_{total} = \frac{1}{2\pi \cdot r_1 L \cdot h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot L \cdot k} + \frac{1}{2\pi \cdot r_2 L \cdot h_2}$$

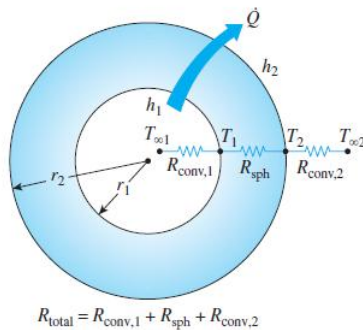
Selanjutnya untuk besarnya nilai laju perpindahan panas ($\dot{Q}$) didapatkan dengan persamaan :

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}}$$

2.2.4 Konduksi dan Konveksi Pada Sistem Bola

Sistem lain yang sering menggunakan aplikasi perpindahan panas adalah sistem bola. Pada bola berongga terdapat fluida yang temperaturnya berbeda dengan temperatur lingkungan, sehingga terjadi perpindahan panas dari dalam bola ke lingkungan, atau sebaliknya.

Seperti halnya pada sistem silinder, pada sistem bola terjadi gabungan perpindahan panas, yaitu secara konveksi dan konduksi. Pada gambar 2.7 terlihat perpindahan panas pada sistem bola.



Gambar 2. 9

Hambatan Thermal Konduksi dan Konveksi Sistem Bola
(sumber : Cengel,2020)

Pada gambar 2.9 terlihat laju aliran panas ($\dot{Q}$) dari fluida di dalam bola menuju fluida di lingkungan. Proses perpindahan panasnya berupa gabungan antara konveksi dan konduksi. Konveksi pertama terjadi antara $T_{\infty 1}$ ke T_1 , selanjutnya perpindahan panas secara konduksi dari T_1 ke T_2 . Tahap akhir berupa perpindahan panas secara konveksi dari T_2 ke $T_{\infty 2}$.

Nilai hambatan total berdasar rangkaian hambatan thermal sistem silinder ini adalah :

$$R_{total} = R_{konveksi_1} + R_{konduksi} + R_{konveksi_2}$$

$$R_{total} = \frac{1}{4\pi \cdot r_1^2 \cdot h_1} + \frac{r_2 - r_1}{4\pi \cdot r_1 r_2 \cdot k} + \frac{1}{4\pi \cdot r_2^2 \cdot h_2}$$

Selanjutnya untuk besarnya nilai laju perpindahan panas ($\dot{Q}$) pada sistem bola didapatkan dengan persamaan :

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}}$$

DAFTAR PUSTAKA

- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Holman, J. P. (2010). *Heat transfer* (10th ed.). McGraw-Hill.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). Wiley.
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2011). *Principles of heat transfer* (7th ed.). Cengage Learning.
- Mills, A. F. (1999). *Heat transfer* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Nurmalasari, Rianto dkk. (2022). *Perpindahan Kalor dan Massa*. PT Global Eksekutif Teknologi : Padang.

BAB 3

PERSAMAAN UMUM DAN KONDISI BATAS KONDUKSI PANAS

Oleh Yafid Effendi

Perpindahan panas merupakan fenomena penting dalam berbagai bidang teknik dan sains. Salah satu mekanisme utama perpindahan panas adalah konduksi, yaitu proses perpindahan energi panas melalui suatu medium akibat adanya perbedaan temperatur tanpa disertai perpindahan massa secara makroskopik. Konduksi panas umumnya terjadi pada material padat seperti logam, dinding bangunan, dan komponen mesin. Pemahaman mengenai mekanisme ini sangat penting dalam perancangan sistem termal yang efisien dan aman (Çengel dan Ghajar, 2020).

Secara teoritis, proses konduksi panas dijelaskan oleh hukum Fourier yang menyatakan bahwa laju perpindahan panas sebanding dengan gradien temperatur dan konduktivitas termal material. Berdasarkan hukum tersebut, dapat diturunkan persamaan diferensial yang menggambarkan distribusi temperatur dalam suatu medium. Persamaan ini dikenal sebagai persamaan umum konduksi panas yang menjadi dasar dalam analisis

perpindahan panas pada berbagai sistem teknik (Bergman *dkk.*, 2011),

Persamaan umum konduksi panas dapat dinyatakan dalam bentuk satu dimensi, dua dimensi, maupun tiga dimensi serta dapat berlaku pada kondisi tunak maupun tak tunak. Persamaan ini diperoleh dari penerapan prinsip konservasi energi pada elemen kecil dalam suatu material. Dengan menggunakan persamaan tersebut, distribusi temperatur dalam suatu sistem dapat diprediksi secara matematis sehingga membantu dalam analisis dan perancangan peralatan teknik (Holman, 2010)

Namun, penyelesaian persamaan konduksi panas tidak dapat dilakukan tanpa adanya informasi tambahan mengenai kondisi pada batas sistem. Informasi ini dikenal sebagai kondisi batas yang menggambarkan keadaan temperatur atau aliran panas pada permukaan suatu benda. Kondisi batas sangat penting karena menentukan solusi unik dari persamaan diferensial konduksi panas (Incropera *dkk.*, 2020).

Secara umum, terdapat beberapa jenis kondisi batas yang sering digunakan dalam analisis konduksi panas, yaitu kondisi batas temperatur tetap, kondisi batas fluks panas tetap, dan kondisi batas konveksi yang melibatkan interaksi antara permukaan padat dengan fluida di sekitarnya. Pemahaman mengenai persamaan umum dan kondisi batas konduksi panas sangat diperlukan dalam berbagai aplikasi teknik seperti desain sistem pendinginan, isolasi termal, serta analisis kinerja peralatan industri (Çengel dan Ghajar, 2020)

3.1 Hukum Forier sebagai Dasar Konduksi Panas

Setiap kali terdapat gradien suhu dalam medium padat, panas akan mengalir dari daerah bersuhu lebih tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah. Laju perpindahan panas melalui konduksi, q_k , berbanding lurus dengan gradien suhu dT/dx dikali luas A yang dilalui aliran panas.

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad 3.1$$

Dalam hubungan ini, $T(x)$ adalah suhu lokal dan x adalah jarak dalam arah aliran panas. Laju aliran panas sebenarnya bergantung pada konduktivitas termal k , yang merupakan sifat fisik medium. Untuk konduksi melalui medium homogen, kemudian laju perpindahan panas adalah

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad 3.2$$

Tanda minus merupakan konsekuensi dari hukum kedua termodinamika, yang mensyaratkan bahwa panas harus mengalir dari suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah (Kreith, Manglik dan Bohn, 2011).

Hukum Fourier merupakan dasar fundamental dalam analisis konduksi panas yang menyatakan bahwa laju perpindahan panas dalam suatu medium padat sebanding dengan gradien suhu dan luas penampang perpindahan panas, serta berlawanan arah dengan kenaikan suhu. Prinsip ini menunjukkan bahwa panas secara alami mengalir dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah. Hukum Fourier sangat penting karena menjadi landasan dalam pengembangan dan optimasi sistem penukar panas, terutama dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas melalui berbagai teknik rekayasa (Kakac *dkk.*, 1998)

3.2 Kondisi Batas pada Konduksi Panas

Persamaan konduksi panas di atas dikembangkan menggunakan keseimbangan energi pada elemen diferensial di dalam medium, dan persamaan tersebut tetap sama terlepas dari kondisi termal pada permukaan medium. Artinya, persamaan diferensial tidak memasukkan informasi apa pun yang terkait dengan kondisi pada permukaan seperti suhu permukaan atau fluks panas yang ditentukan. Namun kita tahu bahwa fluks panas dan distribusi suhu dalam suatu medium bergantung pada kondisi di permukaan, dan deskripsi masalah perpindahan panas dalam suatu medium tidak lengkap tanpa deskripsi lengkap tentang kondisi termal pada permukaan pembatas medium. Ekspresi matematis dari kondisi termal di batas disebut **kondisi batas**.

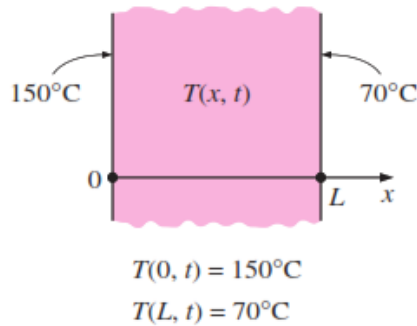
1. Kondisi batas suhu

Suhu permukaan yang terpapar biasanya dapat diukur secara langsung dan mudah. Oleh karena itu, salah satu cara termudah untuk menentukan kondisi termal pada suatu permukaan adalah dengan menentukan suhunya. Untuk perpindahan panas satu dimensi melalui dinding bidang dengan ketebalan L , misalnya, kondisi batas suhu yang ditentukan dapat dinyatakan sebagai (Gambar 3.1)

$$\begin{aligned}T(0, t) &= T_1 \\T(L, t) &= T_2\end{aligned}\tag{3.3}$$

di mana T_1 dan T_2 adalah suhu yang ditentukan pada permukaan di $x = 0$ dan $x = L$, masing-masing. Suhu yang

ditentukan dapat konstan, seperti halnya pada konduksi panas tunak, atau dapat bervariasi dengan waktu



Gambar 3.1 Kondisi batas suhu yang ditentukan pada kedua permukaan dinding bidang datar

2. Kondisi batas heat flux

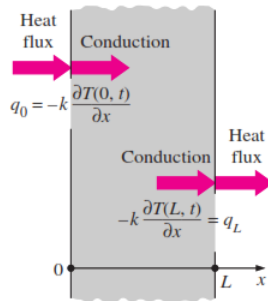
Ketika terdapat informasi yang cukup tentang interaksi energi pada suatu permukaan, mungkin dapat ditentukan laju perpindahan panas dan dengan demikian fluks panas q pada permukaan tersebut, dan informasi ini dapat digunakan sebagai salah satu kondisi batas. Fluks panas dalam arah x positif di mana saja dalam medium, termasuk batas-batasnya, dapat dinyatakan dengan hukum konduksi panas Fourier sebagai (laju perpindahan panas per satuan luas permukaan, W/m^2)

$$\dot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x} = (\text{Heat flux ke arah } x \text{ positif}) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad 3.4$$

Kemudian kondisi batas pada suatu batas diperoleh dengan menetapkan fluks panas yang ditentukan sama dengan $-k (\partial T / \partial x)$ pada batas tersebut. Tanda fluks panas yang ditentukan dengan pengamatan: positif jika fluks panas

berada di arah positif sumbu koordinat, dan negatif jika berada di arah yang berlawanan.

Perlu dicatat bahwa sangat penting untuk memiliki tanda yang benar untuk fluks panas yang ditentukan karena tanda yang salah akan membalikkan arah perpindahan panas dan menyebabkan perolehan panas diinterpretasikan sebagai kehilangan panas (Gambar 3.2).



Gambar 3.2 Kondisi batas fluks panas yang ditentukan pada kedua permukaan dinding bidang

Untuk pelat dengan ketebalan L yang dikenai fluks panas 50 W/m^2 ke dalam medium. Fluks panas yang ditentukan dari kedua sisi, misalnya, kondisi batas fluks panas yang ditentukan dapat dinyatakan sebagai

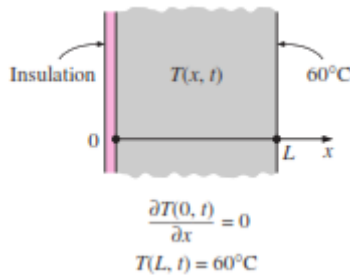
$$-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 50 \text{ dan } -k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = -50 \quad 3.5$$

Perhatikan bahwa fluks panas di permukaan pada $x = L$ berada di arah x negatif, dan dengan demikian nilainya adalah 50 W/m (Çengel dan Ghajar, 2020).

Kasus Khusus: Batas Terisolasi

Beberapa permukaan umumnya diisolasi dalam praktiknya untuk meminimalkan kehilangan panas (atau perolehan panas) melaluinya. Isolasi mengurangi perpindahan panas tetapi tidak sepenuhnya menghilangkannya kecuali

ketebalannya tak terhingga. Namun, perpindahan panas melalui permukaan yang diisolasi dengan benar dapat dianggap nol karena isolasi yang memadai mengurangi perpindahan panas melalui permukaan hingga tingkat yang dapat diabaikan. Oleh karena itu, permukaan yang diisolasi dengan baik dapat dimodelkan sebagai permukaan dengan fluks panas nol. Kemudian kondisi batas pada permukaan yang diisolasi sempurna (pada $x = 0$, misalnya) dapat dinyatakan sebagai (Gambar 3.3).



Gambar 3.3 Dinding datar dengan insulasi dan kondisi batas suhu yang ditentukan

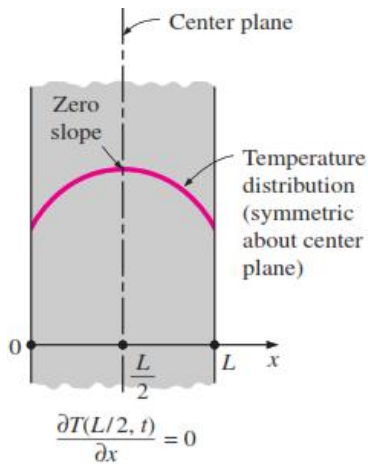
$$k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0 \text{ atau } \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0 \quad 3.6$$

Artinya, pada permukaan terisolasi, turunan pertama suhu terhadap variabel ruang (gradien suhu) dalam arah normal terhadap permukaan terisolasi adalah nol. Ini juga berarti bahwa fungsi suhu harus tegak lurus terhadap permukaan terisolasi karena kemiringan suhu pada permukaan harus nol.

Kasus Khusus Lainnya: Simetri Termal

Beberapa masalah perpindahan panas memiliki simetri termal sebagai hasil dari simetri dalam kondisi termal yang

dikenakan. Misalnya, dua permukaan pelat panas besar dengan ketebalan L yang digantung secara vertikal di udara akan dikenai kondisi termal yang sama, dan dengan demikian distribusi suhu di satu bagian pelat akan sama dengan di bagian lainnya. Artinya, masalah perpindahan panas pada pelat ini akan memiliki simetri termal terhadap bidang tengah di $x = L/2$. Selain itu, arah aliran panas di setiap titik pada pelat akan menuju ke permukaan yang lebih dekat ke titik tersebut, dan tidak akan ada aliran panas melintasi bidang tengah. Oleh karena itu, bidang tengah dapat dipandang sebagai permukaan terisolasi, dan kondisi termal pada bidang simetri ini dapat dinyatakan sebagai (Gambar 2-31)



Gambar 3.4 Kondisi batas simetri termal pada bidang tengah dinding bidang.

$$\frac{\partial T(L/2, t)}{\partial x} = 0 \quad 3.7$$

yang menyerupai kondisi batas isolasi atau fluks panas nol. Hasil ini juga dapat disimpulkan dari plot distribusi suhu

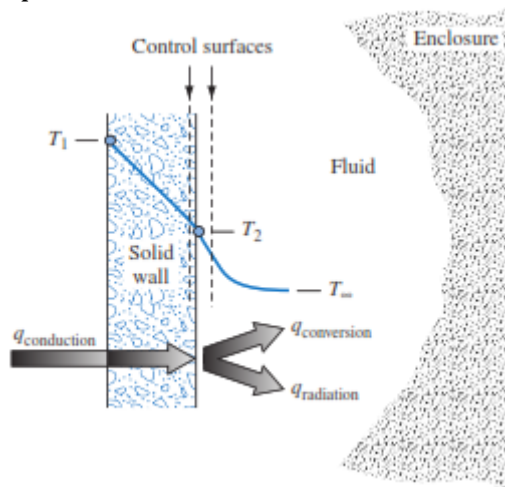
dengan nilai maksimum, dan dengan demikian kemiringan nol, pada bidang tengah.

Dalam kasus benda silindris (atau bulat) yang memiliki simetri termal

terhadap garis tengah (atau titik tengah), kondisi batas simetri termal

mensyaratkan bahwa turunan pertama suhu terhadap r (variabel radial) bernilai nol pada garis tengah (atau titik tengah).

Ada banyak situasi di mana persyaratan konservasi energi diterapkan pada permukaan suatu sistem. Dalam kasus ini, permukaan kontrol tidak mengandung massa dan volume yang dicakupnya mendekati nol, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Penerapan hukum konservasi energi pada permukaan suatu sistem

Akibatnya, tidak mungkin ada penyimpanan atau pembangkitan energi, dan persyaratan konservasi berkurang menjadi

$$q_{net} = q_{in} - q_{out} = 0 \quad 3.8$$

Penting untuk dicatat bahwa dalam bentuk ini hukum konservasi berlaku untuk kondisi tunak maupun transien dan bahwa aliran masuk dan keluar panas dapat terjadi melalui beberapa mekanisme perpindahan panas secara paralel.

1. Bacalah soal dengan saksama dan tanyakan pada diri sendiri dengan kata-kata Anda sendiri apa yang diketahui tentang sistem tersebut, informasi apa yang dapat diperoleh dari sumber-sumber seperti tabel sifat-sifat, buku pegangan, atau lampiran, dan apa saja yang tidak diketahui yang jawabannya harus ditemukan.
2. Gambarlah diagram skematik sistem tersebut, termasuk batas-batas yang akan digunakan dalam penerapan hukum konservasi. Identifikasi proses perpindahan panas yang relevan, dan gambarlah rangkaian termal untuk sistem tersebut.
3. Nyatakan semua asumsi penyederhanaan yang menurut Anda sesuai untuk solusi masalah tersebut, dan tandai asumsi yang perlu diverifikasi setelah jawaban diperoleh. Perhatikan secara khusus apakah sistem tersebut berada dalam keadaan tunak atau tidak tunak. Selain itu, kumpulkan sifat-sifat fisik yang diperlukan untuk menganalisis sistem dan sebutkan sumber-sumber dari mana sifat-sifat tersebut diperoleh.

4. Analisis masalah dengan menggunakan hukum konservasi dan persamaan laju yang sesuai, dengan menggunakan, sedapat mungkin, wawasan tentang proses dan intuisi. Saat Anda mengembangkan lebih banyak wawasan, rujuk kembali ke rangkaian termal dan modifikasi, jika perlu. Lakukan perhitungan numerik secara bertahap sehingga Anda dapat dengan mudah memeriksa hasil Anda dengan analisis orde besaran.
5. Berikan komentar tentang hasil yang telah Anda peroleh dan diskusikan poin-poin yang dipertanyakan, khususnya yang berkaitan dengan asumsi awal. Kemudian rangkum kesimpulan utama di akhir (Kreith, Manglik dan Bohn, 2011).

Menurut Rohsenow dkk., 1998, dalam analisis konduksi panas, **kondisi batas** merupakan elemen penting yang digunakan untuk melengkapi persamaan diferensial energi sehingga solusi distribusi suhu dapat ditentukan secara unik. Kondisi batas menggambarkan interaksi termal antara suatu sistem dengan lingkungannya, baik berupa penetapan suhu, aliran panas, maupun mekanisme perpindahan panas lainnya pada permukaan batas. Menurut Warren M. Rohsenow dalam *Handbook of Heat Transfer*, pemilihan kondisi batas yang tepat sangat penting karena secara langsung memengaruhi hasil analisis temperatur dalam suatu sistem. Salah satu bentuk kondisi batas yang paling umum adalah **kondisi suhu tertentu (prescribed temperature)**, di mana suhu pada suatu permukaan ditentukan atau dijaga konstan. Kondisi ini sering

dijumpai pada permukaan yang bersentuhan dengan reservoir panas besar atau fluida dengan suhu tetap. Dalam pendekatan ini, nilai suhu pada batas menjadi parameter yang diketahui dan digunakan untuk menyelesaikan persamaan konduksi panas.

Selain itu, terdapat **kondisi batas fluks panas tertentu (prescribed heat flux)**, di mana laju perpindahan panas per satuan luas pada permukaan diketahui. Kondisi ini sering digunakan pada sistem yang menerima atau melepaskan panas dengan laju tertentu, seperti permukaan yang dipanaskan oleh elemen listrik. Dalam formulasi matematis, kondisi ini dinyatakan melalui gradien suhu yang berbanding lurus dengan fluks panas pada permukaan. Jenis kondisi batas lainnya adalah **kondisi batas konveksi**, yang melibatkan perpindahan panas antara permukaan padat dan fluida di sekitarnya. Pada kondisi ini, laju perpindahan panas bergantung pada perbedaan suhu antara permukaan dan fluida serta koefisien perpindahan panas konveksi. Kondisi ini banyak dijumpai dalam aplikasi teknik, seperti pendinginan komponen mesin oleh udara atau cairan.

Selain ketiga kondisi utama tersebut, terdapat pula **kondisi batas adiabatik atau simetri**, yaitu kondisi di mana tidak terjadi perpindahan panas melalui suatu permukaan. Hal ini berarti gradien suhu pada arah normal permukaan sama dengan nol. Kondisi ini sering digunakan pada bidang simetri atau pada permukaan yang terisolasi secara termal, sehingga tidak ada energi panas yang melintasinya. Secara keseluruhan, kondisi batas memiliki peranan yang sangat penting dalam

analisis konduksi panas karena menentukan bentuk solusi distribusi suhu dalam suatu sistem. Kesalahan dalam menetapkan kondisi batas dapat menghasilkan prediksi yang tidak akurat terhadap perilaku termal sistem. Oleh karena itu, sebagaimana dijelaskan dalam *Handbook of Heat Transfer*, penentuan kondisi batas harus didasarkan pada pemahaman yang baik terhadap fenomena fisik yang terjadi serta kondisi nyata di lapangan.

3.3 Kondisi Awal dalam Analisis Tak Tunak

Dalam kajian perpindahan panas tak tunak (transien), kondisi awal merupakan aspek krusial yang harus ditetapkan selain persamaan diferensial dan kondisi batas. Kondisi awal merepresentasikan distribusi temperatur suatu sistem pada saat awal pengamatan ($t = 0$), sebelum terjadi perubahan suhu akibat proses perpindahan panas. Tanpa penentuan kondisi awal yang tepat, solusi matematis dari persamaan energi tidak akan bersifat unik dan tidak mampu menggambarkan kondisi fisik yang sebenarnya.

Secara matematis, kondisi awal dinyatakan dalam bentuk fungsi suhu terhadap koordinat ruang pada waktu awal, yaitu $T(x, y, z, 0)$. Fungsi ini dapat berupa distribusi suhu yang seragam maupun tidak seragam, bergantung pada keadaan sistem sebelum proses berlangsung. Penetapan fungsi ini sangat penting karena menjadi dasar dalam memprediksi perubahan distribusi suhu terhadap waktu dalam sistem yang dianalisis.

Dalam banyak permasalahan teknik, sering diasumsikan kondisi awal seragam, di mana seluruh bagian benda memiliki suhu awal yang identik. Kondisi ini umumnya terjadi ketika sistem telah mencapai kesetimbangan termal sebelum mengalami gangguan, seperti proses pemanasan atau pendinginan secara tiba-tiba. Asumsi ini mempermudah proses analisis karena tidak melibatkan variasi suhu terhadap posisi

Namun demikian, pada kondisi nyata tertentu, distribusi suhu awal dapat bersifat tidak seragam. Hal ini biasanya terjadi pada material yang sebelumnya mengalami pemanasan yang tidak merata, seperti pada proses manufaktur atau sistem dengan kondisi termal kompleks. Dalam kasus seperti ini, distribusi suhu awal perlu ditentukan berdasarkan data eksperimen atau hasil simulasi sebelumnya agar hasil analisis tetap valid.

Kondisi awal memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap respons suhu pada tahap awal proses transien. Pada periode awal, distribusi suhu sangat dipengaruhi oleh kondisi awal yang ditentukan. Akan tetapi, seiring berjalannya waktu, pengaruh tersebut akan semakin berkurang dan sistem akan cenderung menuju kondisi tunak apabila kondisi batas tidak berubah (Incropera *dkk.*, 2006).

Menurut Lienhard *dkk.*, 2019, untuk menganalisis perpindahan panas tak tunak (transien), **kondisi awal** merupakan aspek fundamental yang mendeskripsikan distribusi suhu suatu sistem pada waktu awal $t = 0$, sebelum terjadinya perubahan temperatur akibat proses perpindahan panas. Kondisi ini biasanya dinyatakan dalam bentuk fungsi $T(x, y, z, 0)$, yang dapat berupa distribusi suhu seragam maupun tidak seragam, tergantung pada keadaan

sistem sebelumnya. Penetapan kondisi awal yang akurat sangat penting karena secara langsung memengaruhi respons awal sistem terhadap perubahan termal dan menentukan keunikan solusi dari persamaan energi. Oleh karena itu, kondisi awal harus ditentukan berdasarkan kondisi fisik yang realistis agar hasil analisis dapat menggambarkan perilaku suhu yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bergman, L. T. *dkk.* (2011) *Heat Transfer and Mass Transfer*, John Wiley & Sons.
- Cengel, Y. A. dan Boles, M. A. (2015) *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York: McGraw-Hill Education.
- Çengel, Y. A. dan Ghajar, A. J. (2020) *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 6th ed. McGraw-Hill Education.
- Holman, J. P. (2010) *Heat Transfer*. 10th ed. New York: McGraw-Hill.
- Incropera, F. P. *dkk.* (2006) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. U.S.A.: JOHN WILEY & SONS.
- Incropera, F. P. *dkk.* (2020) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8th ed. Wiley.
- Kakac, S. *dkk.* (1998) *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchanger*. London: Kluwer Academic Publishers.
- Kreith, F., Manglik, R. M. dan Bohn, M. S. (2011) *Principles of HEAT TRANSFER*. 7th ed. Global Engineering: Christopher M. Shortt.
- Lienhard IV, J. H. dan Lienhard V, J. H. (2019) *A Heat Transfer Textbook*. 5th ed. U.S.A.: Phlogiston Press Cambridge, Massachusetts, U.S.A.
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. dan Cho, Y. I. (1998) *HANDBOOK OF HEAT TRANSFER*. 3rd ed. New York: MCGRAW-HILL.

BAB 4

ANALISIS KONDUKSI SATU DIMENSI PADA GEOMETRI TERATUR

Oleh Frid Forghanjaya

4.1 Konduksi Panas pada Dinding Datar (*Plane Wall*)

Konduksi panas pada dinding datar merupakan salah satu kasus paling fundamental dalam analisis perpindahan panas. Model ini menjadi dasar untuk memahami fenomena konduksi pada sistem yang lebih kompleks, seperti dinding berlapis, isolasi termal, hingga komponen mesin.

Pada geometri ini, perpindahan panas diasumsikan terjadi hanya dalam satu arah, yaitu sepanjang ketebalan dinding. Oleh karena itu, model ini sering disebut sebagai **konduksi satu dimensi (1D)**. Pemahaman yang baik terhadap konduksi pada dinding datar menjadi sangat penting karena :

- a) menjadi dasar bagi analisis geometri lain (silinder dan bola)
- b) banyak digunakan dalam aplikasi teknik
- c) mempermudah pemodelan sistem termal secara analitik.

4.1.1 Model Fisik dan Asumsi Analisis

Sistem yang dianalisis berupa sebuah dinding datar dengan:

- a) ketebalan L
- b) luas penampang A
- c) suhu pada sisi kiri T_1
- d) suhu pada sisi kanan T_2

Aliran panas terjadi dari suhu tinggi ke suhu rendah, yaitu dari T_1 ke T_2 .

Untuk menyederhanakan proses analisis, digunakan beberapa asumsi berikut ini:

- 1) **Kondisi tunak (steady-state)**
Kondisi suhu atau temperatur tidak berubah terhadap waktu.
- 2) **Konduksi satu dimensi**
Perpindahan panas hanya terjadi sepanjang arah x .
- 3) **Konduktivitas termal konstan**
Nilai k tidak berubah terhadap temperatur.
- 4) **Tidak ada pembangkitan panas internal**
Tidak terdapat sumber panas di dalam material.
- 5) **Kontak sempurna pada permukaan**
Tidak ada hambatan kontak termal.

4.1.2 Penurunan Persamaan Konduksi

Analisis dimulai dari hukum dasar konduksi panas, yaitu **Hukum Fourier** (Bergman *et al.*, 2017; Çengel and Ghajar, 2020).:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4-1)$$

Dimana :

q_x adalah besar laju perpindahan panas (W atau J/s)

k adalah konduktivitas termal material (W/mK atau W/m°C)

A adalah luas penampang (m²)

$\frac{dT}{dx}$ adalah gradien suhu atau perubahan suhu terhadap jarak. (K/m atau °C/m) tanda negatif menunjukkan aliran berlawanan arah dengan peningkatan suhu.

Karena kondisi tunak dan tidak ada pembangkitan panas, maka laju perpindahan panas q konstan dan gradien temperatur bersifat linear. Dengan batas kondisi:

a) pada $x = 0$, $T = T_1$

b) pada $x = L$, $T = T_2$

Maka hasil integrasi memberikan:

$$q_x = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (4-2)$$

Dari persamaan (4-2) tadi dapat dilihat beberapa hal berikut:

- 1) besar laju panas berbanding lurus dengan konduktivitas termal k , luas penampang A , dan perbedaan temperatur $(T_1 - T_2)$,
- 2) namun berbanding terbalik dengan ketebalan dinding L .

4.1.3 Konsep Ketahanan Termal

Untuk mempermudah pemahaman konsep tahanan termal, digunakan pendekatan analogi dengan Hukum Ohm pada rangkaian listrik. Dalam sistem listrik, Hukum Ohm dinyatakan sebagai:

$$I = \frac{V}{R} \quad (4-3)$$

yang menunjukkan bahwa kuat arus listrik (I) berbanding lurus dengan beda potensial atau tegangan (V), serta berbanding terbalik dengan hambatan listrik (R). Secara fisik, semakin besar tegangan yang diberikan, semakin besar arus yang mengalir. Sebaliknya, semakin besar hambatan, semakin kecil arus yang dapat mengalir dalam rangkaian tersebut.

Konsep yang serupa berlaku pada perpindahan panas secara konduksi melalui dinding datar satu dimensi pada kondisi tunak. Berdasarkan persamaan 4-2 sebelumnya, laju perpindahan panas dapat disusun kembali sehingga diperoleh bentuk:

$$q_x = \frac{\Delta T}{\frac{L}{kA}} \quad (4-4)$$

Besaran $\frac{L}{kA}$ kemudian didefinisikan sebagai resistansi termal konduksi. Persamaan hambatan termal untuk konduksi dinyatakan :

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA} \quad (4-5)$$

Resistansi termal (R) adalah ukuran kemampuan suatu material dalam menahan aliran panas dan umumnya dinyatakan dalam satuan Kelvin per watt (K/W). Dengan menggunakan definisi tersebut, persamaan laju panas dapat ditulis kembali dalam bentuk:

$$q_x = \frac{T_1 - T_2}{R_{t,cond}} \quad (4-6)$$

Secara matematis, bentuk persamaan ini identik dengan Hukum Ohm dalam analisis jaringan tahanan termal (Çengel and Ghajar, 2020). Dalam analogi sistem termal dan sistem listrik, laju panas (q) berperan seperti arus listrik (I), perbedaan temperatur (ΔT) berperan seperti tegangan (V), dan resistansi termal (R_t) berperan seperti hambatan listrik (R).

Makna fisiknya pun memiliki kesesuaian. Perbedaan temperatur merupakan gaya pendorong terjadinya aliran panas, sebagaimana tegangan menjadi pendorong aliran arus listrik. Resistansi termal menyatakan tingkat hambatan suatu material terhadap aliran energi panas. Jika ketebalan dinding (L) semakin besar, maka resistansi termal meningkat dan laju panas menurun. Sebaliknya, apabila konduktivitas termal (k) atau luas penampang (A) diperbesar, maka resistansi termal mengecil dan panas lebih mudah mengalir.

Analogi ini memungkinkan kita untuk mengintegrasikan pengetahuan kita tentang sistem listrik ke dalam pemahaman tentang laju panas dalam sistem termal. Dalam tabel 4.1 berikut ditunjukkan perbandingan Sistem termal dengan Sistem listrik.

Tabel 4. 1 Perbandingan Sistem Termal dan Sistem Listrik

No.	Sistem Termal	Sistem Listrik
1	Laju panas q	Kuat Arus I
2	Perbedaan suhu ΔT	Tegangan V
3	Resistansi termal R	Hambatan listrik R

Hubungan antara resistansi termal dan laju perpindahan panas bersifat berbanding terbalik. Nilai resistansi yang tinggi menyebabkan panas sulit mengalir, sehingga material tersebut berfungsi sebagai isolator yang baik. Sebaliknya, nilai resistansi yang rendah menyebabkan panas mudah mengalir, sehingga material tersebut bersifat konduktor. Dalam rekayasa teknik, khususnya pada perancangan konstruksi bangunan, pemilihan material berdasarkan nilai resistansi termal sangat penting. Material insulasi dengan resistansi termal tinggi, seperti fiberglass atau busa polimer, digunakan untuk mengurangi kebocoran panas dan menjaga kestabilan temperatur ruangan. Hal ini meningkatkan kenyamanan termal sekaligus menurunkan konsumsi energi. Sebaliknya, penggunaan material dengan resistansi rendah, seperti logam, akan mempercepat perpindahan panas dan dapat menyebabkan fluktuasi temperatur yang besar, sehingga sistem pemanas atau pendingin harus bekerja lebih keras dan menjadi kurang efisien.

Dengan demikian, pendekatan analogi Hukum Ohm tidak hanya mempermudah pemahaman konsep tahanan termal, tetapi juga membantu dalam analisis sistem termal yang lebih kompleks, seperti dinding berlapis atau rangkaian tahanan termal majemuk, melalui prinsip yang serupa dengan rangkaian listrik seri dan paralel.

4.1.4 Distribusi Temperatur , Karakteristik Profil Suhu, dan Interpretasi Grafik

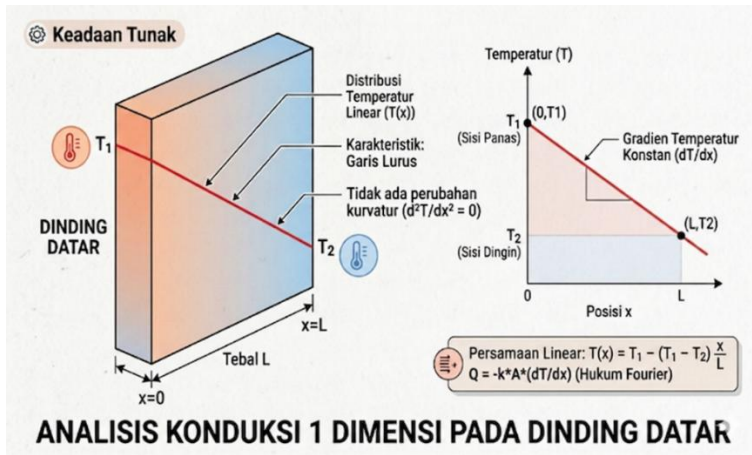
Distribusi temperatur pada dinding datar berbentuk linear untuk kondisi tunak tanpa pembangkitan panas internal (Bergman *et al.*, 2017), dapat dinyatakan sebagai :

$$T(x) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{L} x \quad (4-7)$$

Di mana $T(x)$ adalah suhu pada posisi tertentu x , L adalah tebal dinding, serta T_1 dan T_2 adalah suhu pada kedua sisi permukaan dinding.

Berdasarkan persamaan di atas, kita dapat membedah karakteristik fisik dari aliran panas yang terjadi:

- 1) Profil Linear (Garis Lurus): Karena tidak ada sumber panas internal di dalam dinding dan konduktivitas termal bahan dianggap seragam, suhu berubah secara konstan seiring bertambahnya kedalaman dinding (x).
- 2) Gradien Temperatur Konstan: Perubahan suhu per satuan jarak ($\frac{dT}{dx}$) bernilai tetap. Hal ini menunjukkan bahwa "hambatan" yang ditemui panas saat merambat melalui dinding adalah seragam di setiap lapisannya.
- 3) Nihil Perubahan Kurvatur: Secara kalkulus, turunan kedua dari persamaan suhu terhadap posisi adalah nol ($d^2T/dx^2 = 0$). Ini adalah bukti matematis bahwa profil suhu tidak melengkung, melainkan membentuk lintasan lurus sempurna dari sisi panas ke sisi dingin.



Gambar 4.1 Ilustrasi distribusi temperatur linier untuk konduksi 1 dimensi pada dinding datar
(NotebookLm)

Jika kita memvisualisasikan fenomena ini ke dalam koordinat Kartesius, kita akan mendapatkan gambaran yang jelas mengenai bagaimana energi berpindah seperti yang terlihat dalam Gambar 4.1:

1. Sumbu Horizontal (x): Merepresentasikan posisi atau ketebalan dinding, dimulai dari permukaan kiri ($x=0$) hingga permukaan kanan ($x=L$).
2. Sumbu Vertikal (T): Merepresentasikan besaran suhu pada titik tersebut.

Grafik yang terbentuk adalah garis lurus yang menghubungkan titik T_1 dan T_2 . Kemiringan (*slope*) dari garis ini sangat krusial, semakin curam garisnya, semakin besar laju perpindahan panas yang terjadi pada dinding tersebut. Pemahaman ini merupakan fondasi penting sebelum kita mempelajari sistem yang lebih kompleks seperti dinding berlapis atau silinder.

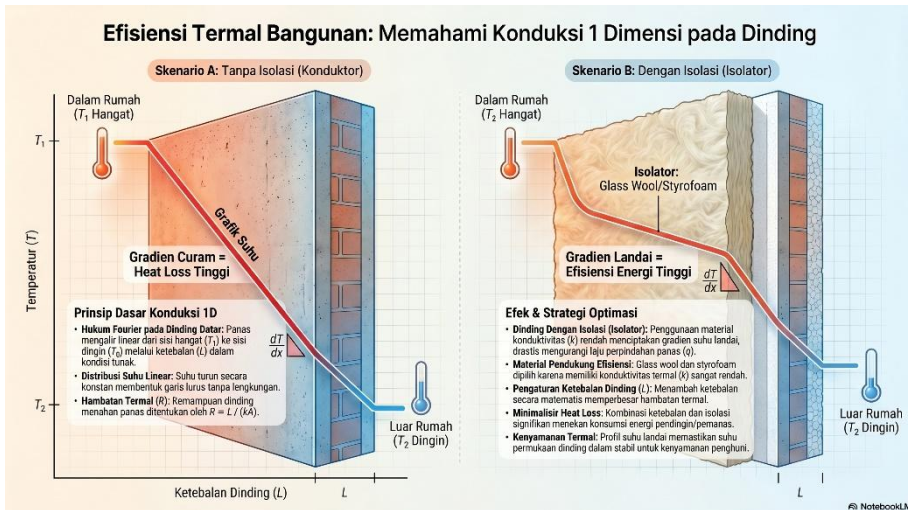
4.1.5 Aplikasi Teknik

Pemahaman mengenai distribusi temperatur linear pada dinding datar bukan sekadar teori di atas kertas. Dalam dunia teknik, konsep ini menjadi fondasi utama untuk menghitung efisiensi energi dan keamanan material. Berikut adalah implementasi konduksi satu dimensi dalam berbagai bidang:

1) Rekayasa Bangunan dan Arsitektur Termal

Pada dinding bangunan, prinsip konduksi digunakan untuk melakukan **analisis kehilangan panas (*heat loss*)**.

- a. **Efisiensi Energi:** Dengan mengetahui gradien temperatur antara bagian dalam rumah yang hangat dan lingkungan luar yang dingin, insinyur dapat menentukan ketebalan dinding yang tepat.
- b. **Desain Isolasi:** Pemilihan material isolasi (seperti *glass wool* atau *styrofoam*) didasarkan pada kemampuan material tersebut untuk memperkecil kemiringan (*slope*) grafik temperatur, sehingga perpindahan panas keluar bangunan dapat diminimalisir secara signifikan.



Gambar 4.2 Ilustrasi Aplikasi Konsep Konduksi 1 Dimensi pada Dinding Datar
(NotebookLm)

2) Industri Manufaktur dan Dinding Tungku (*Furnace*)

Pada industri berat, dinding tungku pembakaran harus mampu menahan suhu ekstrem.

- a. **Konservasi Energi:** Analisis konduksi membantu dalam mendesain dinding berlapis (*composite walls*) untuk memastikan suhu tinggi tetap terperangkap di dalam tungku guna menjaga proses produksi.
- b. **Keamanan Operasional:** Dengan menghitung distribusi temperatur, kita dapat memastikan bahwa suhu pada permukaan luar tungku tetap berada dalam batas aman untuk disentuh atau tidak merusak komponen elektronik di sekitarnya.

3) Pengembangan Komponen Mesin dan Elektronik
Pada skala yang lebih kecil, aplikasi ini ditemukan pada pelat logam dan *casing* mesin.

- a. **Manajemen Termal:** Komponen seperti pelat dasar setrika atau dinding silinder mesin mengandalkan prinsip konduksi untuk meratakan panas secara efisien.
- b. **Perlindungan Material:** Dengan memahami profil suhu satu dimensi, desainer mesin dapat memprediksi terjadinya **tegangan termal** (thermal stress) yang dapat menyebabkan material retak atau melengkung akibat perbedaan suhu yang terlalu kontras antara sisi dalam dan sisi luar.

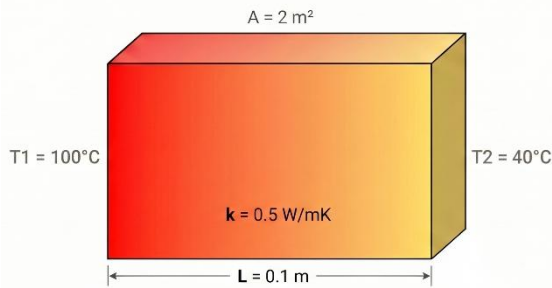
Penting untuk diingat bahwa dalam semua contoh di atas, kita mengasumsikan aliran panas hanya terjadi ke satu arah (tegak lurus terhadap luas permukaan). Penyederhanaan ini memungkinkan kita menggunakan Hukum Fourier secara efektif untuk memecahkan masalah rekayasa yang kompleks dengan akurasi yang tinggi.

4.1.6 Contoh Perhitungan

Berikut contoh perhitungan laju perpindahan panas secara konduksi pada sebuah dinding rumah.

Soal :

Hitunglah laju perpindahan panas yang terjadi pada sebuah dinding yang memiliki ketebalan 10cm dan luas 2m^2 . Besar konduktivitas termal k adalah 0.5W/mK . Besar suhu di sisi sebelah kiri adalah 100°C sedangkan sebelah kanan adalah 40°C .



Gambar 4. 3 Ilustrasi laju perpindahan panas yang terjadi pada sebuah dinding datar
(NotebookLM)

Penyelesaian :

Sebuah dinding memiliki:

- ketebalan $L = 0,1 \text{ m}$
- Luas $A = 2 \text{ m}^2$
- konduktivitas termal $k = 0.5 \text{ W/mK}$
- suhu sisi kiri $T_1 = 100^\circ\text{C}$
- suhu sisi kanan $T_2 = 40^\circ\text{C}$

Besar laju perpindahan panas q dapat dihitung memakai persamaan 4-2 :

$$q_x = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \rightarrow q_x = 0.5 \times 2 \times \frac{(100 - 40)}{0.1} \\ = 1 \times \frac{(60)}{0.1} = 600 \text{ W}$$

Jadi besar laju perpindahan panas pada dinding tersebut adalah 600W.

4.1.7 Diskusi dan Analisis

Dalam termodinamika dan perpindahan panas, model dinding datar memegang peranan penting untuk memahami prinsip dasar konduksi. Berdasarkan Hukum Fourier, laju

perpindahan panas berbanding lurus dengan luas penampang dan gradien suhu, serta berbanding terbalik dengan ketebalan material (Holman, 2010; Bergman *et al.*, 2017). Dari prinsip tersebut, analisis perpindahan panas pada dinding datar menghasilkan beberapa kesimpulan fundamental:

1) **Pengaruh Signifikan Ketebalan (L):**

Ketebalan bertindak sebagai lintasan hambatan bagi aliran energi. Semakin tebal suatu dinding penyekat, semakin besar resistansi termalnya, yang secara matematis dirumuskan dalam persamaan (4-3). Akibatnya, laju perpindahan panas yang berhasil menembus material tersebut akan menjadi semakin kecil.

2) **Peran Material dalam Menentukan Performa (k):**

Jenis material menentukan nilai konduktivitas termal. Logam memiliki nilai konduktivitas yang sangat tinggi karena memiliki struktur elektron bebas yang memfasilitasi transfer energi dengan cepat (berfungsi sebagai konduktor). Sebaliknya, material non-logam seperti keramik atau polimer memiliki konduktivitas yang sangat rendah, sehingga berfungsi efektif sebagai isolator yang meredam laju panas.

3) **Perbedaan Suhu (ΔT) sebagai *Driving Force* :**

Selisih suhu antara dua permukaan dinding merupakan "gaya dorong" utama terjadinya perpindahan panas, sangat analog dengan beda potensial (tegangan) pada sirkuit listrik. Semakin ekstrem perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin, semakin masif pula laju aliran panas yang

berusaha berpindah untuk mencapai keseimbangan termal.

Meskipun penyederhanaan model konduksi satu dimensi sangat praktis untuk perhitungan dasar rekayasa, model matematis ini dibangun di atas kondisi ideal. Oleh karena itu, penerapannya pada kondisi riil memiliki beberapa keterbatasan sebagai berikut :

1) Hanya Berlaku untuk Kondisi Tunak (*Steady-State*):

Model ini mengasumsikan bahwa suhu pada titik mana pun di dalam material bernilai konstan dan tidak berubah terhadap waktu. Model ini tidak dapat memprediksi laju panas pada kondisi tidak tunak (*transient*), seperti saat sistem pemanas ruangan baru saja dinyalakan dan suhu masih terus berfluktuasi.

2) Tidak Mempertimbangkan Pembangkitan Panas Internal:

Analisis ini murni mengasumsikan bahwa energi panas hanya mengalir melewati material. Model ini akan gagal dan tidak akurat jika material dinding itu sendiri menghasilkan energi panas (memiliki variabel q_{gen}), seperti yang terjadi pada elemen pemanas listrik atau pelindung reaktor nuklir.

3) Mengabaikan Aliran Multidimensi:

Model satu dimensi mengasumsikan panas murni bergerak lurus hanya pada satu sumbu (sumbu-x). Dalam praktiknya, aliran panas bersifat tiga dimensi dan bisa menyebar ke arah vertikal atau menyamping, terutama pada bagian tepi atau sudut geometri (*edge effects*).

4) Mengabaikan Resistansi Kontak Termal:

Pada konstruksi nyata yang melibatkan persambungan dua material penyusun, permukaan kontakannya tidak pernah rata sempurna secara mikroskopis. Celah udara kecil yang terbentuk pada bidang batas tersebut akan menciptakan hambatan termal tambahan (resistansi kontak) yang membuat aliran panas tidak seideal perhitungan teoretis murni.

4.1.8 Ringkasan untuk Konduksi Panas pada Dinding Datar

Konduksi panas pada dinding datar merupakan model dasar dalam analisis perpindahan panas satu dimensi pada kondisi tunak tanpa pembangkitan panas internal dan dengan konduktivitas termal konstan. Berdasarkan Hukum Fourier, laju perpindahan panas berbanding lurus dengan konduktivitas termal material (k), luas penampang (A), serta perbedaan temperatur (ΔT), dan berbanding terbalik dengan ketebalan dinding (L). Distribusi temperatur di dalam dinding berbentuk linear karena gradien temperatur konstan dan tidak terdapat sumber panas di dalam material.

Untuk mempermudah analisis, digunakan konsep resistansi termal ($R_{t,cond} = L/kA$), yang memungkinkan persamaan laju panas ditulis dalam bentuk analogi Hukum Ohm, yaitu $q = \Delta T/R$. Nilai resistansi termal yang tinggi menunjukkan kemampuan material dalam menghambat aliran panas (isolator), sedangkan nilai resistansi rendah menunjukkan kemudahan panas mengalir (konduktor). Konsep ini sangat penting dalam perancangan sistem termal,

seperti dinding bangunan, tungku industri, serta komponen mesin dan elektronik.

Meskipun model konduksi satu dimensi pada dinding datar sangat berguna dan sederhana untuk analisis rekayasa, penerapannya memiliki keterbatasan. Model ini hanya berlaku untuk kondisi tunak dan tanpa pembangkitan panas internal sesuai asumsi analisis konduksi satu dimensi klasik (Çengel and Ghajar, 2020; Holman, 2010). Oleh karena itu, pada sistem nyata yang lebih kompleks, diperlukan pendekatan lanjutan agar hasil analisis lebih akurat. Secara keseluruhan, pemahaman konduksi panas pada dinding datar menjadi fondasi penting dalam studi perpindahan panas karena menjadi dasar bagi analisis geometri lain dan berbagai aplikasi teknik di bidang energi, manufaktur, konstruksi, dan perancangan sistem mesin.

4.2 Konduksi Panas pada Geometri Silinder (*Cylindrical System*)

Konduksi panas pada geometri silinder merupakan pengembangan dari analisis konduksi satu dimensi yang lebih kompleks dibandingkan dinding datar. Pada sistem ini, perpindahan panas terjadi secara radial, sehingga luas penampang aliran panas berubah terhadap jari-jari (Çengel and Ghajar, 2020; Bergman *et al.*, 2017).

Geometri silinder sangat umum dijumpai dalam aplikasi teknik, seperti: pipa distribusi fluida panas, kabel listrik, tabung reactor, serta sistem perpipaan industri. Pemahaman konduksi pada silinder menjadi penting karena selain banyak digunakan dalam desain isolasi pipa, juga dipakai

untuk menentukan kehilangan panas (*heat loss*), dan menjadi dasar analisis sistem multilayer silinder.

4.2.1 Model Fisik dan Asumsi

Sistem yang dianalisis berupa silinder berongga (*hollow cylinder*) dengan parameter utama meliputi :

- a) jari-jari dalam: r_1
- b) jari-jari luar: r_2
- c) panjang silinder: L
- d) temperatur sisi dalam: T_1
- e) temperatur sisi luar: T_2
- f) konduktivitas termal: k

Perpindahan panas terjadi dari sisi dalam silinder ke sisi luar (atau sebaliknya) secara radial.

Untuk menyederhanakan analisis matematis, digunakan asumsi berikut:

- 1) Kondisi tunak (steady-state), sehingga temperatur tidak berubah terhadap waktu.
- 2) Konduksi satu dimensi (radial) dalam arah radial, sehingga temperatur hanya fungsi jari-jari r .
- 3) Konduktivitas termal konstan
- 4) Tidak ada pembangkitan panas internal
- 5) Panjang silinder jauh lebih besar dari jari-jarinya, sehingga efek arah aksial diabaikan.

4.2.2 Persamaan Dasar Konduksi Silinder

Berdasarkan hukum Fourier untuk koordinat silinder, besar laju perpindahan panas radial dinyatakan sebagai :

$$q_r = -kA_r \frac{dT}{dr} \quad (4-8)$$

Dengan luas permukaan silinder :

$$A_r = 2\pi rL \quad (4-9)$$

Maka dengan mensubstitusikan luas tersebut ke dalam persamaan Fourier akan diperoleh :

$$q_r = -2\pi kLr \frac{dT}{dr} \quad (4-10)$$

Menggunakan kondisi batas:

- $r = r_1, T = T_1$
- $r = r_2, T = T_2$

Serta integrasi persamaan 4-8, maka diperoleh persamaan laju perpindahan panas:

$$q_r = \frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (4-11)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa hubungan antara laju panas dan geometri bersifat logaritmik.

4.2.3 Ketahanan Termal pada Geometri Silinder

Sebagaimana pada dinding datar, konsep resistansi termal juga dapat diterapkan pada geometri silinder. Resistansi termal konduksi untuk silinder didefinisikan sebagai:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi kL} \quad (4-12)$$

Sehingga nilai laju panas q_r dapat ditulis menjadi persamaan 4-13 berikut :

$$q_r = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{t,cond}} \quad (4-13)$$

Bentuk ini menegaskan bahwa laju panas berbanding lurus dengan perbedaan temperatur dan berbanding terbalik dengan resistansi termal sistem.

4.2.4 Karakteristik Khusus Resistansi Termal Silinder

Berdasarkan Persamaan 4-10, dapat dianalisis bahwa karakteristik resistansi termal pada sistem silinder memiliki perbedaan mendasar dengan sistem dinding datar:

1. **Ketergantungan Logaritmik terhadap Geometri:** Berbeda dengan dinding datar yang resistansinya berbanding lurus dengan ketebalan linear (L), resistansi pada silinder sangat bergantung pada **rasio jari-jari luar terhadap jari-jari dalam** $\ln(r_2/r_1)$. Hal ini menunjukkan bahwa dimensi relatif lebih menentukan performa isolasi dibandingkan selisih ketebalan absolutnya.
2. **Efek Skala pada Efisiensi Termal:** Penambahan ketebalan yang sama pada silinder berdiameter besar akan menghasilkan peningkatan resistansi yang lebih kecil dibandingkan pada silinder berdiameter kecil. Semakin besar rasio jari-jari, semakin besar pula resistansi termal yang dihasilkan, namun tingkat kenaikannya melandai mengikuti fungsi logaritma natural.

Pemahaman karakteristik ini sangat penting dalam perancangan sistem perpipaan, tabung bertekanan, dan isolasi silinder pada industri energi dan manufaktur, karena

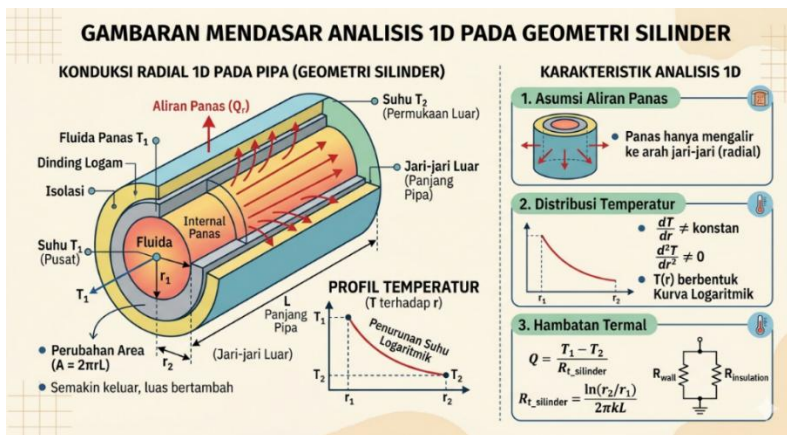
geometri silinder merupakan bentuk yang sangat umum digunakan dalam dunia teknik.

4.2.5 Distribusi Temperatur pada Silinder

Distribusi temperatur pada silinder dinyatakan sebagai:

$$T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (4-14)$$

Karakteristik profil suhu pada Silinder adalah berbentuk logaritmik, gradien temperatur tidak konstan, dan perubahan suhu lebih tajam di radius kecil. Sedangkan grafik yang terbentuk pada sistem ini berbentuk kurva logaritmik, terdiri dari sumbu horizontal mewakili jari-jari r dan sumbu vertical mewakili suhu T .



Gambar 4.4 Ilustrasi Gambaran mendasar Analisis 1 Dimensi pada Geometri Silinder
(NotebookLM)

4.2.6 Implementasi Konduksi Satu Dimensi pada Geometri Silinder

Dalam dunia teknik, aliran panas sering kali terjadi secara radial—menyebar dari pusat ke arah luar—melalui komponen berbentuk silinder. Berbeda dengan dinding datar, luas penampang pada silinder terus bertambah seiring bertambahnya jari-jari, yang memberikan tantangan tersendiri dalam efisiensi energi. Konsep konduksi pada silinder banyak digunakan dalam bidang Teknik, bahkan menjadi krusial dalam beberapa sektor berikut ini :

- 1) Sistem Perpipaan dan Distribusi Fluida,
 - a. Pada pembangkit listrik, pipa uap (*steam pipe*) berfungsi membawa energi panas dari pusat pipa menuju permukaan luar.
 - b. **Analisis Kehilangan Panas:** Insinyur harus menghitung laju perpindahan panas dengan akurat untuk memastikan uap tetap dalam fase gas dan tidak berubah menjadi air (kondensasi) sebelum mencapai turbin.
 - c. **Konsep Jari-Jari Kritis:** Uniknya, pada silinder, menambah ketebalan isolasi tidak selalu mengurangi kehilangan panas. Terdapat titik yang disebut jari-jari kritis isolasi (*critical radius of insulation*), di mana penambahan isolasi justru dapat meningkatkan pelepasan panas (Çengel and Ghajar, 2020)., di mana penambahan isolasi justru dapat meningkatkan pelepasan panas karena luas permukaan luar yang membengkak melebihi efek hambatan termalnya.

2) Manajemen Termal pada Kabel Listrik,

- a. Kabel listrik pada dasarnya adalah silinder panjang yang membangkitkan panas secara internal akibat hambatan listrik (efek Joule).
- b. **Disipasi Panas:** Kabel dirancang agar mampu membuang panas ke lingkungan secara efektif untuk mencegah isolator plastik meleleh.
- c. **Desain Isolasi:** Pemilihan material isolasi bertujuan agar permukaan kabel aman disentuh, namun tetap memiliki kemampuan hantar yang cukup agar tidak "mencekik" panas di dalam inti tembaga yang dapat memicu risiko kebakaran.

3) Industri Proses: Reaktor dan Penukar Panas,

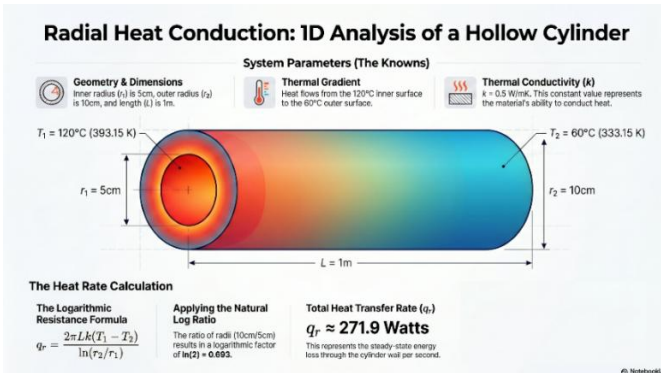
- a. Dalam skala industri yang lebih kompleks, geometri silinder digunakan untuk mengontrol reaksi kimia dan perpindahan energi antar fluida.
- b. **Reaktor Silinder:** Dinding reaktor sering kali terdiri dari lapisan komposit (baja, pelapis tahan korosi, dan isolasi). Analisis konduksi radial memastikan suhu reaksi tetap stabil, mencegah kegagalan material akibat panas berlebih atau kehilangan panas yang merugikan proses kimia.
- c. **Heat Exchanger (Penukar Panas):** Alat ini menggunakan ribuan pipa silinder kecil untuk memindahkan panas secara cepat. Dengan mengoptimalkan diameter dan menggunakan material dengan konduktivitas (**k**) tinggi

d. **Masalah Kerak (Fouling):** Analisis konduksi juga digunakan untuk mendeteksi penumpukan kerak pada dinding pipa yang bertindak sebagai isolator tambahan, yang secara drastis dapat menurunkan efisiensi alat penukar panas tersebut.

(NotebookLM)

Soal :

67



Gambar 4.6 Gambar ilustrasi konduksi pada silinder berongga
(NotebookLM)

Penyelesaian :

Konduksi pada Silinder berongga dengan data sebagai berikut:

- Jari-jari dalam: $r_1 = 0,05 \text{ m}$
- Jari-jari luar: $r_2 = 0,1 \text{ m}$
- Panjang silinder: $L = 1 \text{ m}$
- Konduktivitas termal: $k = 0,5 \text{ W/mK}$
- Suhu permukaan dalam: $T_1 = 120^\circ\text{C}$
- Suhu permukaan luar: $T_2 = 60^\circ\text{C}$

Rumus:

Memakai persamaan 4-9 dapat dihitung nilai q_r ,

$$q_r = \frac{2\pi k L (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)}$$

$$q_r = (2\pi(0,5)(1)(120 - 60))/\ln(2)$$

$$q_r = (2\pi(0,5)(60))/0,693$$

$$q_r \approx 271,6 \text{ W}$$

**Jadi laju perpindahan panas pada silinder tersebut adalah
271,6 watt.**

4.2.8 Karakteristik dan Keterbatasan Model Konduksi Radial pada Silinder

Perpindahan panas pada geometri silinder memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan dinding datar. Pada dinding datar, aliran panas berlangsung secara lurus dan luas penampangnya konstan. Sebaliknya, pada silinder, panas mengalir secara radial, yaitu dari bagian dalam menuju bagian luar atau sebaliknya. Perbedaan arah aliran ini menyebabkan munculnya karakteristik analitis yang khas pada sistem silinder.

Berbeda dengan dinding datar di mana aliran panas bergerak lurus, perpindahan panas pada geometri silinder mengalir secara radial—menyebar dari titik pusat ke arah luar (atau sebaliknya). Hal ini memunculkan beberapa karakteristik analitis yang unik:

- 1) **Luas Permukaan Berubah Terhadap Radius:** Pada dinding datar, luas area penampang selalu konstan. Namun pada silinder, luas permukaan (**A**) terus membesar seiring dengan bertambahnya jari-jari (**r**), sesuai dengan rumus selimut silinder $A = 2\pi r L$. Artinya, semakin panas bergerak ke arah luar silinder, "jalan" yang dilaluinya menjadi semakin lebar.
- 2) **Distribusi Suhu Tidak Linear:** Karena luas penampang yang terus melebar, penurunan suhu di dalam material silinder tidak lagi berupa garis lurus (linear). Alih-alih merosot secara konstan, kurva penurunannya berbentuk logaritmik. Suhu akan turun lebih drastis di bagian dalam silinder yang

sempit, dan melandai di bagian luar yang permukaannya lebih luas.

- 3) **Tingkat Kompleksitas Sistem:** Pemodelan termal pada silinder jauh lebih kompleks dibandingkan dinding datar. Perhitungan resistansi termalnya tidak lagi sekadar membagi ketebalan dengan konduktivitas, melainkan melibatkan fungsi logaritma natural untuk mengakomodasi perubahan geometri ruang secara radial.
- 4) **Sensitivitas Terhadap Jari-jari Dalam:** Sistem ini sangat peka terhadap ukuran jari-jari bagian dalam (ruang lubang silinder). Perubahan kecil pada jari-jari dalam akan secara signifikan mengubah ketebalan efektif dinding dan luas permukaan awal, yang pada akhirnya mendikte seberapa besar total hambatan termal yang dimiliki pipa tersebut.

Sama seperti pemodelan dasar lainnya, analisis konduksi satu dimensi pada silinder ini mengandalkan asumsi ideal. Agar perhitungan akurat, siswa perlu memahami batas-batas keberlakuan model ini di dunia nyata:

- 1) **Tidak Berlaku untuk Kondisi Tidak Tunak (*Transient*):** Model ini berasumsi bahwa aliran panas sudah stabil dan suhu di setiap titik tidak berubah seiring berjalannya waktu. Analisis ini tidak dapat digunakan untuk memprediksi perpindahan panas saat fluida panas baru saja dialirkan ke dalam pipa dingin.
- 2) **Mengabaikan Pembangkitan Panas Internal:** Model ini mengasumsikan silinder murni bertindak sebagai jalur lintasan panas. Perhitungan akan

menjadi tidak valid jika material silinder tersebut ikut menghasilkan panas dari dalam, misalnya pada kawat transmisi listrik yang menghasilkan panas akibat hambatan arus (Efek Joule).

- 3) **Tidak Mencakup Konveksi Eksternal atau Internal:** Analisis ini murni mengisolasi fenomena konduksi *di dalam* dinding solid silinder (dari dinding dalam ke dinding luar). Model ini belum memperhitungkan resistansi konveksi dari fluida (seperti air atau gas) yang mengalir di dalam pipa, maupun udara yang berhembus di luar pipa.
- 4) **Asumsi Material yang Homogen:** Model menganggap bahwa konduktivitas termal (k) material bernilai seragam dan konstan di seluruh bagian silinder. Pada kenyataannya, banyak material yang struktur molekulnya tidak merata sempurna, atau nilai k -nya dapat berubah secara signifikan jika terpapar suhu yang sangat ekstrem.

4.2.9 Ringkasan

Konduksi panas pada geometri silinder merupakan pengembangan analisis konduksi satu dimensi yang mempertimbangkan aliran panas secara radial. Berbeda dengan dinding datar yang memiliki luas penampang konstan, pada silinder luas permukaan perpindahan panas berubah terhadap jari-jari, sehingga menghasilkan karakteristik matematis yang berbeda. Analisis dilakukan pada silinder berongga dengan parameter jari-jari dalam r_1 , jari-jari luar r_2 , panjang L , temperatur permukaan dalam T_1 , temperatur permukaan luar T_2 , dan konduktivitas termal k . Dengan asumsi kondisi tunak, konduksi satu dimensi radial,

tanpa pembangkitan panas internal, dan material homogen, diperoleh persamaan laju perpindahan panas:

$$q_r = \frac{2\pi k L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Berbeda dengan dinding datar, hubungan antara laju panas dan geometri pada silinder bersifat logaritmik akibat perubahan luas permukaan terhadap radius (Holman, 2010). Hal ini terjadi karena luas permukaan silinder meningkat seiring bertambahnya jari-jari. Konsep resistansi termal juga dapat diterapkan pada sistem silinder, dengan bentuk:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k L}$$

Sehingga laju panas dapat dituliskan dalam bentuk analogi Hukum Ohm:

$$q_r = \frac{T_1 - T_2}{R_{t,cond}}$$

Distribusi temperatur di dalam dinding silinder berbentuk logaritmik pada kondisi tunak tanpa pembangkitan panas (Bergman *et al.*, 2017). Penurunan suhu lebih tajam pada radius kecil dan semakin landai pada radius besar karena perubahan luas penampang radial. Dalam praktik teknik, analisis konduksi radial banyak digunakan pada sistem perpipaan, kabel listrik, tabung reaktor, dan penukar panas. Model ini penting untuk menghitung kehilangan panas, menentukan ketebalan isolasi, serta menganalisis performa termal sistem silindris.

Namun demikian, model ini memiliki keterbatasan, yaitu hanya berlaku untuk kondisi tunak, tidak mempertimbangkan pembangkitan panas internal, tidak memasukkan efek konveksi, serta mengasumsikan material

homogen dengan konduktivitas konstan. Untuk sistem nyata yang lebih kompleks, diperlukan analisis lanjutan. Secara keseluruhan, pemahaman konduksi satu dimensi pada geometri silinder merupakan dasar penting dalam perancangan dan evaluasi sistem termal berbentuk silinder di bidang energi, manufaktur, dan industri proses.

4.3 Konduksi Panas pada Geometri Bola (Spherical Sistem)

Konduksi panas pada geometri bola merupakan salah satu bentuk analisis lanjutan dalam konduksi satu dimensi yang memiliki karakteristik unik dibandingkan dinding datar dan silinder. Pada sistem ini, perpindahan panas terjadi secara **radial**, dengan luas penampang yang berubah secara signifikan terhadap jari-jari.

Geometri bola banyak ditemukan dalam aplikasi teknik, seperti: tangki penyimpanan fluida panas, partikel bahan bakar nuklir, sistem isolasi berbentuk spherical, dan bola logam dalam proses pendinginan/pemanasan. Analisis pada geometri ini penting karena:

- 1) memberikan pemahaman distribusi suhu non-linear yang lebih kompleks.
- 2) digunakan pada sistem energi dan industri.
- 3) menjadi dasar untuk analisis sistem radial lainnya.

4.3.1 Model Fisik dan Asumsi

Sistem yang dianalisis berupa sebuah bola berongga (*spherical shell*) dengan parameter :

- jari-jari dalam: r_1
- jari-jari luar : r_2
- temperatur sisi dalam: T_1
- temperatur sisi luar: T_2
- konduktivitas termal: k

Perpindahan panas terjadi dari arah radial dalam ke luar (atau sebaliknya). Untuk menyederhanakan model, digunakan asumsi berikut:

- 1) **Kondisi tunak (steady-state)**
Tidak ada perubahan temperatur terhadap waktu.
- 2) **Konduksi satu dimensi (radial)**
Temperatur hanya fungsi jari-jari r .
- 3) **Konduktivitas termal konstan**
Nilai k tidak berubah terhadap temperatur.
- 4) **Tidak ada pembangkitan panas internal**
- 5) **Distribusi temperatur simetris secara radial**

4.3.2 Persamaan Dasar Konduksi Bola

Analisis dimulai dari hukum Fourier dalam koordinat bola, dimana besar laju perpindahan panas pada arah radial memakai persamaan 4-6 :

:

$$q_r = -kA_r \frac{dT}{dr}$$

Luas permukaan bola dirumuskan dengan $A = 4\pi r^2$, yang menyebabkan perubahan area sangat signifikan terhadap radius (Bergman *et al.*, 2017). Dengan luas permukaan geometri bola :

$$A_r = 4\pi r^2 \quad (4-15)$$

Sehingga laju perpindahan panas :

$$q_r = -4\pi k r^2 \frac{dT}{dr} \quad (4-16)$$

Dengan kondisi batas:

- $r = r_1, \quad T = T_1$
- $r = r_2, \quad T = T_2$

Dengan integrasi persamaan 4-16, maka diperoleh persamaan laju perpindahan panas:

$$q_r = \frac{4\pi k (T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} \quad (4-17)$$

4.3.3 Ketahanan Termal pada Geometri Bola

Ketahanan termal pada geometri bola didefinisikan sebagai :

$$R_{t,cond} = \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4-18)$$

Sehingga nilai q dapat ditulis menjadi persamaan 4-13,

$$q_r = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{t,cond}}$$

Ketahanan tergantung pada **rasio jari-jari**, bukan selisih langsung. Semakin besar rasio r_2/r_1 , maka semakin besar resistansi yang terjadi. Berbeda dengan dinding datar yang bergantung pada ketebalan linear.

4.3.4 Distribusi Temperatur , Karakteristik Profil Suhu, dan Interpretasi Grafik

Distribusi temperatur pada silinder dinyatakan sebagai:

$$T_{(r)} = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right)}{\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)} \quad (4-19)$$

Setelah memahami karakteristik aliran panas pada dinding datar (linear) dan silinder (logaritmik), kita kini sampai pada geometri yang paling efisien dalam menyerap atau melepaskan panas yaitu geometri **bola**. Contoh nyatanya bisa kita temukan pada tangki penyimpanan gas alam cair (LNG) berbentuk bola atau bahkan partikel katalis dalam reaktor kimia.

Pada geometri bola, transfer panas terjadi secara radial dari pusat ke permukaan. Keunikan utama geometri ini terletak pada luas permukaannya (A) yang berubah secara eksponensial terhadap jari-jari (r), yang dirumuskan dengan $A = 4\pi r^2$. Konsekuensi dari area yang meluas dengan sangat cepat ini menciptakan profil distribusi temperatur yang sangat khas.

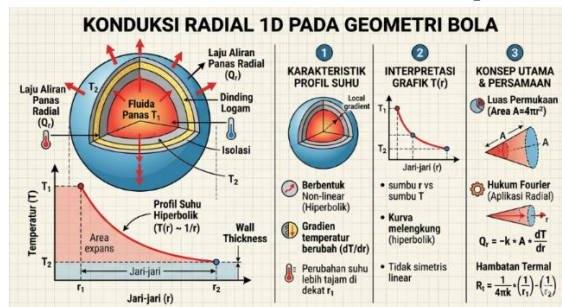
Berdasarkan analisis matematis menggunakan Hukum Fourier untuk geometri bola, kita dapat mengidentifikasi beberapa karakteristik fundamental dari profil suhunya:

- 1) **Berbentuk Non-Linear (Hiperbolik):** Berbeda total dengan dinding datar yang garis lurus atau silinder yang melengkung halus (logaritmik), profil suhu pada bola membentuk kurva hiperbolik (tipe $1/r$). Ini terjadi karena energi panas harus tersebar ke area

permukaan yang mekar dengan sangat cepat seiring bertambahnya radius.

- 2) **Gradien Temperatur Tidak Konstan:** Kemiringan grafik suhu ($\frac{dT}{dr}$) terus berubah di setiap titik radius. Akibatnya, hambatan termal di dekat pusat bola jauh lebih besar dibandingkan di dekat permukaan luar.
- 3) **Perubahan Suhu Ekstrem di Jari-jari Kecil:** Ini adalah ciri paling menonjol. Di area dekat pusat bola (radius kecil), kurva suhu turun dengan sangat tajam. Sebaliknya, saat mendekati permukaan luar (radius besar), kurva menjadi jauh lebih landai. Fenomena ini menunjukkan bahwa di area sempit dekat pusat, penurunan suhu terjadi sangat drastis untuk memindahkan jumlah panas yang sama.

Jika kita memvisualisasikan fenomena ini ke dalam plot dua dimensi, perbedaan geometri ini akan terlihat sangat jelas. Dimana sumbu Horizontal merepresentasikan jari-jari atau radius (r) dan sumbu vertikal mewakili temperatur (T).



Gambar 4.7 Ilustrasi Konduksi 1 Dimensi pada Geometri Bola
(NotebookLM)

Grafik yang terbentuk bukanlah garis lurus simetris seperti pada dinding datar. Kita akan melihat sebuah **kurva**

melengkung tajam (*hiperbolik*) yang menunjukkan penurunan suhu yang sangat kontras antara bagian dalam dan bagian luar bola. Pemahaman ini sangat krusial bagi para insinyur dalam mendesain sistem isolasi untuk tangki bola agar energi tidak terbuang percuma akibat penurunan suhu yang drastis di lapisan dalamnya.

4.3.5 Implementasi Konduksi Satu Dimensi pada Geometri Silinder

Dalam rekayasa termal, geometri bola sering dipilih karena memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang paling kecil, sehingga sangat efektif untuk meminimalkan perpindahan panas dengan lingkungan. Berikut adalah beberapa implementasi krusial dari analisis konduksi radial pada geometri bola:

1) Sistem Penyimpanan Energi dan *Cryogenic Storage*

Aplikasi yang paling umum ditemukan adalah pada tangki penyimpanan berbentuk bola (*spherical tanks*) yaitu **Tangki LNG dan *Cryogenic***. Untuk menyimpan gas alam cair (LNG) pada suhu ekstrem rendah, digunakan tangki bola dengan sistem isolasi berlapis. Analisis konduksi satu dimensi digunakan untuk menghitung tebal isolasi yang optimal guna mencegah panas dari lingkungan masuk ke dalam tangki. Pada penyimpanan cairan atau gas panas, geometri bola membantu meminimalkan "kebocoran" energi panas ke luar, sehingga suhu di dalam tangki dapat dipertahankan lebih lama dengan biaya energi yang lebih rendah.

2) Teknologi Reaktor Nuklir

Dalam beberapa desain reaktor nuklir, khususnya reaktor tipe *Pebble Bed*, bahan bakar disusun dalam bentuk bola-bola kecil. Panas hasil reaksi fisi dibangkitkan di dalam inti bola bahan bakar. Analisis konduksi satu dimensi radial sangat vital untuk memprediksi distribusi suhu dari pusat bola hingga ke permukaannya. Hal ini bertujuan untuk memastikan suhu di pusat bola tidak melebihi titik leleh material yang dapat membahayakan keamanan reaktor.

3) Industri Proses dan Partikel Termal

Pada tingkat mikroskopis atau pemrosesan material, analisis ini digunakan untuk mempelajari perilaku termal partikel padat. Dalam industri metalurgi atau kimia, partikel logam berbentuk bola sering dipanaskan atau didinginkan secara cepat. Dengan memahami profil suhu hiperbolik pada bola, insinyur dapat menghitung waktu yang dibutuhkan agar bagian pusat partikel mencapai suhu tertentu, sehingga kualitas material hasil pemrosesan tetap seragam dan stabil.

4.3.6 Contoh Perhitungan Analisis Satu Dimensi pada Geometri Bola

Soal :

Suatu bola berongga berukuran jari-jari dalam 5 cm dan jari-jari luar 10cm, mengalami perpindahan panas secara konduksi radial. Jika konduktivitas termal silinder adalah $0,6 \text{ W/mK}$, sedangkan besar suhu permukaan dalam

200°C dan suhu permukaan luar 50°C, Hitunglah laju perpindahan panas (q) melalui dinding Bola tersebut!

Penyelesaian :

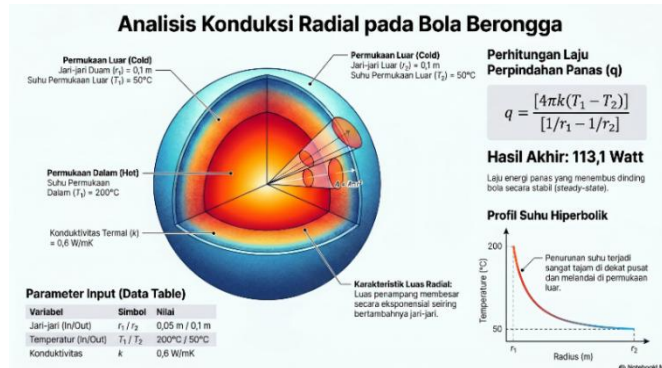
Konduksi pada bola dengan data sebagai berikut:

- Jari-jari dalam: $r_1 = 0,05$ m
- Jari-jari luar: $r_2 = 0,1$ m
- Konduktivitas termal: $k = 0,6$ W/mK
- Suhu permukaan dalam: $T_1 = 200^\circ\text{C}$
- Suhu permukaan luar: $T_2 = 50^\circ\text{C}$

Untuk menghitung laju perpindahan panas q_r , digunakan persamaan 4-17 perpindahan panas pada dinding bola :

$$q_r = \frac{4\pi k(T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$
$$q_r = \frac{4\pi 0.6(200 - 50)}{\left(\frac{1}{0.05} - \frac{1}{0.1}\right)}$$
$$q_r = \frac{2,4\pi(150)}{\frac{1}{0,1}} = 113,1 \text{ W}$$

Jadi, laju perpindahan panas yang terjadi adalah sebesar **113,1 Watt**.



Gambar 4. 8 Perhitungan Konduksi 1 Dimensi pada Geometri Bola
(NotebookLM)

4.3.7 Karakteristik dan Keterbatasan Model Konduksi Radial pada Geometri Bola

Sama halnya seperti silinder, panas pada bola mengalir secara radial dari titik pusat ke arah luar (atau sebaliknya). Namun, karakteristik geometris bola memberikan efek perpindahan panas yang jauh lebih ekstrem, dengan poin-poin analisis sebagai berikut:

- 1) **Peningkatan Luas Permukaan yang Sangat Cepat:**
Pada bola, luas permukaan penampang dihitung dengan rumus $A = 4\pi r^2$. Karena nilai jari-jari (r) dikuadratkan, luas permukaan material akan membesar secara eksponensial seiring dengan Bergeraknya panas ke arah luar. Pertumbuhan luasan ini jauh lebih masif dan cepat dibandingkan pada silinder.
- 2) **Gradien Suhu Sangat Curam di Bagian Dalam:**
Sebagai akibat dari luas permukaan yang sangat sempit di bagian dalam bola, aliran panas mengalami

"kemacetan" termal. Hal ini menyebabkan penurunan suhu (gradien suhu) yang sangat tajam dan melengkung curam di lapisan-lapisan dalam. Sebaliknya, saat panas mencapai lapisan luar yang permukaannya sangat luas, penurunan suhu menjadi jauh lebih landai.

- 3) **Sensitivitas Tinggi Terhadap Perubahan Dimensi:** Sistem geometri bola adalah yang paling sensitif dibandingkan dinding datar maupun silinder. Karena faktor kuadrat pada jari-jari (r^2), sedikit saja perubahan pada ketebalan dinding cangkang bola atau ukuran jari-jari dalam akan memicu perubahan drastis pada total resistansi termal dan laju perpindahan panas keseluruhan.

Perhitungan matematis dasar untuk bola ini menggunakan asumsi penyederhanaan. Agar perhitungan selaras dengan realita, harus dipahami beberapa keterbatasan dari model ini, sehingga **tidak** dapat diterapkan secara langsung:

- 1) **Hanya Mengasumsikan Kondisi Tunak (*Steady-State*):** Model ini murni untuk kondisi di mana suhu sistem sudah stabil. Ia tidak berlaku untuk kondisi tidak tunak (*transient*), seperti saat tangki bola baru saja diisi dengan cairan panas dan suhunya masih berfluktuasi mencari keseimbangan.
- 2) **Tidak Mempertimbangkan Pembangkitan Panas (*Heat Generation*):** Analisis ini berasumsi cangkang bola hanya berfungsi sebagai "jalan layang" bagi panas. Model ini akan gagal jika material penyusun cangkang bola itu sendiri memancarkan energi panas

secara internal (misalnya karena reaksi kimia atau peluruhan radioaktif di dalam dinding material).

- 3) **Tidak Mencakup Konveksi Eksternal:** menghitung konduksi Rumus dasar ini secara eksklusif hanya murni yang menembus ketebalan dinding solid bola (lapisan dalam ke luar). Model ini mengabaikan hambatan konveksi dari fluida di dalam bola maupun paparan angin di lingkungan luar bola.
- 4) **Asumsi Material Homogen:** Perhitungan mengasumsikan bahwa seluruh cangkang bola terbuat dari satu jenis material padat yang merata sempurna, di mana nilai konduktivitas termalnya (k) selalu konstan dan tidak terpengaruh oleh titik lokasi maupun perubahan suhu ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 2017. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8th ed. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Çengel, Y.A. and Ghajar, A.J., 2020. *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications*. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Holman, J.P., 2010. *Heat transfer*. 10th ed. New York: McGraw-Hill.
- Khan, W.A. and Culham, J.R., 2017. Heat conduction in cylindrical and spherical geometries: Recent developments. *Applied Thermal Engineering*, 120, pp.275–289. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.045>
- Zhang, X. and Fujii, M., 2016. Thermal resistance network analysis for heat transfer enhancement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, pp.1–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.015>

BAB 5

PEMBANGKITAN PANAS

INTERNAL DAN VARIABEL

KONDUKTIVITAS TERMAL

Oleh Haryanto

Bab 5 ini berfokus pada fenomena pembangkitan panas internal ($\dot{q}$) dan pengaruh variabel konduktivitas termal (k) terhadap distribusi suhu di dalam suatu material. Fokus utama pembahasan ini adalah bagaimana energi panas dihasilkan secara mandiri di dalam tubuh material, bukan sekadar lewat (transit) dari satu sisi ke sisi lainnya. Pemahaman mengenai variabel-variabel ini menjadi fondasi penting dalam menganalisis sistem termal yang beroperasi pada densitas energi tinggi.

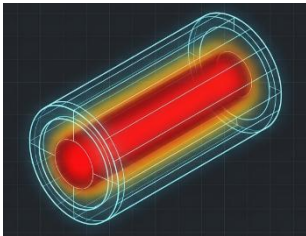


Gambar 5. 1: Perbandingan (a) Media Perantara Konduksi Biasa dan (b) Media dengan Sumber Pembangkit Panas Internal.

(Sumber: NotebookLM)

Berbeda dengan studi konduksi dasar yang umumnya memandang benda padat hanya sebagai media perantara aliran panas pasif, bab ini mengeksplorasi sistem yang secara aktif menghasilkan energi termal di dalam batas fisiknya sendiri (Gambar 5.1). Dalam studi sebelumnya, kita berasumsi bahwa panas masuk melalui satu permukaan dan keluar melalui permukaan lain. Namun, dalam kasus pembangkitan internal, benda padat tersebut bertindak sekaligus sebagai sumber energi.

Fenomena ini terjadi ketika energi dari bentuk lain—seperti energi listrik, kimia, atau nuklir—dikonversi menjadi energi termal melalui proses konversi energi volumetrik (Gambar 5.2). "Volumetrik" berarti pembangkitan panas terjadi di setiap satuan volume material secara merata (W/m^3). Karakteristik ini membuat perhitungan perpindahan panas menjadi lebih kompleks karena sumber panas terdistribusi di seluruh bagian benda.



Gambar 5.2
Ilustrasi Proses Pembangkitan Panas
Internal secara Volumetrik.

(Sumber: NotebookLM)

Salah satu dampak signifikan dari adanya pembangkitan internal adalah perubahan profil distribusi suhu. Jika pada konduksi biasa tanpa sumber panas profil suhu bersifat linier (garis lurus), maka pada sistem ini distribusi suhu tidak lagi linier. Suhu akan mengikuti profil kurva tertentu, biasanya berbentuk parabolik, yang sangat

bergantung pada geometri benda (apakah berbentuk dinding, silinder, atau bola) serta mekanisme pembangkitan panasnya.

Secara praktis, keberadaan sumber panas internal ini menciptakan gradien suhu yang unik di mana suhu tertinggi sering kali berada di titik pusat geometri. Fenomena ini sering ditemukan dalam aplikasi nyata seperti pemanasan Joule pada kabel listrik, reaksi eksotermik dalam reaktor kimia, hingga peluruhan radioaktif pada batang bahan bakar nuklir. Memahami distribusi ini sangat penting untuk mencegah kerusakan material akibat panas berlebih.

Maka, dalam bab ini akan dibahas bagaimana memodifikasi persamaan difusi panas untuk menyertakan suku pembangkitan ($\dot{q}$). Kita akan menganalisis bagaimana pengaruh konduktivitas termal yang bervariasi terhadap suhu dapat mengubah efisiensi pembuangan panas. Analisis ini bertujuan agar para insinyur dapat merancang sistem yang mampu mengelola suhu maksimum di titik pusat agar tidak melampaui batas integritas material yang diizinkan. Sebagai landasan pembahasan, terlebih dahulu diuraikan mekanisme pembangkitan panas internal.

5.1 Mekanisme Pembangkitan Panas Internal

Memahami bagaimana energi termal tercipta di dalam suatu struktur material merupakan langkah fundamental dalam analisis perpindahan panas tingkat lanjut. Berbeda dengan sistem konduksi pasif di mana panas hanya melintasi material dari suhu tinggi ke rendah, mekanisme pembangkitan panas internal melibatkan transformasi energi secara aktif yang mengubah

karakteristik distribusi suhu di dalam benda tersebut. Paragraf berikut akan membedah definisi serta landasan fisik yang menjadi alasan mengapa fenomena ini sangat vital dalam operasional teknologi industri saat ini.

5.1.1 Definisi dan Relevansi Volumetrik

Mekanisme pembangkitan panas ($\dot{q}$) secara harfiah adalah proses konversi energi non-termal—seperti energi listrik, kimia, atau nuklir—menjadi energi termal yang terjadi secara merata di dalam seluruh batas-batas fisik suatu materi. Berbeda dengan perpindahan panas permukaan seperti konveksi yang hanya terjadi di batas luar, fenomena ini bersifat internal dan didefinisikan sebagai laju pembangkitan energi per satuan volume dengan satuan Watt per meter kubik (W/m^3). Secara matematis, besarnya kerapatan fluks energi ini dirumuskan sebagai turunan total energi kinetik molekular terhadap volume sistem ($\dot{q} = dQ_g/dV$), yang menunjukkan bahwa setiap molekul di dalam benda tersebut berkontribusi secara serentak terhadap kenaikan suhu internal.

Pemahaman mengenai mekanisme ini sangat krusial bagi para insinyur dan perancang sistem termal dalam melakukan analisis teknik yang presisi agar sistem tidak mengalami kerusakan. Hal ini dikarenakan distribusi suhu di dalam suatu material sangat bergantung pada seberapa besar dan seberapa merata panas tersebut dibangkitkan di seluruh bagian volume benda, bukan hanya pada suhu lingkungannya. Tanpa identifikasi sumber panas yang tepat, prediksi distribusi akan menjadi tidak akurat, yang dapat berujung pada kesalahan fatal dalam memilih material atau sistem pendinginan yang sesuai.

Analisis mendalam ini harus dilakukan sejak tahap perancangan awal hingga fase evaluasi keamanan dari suatu komponen industri untuk mencegah kegagalan struktural. Mengapa hal ini begitu penting? Karena pada sistem dengan pembangkitan panas internal, suhu puncak sering kali terjadi di titik pusat yang paling jauh dari permukaan pendingin, sebuah lokasi yang sulit dipantau secara langsung oleh sensor luar. Jika laju pembangkitan panas tidak dikendalikan dengan perhitungan yang matang, suhu internal dapat melampaui titik leleh material atau memicu tegangan termal berlebih yang menyebabkan kehancuran struktur secara mendadak.

Aplikasi dari konsep volumetrik ini dapat ditemukan di lokasi-lokasi industri yang memiliki kepadatan energi tinggi, seperti inti reaktor atau komponen semikonduktor berkecepatan tinggi. Di tempat-tempat inilah parameter volumetrik menjadi satu-satunya cara untuk mengukur total beban panas yang harus dibuang ke lingkungan luar guna menjaga stabilitas operasional. Dengan memandang panas sebagai fenomena yang mengisi volume, perancang dapat menghitung "beban termal spesifik" yang menjadi dasar dalam menentukan dimensi fisik dari perangkat tersebut.

Kapanpun terjadi perubahan beban kerja, seperti peningkatan arus listrik atau percepatan reaksi kimia, analisis volumetrik ini harus diperbarui secara *real-time* atau melalui simulasi berkala. Hal ini untuk memastikan bahwa panas yang dibangkitkan tidak menumpuk lebih cepat daripada kemampuan material untuk memindahkannya ke permukaan. Dengan memantau variabel waktu dan volume secara bersamaan, risiko

terjadinya titik panas (*hotspot*) yang dapat merusak integritas perangkat dapat diminimalisir secara signifikan.

Secara operasional, para ahli menerapkan prinsip ini dengan menurunkan persamaan difusi panas yang mengintegrasikan nilai $\dot{q}$ ke dalam keseimbangan energi sistem secara menyeluruh. Bagaimana proses ini bekerja? Melalui penyelesaian persamaan diferensial tersebut, kita dapat memetakan distribusi suhu internal—apakah berbentuk parabolik pada silinder atau kurva distribusi lainnya—guna memastikan suhu maksimum tetap berada di bawah ambang batas aman. Pendekatan sistematis ini memungkinkan dilakukannya optimasi desain, seperti penambahan sirip pendingin atau pemilihan material dengan konduktivitas tinggi, untuk menjamin keselamatan kerja di lingkungan industri.

5.1.2 Sumber Energi Termal Volumetrik

Implementasi dari konsep pembangkitan panas internal ini ditemukan secara luas di berbagai sektor industri strategis, mulai dari pembangkit listrik tenaga nuklir hingga pabrik manufaktur kimia. Di industri proses, fenomena ini muncul secara dominan dalam reaktor kimia eksotermik di mana energi ikatan molekul dilepaskan sebagai panas ke seluruh campuran reaktan secara volumetrik. Sementara itu, di sektor ketenagalistrikan, pembangkitan panas terjadi pada kabel transmisi daya tinggi dan elemen pemanas akibat hambatan listrik yang memicu pelepasan panas Joule (I^2R). Keberadaan sumber panas di lokasi-lokasi kritis ini menuntut sistem manajemen termal yang mumpuni agar operasional industri tetap berjalan tanpa gangguan.

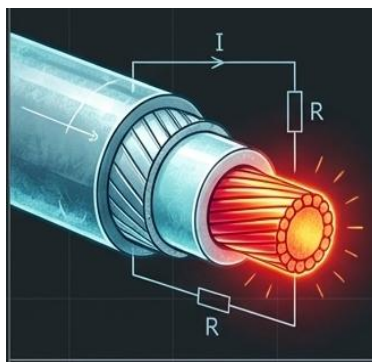
Pada skala energi yang lebih masif, mekanisme ini terlihat jelas pada batang bahan bakar nuklir di mana proses fisi menghasilkan densitas energi termal tertinggi di dunia teknik. Selain itu, aplikasi modern juga melibatkan penyerapan radiasi elektromagnetik, seperti penggunaan gelombang mikro dalam pengeringan material atau paparan sinar gamma, yang energinya terdisipasi menjadi panas saat menembus kedalaman material padat. Keanekaragaman sumber ini menunjukkan bahwa pembangkitan panas internal adalah fenomena multidisiplin yang tidak hanya melibatkan satu variabel, melainkan hasil dari berbagai mekanisme konversi energi yang terjadi secara serempak di seluruh struktur benda.

Pemahaman mendalam terhadap klasifikasi sumber energi ini sangat krusial bagi para praktisi teknik, karena setiap jenis mekanisme konversi menentukan nilai laju pembangkitan panas ($\dot{q}$) yang unik. Bagaimana cara mengelola panas ini sangat bergantung pada identifikasi sumbernya; misalnya, panas Joule dapat dikendalikan melalui pengaturan arus, sedangkan panas reaksi kimia memerlukan kontrol laju reaktan. Dengan memetakan sumber panas secara akurat, insinyur dapat memprediksi distribusi suhu puncak dengan presisi tinggi guna menjaga integritas struktural material dari risiko kelelahan termal atau pelelehan yang dapat membahayakan keselamatan kerja.

1. Pemanasan Ohmik (*Joule Heating*)

Pemanasan Ohmik terjadi akibat adanya hambatan listrik saat elektron mengalir melalui suatu konduktor. Ketika arus listrik (I) melewati material dengan hambatan (R), tabrakan antar elektron dan

atom-atom penyusun material menyebabkan konversi energi listrik menjadi energi kinetik termal. Laju pembangkitan panas ini dinyatakan dalam persamaan $\dot{q} = \frac{I^2 R}{V}$, yang menjadi prinsip dasar kerja elemen pemanas pada perangkat rumah tangga hingga risiko panas berlebih pada kabel transmisi daya tinggi.



Gambar 5.3 Pemanasan Ohmik

(Sumber: NotebookLM)

2. Reaksi Kimia Eksotermik

Dalam berbagai industri proses, pembangkitan panas sering kali bersumber dari reaksi kimia eksotermik yang berlangsung di dalam reaktor. Energi kimia yang tersimpan dalam ikatan molekul dilepaskan sebagai panas saat reaksi berlangsung, menyebar secara volumetrik ke seluruh campuran reaktan. Pengendalian laju pembangkitan panas ini sangat kritis guna mencegah terjadinya *thermal runaway*, di mana peningkatan suhu yang tak terkendali dapat

memicu ledakan atau kerusakan fatal pada unit proses.



Gambar 5. 4 Reaksi Kimia Eksotermik

(Sumber: NotebookLM)

3. Reaksi Nuklir

Pembangkitan panas pada batang bahan bakar nuklir merupakan salah satu contoh dengan densitas energi tertinggi di dunia teknik. Melalui proses fisi, inti atom uranium yang pecah melepaskan energi kinetik dalam jumlah besar yang segera terdisipasi menjadi panas di dalam bahan bakar padat tersebut. Dalam konteks ini, pengendalian nilai $\dot{q}$ bukan sekadar optimasi efisiensi, melainkan masalah keamanan tingkat tinggi untuk mencegah pelelehan teras reaktor (*meltdown*) yang dapat berdampak luas pada lingkungan.

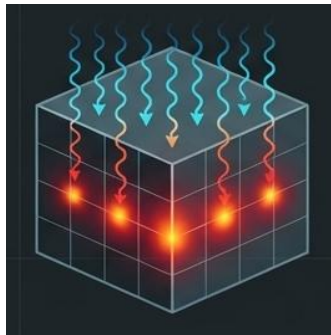


Gambar 5. 5 Reaksi Nuklir

(Sumber: NotebookLM)

4. Penyerapan Radiasi

Energi elektromagnetik (seperti microwave atau sinar gamma) yang menembus benda padat diserap dan diubah menjadi panas di sepanjang lintasannya.



Gambar 5. 6 Penyerapan Radiasi

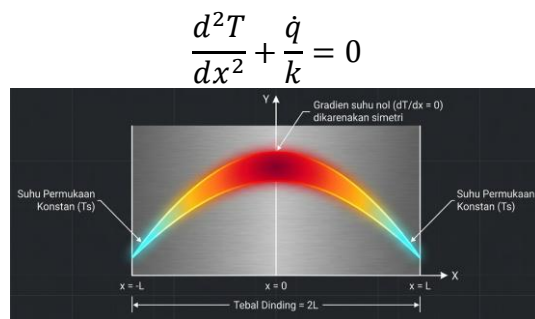
(Sumber: NotebookLM)

Untuk memahami secara kuantitatif bagaimana pembangkitan panas internal memengaruhi distribusi suhu dalam suatu material, diperlukan formulasi matematis yang

mampu menggambarkan keseimbangan energi secara rinci. Oleh karena itu, pada subbab berikut akan diturunkan persamaan distribusi suhu untuk kasus geometri sederhana sebagai dasar analisis lebih lanjut.

5.2 Penurunan Matematis pada Dinding Datar (*Plane Wall*)

Analisis perpindahan panas pada dinding datar dengan pembangkitan panas internal merupakan hal krusial dalam memahami distribusi suhu pada komponen mesin maupun elemen pemanas listrik. Mari kita tinjau sebuah dinding datar dengan tebal $2L$, di mana terjadi pembangkitan panas seragam $\dot{q}$ dan memiliki konduktivitas termal k yang konstan. Dalam kondisi tunak (*steady state*), aliran panas hanya ditinjau dalam satu dimensi (sumbu x), sehingga persamaan difusi panas dapat disederhanakan untuk menggambarkan keseimbangan antara panas yang dibangkitkan dengan panas yang dikonduksikan keluar dari material.



Gambar 5. 7 Distribusi Suhu Dinding Datar

(Sumber: NotebookLM)

5.2.1 Integrasi Umum

Untuk mendapatkan distribusi suhu di sepanjang dinding, kita harus menyelesaikan persamaan diferensial orde dua melalui proses integrasi bertahap. Integrasi pertama terhadap variabel x memberikan fungsi gradien suhu yang mengandung konstanta C_1 , yang mewakili kemiringan distribusi suhu pada titik tertentu.

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{\dot{q}}{k}x + C_1$$

Selanjutnya, dilakukan integrasi kedua untuk menghasilkan persamaan distribusi suhu umum yang mencakup konstanta C_2 . Kedua konstanta integrasi ini nantinya akan ditentukan berdasarkan kondisi batas fisik yang berlaku pada sistem dinding tersebut.

$$T(x) = -\frac{\dot{q}}{2k}x^2 + C_1x + C_2$$

5.2.2 Kondisi Batas Simetris dengan Suhu Permukaan Tetap

Pada kasus di mana kedua sisi permukaan dinding ($x = L$ dan $x = -L$) terpapar pada kondisi lingkungan yang identik sehingga suhunya tetap (T_s), maka distribusi suhu yang terbentuk akan bersifat simetris terhadap titik pusat. Berdasarkan sifat simetri ini, tidak ada aliran panas yang melewati garis tengah dinding, sehingga gradien suhu di titik pusat ($x = 0$) bernilai nol, yang secara matematis menetapkan nilai $C_1 = 0$.

$$T_s = -\frac{\dot{q}L^2}{2k} + C_2 \rightarrow C_2 = T_s + \frac{\dot{q}L^2}{2k}$$

Sehingga distribusi suhunya menjadi:

$$T(x) = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) + T_s$$

Melalui substitusi kondisi batas pada permukaan ($x = L$), kita dapat menentukan nilai C_2 dan menyusun kembali persamaan distribusi suhu ke dalam bentuk parabolik. Dalam profil ini, suhu tertinggi atau $T_{\max}$ akan selalu ditemukan tepat di tengah-tengah dinding ($x = 0$), karena titik tersebut merupakan lokasi yang paling jauh dari permukaan pendingin sekaligus menjadi puncak dari akumulasi panas yang dibangkitkan di dalam material. Suhu maksimum ($T_{\max}$) berada di pusat ($x = 0$):

$$T_{\max} = \frac{\dot{q}L^2}{2k} + T_s$$

5.2.3 Kondisi Batas Konveksi: Realitas Industri

Dalam aplikasi praktis di dunia industri, mengukur suhu permukaan benda padat (T_s) secara langsung sering kali sulit dilakukan atau bahkan tidak memungkinkan. Realitas yang lebih umum ditemui adalah kita hanya memiliki data mengenai suhu fluida di sekitarnya (T_∞) dan efektivitas aliran fluida tersebut dalam menyerap panas, yang dinyatakan melalui koefisien perpindahan panas konveksi (h). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang menghubungkan fenomena internal konduksi dengan fenomena eksternal konveksi untuk mendapatkan distribusi suhu yang akurat.

Pada kondisi tunak (*steady state*), prinsip kekekalan energi menyatakan bahwa seluruh panas yang dibangkitkan secara internal oleh sumber panas dalam dinding harus dibuang ke lingkungan melalui permukaan. Untuk analisis pada setengah tebal dinding (dari $x = 0$ hingga $x = L$), keseimbangan energi ini dirumuskan sebagai:

$$\dot{q}(L \cdot A) = h \cdot A(T_s - T_\infty)$$

Dari hubungan tersebut, kita dapat menentukan suhu permukaan (T_s) secara tidak langsung sebagai:

$$T_s = T_\infty + \frac{\dot{q}L}{h}$$

Substitusikan nilai T_s ini ke dalam persamaan suhu maksimum:

$$T_{max} = T_\infty + \dot{q}L\left(\frac{1}{h} + \frac{L}{2k}\right)$$



Gambar 5. 8 Batas Konveksi Fluida

(Sumber: NotebookLM)

Persamaan suhu maksimum di atas memberikan wawasan fisis yang krusial mengenai bagaimana panas dihantarkan dan dibuang. Terlihat jelas bahwa kenaikan suhu internal di atas suhu fluida dipengaruhi oleh akumulasi dua jenis hambatan termal yang bekerja secara seri. Pertama adalah hambatan konveksi ($1/h$) yang merepresentasikan resistansi perpindahan panas dari permukaan ke fluida, dan kedua adalah hambatan konduksi ($L/2k$) yang merepresentasikan resistansi di dalam material itu sendiri (Gambar 5.8).

Dalam optimasi desain termal industri, analisis ini membantu insinyur menentukan bagian mana yang perlu diperbaiki. Jika hambatan konveksi mendominasi, maka meningkatkan kecepatan fluida atau menggunakan sirip

(*fins*) adalah solusinya. Sebaliknya, jika hambatan konduksi yang dominan, maka penggunaan material dengan konduktivitas termal (k) yang lebih tinggi menjadi prioritas utama untuk menjaga suhu perangkat tetap dalam batas aman.

5.3 Sistem Radial: Silinder dan Bola

Analisis konduksi panas pada sistem radial memiliki karakteristik unik karena luas penampang aliran panas (A) tidak bersifat konstan, melainkan berubah secara linear atau kuadratik terhadap jari-jari (r). Hal ini mengakibatkan kerapatan fluks panas menjadi sangat tinggi di area pusat dan menurun seiring menjauhnya panas ke arah permukaan luar. Fenomena ini menciptakan tantangan teknis dalam manajemen termal, di mana akumulasi panas di pusat geometri sering kali menjadi titik kritis yang membatasi performa sistem.

Dalam konteks teknik, pemahaman mengenai sistem radial sangat krusial untuk mencegah kegagalan material akibat suhu berlebih (*overheating*). Karena panas harus menempuh jalur keluar melalui area yang semakin luas, gradien suhu yang terbentuk tidak bersifat linear seperti pada dinding datar. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan matematis khusus menggunakan koordinat silinder dan bola untuk memprediksi distribusi suhu secara akurat di dalam material tersebut.

5.3.1 Silinder Pejal (Kabel dan Batang Bahan Bakar)

Pada geometri silinder pejal (Gambar 5.9), seperti kabel listrik yang mengalirkan arus atau batang bahan bakar nuklir, panas dihasilkan secara seragam di seluruh volume

material. Persamaan difusi panas dalam koordinat silinder menunjukkan bahwa suhu merupakan fungsi dari jari-jari, di mana keseimbangan termal dicapai melalui pelepasan panas ke arah radial luar. Karena simetri geometri, titik pusat silinder ($r = 0$) memiliki gradien suhu nol ($dT/dr = 0$), yang berarti tidak ada aliran panas yang melewati sumbu pusat; semua panas yang dihasilkan "didorong" keluar menuju permukaan.

Persamaan difusi panas dalam koordinat silinder adalah:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$

Setelah integrasi dengan kondisi batas $dT/dr = 0$ di $r = 0$ dan $T(r_o) = T_s$, kita mendapatkan:

$$T(r) = T_s + \frac{\dot{q} r_o^2}{4k} \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right)$$



Gambar 5. 9 Sistem Radial Silinder Pejal

(Sumber: NotebookLM)

Setelah melalui proses integrasi dengan kondisi batas suhu permukaan (T_s) pada jari-jari luar (r_o), kita dapat memetakan distribusi suhu di dalam silinder yang membentuk profil parabolik. Suhu tertinggi atau *peak*

temperature terjadi tepat di sumbu pusat (T_0), yang besarnya sangat bergantung pada laju pembangkitan panas internal ($\dot{q}$) dan konduktivitas termal material (k). Pemodelan ini sangat penting bagi insinyur untuk memastikan bahwa suhu di pusat kabel atau batang bahan bakar tidak melampaui titik leleh materialnya.

Suhu di sumbu pusat ($r = 0$) adalah:

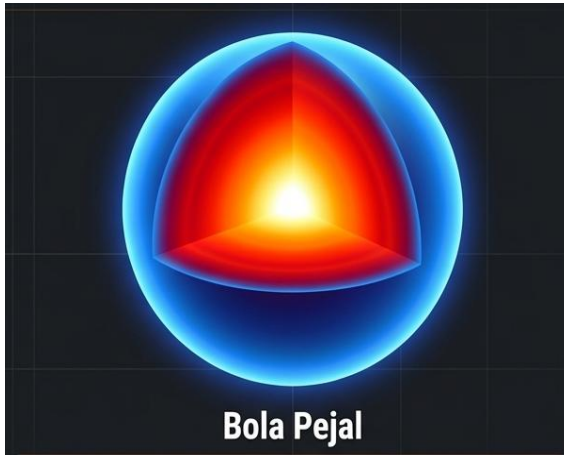
$$T_0 = T_s + \frac{\dot{q}r_0^2}{4k}$$

5.3.2 Geometri Bola

Pada geometri bola pejal (Gambar 5.10) dengan pembangkitan panas internal seragam, distribusi suhu mengikuti profil yang lebih curam dibandingkan silinder. Fenomena tersebut terjadi akibat bertambahnya ukuran bidang kontak perpindahan panas secara kuadratik terhadap jari-jari. Persamaan distribusi suhu menunjukkan bahwa suhu maksimum tetap terjadi di pusat bola ($r = 0$), dengan nilai yang sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara laju pembangkitan panas volumetrik dan konduktivitas termal material.

Sistem bola pejal menghadirkan skenario pembuangan panas yang paling menantang dibandingkan geometri lainnya. Hal ini terjadi karena rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat rendah, sehingga panas yang dihasilkan di dalam volume yang besar hanya memiliki area permukaan yang relatif sempit untuk berpindah ke lingkungan. Persamaan diferensial untuk geometri bola memperhitungkan perubahan luas penampang yang sebanding dengan r^2 , yang menyebabkan

penurunan suhu dari pusat ke permukaan terjadi secara lebih curam dibandingkan pada sistem silinder.



Gambar 5. 10 Sistem Radial Bola Pejal

(Sumber: NotebookLM)

Perbedaan distribusi suhu pada ketiga geometri ini (dinding, silinder, dan bola) sangat dipengaruhi oleh rasio luas permukaan terhadap volume. Pada geometri bola, rasio ini menyebabkan pelepasan panas menjadi paling terbatas dibandingkan silinder atau dinding datar dengan volume yang sama. Akibatnya, distribusi suhu pada bola cenderung lebih curam; akumulasi panas di titik pusat jauh lebih tinggi karena densitas panas volumetrik ($\dot{q}$) yang didefinisikan pada Subbab 5.2 terkonsentrasi pada area penampang yang semakin mengecil menuju pusat radial. Untuk bola pejal, pelepasan panas adalah yang paling sulit karena rasio luas permukaan terhadap volumenya paling kecil. Persamaannya adalah:

$$T(r) = T_s + \frac{\dot{q}r_0^2}{6k} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

Dalam aplikasinya, analisis geometri bola sering ditemui pada bola bahan bakar nuklir atau reaksi kimia eksotermik dalam wadah berbentuk bola. Karena efisiensi pendinginannya yang rendah di bagian inti, penentuan distribusi suhu radial menjadi langkah krusial dalam desain keamanan. Melalui penyelesaian persamaan difusi panas yang tepat, kita dapat memastikan bahwa gradien suhu yang terbentuk tidak menimbulkan tegangan termal yang mampu merusak struktur bola tersebut.

5.4 Variabel Konduktivitas Termal ($k = k(T)$)

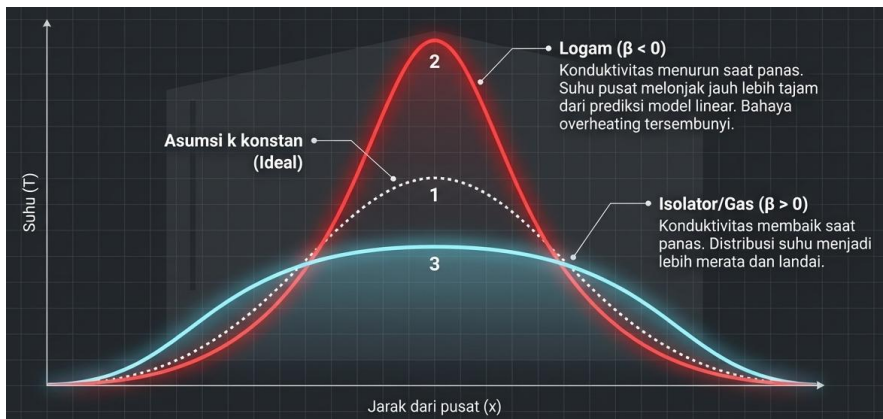
Selain pengaruh geometri yang telah dibahas sebelumnya, distribusi suhu dalam suatu material juga sangat dipengaruhi oleh sifat termofisik material itu sendiri. Salah satu parameter penting adalah konduktivitas termal (k), yang pada kondisi nyata tidak selalu konstan, melainkan dapat berubah terhadap suhu.

Dalam analisis perpindahan panas dasar, kita sering mengasumsikan bahwa konduktivitas termal (k) adalah nilai konstan. Namun, pada kenyataannya, asumsi ini hanyalah penyederhanaan linear yang mungkin tidak akurat untuk aplikasi dengan rentang suhu ekstrem. Konduktivitas termal sebenarnya merupakan fungsi dari suhu, di mana kemampuan material untuk menghantarkan energi berubah seiring dengan berubahnya tingkat agitasi termal pada struktur atom atau molekulnya.

$$k(T) = k_0(1 + \beta T)$$

Jika kita memasukkan persamaan ini ke dalam Hukum Fourier ($q'' = -k(T)dT/dx$), proses integrasi akan menghasilkan profil distribusi suhu yang unik. Tidak seperti model k konstan yang menghasilkan garis lurus (pada dinding datar), variasi k terhadap suhu menyebabkan distribusi suhu melengkung secara non-linear (Gambar 5.11), di mana arah kelengkungannya sangat bergantung pada nilai koefisien suhu β .

- **Logam ($\beta < 0$):** Konduktivitas menurun saat panas. Ini menyebabkan suhu pusat naik lebih cepat daripada prediksi model linear.
- **Isolator/Gas ($\beta > 0$):** Konduktivitas membaik saat panas, membantu meratakan distribusi suhu.



Gambar 5. 11 Variabel Konduktivitas Termal ($k = k(T)$)

(Sumber: NotebookLM)

Variasi konduktivitas termal ini tidak hanya memengaruhi bentuk distribusi suhu, tetapi juga berdampak langsung pada respon mekanis material. Gradien suhu yang

semakin tajam akibat perubahan sifat termal dapat memicu timbulnya tegangan internal yang signifikan.

5.5 Dampak Lanjutan: Tegangan Termal

Penting untuk dipahami bahwa profil distribusi suhu yang dihasilkan oleh konduktivitas termal variabel ($k(T)$), sebagaimana dibahas pada subbab sebelumnya, menjadi faktor penentu besarnya tegangan mekanis yang muncul. Jika nilai k menurun seiring kenaikan suhu (seperti pada banyak logam), maka gradien suhu di dalam material akan menjadi lebih ekstrem (curam). Gradien suhu yang tajam ini secara langsung memperparah perbedaan ekspansi termal antar lapisan material, yang pada akhirnya meningkatkan risiko kegagalan struktur akibat tegangan termal yang lebih tinggi dibandingkan jika k dianggap konstan.

Tegangan termal merupakan konsekuensi mekanis yang muncul akibat adanya gradien suhu yang signifikan di dalam suatu struktur material. Fenomena ini terjadi karena setiap lapisan material memiliki laju ekspansi termal yang berbeda-beda mengikuti distribusi suhu internalnya. Ketika suatu objek mengalami pemanasan atau pendinginan yang tidak seragam, bagian material yang lebih panas akan berusaha memuai lebih besar dibandingkan bagian yang lebih dingin. Karena setiap bagian tersebut saling terikat secara struktural, perbedaan ekspansi ini tidak dapat berlangsung bebas, sehingga memicu timbulnya distribusi tegangan internal yang kompleks di seluruh volume benda tersebut.

Secara spesifik, perbedaan ekspansi ini menciptakan kontradiksi mekanis antara bagian dalam dan bagian luar

material. Bagian pusat yang memiliki suhu lebih tinggi akan cenderung memuai dan mendorong bagian luar, namun karena tertahan oleh lapisan permukaan yang lebih dingin dan kaku, bagian pusat tersebut justru mengalami **tegangan tekan** (*compressive stress*). Sebaliknya, lapisan permukaan dipaksa untuk meregang mengikuti pemuaian bagian dalam, sehingga menciptakan **tegangan tarik** (*tensile stress*) yang kuat pada kulit luar material.



Gambar 5. 12 Dampak Fatal Tegangan Termal

(Sumber: NotebookLM)

Pada material yang bersifat getas seperti keramik atau elemen bahan bakar nuklir, ketidakseimbangan tegangan ini sangat berbahaya karena material tersebut memiliki ketahanan yang rendah terhadap gaya tarik. Jika tegangan tarik di permukaan melampaui batas kekuatan kohesif material, maka akan muncul retakan mikro yang menjalar dengan cepat secara mendadak. Fenomena

kegagalan struktural yang dipicu oleh perubahan suhu ekstrem ini dikenal sebagai *thermal shocking*, yang sering kali berujung pada kerusakan permanen atau hancurnya material secara total, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.12.

5.6 Perbandingan Geometri

Setelah mempelajari berbagai bentuk geometri dalam laju pembangkitan panas internal, dapat disimpulkan bahwa distribusi suhu sangat bergantung pada bagaimana luas permukaan pembuangan panas berinteraksi dengan volume benda. Perbedaan utama antara geometri bidang datar, silinder, dan bola terletak pada **laju perubahan luas penampang** terhadap jarak dari pusat panas.

Pada **Dinding Datar**, luas penampang aliran panas bersifat konstan ($A = \text{tetap}$), sehingga gradien suhunya berubah secara linear sederhana. Hal ini menjadikannya jalur pembuangan panas yang paling efisien dalam konteks desain satu dimensi. Sebaliknya, pada **Sistem Radial** (Silinder dan Bola), luas pembuangan panas terus meningkat seiring bertambahnya jarak dari pusat (r). Hal ini mengakibatkan panas di bagian pusat cenderung lebih sulit "lepas" dibandingkan pada dinding datar, meskipun luas permukaannya membesar di bagian luar.

Secara matematis, perbedaan penyebut ($2k$, $4k$, $6k$) menunjukkan bahwa untuk parameter $\dot{q}$, k , dan dimensi luar yang sama, **Bola Pejal** akan menghasilkan kenaikan suhu pusat yang paling rendah dibandingkan silinder dan dinding datar mengingat proporsi luas permukaan dibandingkan volumenya merupakan yang tertinggi. Namun, dalam

konteks keamanan industri, bola pejal tetap dianggap kritis karena seringkali menangani beban termal yang jauh lebih masif pada volume yang kompak. Tabel 5.1 merupakan ringkasan perbandingan parameter termal untuk ketiga geometri tersebut.

Tabel 5. 1 Matriks Geometri Ideal

Geometri	Kenaikan Suhu Maks (ΔT)	Karakteristik Utama	Aplikasi Tipikal
Dinding Datar	$\dot{q}L^2/2k$	Jalur pembuangan panas linear; paling efisien secara struktural.	Isolasi bangunan, pelat pendingin elektronik.
Silinder Pejal	$\dot{q}r_o^2/4k$	Luas buang meningkat secara linear terhadap radius ($2\pi rL$).	Kabel transmisi listrik, pipa distribusi uap.
Bola Pejal	$\dot{q}r_o^2/6k$	Akumulasi panas pusat tertinggi; luas buang meningkat kuadratik ($4\pi r^2$).	Elemen bahan bakar nuklir, reaktor kimia sferis.

Konsep-konsep yang telah dirangkum pada bagian ini menjadi dasar dalam menganalisis berbagai permasalahan nyata di bidang rekayasa. Pada subbab berikut, akan disajikan beberapa studi kasus untuk menunjukkan bagaimana prinsip-prinsip tersebut diterapkan dalam praktik industri.

5.7 Aplikasi Industri pembangkitan energi internal dan dinamika sifat material

Setelah mempelajari dasar matematis dari distribusi suhu, subbab ini menyajikan bagaimana prinsip-prinsip tersebut diterapkan dalam skenario rekayasa nyata, yang dibagi menjadi aspek pembangkitan energi internal dan dinamika sifat material.

5.7.1 Aplikasi Pembangkitan Panas Internal ($\dot{q}$)

Pembangkitan panas internal sering kali menjadi tantangan utama dalam desain sistem yang melibatkan kepadatan energi tinggi. Fokus utama analisis ini adalah mencegah terjadinya akumulasi suhu di pusat material.

Dalam menyelesaikan masalah pembangkitan panas internal di lapangan, langkah-langkah berikut biasanya digunakan:

1. **Identifikasi Geometri:** Menentukan apakah sistem lebih mendekati bentuk dinding datar (plat), silinder (kabel/pipa), atau bola (reaktor kimia).
2. **Penentuan Laju Pembangkitan Volumetrik ($\dot{q}$):** Menghitung berapa energi yang dikonversi per satuan volume (W/m^3). Misalnya, pada elemen pemanas listrik: $\dot{q} = \frac{I^2 R}{V}$.
3. **Kondisi Batas:** Menentukan suhu permukaan (T_s) atau suhu fluida pendingin (T_∞) dan koefisien konveksi (h).
4. **Prediksi Suhu Maksimum ($T_{\max}$):** Ini adalah langkah paling kritis untuk memastikan material tidak melewati titik leleh atau batas keamanan termal.

Kasus A: Aplikasi pada Elemen Bahan Bakar Nuklir

Kasus A menunjukkan betapa krusialnya pemahaman mengenai distribusi suhu dalam elemen bahan bakar nuklir berbentuk silinder yang mengalami pembangkitan panas internal secara volumetrik. Melalui penerapan hukum konduksi dengan sumber panas seragam, terlihat bahwa suhu tertinggi secara konsisten terpusat di inti batang (T_0), di mana akumulasi energi fisi paling sulit untuk didisipasikan ke media pendingin di permukaan. Berdasarkan perhitungan skenario dengan laju bangkitan panas sebesar $2 \times 10^8 \text{ W/m}^3$, suhu pusat batang mencapai $416,67^\circ\text{C}$, yang secara signifikan masih berada jauh di bawah ambang batas kritis titik leleh uranium dioksida sebesar 2.800°C . Hasil ini memberikan margin keamanan termal yang luas bagi para insinyur reaktor, memastikan bahwa struktur bahan bakar tetap solid dan risiko kebocoran radioaktif akibat pelelehan material (*meltdown*) dapat dimitigasi secara efektif selama sistem pendinginan konveksi di permukaan batang tetap terjaga pada suhu 250°C .

Energi termal pada reaktor nuklir diproduksi melalui proses fisi yang berlangsung di dalam elemen bakar berbentuk silinder (*fuel rods*).

- **Tantangan:** Batang bahan bakar menghasilkan panas yang sangat tinggi. Jika pendinginan (konveksi) gagal, suhu di pusat silinder (T_0) akan meningkat drastis.
- **Analisis:** Menggunakan rumus distribusi suhu silinder, insinyur harus memastikan bahwa $T_{\max}$ tetap berada di bawah titik leleh uranium dioksida (sekitar 2.800°C) untuk mencegah kebocoran radioaktif atau *meltdown*.

- **Skenario:** Sebuah batang bahan bakar nuklir berbentuk silinder padat dengan radius (r_0) 10 mm memiliki konduktivitas termal $k = 30 \text{ W/m.K}$. Akibat reaksi fisi, panas dibangkitkan secara seragam di seluruh volume batang sebesar $\dot{q} = 2 \times 10^8 \text{ W/m}^3$. Batang tersebut didinginkan oleh air yang mengalir di permukaannya, sehingga suhu permukaan batang (T_s) terjaga konstan pada 250°C .
- **Pertanyaan:** Hitunglah suhu di pusat batang bahan bakar (T_0). Jika titik leleh material bahan bakar adalah 2.800°C , apakah desain ini aman dari risiko pelelehan (*meltdown*)?
- **Penyelesaian:**

- **Langkah 1:** Mengidentifikasi Geometri dan Rumus

Untuk geometri silinder dengan pembangkitan panas internal, suhu maksimum terjadi di pusat ($r = 0$) dan dihitung dengan persamaan:

$$T_0 = T_s + \frac{\dot{q}r_0^2}{4k}$$

- **Langkah 2:** Menghitung T_0

$$T_0 = T_s + \frac{\dot{q}r_0^2}{4k}$$

$$T_0 = 250 + \frac{2 \times 10^8 (0,01)^2}{4 \times 30}$$

$$T_0 = 250 + \frac{20.000}{120}$$

$$T_0 = 250 + 166,67$$

$$T_0 = 416,67^\circ\text{C}$$

○ **Langkah 3:** Analisis dan Kesimpulan

1. Suhu di pusat batang bahan bakar adalah **416,67°C**.
2. **Analisis Keamanan:** Karena suhu pusat (416,67°C) jauh di bawah titik leleh material (2.800°C), maka desain batang bahan bakar ini berada dalam kondisi **sangat aman** di bawah parameter operasional tersebut.

Catatan:

Dalam praktiknya, insinyur nuklir harus memperhitungkan "faktor ketidakpastian". Meskipun secara hitungan suhu pusat hanya 416,67°C, jika aliran pendingin terhambat (nilai T_s naik), suhu pusat bisa melonjak drastis dalam waktu singkat. Inilah alasan mengapa pemantauan gradien suhu pada silinder sangat krusial di industri nuklir.

Kasus B: Sistem Pendingin Perangkat Elektronik

Kasus B menyoroti pentingnya manajemen termal pada perangkat elektronika daya, di mana aliran arus listrik melalui semikonduktor memicu pemanasan Joule yang termanifestasi sebagai pembangkitan panas internal. Dalam skenario ini, sebuah chip mikroprosesor dimodelkan sebagai dinding datar yang harus menjaga integritas struktural dan performanya dengan memastikan suhu internal tidak melampaui ambang batas operasional. Berdasarkan kalkulasi termal yang dilakukan, integrasi sistem pendingin yang terdiri dari *heat sink* dan kipas terbukti sangat efektif dalam menjaga suhu permukaan tetap rendah, sehingga suhu maksimum di pusat chip hanya mencapai 45,133°C. Hasil ini menunjukkan margin keamanan yang sangat luas dibandingkan dengan batas *thermal throttling* sebesar 85°C,

yang menegaskan bahwa desain sistem pendingin tersebut tidak hanya memadai untuk mencegah kerusakan permanen, tetapi juga optimal dalam menjamin stabilitas performa komputasi jangka panjang. Pada mikroprosesor atau komponen elektronika daya (power electronics), arus listrik yang melewati semikonduktor menghasilkan panas (pemanasan Joule).

- **Aplikasi:** Chip sering dianggap sebagai dinding datar tipis dengan pembangkitan panas.
- **Perhitungan:** Perhitungan digunakan untuk menentukan seberapa besar *heat sink* (sirip pendingin) yang dibutuhkan agar suhu internal chip tidak melebihi batas operasional (biasanya $< 85^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$), yang dapat menyebabkan kerusakan permanen atau penurunan performa.
- **Skenario:** Sebuah chip prosesor berbentuk silikon datar dengan ketebalan $2L = 4 \text{ mm}$ (sehingga $L = 2 \text{ mm}$ atau $0,002 \text{ m}$) memiliki konduktivitas termal $k = 150 \text{ W/m.K}$. Chip ini membangkitkan panas sebesar $\dot{q} = 10^7 \text{ W/m}^3$ selama beroperasi penuh. Untuk mencegah kerusakan, permukaan chip didinginkan menggunakan kombinasi *heat sink* dan kipas, sehingga suhu permukaan chip (T_s) terjaga pada 45°C .
- **Pertanyaan:** Hitunglah suhu maksimum ($T_{\max}$) yang terjadi di titik tengah (pusat) chip tersebut. Jika pabrikan menyatakan bahwa suhu internal silikon tidak boleh melebihi 85°C agar tidak terjadi *thermal throttling* (penurunan performa otomatis), apakah sistem pendingin ini memadai?

- **Penyelesaian:**

- **Langkah 1:** Mengidentifikasi Geometri dan Rumus

Chip ini dimodelkan sebagai **dinding datar** dengan pembangkitan panas internal. Suhu tertinggi terletak di bidang tengah ($x = 0$):

$$T_{max} = T_s + \frac{\dot{q}L^2}{2k}$$

- **Langkah 2:** Menghitung T_{max}

$$T_{max} = T_s + \frac{\dot{q}L^2}{2k}$$

$$T_{max} = 45 + \frac{10^7(0,002)^2}{2 \times 150}$$

$$T_{max} = 45 + \frac{40}{300}$$

$$T_{max} = 45 + 0,133$$

$$T_{max} = 45,133^\circ\text{C}$$

- **Langkah 3:** Analisis dan Kesimpulan

1. Suhu maksimum di dalam chip adalah **45,133°C**.
2. **Evaluasi Performa:** Karena suhu maksimum 45,133°C) jauh di bawah ambang batas 85°C, maka sistem pendingin ini **sangat memadai** dan chip dapat bekerja pada performa maksimal tanpa risiko gangguan termal.

Catatan:

Mungkin kalian bertanya: "*Mengapa kenaikan suhunya sangat kecil (hanya 0,133°C)?*"

Hal ini dikarenakan:

- **Konduktivitas Silikon Tinggi:** Silikon adalah penghantar panas yang sangat baik ($k = 150 \text{ W/m.K}$).
- **Dimensi Tipis:** Karena chip sangat tipis (L kecil), panas sangat mudah merambat keluar menuju permukaan.

Dalam dunia nyata, tantangan terbesar bagi insinyur bukanlah membuang panas dari *dalam* ke *permukaan* chip, melainkan bagaimana membuang panas dari **permukaan chip ke udara luar** (menjaga T_s tetap rendah). Jika kipas mati, T_s akan melonjak drastis, dan secara otomatis $T_{\max}$ juga akan ikut naik melampaui batas aman.

Kasus C: Industri Kimia (Reaktor Eksotermik)

Kasus C menyoroiti risiko kritis dalam operasional reaktor kimia tipe *batch* berbentuk bola, di mana reaksi eksotermik di seluruh volume cairan memicu pembangkitan panas internal yang sangat besar. Fenomena ini menciptakan gradien suhu non-linear yang puncaknya berada tepat di pusat reaktor ($T_{\max}$), menjauh dari jangkauan sistem pendingin luar. Berdasarkan hasil perhitungan termodinamika, suhu di titik pusat mencapai $268,33^\circ\text{C}$, yang secara drastis melampaui ambang batas aman operasional sebesar 100°C . Ketidakmampuan sistem untuk membuang panas secepat laju pembentukannya ini mengindikasikan terjadinya akumulasi energi termal yang tidak terkendali, sehingga reaktor berada dalam kondisi sangat berbahaya dan berisiko tinggi mengalami *thermal runaway* atau ledakan hebat jika tidak segera dilakukan intervensi pada kapasitas pendinginan atau pengurangan konsentrasi reaktan.

Dalam reaktor kimia tipe *batch* yang berbentuk bola atau silinder, reaksi kimia yang terjadi di seluruh volume cairan dapat bersifat eksotermik (melepas panas).

- **Risiko:** Jika laju pembangkitan panas ($\dot{q}$) lebih besar daripada laju pembuangan panas melalui dinding reaktor, akan terjadi fenomena *thermal runaway*.
- **Aplikasi Perhitungan:** Insinyur menggunakan model variabel konduktivitas termal untuk memprediksi gradien suhu di dalam fluida yang kental, guna menentukan kecepatan pengadukan dan kapasitas sistem pendingin jaket (cooling jacket).
- **Skenario:** Sebuah reaktor kimia berbentuk bola dengan radius luar $r_0 = 0,5$ m digunakan untuk proses pencampuran zat yang bersifat eksotermik (menghasilkan panas). Konduktivitas termal campuran di dalam reaktor dianggap konstan sebesar $k = 2$ W/m.K. Akibat reaksi kimia, panas dibangkitkan secara seragam sebesar $\dot{q} = 10^4$ W/m³. Untuk menjaga keamanan, bagian luar reaktor dilengkapi dengan jaket pendingin yang menjaga suhu dinding permukaan reaktor (T_s) tetap pada 60°C.
- **Pertanyaan:** Hitunglah suhu maksimum ($T_{\max}$) di pusat reaktor bola tersebut. Jika campuran kimia tersebut akan meledak atau mengalami *thermal runaway* apabila suhunya melebihi 100°C, apakah operasi reaktor ini aman?
- **Penyelesaian:**
 - **Langkah 1:** Mengidentifikasi Geometri dan Rumus

Untuk geometri **bola** dengan pembangkitan panas internal, suhu maksimum terjadi di titik pusat ($r = 0$) dengan rumus:

$$T_{max} = T_s + \frac{\dot{q}r_0^2}{6k}$$

(Perhatikan pembagi $6k$ untuk bola, berbeda dengan $4k$ untuk silinder atau $2k$ untuk dinding datar).

- **Langkah 2:** Menghitung T_{max}

$$T_{max} = T_s + \frac{\dot{q}r_0^2}{6k}$$

$$T_{max} = 60 + \frac{10^4 \times (0,5)^2}{6 \times 2}$$

$$T_{max} = 60 + \frac{10.000 \times 0,25}{12}$$

$$T_{max} = 60 + 208,33$$

$$T_{max} = 268,33^\circ\text{C}$$

- **Langkah 3:** Analisis dan Kesimpulan

1. Suhu di pusat reaktor adalah **268,33°C**.
2. **Evaluasi Keamanan:** Karena suhu pusat (268,33°C) jauh melampaui batas aman ledakan (100°C), maka kondisi operasi ini **Sangat Berbahaya**.

Rekomendasi Teknik:

Dalam situasi nyata, jika seorang mahasiswa/insinyur menemukan hasil hitungan seperti ini, tindakan yang harus diambil adalah:

- **Meningkatkan Pendinginan:** Menurunkan suhu permukaan (T_s) dengan cairan pendingin yang lebih dingin.

- **Memperkecil Ukuran Reaktor:** Menggunakan beberapa reaktor kecil alih-alih satu reaktor besar (memperkecil r_0 sangat efektif karena pangkat dua).
- **Menambah Pengadukan:** Meningkatkan konduktivitas termal efektif (k) dengan alat pengaduk agar panas lebih cepat merambat ke dinding.

Catatan:

Contoh ini menunjukkan mengapa geometri bola paling sulit membuang panas dibandingkan dinding datar atau silinder (karena pembagiannya adalah $6k$), sehingga pengendalian suhu pada reaktor bola harus jauh lebih ketat.

Kasus D: Distribusi Kabel Listrik Bawah Tanah

Kasus D meninjau aspek keamanan termal pada kabel transmisi daya bawah tanah, di mana kabel tembaga mengalami pembangkitan panas internal akibat hambatan listrik saat menyalurkan arus tinggi. Dalam skenario ini, tanah di sekeliling kabel berperan sebagai isolator alami yang memiliki konduktivitas termal rendah, sehingga panas yang dihasilkan sulit dibuang dan memicu kenaikan suhu permukaan kabel hingga mencapai 70°C . Melalui analisis distribusi suhu silinder, ditemukan bahwa perbedaan suhu antara pusat kabel dan permukaannya sangatlah kecil, yakni hanya sekitar $0,039^{\circ}\text{C}$, yang menunjukkan efisiensi konduksi internal tembaga yang sangat tinggi. Meskipun suhu maksimum di pusat kabel sebesar $70,039^{\circ}\text{C}$ masih berada di bawah ambang batas leleh isolasi plastik (75°C), margin keamanan yang tersedia sangatlah tipis, sehingga diperlukan pemantauan ketat terhadap beban arus (ampacity) guna mencegah terjadinya kegagalan isolasi yang berpotensi memicu hubungan arus pendek. Kabel transmisi daya tinggi

yang tertanam di bawah tanah membangkitkan panas akibat hambatan listrik.

- **Permasalahan:** Tanah bertindak sebagai isolator dengan konduktivitas termal (k) yang rendah.
- **Solusi Teknis:** Dengan menghitung distribusi silinder, ditentukan arus maksimal (ampacity) yang boleh dialirkan agar isolasi plastik kabel tidak meleleh, yang dapat menyebabkan hubungan arus pendek (korsleting).
- **Skenario:** Sebuah kabel listrik tembaga tunggal dengan radius $r_0 = 20 \text{ mm}$ ($0,02 \text{ m}$) ditanam di dalam tanah. Kabel tersebut memiliki hambatan listrik yang menyebabkan pembangkitan panas sebesar $\dot{q} = 1,5 \times 10^5 \text{ W/m}^3$. Tanah di sekeliling kabel berfungsi sebagai media pendingin, namun karena tanah memiliki konduktivitas termal yang rendah, suhu di permukaan kulit kabel (T_s) meningkat hingga mencapai 70°C . Konduktivitas termal kabel tembaga adalah $k = 380 \text{ W/m.K}$.
- **Pertanyaan:** Hitunglah perbedaan suhu antara pusat kabel (T_0) dan permukaan kabel (T_s). Jika isolasi plastik di dalam kabel akan rusak (meleleh) pada suhu 75°C , apakah pengoperasian kabel dengan beban arus ini aman?
- **Penyelesaian:**
 - **Langkah 1:** Mengidentifikasi Geometri dan Rumus

Kabel dimodelkan sebagai **silinder panjang** dengan pembangkitan panas internal. Selisih suhu

antara pusat dan permukaan dihitung dengan rumus:

$$\Delta T = T_0 - T_s = \frac{\dot{q}r_0^2}{4k}$$

○ **Langkah 2: Menghitung T_0**

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_0 - T_s = \frac{\dot{q}r_0^2}{4k} \\ \Delta T &= \frac{(1,5 \times 10^4) \times (0,02)^2}{4 \times 380} \\ \Delta T &= \frac{150.000 \times 0,0004}{1.520} \\ \Delta T &\approx 0,039^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Maka, suhu di pusat kabel adalah:

$$\begin{aligned}T_0 &= \Delta T + T_s \\ T_0 &= 0,039 + 70 = 70,039^\circ\text{C}\end{aligned}$$

○ **Langkah 3: Analisis dan Kesimpulan**

1. Perbedaan suhu antara pusat dan permukaan kabel sangat kecil, yaitu sekitar **0,039°C**.
2. **Evaluasi Keamanan:** Karena suhu maksimum (70,039°C) masih di bawah titik leleh isolasi (75°C), maka pengoperasian kabel ini **aman**. Namun, margin keamanannya sangat tipis (hanya selisih sekitar 5°C).

Catatan:

Dari kasus ini, kita belajar dua hal penting dalam praktik lapangan:

1. **Material Konduktor:** Pada logam dengan konduktivitas sangat tinggi seperti tembaga, gradien suhu internal hampir tidak ada (suhu di dalam dan di permukaan kabel hampir sama).

2. **Masalah Utama adalah Lingkungan:** Tantangan terbesar kabel bawah tanah bukanlah panas yang terjebak di *dalam* tembaga, melainkan bagaimana panas tersebut dibuang ke *tanah*. Jika tanah di sekitar kabel kering (konduktivitas tanah menurun), maka T_s akan melonjak melewati 75°C dan merusak isolasi kabel, meskipun arus yang mengalir tetap sama. Inilah alasan mengapa penanaman kabel sering disertai dengan material pengisi (*backfill*) yang memiliki konduktivitas termal baik.

5.7.2 Aplikasi Variabel Konduktivitas Termal ($k(T)$)

Dalam melakukan analisis termal di mana konduktivitas termal (k) tidak lagi dianggap konstan (karena dipengaruhi oleh suhu), prosedur perhitungannya menjadi lebih kompleks dibandingkan kasus standar. Hal ini disebabkan oleh sifat persamaan yang menjadi non-linear. Berikut adalah prosedur umum langkah-demi-langkah untuk menghitung distribusi suhu dengan variabel konduktivitas termal:

1. **Identifikasi Hubungan Fungsi $k(T)$:** Langkah pertama adalah menentukan bagaimana konduktivitas termal berubah terhadap suhu. Model yang paling umum digunakan dalam teknik adalah hubungan linear:

$$k(T) = k_0(1 + \beta T)$$

2. **Substitusi ke dalam Persamaan Diferensial Konduksi:** Gunakan Hukum Fourier dalam bentuk umum untuk kondisi tunak (*steady state*). Untuk satu dimensi (misalnya pada dinding datar), persamaannya adalah:

$$\frac{d}{dx} \left(k(T) \frac{dT}{dx} \right) + \dot{q} = 0$$

Substitusikan fungsi $k(T) = k_0(1 + \beta T)$ ke dalam persamaan di atas.

3. Integrasi Persamaan (Penyelesaian Matematis):

Untuk mendapatkan distribusi, Anda harus melakukan integrasi. Jika tidak ada pembangkitan panas ($\dot{q} = 0$), persamaannya menjadi:

$$\int k(T) dT = \int C_1 dx$$
$$\int k_0 (1 + \beta T) dT = C_1 x + C_2$$

Hasil integrasi ini akan menghasilkan persamaan kuadrat untuk T , yang menunjukkan bahwa distribusi tidak lagi berbentuk garis lurus (linear), melainkan melengkung (kurvilinear).

4. Penerapan Kondisi Batas (*Boundary Conditions*):

Tentukan nilai konstanta integrasi (C_1 dan C_2) dengan memasukkan nilai yang diketahui pada batas sistem, misalnya:

- Suhu permukaan kiri ($x = 0$) adalah T_1 .
- Suhu permukaan kanan ($x = L$) adalah T_2 .

5. Perhitungan Konduktivitas Rata-rata (k_{avg}):

Dalam praktiknya, untuk menyederhanakan perhitungan tanpa kehilangan terlalu banyak akurasi, insinyur sering menggunakan nilai konduktivitas rata-rata:

$$k_{avg} = \frac{k_{T_1} + k_{T_2}}{2} = k_0 \left(1 + \beta \frac{T_1 + T_2}{2} \right)$$

Setelah k_{avg} didapat, laju perpindahan panas (q) dapat dihitung menggunakan hukum Fourier standar:

$$q = k_{avg} \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L}$$

6. **Evaluasi Gradien dan Tegangan Termal:** Langkah terakhir adalah mengevaluasi kemiringan kurva suhu (dT/dx).

- Jika β **negatif** (logam), kurva akan melengkung ke atas (cekung), yang berarti gradien suhu lebih tajam di sisi yang lebih panas.
- Jika β **positif** (isolator/gas), kurva akan melengkung ke bawah (cembung), yang berarti gradien suhu lebih landai di sisi yang panas.

Pemahaman gradien ini penting untuk menghitung **tegangan termal** guna mencegah retak pada material.

Berbeda dengan kasus konduktivitas konstan, pada bagian ini kita meninjau material yang sifat penghantaran panasnya berubah seiring perubahan suhu. Hal ini sangat krusial pada aplikasi dengan gradien suhu ekstrem seperti pada mesin jet, reaktor kimia suhu tinggi, atau sistem kriogenik.

Kasus E: Dinding Tungku Peleburan Logam (Koefisien β Negatif)

Fenomena kritis pada operasional tungku peleburan logam, di mana material dinding penyusunnya memiliki karakteristik konduktivitas termal yang menurun drastis seiring dengan meningkatnya suhu operasional (koefisien β negatif). Kondisi ini menciptakan tantangan teknis yang signifikan karena panas yang dihasilkan di dalam tungku menjadi lebih sulit untuk dihantarkan keluar melalui dinding

dibandingkan dengan material standar, sehingga menyebabkan penumpukan energi termal yang membuat distribusi di dalam dinding melengkung secara tidak linear. Akibatnya, suhu pada sisi internal dinding tungku melonjak jauh melampaui prediksi perhitungan linear konvensional, yang jika tidak diperhitungkan dalam desain teknik, dapat memicu kegagalan struktural dini atau pelelehan pada lapisan refraktori akibat beban termal yang melebihi ambang batas material.

Pada industri metalurgi, dinding tungku sering menggunakan material yang konduktivitas termalnya menurun saat suhu meningkat (seperti beberapa jenis logam atau refraktori khusus).

- **Tantangan:** Karena k menurun saat panas, panas menjadi lebih sulit keluar dari sisi dalam tungku, menyebabkan distribusi melengkung ke atas (cekung) dan suhu internal menjadi lebih tinggi dari prediksi model linear.
- **Skenario:** Sebuah dinding datar tungku setebal $L = 0,2$ m memiliki konduktivitas termal yang mengikuti fungsi $k(T) = k_0(1 + \beta T)$, dengan $k_0 = 50$ W/m.K dan $\beta = -0,001$ K⁻¹. Dimana distribusi suhu pada material tersebut memiliki nilai 1000°C pada sisi permukaan dalam (T_1) dan 200°C pada sisi permukaan luar (T_2).
- **Pertanyaan:** Hitunglah nilai konduktivitas rata-rata (k_{avg}) dan laju perpindahan panas per satuan luas (q'') melalui dinding tersebut.
- **Penyelesaian:**
 - **Langkah 1:** Menghitung k_{avg}

$$k_{avg} = k_0 \left(1 + \beta \frac{T_1 + T_2}{2} \right)$$

$$k_{avg} = 50(1 + (-0,001) \frac{1000 + 200}{2}) = 50(1 - 0,6)$$

$$= 20 \text{ W/m.K}$$

- **Langkah 2:** Menghitung Laju Perpindahan Panas (q'')

$$q'' = k_{avg} \frac{T_1 - T_2}{L} = 20 \frac{1000 - 200}{0,2} = 20 \times 4.000$$

$$= 80.000 \text{ W/m}^2$$

- **Analisis:** Penggunaan k_0 (50 W/m.K) tanpa mempertimbangkan variabel suhu akan menyebabkan kesalahan prediksi sebesar 150%. Ini membuktikan bahwa pada suhu tinggi, penurunan kemampuan material menghantar panas wajib diperhitungkan.

Kasus F: Isolasi Pipa Gas Alam Cair/LNG (Koefisien β Positif)

Pentingnya mempertimbangkan variabel konduktivitas termal dalam aplikasi kriogenik, khususnya pada sistem isolasi pipa gas alam cair (LNG) yang beroperasi pada suhu jauh di bawah titik beku. Dalam skenario ini, material isolasi memiliki koefisien β positif, yang secara mekanis berarti kemampuan material dalam menghantarkan panas justru menurun seiring dengan turunnya suhu operasional. Fenomena ini memberikan keuntungan teknis yang signifikan; ketika sisi dalam isolasi bersentuhan dengan LNG pada suhu -160°C , nilai konduktivitas termal rata-rata (k_{avg}) menjadi jauh lebih rendah dibandingkan nilai nominalnya pada suhu ruang. Akibatnya, efisiensi termal sistem meningkat secara alami dalam kondisi dingin ekstrem, yang secara efektif meminimalkan kebocoran panas dari

lingkungan luar ke dalam pipa dan menjaga stabilitas fase cair gas tersebut dengan konsumsi energi yang lebih efisien. Material isolator atau gas seringkali memiliki konduktivitas termal yang meningkat seiring kenaikan suhu ($\beta > 0$).

- **Aplikasi:** Pada sistem kriogenik, isolator menjaga suhu sangat rendah di dalam pipa.
- **Skenario:** Sebuah lapisan isolasi datar pada tangki LNG memiliki $k_0 = 0,03 \text{ W/m.K}$ dengan $\beta = 0,005 \text{ K}^{-1}$. Suhu dingin di sisi dalam (T_1) adalah -160°C dan suhu sisi luar (T_2) adalah 20°C . Tebal isolasi $L = 0,1 \text{ m}$.
- **Pertanyaan:** Tentukan konduktivitas rata-rata material isolasi tersebut.
- **Penyelesaian:**

- **Langkah 1:** Menghitung Suhu Rata-rata

$$T_{avg} = \frac{-160 + 20}{2} = -70^\circ\text{C}$$

- **Langkah 2:** Menghitung k_{avg}

$$k_{avg} = k_0(1 + \beta \frac{T_1 + T_2}{2})$$

$$k_{avg} = 0,03(1 + 0,005 \times (-70)) =$$

$$0,03(1 - 0,35) = 0,0195 \text{ W/m.K}$$

- **Analisis:** Nilai k pada suhu operasional rata-rata jauh lebih rendah daripada nilai nominal k_0 . Ini menguntungkan karena efisiensi isolasi justru membaik pada kondisi sangat dingin.

Kasus G: Analisis Integritas Struktural pada Bilah Turbin (Gradien Suhu Non-Linear)

Fenomena kritis pada komponen turbin pesawat, di mana distribusi tidak lagi bersifat linear melainkan melengkung secara cekung akibat penggunaan material dengan koefisien

β negatif. Dalam kondisi operasional ekstrem ini, konduktivitas termal material justru menurun drastis pada area yang paling panas, sehingga menciptakan hambatan termal yang besar tepat di permukaan yang bersentuhan dengan gas pembakaran. Akibatnya, terjadi lonjakan gradien suhu yang sangat tajam pada lapisan permukaan material, yang secara fisik memicu perbedaan ekspansi termal antar lapisan yang sangat kontras. Fenomena ini tidak hanya meningkatkan risiko kelelahan termal (*thermal fatigue*), tetapi juga menjadi penyebab utama munculnya retak mikro atau kegagalan struktural mendadak akibat tegangan termal yang melampaui batas elastisitas material penyusun bilah turbin.

- **Tantangan:** Bilah turbin gas beroperasi pada suhu ekstrem di mana konduktivitas termal material (k) menurun signifikan seiring kenaikan suhu ($\beta < 0$). Hal ini menyebabkan distribusi suhu tidak lagi linear, yang berdampak pada distribusi tegangan mekanis.
- **Skenario:** Sebuah bilah turbin dengan ketebalan L memiliki suhu permukaan gas panas $T_1 = 1200^\circ\text{C}$ dan suhu permukaan pendingin $T_2 = 700^\circ\text{C}$. Material memiliki koefisien β negatif.
- **Pertanyaan:** Jelaskan mengapa distribusi dengan $k(T)$ yang menurun ($\beta < 0$) lebih berisiko terhadap kegagalan struktur dibandingkan dengan asumsi k konstan?
- **Penyelesaian:**
 1. **Analisis Kelengkungan Profil:** Pada material dengan $\beta < 0$, bagian material yang lebih panas memiliki resistansi termal yang lebih tinggi. Akibatnya, penurunan suhu terbesar terjadi di

dekat permukaan panas (T_1). Distribusi akan melengkung ke atas (cekung).

2. **Perhitungan Gradien Lokal (dT/dx):** Secara matematis, karena $q'' = -k(T)\frac{dT}{dx}$ adalah konstan pada kondisi tunak, maka pada area dengan k rendah (suhu tinggi), nilai $|dT/dx|$ harus sangat besar agar q'' tetap seimbang.
3. **Identifikasi Risiko:** Gradien suhu yang sangat tajam di dekat permukaan panas menyebabkan ekspansi termal yang tidak seragam secara ekstrem. Hal ini memicu *Thermal Stress* (tegangan termal) yang melampaui batas elastis material, menyebabkan retak mikro atau *spalling* pada lapisan pelindung termal.

Kasus H: Penentuan Titik Kritis pada Pelat Keramik (Analisis Titik Tengah)

Kasus H memberikan gambaran kritis mengenai pentingnya mempertimbangkan variabel konduktivitas termal dalam penentuan titik suhu internal pada pelat keramik, di mana asumsi konduktivitas konstan terbukti dapat menghasilkan estimasi yang menyesatkan. Dengan nilai koefisien β yang positif, material menunjukkan kemampuan penghantaran panas yang lebih efektif pada area bersuhu tinggi, yang mengakibatkan profil distribusi suhu melengkung secara cembung dan menggeser suhu titik tengah (T_{mid}) menjadi lebih tinggi dibandingkan model linear. Selisih suhu sebesar 25°C yang ditemukan dalam analisis ini bukan sekadar angka matematis, melainkan parameter keamanan krusial yang menentukan apakah bagian dalam keramik akan tetap

stabil atau justru mengalami degradasi termal dan transisi fase yang tidak diinginkan akibat akumulasi panas yang tidak terdeteksi oleh perhitungan sederhana.

- **Tantangan:** Menentukan suhu di bagian tengah material sangat penting untuk memastikan bagian dalam material tidak mengalami degradasi termal atau fase transisi yang tidak diinginkan.
- **Skenario:** Sebuah pelat keramik setebal $L = 0,05$ m memiliki $k(T) = k_0(1 + \beta T)$ dengan $k_0 = 2$ W/m.K dan $\beta = 0,002$ K⁻¹. Suhu permukaan adalah $T_1 = 600^\circ\text{C}$ ($x=0$) dan $T_2 = 200^\circ\text{C}$ ($x=L$).
- **Pertanyaan:** Hitunglah suhu tepat di tengah pelat (T_{mid} pada $x = 0,025$ m) dan bandingkan dengan hasil jika menggunakan asumsi k konstan.
- **Penyelesaian:**

- **Langkah 1:** Menghitung k_{avg} (untuk mendapatkan q'')

$$T_{\text{AVG}} = \frac{600+200}{2} = 400^\circ\text{C}$$

$$k_{\text{avg}} = 2 \times (1 + 0,002 \times 400) = 2 \times 1,8$$

$$= 3,6 \text{ W/m.K}$$

$$q'' = k_{\text{avg}} \frac{T_1 - T_2}{L} = 3,6 \frac{400}{0,05} = 28.800 \text{ W/m}^2$$

- **Langkah 2:** Mencari T_{mid} menggunakan integrasi hukum Fourier

Untuk variabel k , hubungan suhu dan posisi adalah:

$$q'' \cdot x = - \int_{T_1}^{T_2} k_0(1 + \beta T) dT$$

$$q'' \cdot x = k_0[(T_1 - T_2) + \frac{\beta}{2}(T_1^2 - T_2^2)]$$

Pada $x = L/2$, dengan memasukkan nilai q'' , k_0 , dan β , kita mendapatkan persamaan kuadrat untuk T_x .

- **Hasil Perbandingan:**
 - Jika k konstan: $T_{\text{mid}} = 400^\circ\text{C}$ (Linear).
 - Dengan variabel k ($\beta > 0$): $T_{\text{mid}} \approx 425^\circ\text{C}$.
- **Analisis:** Karena β positif, kemampuan material menghantar panas di sisi panas lebih baik, sehingga panas "menumpuk" lebih banyak di bagian tengah dibandingkan kasus linear. Hal ini menunjukkan bahwa suhu internal sebenarnya lebih tinggi 25°C dari perkiraan sederhana, yang bisa menjadi batas aman operasional material tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons. (Sumber utama untuk teori konduksi dengan pembangkitan panas internal dan variabel konduktivitas).
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education. (Referensi untuk aplikasi praktis dan penyelesaian matematis pada geometri silinder dan bola).
- Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10th ed.). McGraw-Hill. (Referensi untuk konsep dasar hambatan termal dan konveksi permukaan).
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons. (Referensi untuk konversi energi non-termal menjadi energi termal/pemanasan Ohmik).
- Kern, D. Q. (1950). *Process Heat Transfer*. McGraw-Hill. (Referensi klasik untuk aplikasi perpindahan panas pada reaktor kimia dan industri).
- Lienhard, J. H., IV, & Lienhard, J. H., V. (2019). *A Heat Transfer Textbook* (5th ed.). Phlogiston Press.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Sallolo Suluh, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Mesin
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik

Penulis lahir di Palopo, 20 Maret 1981. Penulis adalah salah satu dosen tetap di Program Studi Teknik Mesin UKI Toraja Sebagai kepala Lab. Teknik Mesin sejak tahun 2019 sampai tahun 2023. Menjabat Ketua Prodi Teknik Mesin tahun 2023 sampai sekarang.

Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sam Ratulangi Manado tahun 2000-2005 dan melanjutkan S2 pada Teknik Mesin Di Universitas Hasanuddin tahun 2012-2014. Pada tahun 2018-2023 melanjutkan jenjang S3 Pada Program pascasarjana Doktorat S3 Di Universitas Hasanuddin, Makassar. Beliau meraih gelar Insiyur tahun 2024. Aktif mengajar matakuliah Perpindahan Panas I dan Perpindahan Panas II, Alat Penukar kalor serta Bahan Bakar Dan Sistem Pembakaran. Aktif meneliti dan publikasi baik di jurnal nasional terindeks sinta maupun di jurnal internasional terindeks scopus.

BIODATA PENULIS



Rianto Wibowo, S.T., M.Eng.

Dosen Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Muria Kudus

Penulis lahir di Demak tanggal 30 Maret 1973. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus.

Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Jakarta dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Penulis mengajar matakuliah Perpindahan Kalor dan Massa, Termodinamika, Energi Terbarukan dan Manajemen Energi di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muria Kudus, Jawa Tengah. Penulis menekuni bidang Menulis.

Email penulis : rianto.wibowo@umk.ac.id

BIODATA PENULIS



Dr. Yafid Effendi, ST., MT

Dosen Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Tangerang

Penulis lahir di Desa Gunungsari Kemiri, Baureno, Bojonegoro pada tahun 1983. Ia menyelesaikan pendidikan sarjana Teknik Mesin di Fakultas Teknik, Sekolah Tinggi Teknologi Mandala Bandung pada tahun 2008. Melanjutkan studi S2 meraih gelar Magister Teknik Mesin dari Universitas Diponegoro (UNDIP) pada tahun 2013, dan kemudian memperoleh gelar Doktor Teknik Mesin dari universitas yang sama pada tahun 2022. Saat ini menjadi dosen tetap di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Tangerang (UMT).

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:
yafid_effendi@yahoo.com

BIODATA PENULIS



Frid Forghanjaya, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknologi Manufaktur
Politeknik Tunas Garuda

Penulis kelahiran Jakarta, 18 Mei 1979 ini adalah seorang akademisi, peneliti, dan praktisi di bidang Teknik Mesin. Ia mendedikasikan karier profesionalnya pada integrasi antara desain digital, dunia manufaktur, serta simulasi komputasi tingkat lanjut.

Fondasi keilmuannya dibangun secara kuat dan berjenjang, dimulai dari jenjang Diploma di ATMI Surakarta, Sarjana Teknik di Universitas Muhammadiyah Metro, hingga meraih gelar Magister Teknik dari Universitas Lampung. Sebelum terjun sepenuhnya ke dunia pendidikan, beliau telah menempa integritas dan pengalaman profesionalnya selama satu dekade sebagai *Die Designer* di CV Karya Hidup Sentosa (produsen traktor tangan *QUICK*). Saat ini, beliau mengabdikan sebagai dosen tetap di Program Studi Teknologi Manufaktur, Politeknik Tunas Garuda, Lampung.

Buku *Perpindahan Panas I* ini merupakan wujud kontribusi nyata beliau dalam memperkaya literatur teknik di Indonesia. Penulis dapat dihubungi melalui korespondensi surat elektronik di: forghan@ptg.ac.id.

BIODATA PENULIS



Haryanto, S.T., M.E., M.M.

Dosen Program Studi Teknologi Manufaktur
Politeknik Tunas Garuda

Penulis lahir di Supat, Musi Banyuasin, pada 29 Juni 1973. Beliau menempuh pendidikan dasar teknik di Diploma III Teknik Mesin Politeknik Universitas Sriwijaya (1995), lalu melanjutkan jenjang Sarjana Teknik Mesin di Universitas Jayabaya (2003). Memiliki antusiasme tinggi pada bidang manajerial dan keteknikan, penulis menyelesaikan gelar Magister Manajemen di Universitas Mercu Buana (2008) serta meraih gelar *Master of Engineering* dari *University of Technology Sydney* (UTS), Australia, pada tahun 2012.

Sebelum terjun sepenuhnya ke dunia akademik, penulis membangun karier profesional yang solid sebagai *Quality Engineer* di PT Matsushita Toshiba Picture Display Indonesia selama kurang lebih 11 tahun (1996–2007). Pengalaman di industri multinasional ini memberikan wawasan praktis mendalam mengenai sistem manufaktur

dan mekanikal, yang menjadi landasan kuat dalam penyampaian materi perkuliahan aplikatif bagi mahasiswa. Karier dosen penulis dimulai pada tahun 2008 di Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara Politeknik Sekayu hingga tahun 2020. Sejak tahun 2021, penulis aktif mengabdikan sebagai dosen di Program Studi Teknologi Manufaktur, Politeknik Tunas Garuda. Buku **Perpindahan Panas I** ini merupakan bentuk kontribusi nyata penulis dalam literatur teknik di Indonesia, yang memadukan kedalaman teori akademik dengan pengalaman praktis di lapangan.