



FENOMENA PERPINDAHAN

KONSEP DAN PERHITUNGAN PERPINDAHAN MASSA, PANAS, DAN MOMENTUM

Tim Penulis:

Didiek Hari Nugroho, S.T., M.T | Dwi Indah Lestari, M.Eng

Aulia Cahyani, S.T., M.T | Ir. Selastia Yulianti, M.Si

FENOMENA PERPINDAHAN

KONSEP DAN PERHITUNGAN PERPINDAHAN MASSA, PANAS, DAN MOMENTUM

Tim Penulis:

Didiek Hari Nugroho, S.T.,M.T | Dwi Indah Lestari, M.Eng
Aulia Cahyani, S.T., M.T | Ir. Selastia Yulianti, M.Si

FENOMENA PERPINDAHAN: KONSEP DAN PERHITUNGAN PERPINDAHAN MASSA, PANAS, DAN MOMENTUM

Tim Penulis:

Didiek Hari Nugroho, S.T.,M.T
Dwi Indah Lestari, M.Eng
Aulia Cahyani, S.T., M.T
Ir. Selastia Yulianti, M.Si

Desain Cover:

Andi Juliandi

Sumber Ilustrasi:

www.freepik.com

Tata Letak:

Handarini Rohana

Proofreader:

Aas Masruroh

ISBN:

978-634-317-107-2

Cetakan Pertama:

Juli, 2026

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

by Penerbit Widina Media Utama

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

PENERBIT:

WIDINA MEDIA UTAMA

Komplek Puri Melia Asri Blok C3 No. 17 Desa Bojong Emas
Kec. Solokan Jeruk Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat

Anggota IKAPI No. 519/JBA/2025

Website: www.penerbitwidina.com

Instagram: @penerbitwidina

Telepon (022) 87355370

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

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

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

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

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

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).

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

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kepada Allah S.W.T. atas limpahan hidayahnya, Rahmat dan inayah-Nya sehingga buku yang berjudul “Fenomena Perpindahan (Konsep dan Perhitungan Perpindahan Massa, Panas, dan Momentum)” ini dapat disusun dan diterbitkan. Buku ini ditujukan untuk mahasiswa, akademisi, dan praktisi yang tertarik pada konsep dasar dan penerapan fenomena perpindahan dalam berbagai bidang, khususnya di bidang teknik kimia dan fisika.

Fenomena perpindahan adalah konsep penting yang mendasari banyak proses di alam dan industri. Secara umum, fenomena perpindahan mencakup tiga kategori utama, yaitu perpindahan panas, massa, dan momentum. Pemahaman yang mendalam mengenai proses-proses ini sangat diperlukan bagi siapa saja yang terlibat dalam perancangan, pengoperasian, dan pengoptimalan sistem industri yang kompleks, seperti reaktor kimia, sistem pendingin, proses pemurnian, dan banyak aplikasi teknik kimia lainnya. Di era modern, dengan tuntutan energi yang semakin meningkat dan kebutuhan akan teknologi yang ramah lingkungan, fenomena perpindahan memiliki peran penting dalam mendorong inovasi yang efisien dan berkelanjutan.

Buku ini disusun dengan tujuan memberikan penjelasan komprehensif mengenai dasar-dasar perpindahan, dari prinsip fisiknya hingga penerapannya dalam kehidupan sehari-hari dan industri. Setiap bab dirancang agar pembaca dapat memahami aspek-aspek teoritis dari fenomena perpindahan sekaligus memahaminya secara praktis.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung proses penyusunan buku ini, baik dari segi penelitian, pengajaran, maupun umpan balik yang konstruktif. Semoga buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat dalam mempelajari dan memahami fenomena perpindahan serta menginspirasi inovasi dan penerapan yang lebih luas dalam berbagai disiplin ilmu,

Palembang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan dan Ruang Lingkup	3
C. Keterkaitan Fenomena Panas, Massa, dan Momentum	4
D. Struktur Buku	5
BAB 2 DASAR-DASAR FENOMENA PERPINDAHAN	7
A. Konsep Umum Fenomena Perpindahan	7
B. Dasar-Dasar Perpindahan Panas	8
C. Dasar-Dasar Perpindahan Massa	9
D. Dasar-Dasar Perpindahan Momentum	11
E. Kesetaraan Matematis Tiga Fenomena	13
F. Prinsip Konservasi Umum	13
G. Penutup	14
BAB 3 PERPINDAHAN PANAS	17
A. Pengantar Perpindahan Panas	17
B. Konduksi Panas (Heat Conduction)	18
C. Konveksi Panas (Heat Convection)	21
D. Radiasi Panas (Thermal Radiation)	23
E. Perpindahan Panas Gabungan (Combined Heat Transfer)	24
F. Bilangan Tak Berdimensi Pada Perpindahan Panas	25
G. Contoh Aplikasi Perpindahan Panas di Industri	26
H. Contoh Kasus dan Penyelesaian Kalkulatifnya	26
I. Penutup	28
BAB 4 PERPINDAHAN MASSA	31
A. Pengantar Perpindahan Massa	31
B. Mekanisme Dasar Perpindahan Massa	32
C. Difusi Gas dan Cair	33
D. Difusi Melalui Membran	34
E. Perpindahan Massa Antarfase (Interphase Mass Transfer)	35
F. Bilangan Tak Berdimensi Dalam Perpindahan Massa	36
G. Pembuktian Bilangan Tak-Berdimensi Reynolds (RE)	37
H. Aplikasi Perpindahan Massa Di Industri	38

I. Penutup	38
BAB 5 PERPINDAHAN MOMENTUM	43
A. Pengantar Perpindahan Momentum.....	43
B. Hukum Gerak Newton Tentang Viskositas	43
C. Persamaan Momentum Diferensial (Navier-Stokes).....	48
D. Viskositas dan Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi.....	49
E. Rezim Aliran dan Bilangan Tak Berdimensi	50
F. Aliran Laminar dan Turbulen	51
G. Persamaan Momentum Pada Sistem Fluida Nyata	52
H. Analogi Perpindahan Momentum, Panas, dan Massa	54
I. Aplikasi Perpindahan Momentum di Industri	55
J. Deformasi Elemen Fluida dan Laju Regangan Geser	57
K. Contoh Kasus dan Penyelesaian Kalkulatifnya	58
L. Penutup	59
BAB 6 APLIKASI FENOMENA PERPINDAHAN DALAM INDUSTRI.....	61
A. Pendahuluan.....	61
B. Aplikasi Dalam Industri Energi.....	62
C. Aplikasi Dalam Industri Kimia	64
D. Aplikasi Dalam Industri Pangan	66
E. Keterpaduan Fenomena Panas-Massa-Momentum	68
F. Peran Fenomena Perpindahan Dalam Efisiensi Energi Industri	68
G. Penutup	69
DAFTAR PUSTAKA.....	71
KUNCI JAWABAN	75
PROFIL PENULIS.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Rangkaian Sistem CCS.....	2
Gambar 2. Aplikasi Kombinasi Fenomena Perpindahan pada Menara Distilasi	61
Gambar 3. Skema Proses Metanasi CO ₂ di Reaktor Batch Katalitik.....	64
Gambar 4. Keterlibatan Fenomena Perpindahan dalam Proses Aerasi Limbah Industri	66

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Parameter Utama pada Fenomena Perpindahan	5
Tabel 2. Konsep Utama pada Fenomena Perpindahan	13
Tabel 3. Daftar Implementasi Bilangan tak Berdimensi pada Fenomena Perindahan.....	25
Tabel 4. Bilangan tak Berdimensi pada Perpindahan Massa.....	36
Tabel 5. Korelasi Aplikasi Fenomena Perpindahan di Industri	68

BAB 1

PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Fenomena perpindahan merupakan salah satu bidang kajian fundamental dalam ilmu teknik yang berperan besar dalam analisis, perancangan, serta pengoperasian berbagai sistem industri. Secara umum, fenomena perpindahan mencakup tiga mekanisme utama, yaitu perpindahan panas (*heat transfer*), perpindahan massa (*mass transfer*), dan perpindahan momentum (*momentum transfer*). Ketiga mekanisme tersebut saling berhubungan dan terjadi secara simultan dalam banyak proses di alam maupun dalam sistem rekayasa teknik (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2015).

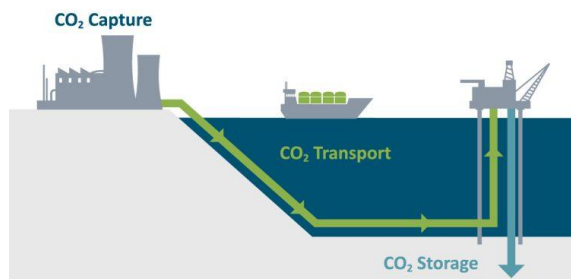
Perpindahan panas berkaitan dengan transfer energi akibat perbedaan temperatur antara dua titik dalam ruang. Proses ini dapat berlangsung melalui tiga mekanisme utama yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi (Incropera et al., 2017). Sementara itu, perpindahan massa terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi suatu komponen dalam campuran, sehingga partikel atau molekul akan bergerak dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi rendah (Cussler, 2009). Adapun perpindahan momentum berhubungan dengan gaya geser dan viskositas fluida, yang menjelaskan bagaimana momentum ditransfer antar lapisan fluida yang bergerak dengan kecepatan berbeda (White, 2011).

Ketiga fenomena ini merupakan pondasi dari berbagai proses teknik, seperti pada desain reaktor kimia, penukar panas (*heat exchanger*), menara distilasi, menara absorpsi, pengeringan (*drying*), dan sistem pendinginan. Pemahaman yang baik terhadap prinsip-prinsip dasar fenomena

perpindahan sangat penting dalam meningkatkan efisiensi, keamanan, serta keberlanjutan proses industri (Geankoplis, 2018).

Sebagai contoh, dalam industri petrokimia, pemanfaatan fenomena perpindahan panas digunakan pada proses distilasi untuk memisahkan komponen hidrokarbon berdasarkan titik didih. Di sisi lain, perpindahan massa digunakan dalam proses absorpsi gas CO_2 atau H_2S untuk pemurnian gas alam, sedangkan perpindahan momentum berperan dalam pengaturan aliran fluida di pipa, pompa, dan reaktor (Welty et al., 2020).

Dari perspektif pendidikan teknik, pemahaman fenomena perpindahan memiliki nilai strategis karena menjadi jembatan antara ilmu dasar (fisika, termodinamika, kimia) dan aplikasi rekayasa (desain alat, optimasi proses, dan kontrol industri). Oleh sebab itu, mata kuliah fenomena perpindahan menjadi salah satu pilar utama dalam kurikulum teknik kimia, teknik mesin, teknik lingkungan, dan teknik pangan (Bejan, 2013).



Gambar 1. Rangkaian Sistem CCS

Perkembangan teknologi saat ini semakin menuntut penerapan konsep fenomena perpindahan dalam konteks baru, seperti sistem energi terbarukan, reaktor fotokatalitik, penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS), serta teknologi membran untuk pemisahan gas dan cairan. Dalam sistem-sistem tersebut, ketiga fenomena perpindahan terjadi secara bersamaan dan kompleks, sehingga analisis kuantitatif dan model matematis sangat diperlukan (Patil et al., 2022).

Dengan demikian, pembahasan fenomena perpindahan tidak hanya berfungsi untuk memahami perilaku fisik suatu sistem, tetapi juga untuk mendukung perancangan proses yang efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan. Buku ini disusun untuk menjelaskan konsep-konsep dasar serta

penerapan fenomena perpindahan secara terintegrasi antara panas, massa, dan momentum, baik dari sisi teori maupun praktik.

B. TUJUAN DAN RUANG LINGKUP

Tujuan utama penyusunan buku ini adalah memberikan pemahaman menyeluruh kepada mahasiswa dan praktisi teknik mengenai dasar-dasar fenomena perpindahan serta aplikasinya dalam proses industri. Adapun ruang lingkup pembahasan dalam buku ini mencakup tiga bagian besar, yaitu:

1. Dasar-dasar fenomena perpindahan, meliputi konsep energi, massa, dan momentum serta hukum-hukum dasar yang mengatur ketiga proses tersebut.
2. Mekanisme dan perhitungan perpindahan panas, massa, dan momentum, termasuk turunan persamaan matematis, hukum empiris, serta penerapan dalam sistem rekayasa.
3. Aplikasi fenomena perpindahan dalam industri, yang mencakup sektor energi, kimia, dan pangan, untuk menunjukkan relevansi praktis dari teori-teori yang dibahas.

Melalui struktur ini, pembaca diharapkan dapat:

- Memahami hubungan fundamental antara perpindahan panas, massa, dan momentum.
- Menguasai formulasi matematis dasar yang digunakan dalam analisis fenomena perpindahan.
- Mampu menerapkan konsep-konsep tersebut dalam penyelesaian masalah teknik nyata.

Ruang Lingkup Teoritis

Secara teoritis, buku ini didasarkan pada hukum-hukum fisika klasik yang telah menjadi dasar dalam analisis fenomena perpindahan, antara lain:

- Hukum Fourier untuk perpindahan panas konduksi,
- Hukum Fick untuk perpindahan massa difusif, dan
- Hukum Newton untuk viskositas dalam perpindahan momentum.

Selain itu, buku ini juga akan mengulas pendekatan analitik dan numerik dalam penyelesaian permasalahan, serta memperkenalkan penggunaan persamaan Navier–Stokes, persamaan energi, dan persamaan difusi umum yang digunakan secara luas dalam rekayasa proses modern (Çengel & Ghajar, 2020).

Ruang Lingkup Aplikatif

Pada bagian akhir, pembahasan diarahkan pada penerapan konsep dalam berbagai sistem industri seperti:

- Proses pertukaran panas pada boiler dan kondensor,
- Difusi massa dalam absorber CO₂ dan reaktor katalitik, serta
- Perpindahan momentum dalam pipa, pompa, dan menara distilasi.

Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi akademik sekaligus panduan praktis bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan praktisi industri dalam memahami dan menerapkan prinsip fenomena perpindahan secara komprehensif.

C. KETERKAITAN FENOMENA PANAS, MASSA, DAN MOMENTUM

Secara konseptual, fenomena perpindahan panas, massa, dan momentum memiliki bentuk matematis yang serupa. Ketiganya dapat dijelaskan melalui persamaan umum berikut:

$$Flux = -D \frac{d\phi}{dx}$$

di mana D merupakan koefisien perpindahan (konduktivitas termal, difusivitas massa, atau viskositas kinematik), dan ϕ adalah besaran yang berpindah (temperatur, konsentrasi, atau kecepatan).

Persamaan ini menunjukkan bahwa aliran energi, massa, dan momentum terjadi karena adanya gradien potensial — temperatur untuk panas, konsentrasi untuk massa, dan kecepatan untuk momentum (Bird et al., 2015).

Keterkaitan ini dapat disajikan dalam bentuk tabel berikut:

Tabel 1. Parameter Utama pada Fenomena Perpindahan

Jenis Perpindahan	Besaran yang Ditransfer	Gaya Pendorong	Koefisien	Persamaan Dasar
Panas	Energi (Q)	Gradien Temperatur (dT/dx)	Konduktivitas termal (k)	Hukum Fourier: $q = -k \frac{dT}{dx}$
Massa	Zat (N)	Gradien Konsentrasi (dC/dx)	Difusivitas massa (D_{AB})	Hukum Fick: $J = -D_{AB} \frac{dC}{dx}$
Momentum	Kecepatan (v)	Gradien Kecepatan (dv/dy)	Viskositas (μ)	Hukum Newton: $\tau = -\mu \frac{dv}{dy}$

Dari tabel tersebut terlihat bahwa perilaku matematis ketiga fenomena identik, meskipun sifat fisis dan satuan masing-masing berbeda. Kesamaan ini memungkinkan analisis fenomena perpindahan dilakukan dengan pendekatan analogi, seperti analogi Reynolds, analogi Chilton–Colburn, dan analogi Prandtl–Taylor yang banyak digunakan dalam rekayasa perpindahan gabungan (Incropera et al., 2017)

D. STRUKTUR BUKU

- Buku ini dibagi menjadi enam bab utama yang disusun secara sistematis:
- Bab 1: Pendahuluan, menjelaskan latar belakang, tujuan, dan ruang lingkup fenomena perpindahan.
 - Bab 2: Dasar-Dasar Fenomena Perpindahan, membahas teori fundamental perpindahan panas, massa, dan momentum.
 - Bab 3: Perpindahan Panas, memaparkan teori, hukum dasar, dan penerapan konduksi, konveksi, dan radiasi.
 - Bab 4: Perpindahan Massa, menguraikan mekanisme difusi, perpindahan gas-cair, dan perpindahan melalui membran.

- Bab 5: Perpindahan Momentum, menjelaskan dinamika aliran fluida, viskositas, dan hukum Newton.
- Bab 6: Aplikasi dalam Industri, menampilkan studi kasus fenomena perpindahan dalam industri energi, kimia, dan pangan.

Dengan pendekatan tersebut, buku ini diharapkan tidak hanya menjadi sumber teori, tetapi juga memberikan panduan praktis dan aplikatif dalam memahami fenomena perpindahan secara terintegrasi.

BAB 2

DASAR-DASAR FENOMENA PERPINDAHAN

A. KONSEP UMUM FENOMENA PERPINDAHAN

Fenomena perpindahan (*transport phenomena*) merupakan disiplin ilmu yang mempelajari mekanisme perpindahan massa, energi, dan momentum di dalam sistem fisik. Ketiga fenomena ini berperan sebagai dasar bagi berbagai proses industri yang melibatkan perpindahan zat dan energi, baik dalam fluida maupun padatan (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2015).

Setiap fenomena perpindahan muncul karena adanya gradien suatu sifat fisik — temperatur, konsentrasi, atau kecepatan — yang menyebabkan terjadinya pergerakan molekul atau energi untuk mencapai kesetimbangan. Dengan demikian, prinsip dasar fenomena perpindahan mengikuti kecenderungan alamiah sistem menuju kondisi equilibrium termodinamika.

Fenomena perpindahan dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok utama:

1. Perpindahan Panas (*Heat Transfer*) – perpindahan energi akibat perbedaan temperatur.
2. Perpindahan Massa (*Mass Transfer*) – perpindahan zat akibat perbedaan konsentrasi.
3. Perpindahan Momentum (*Momentum Transfer*) – perpindahan momentum akibat perbedaan kecepatan antar lapisan fluida.

Ketiganya dapat dianalisis dengan kerangka matematis serupa, yang umumnya dinyatakan dalam bentuk hukum diferensial pertama (*first law gradient relation*):

$$Flux = -D \frac{d\phi}{dx}$$

dengan:

- $Flux$: laju perpindahan per satuan luas,
- D : koefisien perpindahan,
- $\frac{d\phi}{dx}$: gradien sifat fisik (temperatur, konsentrasi, atau kecepatan).

Persamaan ini menunjukkan bahwa perpindahan terjadi dari daerah dengan nilai sifat yang tinggi ke daerah bernilai rendah (arah negatif gradien)

B. DASAR-DASAR PERPINDAHAN PANAS

1. Definisi dan Mekanisme

Perpindahan panas adalah proses aliran energi termal dari suatu daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah sebagai akibat adanya perbedaan temperatur. Terdapat tiga mekanisme utama perpindahan panas, yaitu:

1) Konduksi (*Conduction*)

Energi ditransfer melalui getaran molekul dalam medium padat atau fluida diam tanpa adanya perpindahan massa secara makroskopis.

Hukum dasar perpindahan panas konduksi dinyatakan oleh Hukum Fourier (*Fourier's Law*):

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

di mana:

q = fluks panas (W/m^2),

k = konduktivitas termal ($W/m \cdot K$),

$\frac{dT}{dx}$ = gradien temperatur.

Konduktivitas termal k menunjukkan kemampuan material dalam menghantarkan panas. Nilai k bergantung pada jenis material, temperatur, dan arah aliran panas (Incropera et al., 2017).

2) Konveksi (*Convection*)

Panas berpindah melalui kombinasi konduksi dan perpindahan massa fluida. Proses ini terjadi pada fluida bergerak seperti udara, air, atau minyak.

Laju perpindahan panas konveksi dijelaskan dengan Hukum Newton untuk pendinginan (*Newton's Law of Cooling*):

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

di mana:

h = koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$),

A = luas permukaan perpindahan panas,

T_s = temperatur permukaan,

T_∞ = temperatur fluida jauh dari permukaan.

Konveksi dapat bersifat alami (*natural convection*), yang terjadi karena perbedaan densitas akibat perubahan temperatur, atau paksa (*forced convection*), yang terjadi karena adanya gaya eksternal seperti kipas atau pompa.

3) Radiasi (*Radiation*)

Berbeda dengan konduksi dan konveksi, perpindahan panas radiasi terjadi tanpa medium, melalui gelombang elektromagnetik.

Hukum Stefan–Boltzmann menjelaskan hubungan antara panas radiasi dan temperatur permukaan:

$$q = \varepsilon \sigma T^4$$

di mana:

ε = emisivitas permukaan (0–1),

σ = konstanta Stefan–Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$),

T = temperatur mutlak (K).

Ketiga mekanisme ini sering terjadi bersamaan dalam sistem nyata, misalnya pada perpindahan panas di boiler atau sistem pendingin mesin.

C. DASAR-DASAR PERPINDAHAN MASSA

1. Definisi dan Prinsip Dasar

Perpindahan massa (*Mass Transfer*) adalah proses perpindahan suatu komponen dari daerah berkonsentrasi tinggi menuju daerah dengan

konsentrasi rendah. Fenomena ini biasanya disebabkan oleh gradien konsentrasi, tekanan, atau temperatur dalam suatu sistem (Cussler, 2009).

Proses perpindahan massa banyak dijumpai dalam operasi seperti distilasi, absorpsi, pengeringan, evaporasi, dan proses membran.

Hukum dasar perpindahan massa difusif dijelaskan melalui Hukum Fick (*Fick's Law of Diffusion*), yaitu:

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx}$$

dengan:

J_A = fluks massa komponen A ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$),

D_{AB} = koefisien difusi molekuler antara A dan B (m^2/s),

C_A = konsentrasi komponen A (mol/m^3).

Nilai D_{AB} dipengaruhi oleh temperatur, tekanan, dan sifat molekul dari zat yang terlibat. Untuk sistem gas ideal, D_{AB} umumnya meningkat dengan temperatur dan menurun dengan tekanan (Geankoplis, 2018).

2. Jenis-Jenis Perpindahan Massa

1) Difusi Molekuler (*Molecular Diffusion*)

Terjadi akibat pergerakan acak molekul. Dapat dijelaskan dengan hukum Fick.

2) Difusi Konvektif (*Convective Diffusion*)

Terjadi bila terdapat aliran makroskopis fluida yang membawa molekul dari satu daerah ke daerah lain.

3) Difusi Knudsen (*Knudsen Diffusion*)

Terjadi bila ukuran pori medium sama dengan panjang lintasan bebas molekul (umumnya pada sistem gas di membran mikropori).

Perpindahan massa juga dapat melibatkan difusi multikomponen (lebih dari dua zat), yang dijelaskan melalui persamaan Maxwell–Stefan, dan menjadi dasar analisis pemisahan gas kompleks (Krishna & Wesselingh, 2015).

D. DASAR-DASAR PERPINDAHAN MOMENTUM

1. Definisi dan Konsep

Perpindahan momentum terjadi ketika partikel atau lapisan fluida yang memiliki kecepatan berbeda saling berinteraksi. Mekanisme ini menghasilkan gaya geser yang dikenal sebagai tegangan geser (*shear stress*). Dan dalam implementasinya dalam konsep fluida, *shear stress* yang diplotkan dengan besaran $\frac{du}{dy}$ akan menghasilkan garis linieritas yang menunjukkan karakteristik viskositas pada fluida.

Hukum dasar perpindahan momentum dijelaskan oleh Hukum Newton tentang Viskositas (*Newton's Law of Viscosity*):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

dengan:

τ = tegangan geser (N/m²),

μ = viskositas dinamik (Pa·s),

$\frac{du}{dy}$ = gradien kecepatan terhadap arah normal aliran.

nilai $\frac{du}{dy}$ berperan sebagai penyebab atau gradien kecepatan dari fenomena perpindahan momentum. Hukum ini menyatakan bahwa tegangan geser sebanding dengan gradien kecepatan — semakin besar perubahan kecepatan antarlapisan, semakin besar pula gaya geser yang ditimbulkan (White, 2011).

2. Persamaan Momentum

Dalam sistem fluida kontinu, perpindahan momentum dinyatakan dalam bentuk persamaan Navier–Stokes, yang merupakan bentuk konservasi momentum untuk fluida Newtonian:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g$$

dengan:

- ρ : densitas fluida (kg/m³)
- v : vektor kecepatan (m/s)
- p : tekanan (Pa)

- μ : viskositas dinamis (Pa.s)
- g : percepatan gravitasi (m/s^2)

Persamaan ini menjadi dasar analisis aliran fluida dalam pipa, pompa, reaktor, dan peralatan perpindahan panas (Çengel & Cimbala, 2020).

3. Rezim Aliran dan Bilangan Tak Berdimensi

Perilaku aliran fluida sangat ditentukan oleh bilangan tak berdimensi yang disebut Bilangan Reynolds (Re):

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

Nilai Re menentukan jenis aliran:

- Laminar ($Re < 2100$) – aliran teratur dan terlapis,
- Transisi ($2100 < Re < 4000$) – kondisi tidak stabil,
- Turbulen ($Re > 4000$) – aliran acak dan berputar.

Selain itu, terdapat bilangan lain yang penting untuk menghubungkan fenomena panas dan massa:

- Bilangan Prandtl (Pr): $Pr = \frac{c_p \mu}{k}$
- Bilangan Schmidt (Sc): $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$
- Bilangan Nusselt (Nu) dan Sherwood (Sh), yang menunjukkan rasio perpindahan konvektif terhadap difusif.

Analogi antara Pr , Sc , Nu , dan Sh menjadi dasar pengembangan teori analogi Chilton–Colburn, yang memungkinkan penyamaan analisis perpindahan panas, massa, dan momentum (Bird et al., 2015).

E. KESETARAAN MATEMATIS TIGA FENOMENA

Tabel berikut menggambarkan kesetaraan struktural antara perpindahan panas, massa, dan momentum:

Tabel 2. Konsep Utama pada Fenomena Perpindahan

Fenomena	Besaran Fisik	Gaya Pendorong	Koefisien Perpindahan	Hukum Dasar
Panas	Energi	Gradien Temperatur	Konduktivitas termal (k)	Hukum Fourier: $q = -k \frac{dT}{dx}$
Massa	Zat	Gradien Konsentrasi	Difusivitas (D_AB)	Hukum Fick: $J = -D_{AB} \frac{dC}{dx}$
Momentum	Kecepatan	Gradien Kecepatan	Viskositas (μ)	Hukum Newton: $\tau = -\mu \frac{dv}{dy}$

Kesamaan ini menunjukkan bahwa analisis matematis satu fenomena dapat digunakan untuk memahami fenomena lainnya dengan mengganti parameter fisiknya. Pendekatan ini menjadi dasar teori *analog transport phenomena*, yang digunakan secara luas dalam perancangan sistem rekayasa (Bejan, 2013).

F. PRINSIP KONSERVASI UMUM

Ketiga fenomena perpindahan tunduk pada prinsip dasar konservasi, yaitu:

1. Konservasi Massa (*Continuity Equation*)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

2. Konservasi Momentum (*Navier–Stokes Equation*)

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g$$

3. Konservasi Energi (*Energy Equation*)

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \Phi$$

di mana Φ adalah disipasi viskositas.

Ketiga persamaan ini menjadi dasar simulasi numerik dalam *computational fluid dynamics (CFD)*, yang banyak digunakan untuk menganalisis fenomena perpindahan kompleks dalam industri energi, kimia, dan lingkungan (Versteeg & Malalasekera, 2007).

G. PENUTUP

Bab ini telah menguraikan dasar konseptual dan matematis dari fenomena perpindahan panas, massa, dan momentum. Kesetaraan antara ketiganya tidak hanya bersifat analogi matematis, tetapi juga memiliki keterkaitan fisik yang mendalam dalam setiap sistem rekayasa.

Pemahaman terhadap hukum-hukum dasar seperti Fourier, Fick, dan Newton menjadi fondasi penting sebelum menganalisis fenomena perpindahan spesifik pada bab-bab berikutnya.

Pada bab berikutnya (Bab 3), pembahasan akan difokuskan pada fenomena perpindahan panas, mencakup konduksi, konveksi, dan radiasi, beserta contoh aplikasinya pada sistem industri.

Latihan Soal

A. Isian Singkat

1. Fenomena perpindahan mempelajari perpindahan _____, _____, dan _____ dalam suatu sistem.
2. Perbedaan temperatur merupakan gaya pendorong (*driving force*) terjadinya perpindahan _____.
3. Hukum Fourier digunakan untuk menjelaskan perpindahan panas secara _____.
4. Perpindahan massa terjadi akibat adanya perbedaan _____ suatu komponen dalam sistem.
5. Viskositas fluida menunjukkan hambatan fluida terhadap perpindahan _____.

B. Essai

1. Jelaskan konsep umum fenomena perpindahan dan mengapa perpindahan panas, massa, dan momentum dipelajari dalam satu disiplin ilmu yang sama.

2. Jelaskan mekanisme perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi serta berikan masing-masing satu contoh penerapannya dalam industri.
3. Jelaskan analogi antara Hukum Fourier, Hukum Fick, dan Hukum Newton tentang viskositas.
4. Sebuah fluida mengalir dalam pipa. Jelaskan bagaimana perpindahan momentum mempengaruhi profil kecepatan fluida dan kehilangan tekanan dalam sistem.
5. Jelaskan keterkaitan fenomena perpindahan panas, massa, dan momentum pada proses pengeringan bahan pangan atau biomassa

BAB 3

PERPINDAHAN PANAS

A. PENGANTAR PERPINDAHAN PANAS

Perpindahan panas (*heat transfer*) merupakan proses aliran energi termal dari suatu sistem ke sistem lain akibat perbedaan temperatur. Fenomena ini tidak dapat dihindari dalam hampir seluruh sistem rekayasa, baik di bidang energi, kimia, pangan, maupun lingkungan. Pemahaman terhadap mekanisme perpindahan panas sangat penting untuk merancang peralatan seperti penukar panas (*heat exchanger*), boiler, kondensor, evaporator, dan sistem pendingin industri (Incropera et al., 2017).

Secara umum, perpindahan panas terjadi dalam tiga mekanisme utama:

1. Konduksi (*Conduction*) – melalui interaksi molekuler tanpa pergerakan massa.
2. Konveksi (*Convection*) – melalui pergerakan fluida yang membawa energi panas.
3. Radiasi (*Radiation*) – melalui pancaran gelombang elektromagnetik tanpa medium perantara.

Ketiga mekanisme ini dapat terjadi secara tunggal atau bersamaan. Misalnya, pada sistem pendingin logam panas dalam udara, panas berpindah secara konduksi dalam logam, konveksi ke udara, dan sebagian hilang melalui radiasi (Bejan, 2013).

B. KONDUKSI PANAS (*HEAT CONDUCTION*)

1. Pengertian dan Mekanisme

Konduksi panas adalah proses perpindahan energi akibat getaran molekul atau perpindahan elektron pada zat padat atau fluida diam. Energi panas berpindah dari bagian dengan temperatur tinggi ke bagian bertemperatur rendah.

Fenomena ini dijelaskan oleh Hukum Fourier (*Fourier's Law of Heat Conduction*):

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$

dengan:

q_x = fluks panas dalam arah x (W/m²)

k = konduktivitas termal bahan (W/m·K)

$\frac{dT}{dx}$ = gradien temperatur (K/m)

Tanda negatif menunjukkan bahwa aliran panas terjadi dari temperatur tinggi ke rendah.

2. Persamaan Diferensial Konduksi Panas

Untuk sistem tiga dimensi, hukum Fourier dapat dinyatakan sebagai:

$$q = -k \nabla T$$

dan dengan prinsip konservasi energi, diperoleh persamaan konduksi panas tak tunak (transient):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \dot{q}$$

dengan:

ρ = massa jenis (kg/m³),

c_p = kapasitas panas jenis (J/kg·K),

$\dot{q}$ = sumber panas internal (W/m³).

Jika sistem berada pada kondisi tunak (*steady-state*), maka $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ dan diperoleh:

$$\nabla^2 T = 0$$

yang dikenal sebagai persamaan Laplace, sering digunakan untuk analisis konduksi tunak dalam dinding datar, silinder, atau bola (Çengel & Ghajar, 2020).

3. Contoh Kasus dan Penyelesaian Kalkulatifnya

Sebuah dinding komposit terdiri dari dua lapisan seri (luas penampang A sama untuk kedua lapisan). Berikut data yang diberikan:

- 1) Lapisan A memiliki konduktivitas termal k_a : 0,40 W/m.K dan L_a sepanjang 0,030 cm
- 2) Lapisan B memiliki konduktivitas termal k_b : 065 W/m.K dan L_b sepanjang 0,050 cm
- 3) Luas penampang bersama $A = 0,60 \text{ m}^2$
- 4) Suhu sisi kiri $T_1 = 360\text{K}$ dan suhu sisi kanan $T_3 = 310\text{K}$

Gunakan persamaan Hukum Fourier menentukan nilai numerik dari laju alir q_x (W) dan suhu *interface* T_2 .

Penyelesaian:

Untuk lapisan A:

$$\frac{q_x}{A} = -k_a \frac{dT}{dx}$$

Integrasi dari $x = 0$ sampai $x = L_a$ dan

$T = T_1$ sampai $T = T_2$

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = -\frac{q_x}{A.k_a} \int_0^{L_a} dx$$

$$T_2 - T_1 = -\frac{q_x . L_a}{A . k_a} \Rightarrow T_1 - T_2 =$$

$$\frac{q_x . L_a}{A . k_a} \quad (\text{Pers. 1})$$

Untuk lapisan B:

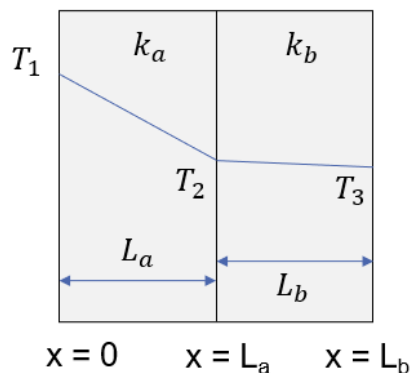
$$\frac{q_x}{A} = -k_b \frac{dT}{dx}$$

Integrasi dari $x = 0$ sampai $x = L_b$ dan $T = T_2$ sampai $T = T_3$

$$T_3 - T_2 = -\frac{q_x . L_b}{A . k_b} \Rightarrow T_2 - T_3 = \frac{q_x . L_b}{A . k_b} \quad (\text{Pers. 2})$$

Menjumlahkan Pers. 1 dan Pers. 2 menjadi bentuk:

$$(T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) = \frac{q_x . L_a}{A . k_a} + \frac{q_x . L_b}{A . k_b}$$



$$T_1 - T_3 = qx \left(\frac{La}{A \cdot ka} + \frac{Lb}{A \cdot kb} \right)$$

Sehingga diperoleh bentuk akhir sebagai berikut:

$$qx = \frac{T_1 - T_3}{\frac{La}{A \cdot ka} + \frac{Lb}{A \cdot kb}}$$

Substitusikan data untuk kalkulasi nilai qx:

$$qx = \frac{(360 - 310)}{\frac{0,030}{0,40 \times 0,60} + \frac{0,050}{0,65 \times 0,60}}$$

$$a. \frac{0,030}{0,40 \times 0,60} = \frac{0,030}{0,24} = 0,125$$

$$b. \frac{0,050}{0,65 \times 0,60} = \frac{0,050}{0,39} = 0,128$$

Sehingga nilai laju alir $qx = 197,63 \text{ W}$

Perhitungan suhu *interface* T_2 dengan menggunakan Pers. 1:

$$T_1 - T_2 = \frac{qx \cdot La}{A \cdot ka}$$

$$T_1 - T_2 = \frac{197,63 \times 0,030}{0,60 \times 0,40} = 24,70 \Rightarrow T_2 = 335,30K$$

Pada kasus ini didapatkan besar laju alir sebesar 197,63 W dengan suhu *interface* 335,30 K.

4. Contoh Aplikasi

Konduksi panas banyak digunakan dalam:

- Perancangan dinding isolasi termal, misalnya pipa uap dan tangki penyimpanan panas.
- Analisis perpindahan panas dalam logam padat, seperti sirip pendingin (heat sink).
- Katalis padat, di mana panas harus ditransfer secara efisien dari permukaan ke bagian dalam partikel.

Dalam desain dinding datar berlapis, laju perpindahan panas total dapat dihitung dengan resistansi termal total:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \dots}$$

Pendekatan ini menyerupai hukum Ohm pada rangkaian listrik, dengan temperatur analog terhadap tegangan dan resistansi termal terhadap hambatan listrik (Kreith & Manglik, 2013).

C. KONVEKSI PANAS (*HEAT CONVECTION*)

1. Pengertian dan Prinsip Dasar

Konveksi panas adalah perpindahan panas melalui kombinasi antara konduksi dan perpindahan massa fluida. Energi panas dibawa oleh partikel fluida yang bergerak dari satu tempat ke tempat lain (White, 2011).

Hukum dasar konveksi panas dijelaskan oleh Hukum Newton tentang Pendinginan (*Newton's Law of Cooling*):

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

dengan:

- h : koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$),
- A : luas permukaan perpindahan panas,
- T_s : temperatur permukaan,
- T_∞ : temperatur fluida jauh dari permukaan.

Koefisien h bergantung pada sifat fluida (ρ , μ , c_p , k), kecepatan aliran, dan kondisi geometri permukaan.

2. Jenis-Jenis Konveksi

1) Konveksi Alami (*Natural convection*)

Terjadi akibat gaya apung (*buoyancy*) karena perbedaan densitas fluida akibat pemanasan.

Koefisien h ditentukan melalui korelasi empiris dengan bilangan Nusselt (Nu) dan Grashof (Gr):

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$$

dengan:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

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

2) Konveksi Paksa (*Forced convection*)

Terjadi bila aliran fluida diinduksi oleh gaya eksternal seperti kipas atau pompa.

Untuk aliran laminar dalam pipa, digunakan korelasi:

$$Nu = 3.66 \text{ (untuk aliran laminar, fully developed)}$$

Sedangkan untuk aliran turbulen:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

(korelasi Dittus–Boelter).

3) Konveksi Campuran (*Mixed Convection*)

Kombinasi antara konveksi alami dan paksa, di mana keduanya memberikan kontribusi terhadap perpindahan panas total.

3. Mekanisme Lapisan Batas (*Boundary Layer*)

Lapisan batas termal terbentuk di dekat permukaan padat di mana gradien temperatur dan kecepatan fluida signifikan. Ketebalan lapisan batas ini menentukan besar koefisien h .

Persamaan energi dalam lapisan batas diberikan oleh:

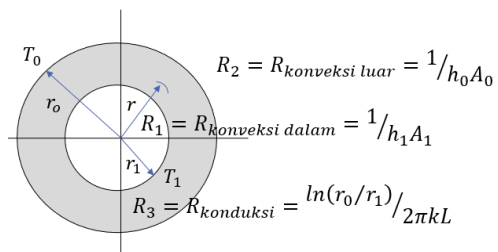
$$\rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

yang menjadi dasar analisis konveksi paksa laminar (Incropera et al., 2017).

4. Contoh Kasus dan Penyelesaian Kalkulatifnya

Transfer Panas secara Kombinasi Konduksi dan Konveksi

Uap air jenuh pada 0,276 mPa mengalir di sebuah pipa yang terbuat dari material baja lunak yang mempunyai diameter dalam 2,09 cm dan diameter luar 2,67 cm. Koefisien konveksi pada permukaan pipa dalam dan permukaan luar dapat dianggap



masing-masing sebesar 5680 W/m².K. dan 22,7 W/m².K. Suhu udara sekitar adalah 294K. Tentukanlah: besar *heat loss* untuk pipa tanpa pelapis isolator dan *heat loss* untuk pipa yang diberi insulasi magnesita 85% setebal 3,8 cm ($h = 0,0675$ W/m.K) di permukaan luarnya. Temperature uap jenuh 404K.

Penyelesaian:

- 1) Menghitung rugi panas (*heat loss*) per meter untuk pipa tanpa pelapis isolator:

$$d_1 = 0,0209 \text{ m} \Rightarrow r_1 = 0,01045 \text{ m}$$

$$d_2 = 0,0267 \text{ m} \Rightarrow r_1 = 0,01335 \text{ m}$$

$$R_1 = 1/\{(5680 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})2\pi(0,01045 \text{ m})1\text{m}\} = 0,00268 \text{ K/W}$$

$$R_2 = 1/\{(22,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})2\pi(0,01335 \text{ m})1\text{m}\} = 0,525 \text{ K/W}$$

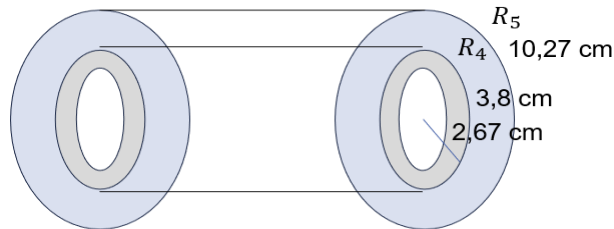
$$R_3 = \ln(0,01335/0,01045)/2\pi(42,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(1\text{m}) = 0,00091 \text{ K/W}$$

Temperature dalam menggunakan temperature uap jenuh 0,276 mPa yaitu 267 °F atau 404 K. Laju transfer panas per meter pipa dapat dihitung sebagai:

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R} = \frac{404 \text{ K} - 294 \text{ K}}{0,528 \text{ K/W}} = 208 \text{ W}$$

- 2) Menghitung rugi panas (*heat loss*) untuk pipa yang diberi insulasi magnesia 85% setebal 3,8 cm:

Dalam kasus pipa yang diinsulasi, resistensi termal total akan melibatkan nilai dari R_1 dan R_3 yang dihitung di atas, ditambahkan dengan nilai R tambahan yang ditimbulkan akibat adanya insulasi:



Untuk permukaan dalam dari lapisan insulasi:

$$R_4 = \ln\{(0,00267 + 2 \times 0,038)/0,0267\}/2\pi kL$$

$$R_4 = \ln(0,01027)/2\pi(0,0675 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(1\text{m}) = 3,176 \text{ K/W}$$

dan untuk permukaan luar dari insulasi:

$$R_5 = 1/(22,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})\pi(0,1027 \text{ m})(1 \text{ m}) = 0,1365 \text{ K/W}$$

Jadi besar *heat loss* untuk pipa yang diinsulasi berkurang secara signifikan menjadi:

$$\Sigma R = R_1 + R_3 + R_4 + R_5$$

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R} = \frac{404 \text{ K} - 294 \text{ K}}{3,316 \text{ K/W}} = 33,2 \text{ W}$$

D. RADIASI PANAS (*THERMAL RADIATION*)

1. Definisi dan Karakteristik

Radiasi panas adalah perpindahan energi melalui gelombang elektromagnetik, terutama dalam bentuk inframerah, yang tidak memerlukan medium perantara. Berbeda dengan konduksi dan konveksi, radiasi dapat terjadi dalam ruang hampa (Bejan, 2013).

Energi radiasi total yang dipancarkan oleh permukaan ideal (*black body*) dijelaskan oleh Hukum Stefan–Boltzmann:

$$E_b = \sigma T^4$$

dengan:

E_b : energi radiasi emisi benda hitam (W/m^2),

σ : konstanta Stefan–Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$),

T : temperatur mutlak (K).

Untuk benda nyata (*gray body*), energi yang dipancarkan berkurang dengan faktor emisivitas ε :

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

Nilai ε berkisar antara 0 (reflektor sempurna) dan 1 (benda hitam sempurna).

2. Pertukaran Radiasi Antar Permukaan

Ketika dua permukaan saling berhadapan dan memiliki temperatur berbeda, perpindahan panas radiasi bersih di antara keduanya adalah:

$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

di mana F_{12} adalah faktor pandang (*view factor*), yang bergantung pada geometri dan orientasi permukaan.

Radiasi menjadi mekanisme dominan pada temperatur tinggi seperti dalam tungku industri, reaktor pembakaran, dan permukaan logam pijar.

E. PERPINDAHAN PANAS GABUNGAN (*COMBINED HEAT TRANSFER*)

Dalam banyak sistem, ketiga mekanisme perpindahan panas (konduksi, konveksi, radiasi) terjadi secara bersamaan. Misalnya:

- Dinding tungku logam menerima panas melalui radiasi dari gas pembakaran, menghantarkan panas secara konduksi ke sisi luar, dan kehilangan panas melalui konveksi udara sekitar.

Laju perpindahan panas total dapat dihitung dengan menambahkan resistansi termal dari masing-masing mekanisme:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_r}$$

dengan U = koefisien perpindahan panas total (W/m²·K).

Persamaan ini digunakan secara luas dalam desain *heat exchanger* dan sistem insulasi termal (Kreith & Manglik, 2013).

F. BILANGAN TAK BERDIMENSI PADA PERPINDAHAN PANAS

Analisis konveksi dan radiasi sering melibatkan bilangan tak berdimensi sebagai parameter universal. Beberapa bilangan penting yang berhubungan dengan fenomena peprindahan dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3. Daftar Implementasi Bilangan tak Berdimensi pada Fenomena Perindahan

Bilangan	Definisi	Makna Fisik
Reynolds (Re)	$\frac{\rho v L}{\mu}$	Menunjukkan rejim aliran (laminar/turbulen)
Prandtl (Pr)	$\frac{c_p \mu}{k}$	Perbandingan difusi momentum dan panas
Nusselt (Nu)	$\frac{h L}{k}$	Rasio konveksi terhadap konduksi
Grashof (Gr)	$\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$	Gaya apung pada konveksi alami
Biot (Bi)	$\frac{h L_c}{k}$	Perbandingan resistansi internal dan eksternal
Fourier (Fo)	$\frac{\alpha t}{L^2}$	Rasio waktu terhadap difusi panas

Bilangan-bilangan ini digunakan untuk analisis tak berdimensi, perancangan sistem termal, serta validasi hasil eksperimen terhadap model teoritis (Incropera et al., 2017).

G. CONTOH APLIKASI PERPINDAHAN PANAS DI INDUSTRI

1. Industri Energi
 - Desain penukar panas pada pembangkit listrik (boiler, kondensor).
 - Pengoptimalan efisiensi termal turbin gas dan uap.
2. Industri Kimia
 - Pengendalian temperatur pada reaktor eksotermis atau endotermis.
 - Desain kolom distilasi dan evaporator.
3. Industri Pangan dan Farmasi
 - Proses pasteurisasi dan sterilisasi.
 - Pengeringan dan pembekuan bahan pangan.

Perhitungan efisiensi termal pada alat industri biasanya melibatkan kombinasi analisis energi (*enthalpy balance*) dan perhitungan laju perpindahan panas total berdasarkan teori konveksi dan konduksi.

H. CONTOH KASUS DAN PENYELESAIAN KALKULATIFNYA

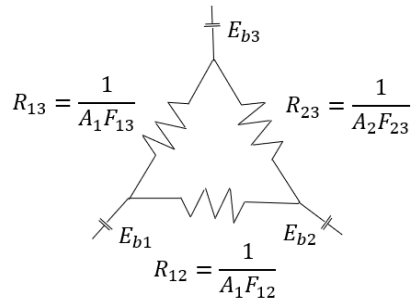
Dua pelat hitam sejajar

Terdapat beberapa pelat hitam yang saling berhadapan seperti ilustrasi di atas, sehingga nilai *view factor* $F=1$. Suhu permukaan 1 sebesar 800 K dan suhu permukaan 2 sebesar 300 K. Tunjukkan bentuk turunan persamaannya dan hitung besar laju alir neto q_{12} dari permukaan 1 ke 2. (konstanta Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,676 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

Penyelesaian:

$$q_{12} = \frac{(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1}{A_1 F_{13} + A_2 F_{23}}} + \frac{(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{A_1 F_{13}} + \frac{1}{A_2 F_{23}}}$$

$$= A_1 F_{12} (E_{b1} - E_{b2}) + \frac{(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{A_1 F_{13}} + \frac{1}{A_2 F_{23}}}$$



$$\begin{aligned}
&= \left[A_1 F_{12} + \frac{1}{\frac{1}{A_1 F_{13}} + \frac{1}{A_2 F_{23}}} \right] (E_{b1} - E_{b2}) \\
&= \left[A_1 F_{12} + \frac{1}{\frac{1}{A_1 F_{13}} + \frac{1}{A_1 A_2 F_{23}}} \right] (E_{b1} - E_{b2}) \\
q_{12} &= \left[A_1 F_{12} + \frac{A_1}{\frac{1}{F_{13}} + \frac{1}{A_2 F_{23}}} \right] (E_{b1} - E_{b2}) \\
q_{12} &= A_1 \left[F_{12} + \frac{1}{\frac{1}{F_{13}} + \frac{1}{A_2 F_{23}}} \right] (E_{b1} - E_{b2}) \\
q_{12} &= A_1 F_{12} \text{total} (E_{b1} - E_{b2})
\end{aligned}$$

Menghitung transfer panas neto antar dua permukaan hitam q_{12} :

$$\begin{aligned}
E_{b1} &= \sigma T_1^4 = 5,676 \times 10^{-8} \times 800^4 = 23224,32 \text{ W/m}^2 \\
E_{b2} &= \sigma T_2^4 = 5,676 \times 10^{-8} \times 300^4 = 459,27 \text{ W/m}^2 \\
q_{12} &= A_1 F_{12} \text{total} (E_{b1} - E_{b2}) \\
q_{12} &= 2 \times 1 \times (23224,32 - 459,27) = 4,55 \times 10^4 \text{ W}.
\end{aligned}$$

Kasus dengan Permukaan ketiga

Tiga permukaan berinteraksi. Diketahui $A_1 = 1,00 \text{ m}^2$ dan $A_2 = 2,00 \text{ m}^2$. Mempunyai data view factor langsung sebesar $F_{12} = 0,20$, $F_{13} = 0,30$, $F_{23} = 0,40$. $T_1 = 1000\text{K}$, $T_2 = 400\text{K}$ Hitunglah laju panas neto q_{12} dari permukaan 1 ke 2 dengan memperhitungkan jalur tidak langsung (via jalur ketiga).

Penyelesaian:

$$\begin{aligned}
E_{b1} &= \sigma T_1^4 = 5,676 \times 10^{-8} \times 1000^4 = 56700 \text{ W/m}^2 \\
E_{b2} &= \sigma T_2^4 = 5,676 \times 10^{-8} \times 400^4 = 1451,52 \text{ W/m}^2 \\
R_{13} &= \frac{1}{A_1 F_{13}} = 3,3333 \quad R_{23} = \frac{1}{A_2 F_{23}} = 1,25 \\
R_{via3} &= R_{13} + R_{23} = 4,5833 \\
F_{12 \text{ via3}} &= \frac{1}{A_1 R_{via3}} = \frac{1}{1 \times 4,5833} = 0,21818 \\
F_{12}^{total} &= 0,20 + 0,21818 = 0,41818 \\
q_{12} &= A_1 F_{12}^{total} (E_{b1} - E_{b2}) = 1,00 \times 0,41818 (56700 - 1451,52) = \\
&= 23103,9 \text{ W} \\
q_{12} &\approx 2,31 \times 10^4 \text{ W}.
\end{aligned}$$

I. PENUTUP

Bab ini membahas konsep dasar dan perhitungan fenomena perpindahan panas melalui konduksi, konveksi, dan radiasi, termasuk keterkaitan matematis dan penerapan industrinya. Pemahaman yang mendalam terhadap ketiga mekanisme ini sangat penting sebelum memasuki kajian lanjutan pada Bab 4, yang akan menguraikan perpindahan massa, termasuk difusi, konveksi massa, dan transport melalui membran.

Latihan Soal

A. Isian Singkat

1. Perpindahan panas yang terjadi melalui interaksi molekuler tanpa perpindahan massa disebut _____.
2. Dua dinding memiliki ketebalan yang sama. Dinding A memiliki konduktivitas termal 5 kali lebih besar daripada dinding B. Jika beda suhu pada kedua dinding sama, maka laju perpindahan panas melalui dinding A adalah _____ kali laju perpindahan panas melalui dinding B.
3. Pada sebuah pipa berisolasi, ketebalan isolasi diperbesar dua kali lipat sehingga resistansi termal total meningkat. Akibatnya, heat loss dari pipa akan _____.
4. Sebuah permukaan panas berada pada suhu 600 K. Jika suhu permukaan dinaikkan menjadi 1200 K dan emisivitas tetap, maka energi radiasi yang dipancarkan meningkat sebesar _____ kali.
5. Pada konveksi paksa, peningkatan kecepatan aliran fluida menyebabkan lapisan batas termal menjadi lebih tipis. Akibatnya koefisien perpindahan panas konveksi (h) cenderung _____.

B. Essai

1. Sebuah pelat baja karbon dengan konduktivitas termal (k) sebesar $54 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ memiliki ketebalan $0,03 \text{ m}$ dan luas penampang $0,8 \text{ m}^2$. Jika suhu pada sisi pertama pelat adalah 200°C dan sisi lainnya 80°C , tentukan:
 - a. Laju perpindahan panas (Q) melalui pelat (dalam Watt).

- b. Fluks panas (q/A) dalam W/m^2 .
2. Udara pada suhu $30^\circ C$ dihembuskan di atas plat datar aluminium berukuran 60×80 cm yang dijaga pada suhu $300^\circ C$. Koefisien perpindahan panas konveksi udara yang mengalir $28 W/m^2 \cdot ^\circ C$. Plat tersebut memiliki ketebalan 4 cm, dengan konduktivitas termal (k) = $205 W/m \cdot ^\circ C$. Diketahui bahwa sebanyak 400 W panas hilang karena radiasi. Hitunglah temperatur bagian dalam plat (T_i).
 3. Steam pada $T_{\infty 1} = 400^\circ C$ mengalir kedalam pipa besi cor ($k = 80 W/m \cdot ^\circ C$) yang diameter dalam dan luarnya masing-masing $D_1 = 4$ cm dan $D_2 = 6$ cm dengan Panjang pipa $L = 1$ m. pipa tersebut dilapisi dengan insulasi *glass wool* setebal 3 cm dengan $k = 0.05 W/m \cdot ^\circ C$. Panas yang hilang ke lingkungan sebesar $T_{\infty 2} = 10^\circ C$ karena konveksi alami dengan koefisien perpindahan panas konveksi sebesar $h_2 = 18 W/m^2 \cdot ^\circ C$. Kemudian pada aliran steam terjadi aliran panas konveksi dengan koefisien perpindahan panas konveksi $h_1 = 60 W/m^2 \cdot ^\circ C$. Tentukan:
 - a. Gambar skema perpindahan panas pada pipa tersebut.
 - b. Total laju perpindahan panas (*steady state*).
 - c. Temperatur *interface* antara lapisan pipa besi cor dan lapisan *glass wool*.
 4. Sebuah perusahaan manufaktur baja menggunakan tungku pemanas (furnace) untuk memanaskan slab baja sebelum proses rolling. Selama audit energi, ditemukan bahwa sebagian energi panas hilang melalui radiasi dari dinding dalam tungku menuju pintu inspeksi yang sering dibuka saat proses pengamatan. Untuk menyederhanakan analisis, dinding tungku dan pintu inspeksi dianggap sebagai dua pelat hitam sejajar yang saling berhadapan dengan faktor pandang (view factor) sebesar 1.
Diketahui:
 - Luas permukaan dinding tungku = $2 m^2$
 - Temperatur dinding tungku = $900 K$
 - Temperatur pintu inspeksi = $400 K$
 - Konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

Tentukan:

- a. Hitung laju perpindahan panas radiasi bersih dari dinding tungku ke pintu inspeksi.
 - b. Jika temperatur tungku dinaikkan menjadi 1100 K untuk meningkatkan kapasitas produksi, hitung laju perpindahan panas radiasi yang baru.
 - c. Jelaskan mengapa kenaikan temperatur tungku dapat menyebabkan peningkatan kehilangan panas yang sangat signifikan dibandingkan kenaikan temperatur itu sendiri.
5. Sebuah pabrik minyak sawit sedang mengevaluasi efisiensi termal tangki penyimpanan minyak panas. Tangki memiliki dinding baja setebal 8 mm dan mengalami kehilangan panas ke lingkungan melalui mekanisme gabungan konveksi–konduksi–konveksi.

Data operasi:

- Temperatur minyak dalam tangki = 180°C
- Temperatur udara lingkungan = 30°C
- Koefisien konveksi sisi dalam (h_i) = $250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Koefisien konveksi sisi luar (h_o) = $20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Konduktivitas termal baja = $45 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Ketebalan dinding baja = 8 mm
- Luas permukaan tangki = 12 m^2

Tentukan:

- a. Hitung koefisien perpindahan panas menyeluruh (U).
- b. Hitung laju kehilangan panas dari tangki.

BAB 4

PERPINDAHAN MASSA

A. PENGANTAR PERPINDAHAN MASSA

Perpindahan massa (*mass transfer*) adalah fenomena transportasi zat dari satu lokasi ke lokasi lain sebagai akibat adanya perbedaan konsentrasi, tekanan parsial, atau potensial kimia di dalam suatu sistem. Fenomena ini memegang peranan penting dalam berbagai proses industri, terutama pada operasi pemisahan seperti distilasi, absorpsi, ekstraksi, pengeringan, dan adsorpsi (Geankoplis, 2018).

Secara umum, perpindahan massa dapat berlangsung dalam tiga bentuk utama:

1. Difusi molekuler (*molecular diffusion*) – akibat gerakan acak molekul pada skala mikroskopis.
2. Difusi konvektif (*convective diffusion*) – akibat pergerakan makroskopik fluida yang membawa zat terlarut.
3. Perpindahan massa pada antarmuka (*interphase Mass Transfer*) – terjadi antara dua fase berbeda (gas-cair, cair-cair, atau gas-padat).

Fenomena ini sangat erat kaitannya dengan perpindahan panas dan momentum, karena dalam sistem nyata ketiganya sering berlangsung secara simultan. Misalnya pada proses absorpsi gas CO_2 dalam larutan alkali, perpindahan massa CO_2 ke dalam cairan bergantung pada difusi, aliran fluida, dan juga panas reaksi (Cussler, 2009).

B. MEKANISME DASAR PERPINDAHAN MASSA

1. Hukum Fick (*Fick's Law of Diffusion*)

Hukum dasar yang mengatur difusi adalah Hukum Fick, yang menyatakan bahwa laju perpindahan massa sebanding dengan gradien konsentrasi dan berarah dari konsentrasi tinggi ke rendah.

Untuk difusi satu dimensi:

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx}$$

dengan:

J_A = fluks massa komponen A ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$)

D_{AB} = koefisien difusi molekuler antara A dan B (m^2/s)

$\frac{dC_A}{dx}$ = gradien konsentrasi komponen A ($\text{mol/m}^3 \cdot \text{m}$)

Tanda negatif menunjukkan bahwa difusi terjadi ke arah berkurangnya konsentrasi (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2015).

2. Hukum Fick Kedua (*Unsteady Diffusion*)

Untuk kondisi tak tunak (transien), perubahan konsentrasi terhadap waktu dinyatakan oleh Hukum Fick Kedua:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2}$$

Persamaan ini menggambarkan penyebaran massa dalam medium dari waktu ke waktu, dan digunakan untuk menganalisis proses seperti penyebaran gas dalam membran atau difusi uap dalam padatan berpori (Crank, 1975).

3. Koefisien Difusi

Koefisien difusi D_{AB} menggambarkan kecepatan penyebaran molekul dan dipengaruhi oleh temperatur, tekanan, dan sifat molekul. Untuk sistem gas ideal, D_{AB} dapat diperkirakan menggunakan korelasi Fuller-Schettler-Giddings:

$$D_{AB} = 0.001 T^{1.75} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \frac{1}{p(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2}$$

di mana T dalam Kelvin, p tekanan (atm), M massa molekul, dan V volume difusi (Fuller et al., 1966).

Nilai D_{AB} untuk gas umumnya berada pada orde $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, sedangkan untuk cairan pada orde $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Cussler, 2009).

C. DIFUSI GAS DAN CAIR

1. Difusi dalam Fase Gas

Difusi gas sering dijumpai pada proses absorpsi dan desorpsi. Contoh sederhana adalah difusi uap air ke udara kering pada proses pengeringan.

Untuk sistem biner gas A–B, fluks total dapat dinyatakan dengan persamaan Maxwell–Stefan:

$$-\frac{x_B J_A - x_A J_B}{c D_{AB}} = \frac{dx_A}{dz}$$

yang berlaku untuk sistem di mana kedua komponen ikut berdifusi. Dalam kasus gas jarang (*steady-state*, satu arah), persamaan ini dapat disederhanakan menjadi hukum Fick pertama.

Untuk sistem non-isotermis (perbedaan temperatur), terdapat efek tambahan yang disebut difusi termal (*Soret effect*), di mana gradien temperatur turut mendorong perpindahan massa.

2. Difusi dalam Fase Cair

Dalam cairan, difusi jauh lebih lambat karena interaksi molekul yang kuat. Difusi dalam cairan digunakan untuk menganalisis:

- Ekstraksi cair–cair,
- Absorpsi gas ke dalam pelarut cair,
- Proses fermentasi dan bioreaktor.

Hukum Fick tetap berlaku, tetapi dengan nilai D_{AB} lebih kecil. Difusi pada cairan sering dikombinasikan dengan aliran makroskopik, sehingga persamaan umum menjadi:

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx} + C_A v_x$$

dengan v_x adalah kecepatan fluida rata-rata dalam arah x (Bird et al., 2015).

3. Difusi Multikomponen

Untuk campuran dengan lebih dari dua komponen, difusi tidak dapat dijelaskan hanya dengan hukum Fick. Maka digunakan persamaan Maxwell–Stefan secara lengkap:

$$\nabla x_i = \sum_{j \neq i} \frac{x_j(J_i - J_j)}{cD_{ij}}$$

Pendekatan ini digunakan dalam simulasi modern pemisahan gas dan reaksi heterogen (Krishna & Wesselingh, 2015).

D. DIFUSI MELALUI MEMBRAN

1. Prinsip Dasar

Difusi melalui membran merupakan salah satu penerapan penting fenomena perpindahan massa. Membran bertindak sebagai penghalang selektif yang memungkinkan komponen tertentu melewati lapisan berdasarkan ukuran molekul, polaritas, atau kelarutan (Mulder, 2012).

Contoh aplikasi:

- Pemisahan gas (O_2/N_2 , CO_2/CH_4),
- Desalinasi air laut melalui reverse osmosis,
- Pemurnian bioproduk dengan ultrafiltrasi,
- Penangkapan CO_2 pasca-pembakaran.

2. Model Difusi Membran

Fenomena difusi melalui membran umumnya mengikuti model solusi–difusi (*solution–diffusion model*), yang menyatakan bahwa perpindahan zat melalui membran terjadi dalam tiga tahap:

- a. Pelarian (*sorption*) – molekul terlarut diserap di permukaan membran,
- b. Difusi (*diffusion*) – molekul bergerak melalui pori atau matriks polimer,
- c. Desorpsi (*desorption*) – molekul keluar di sisi lain membran.

Fluks massa total diberikan oleh:

$$J = \frac{P(C_1 - C_2)}{L}$$

dengan:

- J : fluks ($\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$),
- P : permeabilitas (m^2/s),
- L : tebal membran (m),
- $C_1 - C_2$ Perbedaan konsentrasi di kedua sisi membran.

Nilai $P = D \times S$, di mana D adalah difusivitas dan S adalah kelarutan komponen dalam membran.

3. Difusi Knudsen dan Permselektif

Dalam membran mikropori, bila ukuran pori mendekati panjang lintasan bebas molekul (λ), maka terjadi difusi Knudsen. Koefisien difusi Knudsen diberikan oleh:

$$D_K = \frac{2}{3} r_p \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

dengan r_p = jari-jari pori, M = massa molekul gas. Difusi ini bergantung pada ukuran pori dan temperatur, dan banyak diterapkan dalam sistem pemisahan gas dan reaktor katalitik (Tabe-Mohammadi, 1999).

E. PERPINDAHAN MASSA ANTARFASE (INTERPHASE MASS TRANSFER)

1. Koefisien Perpindahan Massa

Dalam sistem dua fase (misalnya gas-cair), resistansi terhadap perpindahan massa terdapat di kedua fase. Fluks total dapat ditulis sebagai:

$$N_A = K_G(p_A - p_A^*)$$

atau

$$N_A = K_L(C_A^* - C_A)$$

dengan:

- K_G, K_L : koefisien perpindahan massa keseluruhan (gas/cair),
- p_A, C_A : tekanan parsial dan konsentrasi aktual komponen A,
- p_A^*, C_A^* : tekanan/konsentrasi kesetimbangan di antarmuka.

Hubungan K_G dan K_L terhadap koefisien individual diberikan oleh analogi resistansi seri:

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L}$$

atau

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{mk_G}$$

di mana m adalah konstanta kesetimbangan Henry.

2. Analogi Chilton–Colburn

Fenomena perpindahan massa dan panas sering memiliki kesamaan perilaku matematis. Chilton dan Colburn (1934) mengembangkan analogi j-factor yang menyatukan perpindahan panas, massa, dan momentum:

$$j_H = j_D = j_F$$

dengan:

$$j_D = \frac{Sh}{Re \cdot Sc^{1/3}}$$

Analogi ini digunakan secara luas dalam desain kolom absorpsi dan reaktor kimia (Bird et al., 2015).

F. BILANGAN TAK BERDIMENSI DALAM PERPINDAHAN MASSA

Bilangan tak berdimensi merupakan parameter penting dalam analisis perpindahan massa karena membantu menyederhanakan fenomena fisik yang kompleks menjadi bentuk yang lebih mudah difahami. Setiap bilangan ini menggambarkan perbandingan besaran gaya atau mekanisme transport tertentu sehingga sangat berguna untuk menentukan karakteristik suatu aliran, laju difusi, dan dominasi mekanisme perpindahan massa dalam suatu sistem.

Tabel 4. Bilangan tak Berdimensi pada Perpindahan Massa

Bilangan	Persamaan	Makna Fisik
Reynolds (Re)	$\frac{\rho v L}{\mu}$	Menunjukkan rejim aliran
Schmidt (Sc)	$\frac{\mu}{\rho D_{AB}}$	Rasio difusivitas momentum terhadap massa

Bilangan	Persamaan	Makna Fisik
Sherwood (Sh)	$\frac{kL}{D_{AB}}$	Rasio konveksi terhadap difusi
Peclet (Pe)	$Re \cdot Sc$	Rasio perpindahan konvektif terhadap difusif
Lewis (Le)	$\frac{Sc}{Pr}$	Hubungan antara difusi massa dan panas

Korelasi empiris antara bilangan-bilangan ini memungkinkan perhitungan k_L atau k_G dari data eksperimental.

Sebagai contoh, untuk aliran turbulen dalam pipa:

$$Sh = 0.023Re^{0.8}Sc^{0.33}$$

G. PEMBUKTIAN BILANGAN TAK-BERDIMENSI REYNOLDS (Re)

Bilangan Reynolds (Re) merupakan suatu bentuk bilangan yang tak memiliki satuan, yaitu suatu gaya yang mendorong fluida untuk terus bergerak yang dibagi dengan besarnya viskositas dari fluida. Besar kecilnya nilai Re menunjukkan jenis aliran, apakah aliran tersebut laminar (viskositas mendominasi) atau turbulen (gaya inersia mendominasi). Adapun pembuktian bahwa bilangan Reynolds merupakan suatu bentuk bilangan tak berdimensi adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \text{ dimana:}$$

$$[\rho] = \text{masa jenis} = ML^{-3} \text{ (massa per volume)}$$

$$[v] = \text{kecepatan} = LT^{-1}$$

$$[L] = \text{panjang} = L$$

$$\mu = \text{viskositas dinamis} = ML^{-1}T^{-1} \text{ (satuan kg/(m.s))}$$

Sehingga bentuk persamaannya menjadi:

$$[Re] = \frac{[\rho] [v] [L]}{[\mu]} = \frac{(ML^{-3}) (LT^{-1}) (L)}{ML^{-1}T^{-1}} \text{ menunjukkan semua dimensi saling}$$

meniadakan satu dengan yang lainnya. Perlu diketahui bahwa bilangan Re membandingkan gaya inersia dengan gaya viskositasnya sehingga satuan-satuannya selalu saling membatalkan.

H. APLIKASI PERPINDAHAN MASSA DI INDUSTRI

1. Industri Energi dan Lingkungan
 - Proses penyerapan CO₂ dalam amina (MEA) untuk *carbon capture*.
 - Difusi oksigen dalam sistem bioreaktor dan pengolahan air limbah.
 - Pemisahan hidrogen melalui membran logam.
2. Industri Kimia dan Petrokimia
 - Distilasi dan absorpsi gas pada kolom fraksinasi.
 - Ekstraksi cair–cair pada pemisahan pelarut organik.
 - Difusi reaktan dalam katalis pori mikropori.
3. Industri Pangan dan Farmasi
 - Difusi air dalam pengeringan bahan pangan.
 - Difusi zat aktif melalui membran kulit pada obat transdermal.

Perancangan operasi tersebut memerlukan pemahaman mendalam terhadap resistansi difusif dan konvektif antar fase.

I. PENUTUP

Bab ini telah menguraikan konsep dasar perpindahan massa, mencakup hukum Fick, difusi gas dan cair, serta fenomena perpindahan melalui membran dan antarfase. Prinsip-prinsip yang telah dibahas menjadi fondasi penting dalam memahami fenomena transportasi zat di berbagai sistem industri.

Bab berikutnya (Bab 5) akan membahas perpindahan momentum, yang berkaitan dengan gaya geser, viskositas, dan dinamika fluida, serta aplikasinya dalam desain sistem perpipaan, pompa, dan reaktor.

Latihan Soal

A. Isian Singkat

1. Pada proses absorpsi gas, jika resistansi perpindahan massa di fase cair jauh lebih besar dibanding fase gas, maka peningkatan koefisien perpindahan massa yang paling efektif dilakukan pada fase _____.
2. Sebuah gas A berdifusi melalui gas B dengan koefisien difusi $D_{AB} = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Jika gradien konsentrasi dinaikkan menjadi

- dua kali lipat sementara parameter lain tetap, maka fluks difusi akan meningkat sebesar _____ kali.
3. Pada proses difusi melalui membran, ketebalan membran dinaikkan dari 1 mm menjadi 2 mm. Jika permeabilitas dan beda konsentrasi tetap, maka fluks massa menjadi _____ dari nilai semula.
 4. Suatu sistem memiliki bilangan Schmidt (Sc) yang sangat besar. Hal ini menunjukkan bahwa difusi massa berlangsung lebih _____ dibandingkan dengan difusi momentum.
 5. Jika Bilangan Reynolds suatu aliran meningkat dari 10.000 menjadi 20.000 dan korelasi Sherwood mengikuti:

$$Sh = 0.023Re^{0.8}Sc^{0.33}$$
 maka nilai Sherwood meningkat sekitar _____ kali.

B. Essai

1. Sebuah perusahaan bioteknologi mengoperasikan bioreaktor untuk produksi enzim. Selama proses fermentasi ditemukan bahwa suplai oksigen menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroorganisme. Koefisien difusi O_2 dalam medium = $2,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Konsentrasi O_2 pada permukaan cairan = $0,12 \text{ mol/m}^3$. Konsentrasi O_2 pada lokasi sel = $0,02 \text{ mol/m}^3$. Jarak difusi = 5 mm. Tentukan:
 - a. Hitung fluks difusi oksigen menuju sel.
 - b. Jika jarak difusi meningkat dua kali lipat akibat pembentukan biofilm, hitung fluks baru.
 - c. Jelaskan dampak fenomena ini terhadap produktivitas fermentasi.
2. Sebuah pabrik pupuk ingin mengurangi emisi CO_2 menggunakan membran polimer. Permeabilitas membran = $1,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Ketebalan membran = 0,5 mm. Konsentrasi sisi umpan = 8 mol/m^3 . Konsentrasi sisi permeat = 2 mol/m^3 . Tentukan:
 - a. Hitung fluks CO_2 yang melewati membran.
 - b. Jika ketebalan membran dikurangi menjadi 0,25 mm, hitung fluks baru.
 - c. Diskusikan keuntungan dan risiko penggunaan membran yang lebih tipis.

3. Sebuah pabrik pupuk menggunakan absorber untuk menangkap amonia dari gas buang.

Data:

- $k_G = 0,020 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$
- $k_L = 0,005 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$
- Konstanta Henry $m = 2$

Tentukan:

- Hitung koefisien perpindahan massa keseluruhan berbasis gas K_G .
 - Tentukan fase yang memberikan resistansi dominan.
 - Jika perusahaan hanya dapat meningkatkan salah satu koefisien individual sebesar dua kali lipat, koefisien mana yang sebaiknya ditingkatkan?
4. Sebuah industri pengeringan mangga menggunakan udara panas untuk menghilangkan kadar air.

Data:

- Reynolds awal = 15.000
- Reynolds akhir = 30.000
- Schmidt = 0,80

Gunakan korelasi:

$$Sh = 0.023 Re^{0.8} Sc^{0.33}$$

Tentukan:

- Hitung Sherwood awal dan akhir
 - Hitung persentase peningkatan Sherwood.
 - Jelaskan hubungan peningkatan kecepatan udara terhadap laju pengeringan.
5. Sebuah pembangkit listrik sedang mengevaluasi proses absorpsi CO_2 menggunakan larutan amina. Luas kontak gas-cair = 200 m^2 . Koefisien keseluruhan $K_L = 2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Konsentrasi kesetimbangan $C_A^* = 0,80 \text{ mol/m}^3$. Konsentrasi aktual $C_A = 0,20 \text{ mol/m}^3$. Tentukan:

- a. Hitung fluks perpindahan massa CO_2 .
- b. Hitung laju perpindahan massa total.

BAB 5

PERPINDAHAN MOMENTUM

A. PENGANTAR PERPINDAHAN MOMENTUM

Perpindahan momentum merupakan salah satu fenomena dasar dalam ilmu transport yang berhubungan dengan gaya dan gerak fluida. Dalam konteks teknik, fenomena ini menjadi dasar untuk memahami mekanika fluida, aliran dalam pipa, operasi pompa dan kompresor, serta rancangan peralatan perpindahan panas dan massa (White, 2011).

Fenomena perpindahan momentum terjadi ketika lapisan fluida yang bergerak dengan kecepatan berbeda saling berinteraksi dan menghasilkan gaya geser (*shear stress*). Gaya geser ini mentransfer momentum antar lapisan sehingga menghasilkan profil kecepatan tertentu. Secara matematis, fenomena ini diatur oleh Hukum Newton tentang Viskositas dan secara umum oleh Persamaan Navier–Stokes (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2015).

Sebagaimana halnya perpindahan panas dan massa, perpindahan momentum juga dapat dijelaskan dalam bentuk analog transport phenomena, karena kesamaan bentuk persamaan diferensialnya (Incropera et al., 2017).

B. HUKUM GERAK NEWTON TENTANG VISKOSITAS

1. Pengertian

Fluida yang mengikuti hubungan linear antara tegangan geser dan gradien kecepatan disebut fluida Newtonian. Hubungan ini dijelaskan oleh Hukum Newton tentang Viskositas:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

dengan:

- τ : tegangan geser (Pa atau N/m^2),
- μ : viskositas dinamik ($\text{Pa}\cdot\text{s}$),
- $\frac{du}{dy}$: gradien kecepatan tegak lurus arah aliran (s^{-1}).

Hukum ini menyatakan bahwa gaya geser dalam fluida sebanding dengan laju perubahan kecepatan antar lapisan.

Contoh Kasus dan Penyelesaian Kualitatifnya

Menghitung Tegangan Geser Fluida Newtonian dalam Celah Paralel.

Air (fluida Newtonian) mengalir dalam celah sempit antara dua pelat sejajar. Pelat bawah diam, sedangkan pelat atas bergerak dengan kecepatan 0,5 m/s. Jarak kedua pelat adalah 5 mm dan viskositas air adalah 0,001 Pa·s.

Hitung tegangan geser yang terjadi pada pelat bawah.

Gunakan Hukum Newton tentang viskositas:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Diketahui:

- $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- $u = 0,5 \text{ m/s}$
- $y = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$

Gradien Kecepatan

$$\frac{du}{dy} = \frac{0,5 \text{ m/s}}{0,005 \text{ m}} = 100 \text{ s}^{-1}$$

Tegangan Geser

$$\tau = (0,001)(100) = 0,1 \text{ Pa}$$

2. Fluida Newtonian dan Non-Newtonian

Dalam kajian perpindahan momentum, karakteristik fluida terhadap gaya geser menjadi aspek yang sangat penting. Ketika fluida mengalir membentuk aliran berlapis (*shear flow*), maka gaya geser yang bekerja akan

memengaruhi perubahan elemen fluida. Hubungan antara tegangan geser dengan laju regangan geser inilah yang digunakan untuk mengklasifikasikan suatu fluida menjadi jenis berikut ini:

- 1) Fluida Newtonian, menunjukkan hubungan linear antara τ dan du/dy . Artinya, besarnya gaya yang diberikan pada fluida sebanding dengan besarnya gerakan/perpindahan dari fluida tersebut. Garis linear yang terbentuk menunjukkan properties viskositas fluida.

Contoh: air, udara, etanol, dan cairan industri sederhana seperti minyak pelumas ringan.

Ciri utama dari fluida newtonian adalah viskositasnya tidak berubah meskipun gaya geser atau kecepatan alirannya meningkat. Oleh sebab itu, karakteristik pengalirannya dapat dengan mudah diprediksi dengan persamaan dasar mekanika fluida.

- 2) Fluida non-Newtonian menunjukkan hubungan nonlinier antara tegangan geser dan gradien kecepatan. Artinya, viskositas dari fluida ini dapat berubah-ubah tergantung pada gaya geser dan faktor lainnya.

Secara umum, fluida non-newtonian terbagi menjadi beberapa jenis karakteristik perilaku aliran, diantaranya:

- a. *Shear Thinning (Pseudoplastic)*

Angka viskositas akan menurun saat $\frac{dv}{dy}$ meningkat. Contoh: kecap, darah, cat tembok.

- b. *Shear Thickening (Dilatant)*

Angka viskositas akan meningkat saat $\frac{dv}{dy}$ naik.

Contoh: oobleck (suspensi pati).

- c. *Bingham Plastics*

Baru akan bergerak/ mengalir jika fluidanya mencapai nilai tegangan geser (τ) minimum. Contoh: pasta gigi, lumpur pengeboran.

- d. *Thixotropic*

Seiring terjadinya pergerakan fluida, maka viskositas menurun. Contoh: yoghurt.

- e. *Rheopectic*

Seiring terjadinya pergerakan fluida, maka viskositas meningkat. Contoh: krim.

Pada fluida non-newtonian, analisis perpindahan momentum membutuhkan model reologi khusus seperti Power-Law Model, Bingham, atau Herschel-Bulkley, sebab hukum newtonian viskositas tidak cukup mewakili fenomena pengaliran yang nyata.

1) Power-Law Model

Penerapan model ini banyak digunakan untuk fluida yang menunjukkan berubahnya sifat viskositas fluida akibat adanya perubahan gaya geser, baik jenis *shear-thinning* maupun *shear-thickening*. Hubungan umum fluida non-Newtonian dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\tau = K\left(\frac{du}{dy}\right)^n$$

dengan:

- K : konsistensi fluida ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$),
- n : indeks aliran.

Nilai $n < 1$ menunjukkan perilaku *pseudoplastik*, sedangkan $n > 1$ menunjukkan *dilatant* (Bird et al., 2015).

2) Bingham Plastic Model

Ada beberapa jenis fluida yang tidak akan langsung mengalir jika diberi gaya gesek yang tergolong kecil. Untuk memulai pergerakan, mereka memerlukan tegangan awal tertentu. Model ini untuk fluida yang memiliki *yield stress*:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dy}$$

dimana μ sebagai viskositas fluida dan τ_0 sebagai tegangan awal minimal yang harus dilampaui fluida agar bisa mulai mengalir.

3) Herschel-Bulkley Model

Model ini adalah gabungan konsep Bingham dan Power-Law, sehingga lebih fleksibel dalam mewakili fluida yang kompleks seperti slurry dan pewarna cat. Persamaannya ditulis dalam bentuk sebagai berikut:

$$\tau = \tau_0 + K\left(\frac{dv}{dy}\right)^n$$

Fluida ini dapat menunjukkan *yield stress*, dan sekaligus *shear-thinning* atau *shear-thickening*.

Model ini dominan penerapannya dalam simulasi CFD untuk industri polimer, pulp&paper serta material basis partikel.

Contoh Kasus dan Penyelesaian Kualitatifnya

Dilakukan uji reologi pada suatu fluida pekat. Didapatkan data sebagai berikut:

Laju Geser ($\dot{\gamma}$, s^{-1})	Tegangan Geser (τ , Pa)
10	9.8
20	23.7
40	62.1
80	165.3

Asumsikan fluida mengikuti model *Ostwald-de Waele (Power Law)*:

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \text{ atau } \tau = K \dot{\gamma}^n$$

Tentukan:

- Nilai indeks aliran (n).
- Nilai konsistensi fluida (K).
- Viskositas semu pada $\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$.

Penyelesaian:

- Nilai Indeks aliran (n)

Linierisasi persamaan $\tau = K \dot{\gamma}^n$ menjadi persamaan berikut,

$$\ln \tau = \ln K + n \ln \dot{\gamma}$$

sehingga mencari slope dari persamaan tersebut menjadi,

$$n = \frac{\ln \tau_2 - \ln \tau_1}{\ln \dot{\gamma}_2 - \ln \dot{\gamma}_1}$$
$$n = \frac{\ln (165,3) - \ln (9,8)}{\ln (80) - \ln (10)}$$

$$n = \frac{2,824}{2,079} \approx 1,36 \text{ (fluida dilatant)}$$

b. Nilai konsistensi fluida (K)

diambil pada titik ke-2 ($\tau = 23,7 \text{ Pa}; \gamma = 20 \text{ s}^{-1}$)

$$\tau = K\gamma^n$$

$$K = \frac{\tau}{\gamma^n}$$

$$K = \frac{23,7}{20^{2,36}} \approx 0,41$$

c. Viskositas semu pada $\gamma = 50 \text{ s}^{-1}$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

$$\eta = \frac{64}{50} \approx 1,28 \text{ Pa.s}$$

C. PERSAMAAN MOMENTUM DIFERENSIAL (NAVIER-STOKES)

1. Prinsip Dasar Konservasi Momentum

Konservasi momentum menyatakan bahwa perubahan momentum dalam suatu elemen fluida sama dengan resultan gaya yang bekerja padanya. Dalam bentuk umum, persamaan momentum (untuk fluida Newtonian dan inkompresibel) adalah:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g$$

dengan:

- ρ : densitas fluida (kg/m^3),
- v : vektor kecepatan (m/s),
- p : tekanan (Pa),
- μ : viskositas dinamik (Pa.s),
- g : percepatan gravitasi (m/s^2).

Persamaan ini dikenal sebagai Persamaan Navier–Stokes, yang merupakan turunan langsung dari hukum Newton kedua yang diterapkan pada fluida kontinu (Çengel & Cimbala, 2020).

2. Bentuk Sederhana Aliran Laminar Satu Dimensi

Untuk aliran laminar, tunak, dan satu dimensi dalam pipa horizontal (tanpa gradien tekanan lateral), persamaan di atas disederhanakan menjadi:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

Dengan kondisi batas:

- $u = 0$ di dinding ($r = R$)
- $\frac{du}{dr} = 0$ di pusat pipa ($r = 0$)

Solusi integral menghasilkan profil kecepatan parabola (*Poiseuille flow*):

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) (R^2 - r^2)$$

dan laju aliran volumetrik total:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left(\frac{\Delta p}{L} \right)$$

Hubungan ini dikenal sebagai Persamaan Hagen–Poiseuille, berlaku untuk aliran laminar dalam pipa sirkular (Bird et al., 2015).

D. VISKOSITAS DAN FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI

Viskositas adalah sifat fluida yang menyatakan resistansi terhadap aliran atau deformasi. Nilai viskositas sangat bergantung pada temperatur dan tekanan.

1. Pengaruh Temperatur

- Pada cairan, viskositas menurun dengan meningkatnya temperatur karena gaya kohesi melemah.

$$\mu = A e^{\frac{B}{T}}$$

(Persamaan Andrade)

- Pada gas, viskositas meningkat dengan temperatur karena tumbukan molekul yang lebih sering.

2. Pengaruh Tekanan

Tekanan berpengaruh kecil pada cairan, tetapi signifikan untuk gas pada tekanan tinggi.

3. Korelasi Empiris

Untuk gas ideal, viskositas dapat diperkirakan dengan Persamaan Sutherland:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S}$$

E. REZIM ALIRAN DAN BILANGAN TAK BERDIMENSI

1. Bilangan Reynolds (Re)

Bilangan Reynolds merupakan parameter utama yang menentukan jenis aliran fluida:

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

- $Re < 2100$: aliran laminar (teratur).
- $2100 < Re < 4000$: aliran transisi.
- $Re > 4000$: aliran turbulen (acak dan berputar).

Contoh Kasus dan Penyelesaian Kualitatifnya

Menentukan Jenis Aliran & Faktor Gesekan (Re dan f)

Air mengalir dalam pipa dengan diameter 0,02 m dan kecepatan rata-rata 1 m/s. Densitas air adalah 1000 kg/m³ dan viskositas 0,001 Pa·s.

Tentukan:

- a. Nilai Bilangan Reynolds (Re)
- b. Jenis aliran (laminar/turbulen)
- c. Faktor gesekan f menggunakan korelasi laminar/turbulen.

Penyelesaian:

- a. Bilangan Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$
$$Re = \frac{1000 (1)(0,02)}{0,001} = 20000$$

b. Jenis aliran

Karena $Re = 20.000$ maka termasuk aliran turbulen

c. Faktor gesekan

$$\begin{aligned}f &= 0.316 Re^{-0.25} \\f &= 0.316 20000^{-0.25} \\f &= 0,0376\end{aligned}$$

2. Bilangan Froude (Fr) dan Euler (Eu)

- Froude (Fr): $\frac{v^2}{gL} \rightarrow$ rasio gaya inersia terhadap gaya gravitasi.
- Euler (Eu): $\frac{p}{\rho v^2} \rightarrow$ rasio gaya tekanan terhadap gaya inersia.

Bilangan tak berdimensi ini digunakan untuk membandingkan kondisi aliran antar sistem berbeda dan menskalakan percobaan ke sistem industri (*dynamic similarity*).

F. ALIRAN LAMINAR DAN TURBULEN

1. Aliran Laminar

Dalam aliran laminar, partikel fluida bergerak dalam lintasan paralel tanpa pencampuran lateral. Analisis dapat dilakukan secara analitik menggunakan persamaan Navier–Stokes.

2. Aliran Turbulen

Pada aliran turbulen, kecepatan berfluktuasi secara acak terhadap waktu dan ruang. Rata-rata kecepatan dinyatakan sebagai:

$$v = \bar{v} + v'$$

di mana v' adalah fluktuasi kecepatan. Persamaan Navier–Stokes untuk aliran turbulen melibatkan tambahan tegangan Reynolds:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} - \rho \bar{u'v'}$$

yang menggambarkan transfer momentum akibat fluktuasi turbulen (Pope, 2000).

G. PERSAMAAN MOMENTUM PADA SISTEM FLUIDA NYATA

1. Persamaan Bernoulli

Untuk fluida ideal (tanpa viskositas), hukum kekekalan energi mekanik menghasilkan Persamaan Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{konstan}$$

Namun dalam sistem nyata, efek viskositas menimbulkan kehilangan tekanan (*head loss*), sehingga persamaan menjadi:

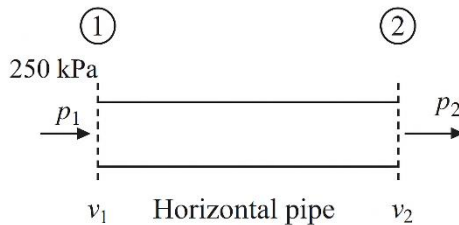
$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

dengan h_f adalah kehilangan energi karena gesekan.

Contoh Kasus dan Penyelesaian Kualitatifnya

Perhitungan Tekanan Menggunakan Persamaan Bernoulli

Air mengalir dalam pipa horizontal dari titik 1 ke titik 2.



Diketahui:

- Kecepatan di titik 1 = 1,5 m/s
- Tekanan di titik 1 = 250 kPa
- Kecepatan di titik 2 = 3,0 m/s
- Perbedaan elevasi = 0 (pipa horizontal)
- Abaikan kehilangan tekanan ($h_f \approx 0$)

Hitung tekanan di titik 2 (p_2).

Penyelesaian:

Gunakan Persamaan Bernoulli untuk fluida nyata

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

Karena tidak ada perbedaan ketinggian maka $z_1 = z_2 = 0$ dan kehilangan tekanan diabaikan maka $h_f \approx 0$. Sehingga persamaan menjadi,

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2)$$

Diketahui:

ρ air = 1000 kg/m³

p_1 = 250.000 Pa

v_1 = 1,5 m/s

v_2 = 3,0 m/s

Menghitung p_2

$$p_2 = 250000 + \frac{1}{2} (1000) (1,5^2 - 3,0^2)$$
$$p_2 = 250000 - 3375 = 246625 \text{ Pa}$$

2. Kehilangan Tekanan (*Pressure Drop*)

Untuk aliran dalam pipa:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

di mana f adalah faktor gesekan (*Darcy–Weisbach*), ditentukan oleh korelasi empiris:

$$\text{Laminar: } f = \frac{64}{Re}$$

$$\text{Turbulen (Blasius): } f = 0.316 Re^{-0.25}$$

Contoh Kasus dan Penyelesaian Kualitatifnya

Menghitung Kehilangan Tekanan (*Pressure Drop*) dalam Pipa

Dalam pipa horizontal sepanjang 30 m dan diameter 0,05 m, air mengalir dengan kecepatan 1,2 m/s. Gunakan $f = 0,03$ (dari tabel atau korelasi). Hitung *head loss* (h_f) akibat gesekan menggunakan persamaan Darcy–Weisbach.

Diketahui:

$$f = 0,03$$

$$L = 30 \text{ m}$$

$$D = 0,05 \text{ m}$$

$$v = 1,2 \text{ m/s}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} h_f &= f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \\ h_f &= 0,03 \frac{30}{0,05} \frac{1,2^2}{2(9,8)} \\ h_f &= 0,03(600) \left(\frac{1,44}{19,62} \right) \\ h_f &= 1,32 \text{ m} \end{aligned}$$

H. ANALOGI PERPINDAHAN MOMENTUM, PANAS, DAN MASSA

Fenomena perpindahan momentum, panas, dan massa memiliki bentuk matematis yang serupa, sehingga memungkinkan penggunaan analogi transportasi.

1. Analogi Reynolds

$$\frac{h}{\rho c_p v} = \frac{k}{\mu v}$$

2. Analogi Chilton–Colburn

$$j_H = j_D = j_F$$

dengan:

Faktor Chilton–Colburn untuk perpindahan panas dan massa masing-masing dinyatakan sebagai:

- Untuk perpindahan panas:

$$j_H = St_H Pr^{2/3}$$

- Untuk perpindahan massa:

$$j_D = St_D Sc^{2/3}$$

di mana:

j_H = faktor Chilton–Colburn untuk panas,

j_D = faktor Chilton–Colburn untuk massa,

St_H, St_D = bilangan Stanton untuk panas dan massa,

Pr = bilangan Prandtl,

Sc = bilangan Schmidt.

Persamaan ini digunakan untuk menghubungkan perpindahan momentum, panas, dan massa dalam sistem aliran fluida turbulen — salah satu konsep penting dalam analogi Chilton–Colburn (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2015).

I. APLIKASI PERPINDAHAN MOMENTUM DI INDUSTRI

Perpindahan/transfer momentum merupakan dasar dari berbagai fenomena aliran fluida yang banyak dijumpai di suatu sistem proses di industri, terutama industri kimia. Implementasinya tidak hanya sebatas pada pengaturan laju aliran, tetapi juga mencakup pengendalian tekanan proses pencampuran (*mixing process*), transportasi fluida, hingga konversi bentuk energi di dalam peralatan proses kimia. Berikut beberapa contoh penerapannya pada sektor industri:

1. Industri Kimia dan Petrokimia

- Desain pompa, kompresor, dan sistem perpipaan.
Untuk mengalirkan fluida antarunit dalam suatu sistem serta memastikan efisiensi distribusi fluida.
- Analisis kehilangan tekanan pada kolom distilasi dan reaktor fluida.
Memastikan aliran fase gas-cair stabil sehingga reaksi berlangsung optimal.
- Desain dan operasi reaktor ber-agitasi
Pengaruh tegangan geser (*shear stress*) untuk homogenisasi campuran, terutama pada kasus reaksi banyak fase.
- Proses pencampuran pada proses cair-cair dan cair-padat
Perpindahan momentum dari impeller yang membantu proses emulsifikasi.
- Operasi fluidisasi
Untuk mengontrol kondisi partikel tetap melayang dan distribusi merata.

2. Industri Energi

- Analisis aliran bahan bakar pada sistem pembakaran.
Ada pengaruh dari kecepatan aliran fluida dan turbulensi pada efisiensi pembakaran di boiler dan gas turbine.
- Desain sistem pendingin pada pembangkit listrik.
Termasuk di dalamnya penerapan pada aliran *cross-flow* pada HE agar operasi berjalan aman.
- Aliran fluida pada turbin dan pompa sentrifugal
Untuk konversi energi dari fluida menjadi energi gerak atau sebaliknya.

3. Industri Proses dan Lingkungan

- Desain reaktor aliran turbulen pada *jet bubble column*.
Meningkatkan efisiensi perpindahan momentum dan massa antara gas dan cair pada proses pengolahan air limbah (Nugroho, Didiek Hari, 2025).
- Sistem pengolahan air limbah industri pupuk urea dengan menggunakan *jet bubble reactor*
Meningkatkan efisiensi penyisihan kadar amonia yang terkandung didalam limbah cair (*ammonia removal*) dan meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa (K_La) (Nugroho, Didiek Hari, 2025; Nugroho, 2025; Nugroho, 2024).
- Sistem pengolahan air limbah dan aerasi mekanis.
Pola aliran memengaruhi besarnya oksigen yang terlarut dan efisiensi pengolahan biologis.
- Transport dan distribusi air minum
Mengontrol tekanan distribusi dan meminimalkan *headloss*.

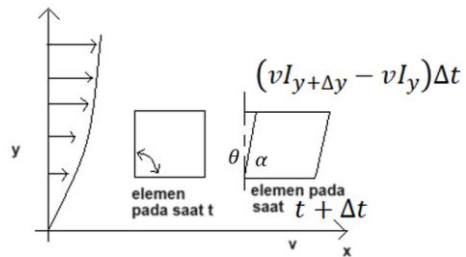
4. Industri Makanan dan Farmasi

- Proses pasteurisasi dan sterilisasi berbasis aliran fluida
Aliran fluida berpengaruh pada kesegaraman pemanasan produk.
- Pencampuran viskositas tinggi
Adonan, krim, atau sirup membutuhkan analisis *shear stress* untuk menjaga tekstur produk.

Dalam setiap aplikasi, pengendalian momentum aliran menjadi kunci dalam menjaga efisiensi perpindahan panas dan massa serta kestabilan operasi sistem (Çengel & Cimbala, 2020).

J. DEFORMASI ELEMEN FLUIDA DAN LAJU REGANGAN GESER

Pada kasus fluida yang mengalir, transfer momentum tidak hanya menyebabkan percepatan dan perubahan arah aliran saja, tetapi juga perubahan bentuk elemen fluida. Saat gradien kecepatan antar dua lapisan fluida yang bersebelahan,



maka lapisan yang kecepatannya lebih tinggi akan menarik lapisan di dekatnya, sehingga elemen fluida mengalami deformasi. Gradien kecepatan memberikan kontribusi pada komponen tegangan geser (Bird, Stewart & Lightfoot, 2015).

Perhatikan kondisi awal elemen fluida berbentuk suatu persegi pada waktu awal t . Apabila aliran fluida memiliki kecepatan v yang berubah menurut arah tegak lurus aliran (contohnya di arah y), maka setelah selang waktu $t + \Delta t$, salah satu sisi dari elemen tersebut bergerak lebih cepat dibanding sisi lainnya, yang menyebabkan perubahan sudut elemen sebesar θ .

Adapun deformasi ini dikenal sebagai regangan geser (shear strain)/ $\frac{d\theta}{dt}$ dan dinyatakan sebagai:

$$\tan\theta = \frac{(v|y+\Delta y - v|y)\Delta t}{\Delta y}, \text{ tapi jika sudut } \tan\theta \approx \theta, \text{ maka ditulis dalam bentuk:}$$

$$\tan\theta = \frac{(v|y+\Delta y - v|y)\Delta t}{\Delta y}, \text{ jika } \Delta y = 0 \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{dv}{dy}.$$

1. Regangan Geser dalam Perpindahan Momentum

Dalam fluida, deformasi ini terjadi dikarenakan terdapat gaya geser antara lapisan yang terbentuk di fluida. Newton kemudian merumuskan korelasi ini yaitu hubungan linearitas antara tegangan geser dengan laju

regangan geser, yang dikenal sebagai Hukum Newton Viskositas (Bird, Stewart & Lightfoot, 2015):

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

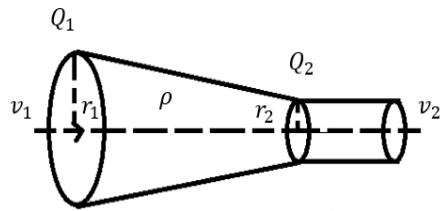
Hubungan ini menjadi dasar analisis perpindahan momentum, baik pada aliran laminar dalam pipa, maupun di dalam suatu operasi industri yang melibatkan fluida seperti proses pencampuran dan sistem perpipaan.

K. CONTOH KASUS DAN PENYELESAIAN KALKULATIFNYA

Pada suatu aliran pipa yang mengalami penyempitan penampang, fluida berupa air mengalir melewati bagian hulu dengan kecepatan awal sebesar 2 m/det. Diketahui diameter penampang pada bagian hulu tersebut sepanjang (D_1) 2 meter, sedangkan diameter penampang pada bagian hilir setelah mengalami penyempitan (D_2) sepanjang 1 meter. Berdasarkan prinsip kontinuitas aliran pada fluida tak termampatkan, tentukan besaran kecepatan aliran air keluar penampang pipa.

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_2 \\ v_1 A_1 &= v_2 A_2 \\ v_1 (\pi r_1^2) &= v_2 (\pi r_2^2) \\ \frac{v_1}{v_2} &= \frac{(\pi r_1^2)}{(\pi r_2^2)} \end{aligned}$$



1. Luas penampang pipa: $A = \frac{\pi D^2}{4}$
 $A_1 = \frac{\pi(2,0)^2}{4} = \pi(1) = 3,14159 \text{ m}^2$
 $A_2 = \frac{\pi(1,0)^2}{4} = \pi(0,25) = 0,785398 \text{ m}^2$
2. Debit volumetrik: $Q = v_1 A_1$
 $Q = 2,0 \times 3,14159 = 6,28318 \text{ m}^3/\text{s} = 376991,1 \text{ L/min}$
3. v_2 dari kontinuitas: $v_2 = \frac{Q}{A_2}$ atau $v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2}$
 $v_2 = 2,0 \times \frac{3,14159}{0,785398} = 2,0 \times 4 = 8,00 \text{ m/s}.$

L. PENUTUP

Bab ini telah menguraikan prinsip-prinsip dasar perpindahan momentum, dimulai dari hukum Newton tentang viskositas, persamaan Navier–Stokes, hingga aplikasi nyata pada sistem industri. Pemahaman terhadap mekanika fluida dan viskositas sangat penting untuk menganalisis sistem perpindahan panas dan massa, karena momentum merupakan penggerak utama transportasi energi dan zat dalam sistem teknik.

Bab berikutnya (Bab 6) akan membahas aplikasi fenomena perpindahan dalam industri, dengan fokus pada sektor energi, kimia, dan pangan — di mana ketiga fenomena (panas, massa, dan momentum) bekerja secara simultan.

Latihan Soal

A. Isian Singkat

1. Dalam suatu aliran fluida, perpindahan momentum terjadi karena adanya interaksi antar lapisan fluida yang bergerak dengan kecepatan berbeda. Interaksi tersebut menghasilkan gaya yang bekerja sejajar terhadap permukaan fluida. Gaya tersebut disebut _____.
2. Pada fluida Newtonian, hubungan antara tegangan geser dan gradien kecepatan bersifat linear. Besaran yang menunjukkan hambatan internal fluida terhadap aliran disebut _____.
3. Air dan udara termasuk fluida Newtonian karena nilai viskositasnya relatif tetap meskipun laju geser berubah. Sebaliknya, fluida seperti kecap dan darah memiliki viskositas yang berubah terhadap gaya geser sehingga disebut fluida _____.
4. Dalam mekanika fluida, jenis aliran dapat ditentukan menggunakan bilangan Reynolds. Jika nilai Reynolds kurang dari 2100, maka aliran tersebut termasuk aliran _____.
5. Ketika nilai bilangan Reynolds sangat besar, aliran fluida menjadi tidak teratur dan muncul fluktuasi kecepatan secara acak. Jenis aliran tersebut disebut aliran _____.
6. Persamaan Bernoulli digunakan untuk menjelaskan hubungan tekanan, kecepatan, dan elevasi dalam aliran fluida ideal. Dalam

sistem nyata, adanya efek viskositas menyebabkan kehilangan energi yang dikenal sebagai _____.

7. Pada aliran fluida di dalam pipa, jika luas penampang pipa diperkecil sementara debit dijaga tetap, maka kecepatan aliran fluida akan _____.
8. Persamaan momentum diferensial yang menjadi dasar analisis mekanika fluida dan menggambarkan konservasi momentum pada fluida Newtonian dikenal sebagai persamaan _____.
9. Pada fluida jenis Bingham Plastic, fluida baru dapat mulai mengalir apabila tegangan geser telah melampaui nilai minimum tertentu yang disebut _____.
10. Dalam proses industri seperti distilasi, perpindahan momentum sering dianalisis bersama perpindahan panas dan massa menggunakan pendekatan kesetaraan matematis yang dikenal sebagai analogi _____.

B. Essay

Air mengalir di dalam sebuah pipa horizontal dengan diameter 0,04 m dan kecepatan rata-rata 1,5 m/s. Densitas air adalah 1000 kg/m^3 dan viskositas dinamikanya $0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Tentukan:

- a. Nilai bilangan Reynolds (Re)
- b. Jenis aliran yang terjadi
- c. Jelaskan pengaruh jenis aliran tersebut terhadap perpindahan momentum dalam sistem fluida.

BAB 6

APLIKASI FENOMENA PERPINDAHAN DALAM INDUSTRI

A. PENDAHULUAN

Fenomena perpindahan panas, massa, dan momentum merupakan landasan utama dalam operasi dan perancangan sistem industri. Dalam praktiknya, ketiga fenomena ini tidak pernah terjadi secara terpisah, tetapi selalu berlangsung secara simultan dan saling memengaruhi satu sama lain.



Sumber: <https://id.hdhce.com/industrial-distillation-columns-or-towers>

Gambar 2. Aplikasi Kombinasi Fenomena Perpindahan pada Menara Distilasi

Sebagai contoh, pada menara distilasi, uap bergerak ke atas (perpindahan momentum), sementara panas berpindah dari kondensor ke reboiler (perpindahan panas), dan komponen volatil berdifusi antar fase gas-cair (perpindahan massa). Fenomena serupa juga terjadi pada reaktor kimia, penukar panas, kolom absorpsi, serta proses pengeringan bahan pangan (Geankoplis, 2018; Bird, Stewart, & Lightfoot, 2015).

Dengan memahami keterkaitan ketiga fenomena tersebut, insinyur proses dapat:

- Meningkatkan efisiensi operasi,
- Mengoptimalkan desain alat, dan
- Menghemat energi serta sumber daya.

Oleh karena itu, bab ini akan membahas penerapan terpadu fenomena perpindahan dalam tiga sektor utama: industri energi, industri kimia, dan industri pangan.

B. APLIKASI DALAM INDUSTRI ENERGI

Industri energi sangat bergantung pada efisiensi sistem perpindahan panas, massa, dan momentum. Proses seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit gas alam cair (LNG), dan energi terbarukan (geotermal dan biomassa) melibatkan fenomena perpindahan pada setiap tahap operasional.

1. Penukar Panas (*Heat exchanger*)

Penukar panas digunakan untuk mentransfer energi termal antara dua fluida yang memiliki temperatur berbeda. Mekanisme perpindahan panas di dalam alat ini mencakup:

1. Konduksi di dinding pemisah logam:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

2. Konveksi antara fluida dan permukaan logam:

$$q = hA(T_s - T_f)$$

3. Radiasi jika temperatur sangat tinggi, misalnya pada sistem gas buang turbin.

Untuk keseluruhan sistem, digunakan koefisien perpindahan panas total (U):

$$Q = UA\Delta T_{lm}$$

dengan:

Q : laju perpindahan panas (W),

A : luas permukaan perpindahan panas (m^2),

ΔT_{lm} : beda temperatur log mean ($^{\circ}C$).

Optimasi U menjadi fokus utama dalam desain *heat exchanger* pada sistem pembangkit dan proses LNG (Kreith & Manglik, 2013).

2. Sistem Pembangkit Uap (Boiler dan Kondensor)

Pada boiler, energi termal hasil pembakaran ditransfer ke air hingga berubah menjadi uap. Proses ini melibatkan:

- Konveksi panas dari gas panas ke dinding pipa,
- Konduksi panas melalui dinding logam,
- Perpindahan massa dalam bentuk perubahan fasa cair–uap.

Laju perpindahan panas total diberikan oleh:

$$Q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})$$

di mana $\dot{m}$ adalah laju massa fluida (kg/s).

Sebaliknya, pada kondensor, uap dikonversi kembali menjadi cairan melalui pelepasan panas ke media pendingin (air laut atau udara). Efisiensi termal sistem bergantung pada kapasitas perpindahan panas dan laju kondensasi (Çengel & Ghajar, 2020).

3. Sistem Energi Terbarukan

Dalam pembangkit geotermal dan biomassa, fenomena perpindahan panas dan massa terjadi pada media berpori (tanah atau reaktor biomassa). Perpindahan panas konduksi dan konveksi dikombinasikan dengan reaksi kimia endotermik dan perpindahan momentum gas hasil reaksi (Bejan, 2013).

Untuk sistem panel surya termal, efisiensi konversi panas dihitung sebagai:

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{GA}$$

dengan:

G : intensitas radiasi matahari (W/m^2),

A : luas panel (m^2).

C. APLIKASI DALAM INDUSTRI KIMIA

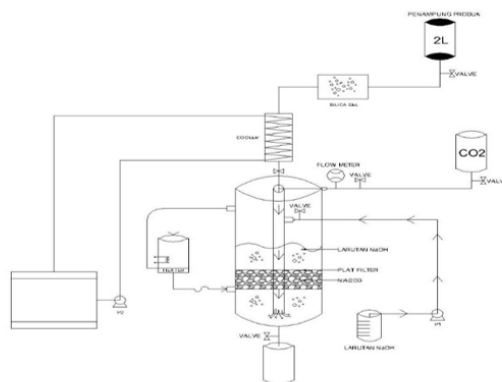
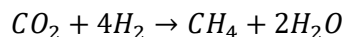
Dalam industri kimia, fenomena perpindahan berperan penting dalam reaktor kimia, proses pemisahan, dan pengolahan limbah. Ketiga fenomena bekerja secara simultan untuk mengontrol temperatur, laju reaksi, dan efisiensi pemisahan.

1. Reaktor Kimia

Reaktor adalah unit utama tempat terjadinya reaksi kimia antara reaktan cair, gas, atau padat. Tiga fenomena perpindahan bekerja secara bersamaan:

- Momentum: mengatur sirkulasi fluida dan pencampuran,
- Panas: mengontrol temperatur reaksi,
- Massa: memfasilitasi difusi reaktan ke situs reaksi.

Misalnya pada reaktor batch katalitik untuk sintesis metana dengan menggunakan katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (metanasi CO_2) (Muntaha, Nugroho, & Junaidi, 2025; Pratama, Junaidi, & Nugroho, 2025):



Gambar 3. Skema Proses Metanasi CO_2 di Reaktor Batch Katalitik
Difusi gas ke permukaan katalis mengikuti Hukum Fick:

$$N_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dy}$$

Sementara panas reaksi eksotermis dikendalikan oleh Hukum Fourier. Kontrol momentum diperlukan untuk menjaga turbulensi aliran dan waktu tinggal (Bird et al., 2015).

2. Kolom Distilasi

Distilasi memisahkan komponen berdasarkan perbedaan titik didih. Pada kolom distilasi:

- Perpindahan panas mengatur penguapan dan kondensasi,
- Perpindahan massa terjadi antara fase gas dan cair,
- Perpindahan momentum terjadi karena aliran berlawanan (*countercurrent flow*).

Model perpindahan massa antarfase dinyatakan dengan:

$$N_A = K_G(p_A - p_A^*)$$

dengan K_G sebagai koefisien perpindahan massa keseluruhan.

Efisiensi kolom distilasi sangat bergantung pada laju aliran uap (momentum) dan beda temperatur antartahap (panas).

3. Absorpsi dan Adsorpsi Gas

Dalam absorpsi gas CO_2 menggunakan larutan amina (MEA), gas terlarut berdifusi melalui antarmuka gas-cair sebelum bereaksi secara kimia. Fenomena perpindahan yang terlibat meliputi:

- Difusi gas (massa) ke dalam larutan,
- Aliran fluida (momentum) dalam kolom absorpsi,
- Pelepasan panas reaksi (panas).

Persamaan keseluruhan:

$$N_A = K_L(C_A^* - C_A)$$

dengan K_L diperoleh dari kombinasi resistansi gas dan cair.

Untuk adsorpsi padat (zeolit, karbon aktif), perpindahan massa terjadi melalui difusi ke dalam pori dan interaksi permukaan, digambarkan dengan model difusi Langmuir atau Freundlich (Ruthven, 1984).

4. Proses Pengolahan Limbah Industri



Sumber: https://id.made-in-china.com/co_qiankunhb/product_Plug-Flow-Aerator-Used-for-Chemical-Industry-Wastewater-Treatment-Plant_yssnhrruy.html

Gambar 4. Keterlibatan Fenomena Perpindahan dalam Proses Aerasi Limbah Industri

Dalam sistem pengolahan air limbah, proses aerasi melibatkan:

- Momentum (gelembung udara bergerak naik),
- Massa (difusi oksigen ke dalam air),
- Panas (perubahan suhu akibat agitasi).

Koefisien perpindahan massa oksigen ($K_L a$) adalah parameter kunci yang menentukan efisiensi proses biologis:

$$r_{O_2} = K_L a (C^* - C)$$

Nilai a (luas permukaan spesifik) meningkat dengan intensitas aerasi — menunjukkan interaksi langsung antara perpindahan momentum dan massa (Metcalf & Eddy, 2014).

D. APLIKASI DALAM INDUSTRI PANGAN

Industri pangan banyak memanfaatkan prinsip perpindahan massa dan panas dalam pengolahan, pengeringan, pendinginan, dan sterilisasi produk.

1. Pengeringan (*Drying*)

Proses pengeringan melibatkan perpindahan panas untuk menguapkan air dan perpindahan massa uap air keluar dari bahan padat.

Laju pengeringan ditentukan oleh:

$$N = k_y(Y_s - Y)$$

di mana Y_s adalah kelembapan udara jenuh dan Y adalah kelembapan udara sekitar. Koefisien k_y bergantung pada kecepatan udara (momentum).

Selain itu, panas laten penguapan dihitung dengan:

$$q = h_{fg} \dot{m}_{H_2O}$$

Proses ini menggambarkan keterpaduan tiga fenomena: panas, massa, dan momentum (Fellows, 2009).

2. Pendinginan dan Pembekuan (*Cooling and Freezing*)

Pada pendinginan dan pembekuan bahan pangan:

- Panas berpindah melalui konduksi dari inti bahan ke permukaan,
- Energi dihilangkan melalui konveksi ke udara dingin,
- Air di dalam bahan mengalami difusi kelembapan selama transisi fase es.

Persamaan energi tak tunak yang digunakan:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T$$

Analisis termal ini digunakan untuk menentukan waktu pembekuan optimal dan menghindari kerusakan struktur bahan.

3. Sterilisasi dan Pasteurisasi

Pada sterilisasi susu atau makanan kaleng, perpindahan panas konduksi dan konveksi digunakan untuk mencapai temperatur sterilisasi (121°C). Perpindahan massa gas dan uap air juga berperan dalam pembentukan tekanan internal wadah.

Efisiensi sterilisasi ditentukan oleh nilai F_0 , yaitu waktu ekuivalen sterilisasi pada 121°C:

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-121}{z}} dt$$

yang dikontrol oleh laju perpindahan panas ke pusat produk (Heldman & Hartel, 2019).

E. KETERPADUAN FENOMENA PANAS-MASSA-MOMENTUM

Dalam sistem industri nyata, fenomena panas, massa, dan momentum saling terkait secara kompleks. Keterkaitan ini dapat diringkas pada Tabel berikut:

Tabel 5. Korelasi Aplikasi Fenomena Perpindahan di Industri

Sistem Industri	Fenomena Panas	Fenomena Massa	Fenomena Momentum
Kolom Distilasi	Kondensasi & Penguapan	Difusi uap & cair	Aliran berlawanan
Reaktor Katalitik	Reaksi eksotermis	Difusi reaktan & produk	Sirkulasi fluida
Penukar Panas	Konduksi & Konveksi	Tidak signifikan	Aliran fluida
Pengeringan Pangan	Pemanasan udara	Difusi uap air	Aliran udara
Kolom Absorpsi	Panas reaksi	Difusi gas-cair	Gelembung & aliran gas

Ketiga fenomena ini umumnya dianalisis dengan pendekatan analogi transport (Reynolds, Prandtl, Chilton–Colburn), untuk memperkirakan koefisien perpindahan panas dan massa berdasarkan data aliran momentum (Bird et al., 2015).

F. PERAN FENOMENA PERPINDAHAN DALAM EFISIENSI ENERGI INDUSTRI

Optimalisasi fenomena perpindahan menjadi kunci untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi karbon.

Contoh penerapan:

- *Recuperative heat exchangers* untuk memanfaatkan panas buang.
- Membran selektif CO₂ untuk pemurnian gas buang.
- Sistem sirkulasi fluida hemat energi dengan pompa efisiensi tinggi.

Simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics (CFD)* kini digunakan secara luas untuk menganalisis interaksi ketiga fenomena tersebut secara simultan (Versteeg & Malalasekera, 2007)

G. PENUTUP

Bab ini telah menguraikan penerapan nyata fenomena perpindahan dalam berbagai bidang industri — mulai dari energi, kimia, hingga pangan. Ketiga fenomena utama (panas, massa, dan momentum) terbukti saling berhubungan erat dan harus dianalisis secara integratif untuk mencapai efisiensi maksimum.

Pemahaman komprehensif terhadap konsep ini memungkinkan pengembangan proses yang lebih hemat energi, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Dengan demikian, buku ini tidak hanya memberikan dasar teoretis tetapi juga menjembatani aplikasi nyata fenomena perpindahan dalam rekayasa industri modern.

Latihan Soal

A. Isian Singkat

1. Dalam menara distilasi, uap bergerak naik sedangkan cairan bergerak turun sehingga terjadi kontak antar fase secara terus-menerus. Perpindahan komponen volatil dari fase cair ke fase gas pada proses tersebut merupakan fenomena perpindahan _____.
2. Pada *heat exchanger*, panas berpindah dari fluida bersuhu tinggi ke fluida bersuhu rendah melalui dinding logam pemisah. Mekanisme perpindahan panas yang terjadi di dalam dinding logam tersebut adalah _____.
3. Dalam sistem boiler industri, air dipanaskan hingga berubah menjadi uap. Proses perubahan fase cair menjadi uap tersebut melibatkan fenomena perpindahan _____.
4. Pada proses pengeringan bahan pangan, udara panas dialirkan untuk membantu penguapan air dari permukaan bahan. Pergerakan udara tersebut merupakan bagian dari fenomena perpindahan _____.
5. Dalam proses absorpsi gas CO_2 menggunakan larutan amina, perpindahan gas dari fase gas menuju fase cair terjadi akibat adanya perbedaan _____.

6. Pada sistem pendinginan dan pembekuan bahan pangan, panas dari bagian dalam bahan berpindah menuju permukaan sebelum dilepaskan ke udara dingin. Mekanisme perpindahan panas di dalam bahan padat tersebut adalah _____.
7. Dalam pengolahan limbah industri, gelembung udara dimasukkan ke dalam air limbah untuk meningkatkan kadar oksigen terlarut. Proses perpindahan oksigen dari gelembung udara ke air termasuk perpindahan _____.
8. Koefisien perpindahan panas total pada *heat exchanger* biasanya dilambangkan dengan simbol _____.
9. Pada reaktor kimia berpengaduk, perpindahan momentum sangat penting untuk menghasilkan proses _____ campuran yang baik.
10. Dalam aplikasi industri modern, simulasi numerik yang sering digunakan untuk menganalisis perpindahan panas, massa, dan momentum secara simultan dikenal sebagai metode _____.

B. Essay

Sebuah *heat exchanger* digunakan untuk mendinginkan fluida panas menggunakan air pendingin. Diketahui koefisien perpindahan panas total sebesar $250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, luas permukaan perpindahan panas 8 m^2 , dan beda temperatur log mean (ΔT_{lm}) sebesar 20°C . Tentukan: Laju perpindahan panas total pada *heat exchanger*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer* (4th ed.). Wiley.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2015). *Transport Phenomena* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2020). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Cussler, E. L. (2009). *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Fellows, P. J. (2009). *Food Processing Technology: Principles and Practice* (3rd ed.). Woodhead Publishing.
- Fox, R. W., Pritchard, P. J., & McDonald, A. T. (2015). *Introduction to Fluid Mechanics* (9th ed.). Wiley.
- Fuller, E. N., Schettler, P. D., & Giddings, J. C. (1966). A New Method for Prediction of Binary Gas-Phase Diffusion Coefficients. *Industrial & Engineering Chemistry*, 58(5), 19–27.
- Geankoplis, C. J. (2018). *Transport Processes and Separation Process Principles* (5th ed.). Prentice Hall.
- Heldman, D. R., & Hartel, R. W. (2019). *Principles of Food Processing* (4th ed.). Springer.
- Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th ed.). Wiley.
- Krishna, R., & Wesselingh, J. A. (2015). *Mass Transfer Theory and Applications*. Elsevier.
- Kreith, F., & Manglik, R. M. (2013). *Principles of Heat Transfer* (7th ed.). Cengage Learning.

- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mulder, M. (2012). *Basic Principles of Membrane Technology* (2nd ed.). Springer.
- Muntaha, A. S., Nugroho, D. H., & Junaidi, R. (2025). Optimization of CO₂ methanation using Ni/Al₂O₃ catalyst and NaOH absorbent in a catalytic batch reactor. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 248-355.
- Nugroho, D. H. (2024). Teknologi Pengolahan Limbah cair Amonia Industri. In Nurhayati, T. E. Rahayu, D. H. Nugroho, & D. E. Rahmanto, *Teknologi Pengelolaan Limbah* (pp. 39-58). Padang: HEI Publishing Indonesia.
- Nugroho, D. H. (2025). Teknologi Pengolahan Air Limbah Dengan Kolom Gelembung Pancaran. In F. A. Soelistianto, M. A. Arifin, D. H. Nugroho, L. Marlina, Y. Baali, Rusman, . . . M. L. Habi, *Teknologi Lingkungan* (pp. 31-44). Kab. Agam: Tri Edukasi Ilmiah.
- Nugroho, Didiek Hari. (2025). Fluida Dinamik: Studi Hidrodinamika pada Reaktor Gelembung Pancaran. In F. D. Ika Maulita, N. A. Silviyanti, A. S. Sirajuddin, Widyantoro, Harmailis, & D. H. Nugroho, *Mekanika Fluida* (pp. 89-99). Kota Padang: HEI Publishing.
- Nugroho, Didiek Hari. (2025). Teknologi Pengolahan Limbah Cair Industri. In Nurhayati, T. E. Rahayu, D. H. Nugroho, & D. E. Rahmanto, *Teknologi Pengelolaan Lingkungan* (pp. 39-58). Kota Padang: HEI Publishing.
- Özisik, M. N. (1993). *Heat Conduction* (2nd ed.). Wiley.
- Patil, R. K., Patel, M., & Jadhav, D. (2022). Recent Advances in Multiphase Transport Phenomena for Energy and Environmental Systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183, 122013.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- Pratama, Y., Junaidi, R., & Nugroho, D. H. (2025). The Effect of Ni/Al₂O₃ catalyst mass variation and operation time on the CO₂ methanation process. *Konversi*, 45-48
- Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. Wiley.
- Tabe-Mohammadi, A. (1999). Gas Separation Using Polymeric Membranes. *Polymer Reviews*, 39(2), 85–98.

- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson Education.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Rorrer, G. L., & Wilson, R. E. (2020). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* (6th ed.). Wiley.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill Education.

KUNCI JAWABAN

Bab 2. DASAR-DASAR FENOMENA PERPINDAHAN

a. Isian Singkat

1. Panas, massa, momentum
2. Panas
3. Konduksi
4. Konsentrasi
5. Momentum

b. Essai

1. Fenomena perpindahan adalah kajian mengenai perpindahan panas, massa, dan momentum akibat adanya gradien (perbedaan) suhu, konsentrasi, atau kecepatan. Ketiganya dipelajari dalam satu disiplin ilmu karena memiliki prinsip dasar yang serupa, yaitu perpindahan terjadi dari daerah berpotensi tinggi ke rendah dan dapat dijelaskan menggunakan persamaan matematis yang analog.
2. Konduksi: Perpindahan panas melalui kontak langsung tanpa perpindahan massa fluida.
Contoh: Perpindahan panas melalui dinding pipa pada *heat exchanger*.
Konveksi: Perpindahan panas antara permukaan dan fluida yang bergerak.
Contoh: Pemanasan fluida di dalam *heat exchanger* oleh aliran fluida panas.
Radiasi: Perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan media.
Contoh: Pemanasan bahan dalam furnace atau tungku industri.
3. Ketiga hukum menyatakan bahwa laju perpindahan berbanding lurus dengan gradien potensial penggerakannya:
 - Hukum Fourier: Fluks panas sebanding dengan gradien temperatur.
 - Hukum Fick: Fluks massa sebanding dengan gradien konsentrasi.

- Hukum Newton tentang viskositas: Tegangan geser sebanding dengan gradien kecepatan.

Dengan demikian, temperatur, konsentrasi, dan kecepatan bertindak sebagai gaya pendorong perpindahan panas, massa, dan momentum.

4. Perpindahan momentum akibat viskositas menyebabkan gesekan antar lapisan fluida dan antara fluida dengan dinding pipa. Akibatnya terbentuk profil kecepatan, di mana kecepatan maksimum berada di pusat pipa dan minimum (nol) di dinding pipa. Gesekan ini juga menyebabkan kehilangan energi yang muncul sebagai penurunan tekanan sepanjang pipa.
5. Pada proses pengeringan, perpindahan panas menyediakan energi untuk menguapkan air, perpindahan massa memindahkan uap air dari dalam bahan ke udara sekitar, dan perpindahan momentum melalui aliran udara membantu membawa uap air menjauh dari permukaan bahan. Ketiga fenomena tersebut terjadi secara simultan dan menentukan laju serta efisiensi proses pengeringan.

Bab 3. Perpindahan Panas

a. Isian Singkat

1. Konduksi
2. 5 kali
3. menurun
4. 16 kali
5. meningkat

b. Essai

1. (a.) 172800 W, (b.) 216000 W/m²
2. 301.6°C
3. (b.) 156.8 W, (c.) 379°C
4. (a.) 72100 W, (b.) 163000 W, (c.) Karena perpindahan panas radiasi berbanding lurus dengan T⁴ (Hukum Stefan–Boltzmann), kenaikan temperatur menyebabkan peningkatan kehilangan panas yang jauh lebih besar daripada kenaikan temperaturnya sendiri.
5. (a.) 18.46 W/m²·K, (b.) 33.2 kW

Bab 4. Perpindahan Massa

a. Isian Singkat

1. Cair
2. 2 kali
3. $\frac{1}{2}$ kali
4. lambat
5. 1.74 kali

b. Essai

1. (a.) $J_A = 5 \times 10^{-8} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$, (b.) $J_A = 2,5 \times 10^{-8} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$, (c.) Fluks menurun 50% sehingga suplai oksigen berkurang. Mikroorganisme dapat mengalami keterbatasan oksigen yang menyebabkan penurunan laju pertumbuhan dan produksi enzim.
2. (a.) $J = 1,8 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$, (b.) $J = 3,6 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$, (c.) Keuntungan fluks meningkat 100%, sedangkan risiko seperti membran cepat rusak, sensitivitas menurun dan umur operasi lebih pendek.
3. (a.) $K_G = 0,00222 \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{atm}$, (b.) fase cair, (c.) peningkatan k_L paling efektif.
4. (a.) Awal: Sh 45.2 ; Akhir: Sh 78.6, (b.) 73.9%, (c.) Semakin tinggi Reynolds maka turbulensi meningkat sehingga perpindahan massa konvektif meningkat dan proses pengeringan menjadi lebih cepat.
5. (a.) $N_A = 1,2 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$, (b.) $\dot{n} = 0,024 \text{ mol/s}$

Bab 5. Perpindahan Momentum

a. Isian Singkat

1. Tegangan geser (*shear stress*).
2. Viskositas dinamik.
3. Non-Newtonian.
4. Laminar.
5. Turbulen.
6. *Head loss* / kehilangan tekanan.
7. Meningkatkan.
8. *Navier–Stokes*.
9. *Yield stress*/ tegangan luluh.

10. *Chilton–Colburn.*

b. Essai

1. a. Menghitung Bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{(\rho \times v \times D)}{\mu}$$

Diketahui:

- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- $v = 1,5 \text{ m/s}$
- $D = 0,04 \text{ m}$
- $\mu = 0,001 \text{ Pa.s}$

Substitusi:

$$Re = (1000 \times 1,5 \times 0,04) / 0,001$$

$$Re = 60 / 0,001$$

$$Re = 60.000.$$

- b. Menentukan jenis aliran

Karena nilai $Re > 4000$, maka jenis aliran termasuk jenis aliran turbulen.

- c. Penjelasan pengaruh terhadap perpindahan momentum

Pada aliran turbulen terjadi fluktuasi kecepatan dan pencampuran fluida yang kuat. Kondisi ini menyebabkan perpindahan momentum antarlapisan fluida menjadi lebih besar dibandingkan dengan aliran laminar. Akibatnya, kehilangan tekanan dalam pipa juga meningkat karena adanya efek gesekan dan pusaran aliran.

Bab 6. Aplikasi Fenomena Perpindahan dalam Industri

a. Isian Singkat

1. Massa.
2. Konduksi.
3. Massa.
4. Momentum.
5. Konsentrasi
6. Konduksi
7. Massa
8. U (kemampuan total sistem).
9. Pencampuran

10. CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

b. Essai

1. Menghitung Laju Perpindahan Panas:

gunakan persamaan *heat exchanger*:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q = (250) \cdot (8) \cdot (50)$$

$$Q = 40000 \text{ W} = 40 \text{ kW}.$$

Penjelasan Fenomena Perpindahannya: pada *heat exchanger* terjadi tiga fenomena utama:

1. Perpindahan panas konveksi dari fluida panas menuju dinding logam.
2. Perpindahan panas konduksi melalui dinding logam pemisah.
3. Perpindahan panas konveksi dari dinding logam menuju fluida pendingin.

Selain itu, perpindahan momentum juga terjadi akibat aliran fluida di dalam pipa atau saluran *heat exchanger*.

PROFIL PENULIS



Didiek Hari Nugroho, S.T.,M.T

Penulis Lahir di Maumere, 30 Oktober 1980, adalah alumni Sarjana (S1) Teknik Kimia Universitas Indonesia dan Magister (S2) Teknik Kimia Universitas Syiah Kuala. Selain itu juga merupakan alumni pada Program Training *Developing A Curriculum* (DACUM) *Theory* dan *Facilitator* di Training Institute for Technical Instruction (TITI) Nepal, Program *Curriculum Design* and *Instructional Materials Development* di National Institute of Technical Teachers Training And Research (NITTTR), India; Program *Drilling, Production and Liquidified Natural Gas Applied Competencies* di Southern Alberta Institute of Technology (SAIT), Canada; Program IVLP di Wright State University, U.S.A; dan Program *Wastewater Treatment* di Environment Protection Training and Research Institute (EPTRI), India. Penulis pernah menjabat sebagai Wakil Direktur Bidang Akademik dan Kemahasiswaan (2012-2014), dan Wakil Direktur Bidang Kerjasama (2015-2017). Sekarang, penulis aktif mengajar di Program Studi D-IV Teknologi Kimia Industri Politeknik Negeri Sriwijaya. Selain itu juga penulis aktif menulis buku, dan meneliti di bidang teknologi proses kimia dan pengolahan limbah industri. Beberapa penelitian dibiayai oleh DRPM Kemdikbudristek dan *outcomes* penelitiannya diterbitkan di beberapa jurnal ilmiah nasional maupun internasional, *book chapter*, dan HKI/paten. Penulis sering juga di undang baik sebagai pembicara maupun konsultan pengembangan kurikulum berbasis industri pada institusi nasional maupun internasional yang merupakan bentuk dari pelaksanaan kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: dh.nugroho@polsri.ac.id.



Dwi Indah Lestari, M.Eng

Penulis lahir di Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi DIV Teknologi Kimia Industri Politeknik Negeri Sriwijaya. Penulis menyelesaikan Pendidikan DIV pada Jurusan Teknik Kimia di Politeknik Negeri Sriwijaya dan studi S2 pada Jurusan Teknik Kimia di Universitas Gadjah Mada. Penulis memiliki latar

belakang riset di bidang lingkungan. Ketertarikan penulis tercermin melalui sejumlah publikasi ilmiah mengenai adsorpsi dan proses *hydrothermal carbonization*.

Penulis telah mengikuti sertifikasi Pembinaan Calon Ahli K3 Umum oleh Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia (KEMENAKER RI). Penulis juga aktif dalam menerbitkan publikasi ilmiah dibidang Teknik dan menulis buku sains serta modul Teknik Kimia. Penulis dapat dihubungi melalui email: dwiindahlest@polsri.ac.id.



Aulia Cahyani, S.T., M.T

Penulis Lahir di Tangerang, 17 Juni 1997, adalah lulusan Magister Teknik Kimia dari Universitas Diponegoro, Semarang, yang menyelesaikan studinya dengan raihan predikat cum laude. Memiliki latar belakang akademik dan riset yang kuat, penulis telah berpengalaman dalam berbagai proyek laboratorium, penelitian pada fokus ilmu material berkelanjutan,

serta analisis proses industri melalui program magang. Ketertarikan penulis pada pengembangan material ramah lingkungan tercermin melalui sejumlah publikasi ilmiah pada jurnal internasional bereputasi mengenai produksi *green-silica* dan teknologi *pra-treatment* berbasis asam organik.

Penulis memiliki pengalaman industri melalui program magang di PT. Indo Acidatama, Tbk., serta bekerja sebagai *Quality Control* di proyek perbaikan jalan pada kawasan industri minyak Pertamina Hulu Rokan. Pengalaman tersebut memperkuat keahlian di bidang analisis proses, perancangan campuran material kimia, serta pengujian laboratorium untuk stabilisasi tanah dan material konstruksi.

Penulis tersertifikasi sebagai Ahli K3 oleh Kementerian Ketenagakerjaan, menjunjung tinggi disiplin, keselamatan kerja, dan kepatuhan terhadap SOP dalam setiap kegiatan profesional maupun penelitian. Selain itu, penulis juga aktif menulis karya ilmiah dan menjadi pemakalah pada berbagai konferensi nasional dan internasional di bidang teknik kimia dan teknologi industri. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: auliacahyani@polsri.ac.id.



Ir. Selastia Yulianti, M.Si

Penulis Lahir di Palembang, 4 Juli 1961, dan menyelesaikan pendidikan sarjana di Teknik Kimia Universitas Sriwijaya, kemudian melanjutkan studi Magister Teknik Kimia di Institut Teknologi Bandung (ITB). Memiliki latar belakang akademik serta pengalaman panjang dalam bidang teknik kimia, penulis aktif melakukan penelitian dan pengabdian

kepada masyarakat sejak tahun 1990 hingga 2020, khususnya pada bidang ilmu teknik kimia.

Dalam karir akademiknya di Politeknik Negeri Sriwijaya, penulis mengampu berbagai mata kuliah inti yang berkaitan erat dengan praktik industri dan rekayasa proses, seperti satuan operasi, termodinamika, perpindahan masa difusional, perpindahan massa termal, teknologi minyak bumi, praktikum hidrokarbon, kewirausahaan, dan praktikum pilot plant. Pengajaran mata kuliah tersebut tidak hanya memperkuat kompetensi teknis mahasiswa, tetapi juga menumbuhkan pemahaman operasional kemampuan analitis yang relevan dengan kebutuhan industri.

Selama pengabdianya, penulis juga telah memperoleh berbagai sertifikat profesional serta mengikuti program magang di Kilang Minyak Pertamina Balongan. Penulis juga aktif meningkatkan kompetensi melalui berbagai pelatihan, seperti manajemen laboratorium, proses pengajaran dan revisi kurikulum, penyusunan bahan ajar dan RPS, serta pelatihan pembuatan proposal penelitian dan penulisan artikel internasional. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: selastiayulianti@yahoo.com.

FENOMENA PERPINDAHAN

KONSEP DAN PERHITUNGAN PERPINDAHAN MASSA, PANAS, DAN MOMENTUM

Fenomena perpindahan adalah konsep penting yang mendasari banyak proses di alam dan industri. Secara umum, fenomena perpindahan mencakup tiga kategori utama, yaitu perpindahan panas, massa, dan momentum. Pemahaman yang mendalam mengenai proses-proses ini sangat diperlukan bagi siapa saja yang terlibat dalam perancangan, pengoperasian, dan pengoptimalan sistem industri yang kompleks, seperti reaktor kimia, sistem pendingin, proses pemurnian, dan banyak aplikasi teknik kimia lainnya.

Di era modern, dengan tuntutan energi yang semakin meningkat dan kebutuhan akan teknologi yang ramah lingkungan, fenomena perpindahan memiliki peran penting dalam mendorong inovasi yang efisien dan berkelanjutan.

Buku ini disusun dengan tujuan memberikan penjelasan komprehensif mengenai dasar-dasar perpindahan, dari prinsip fisiknya hingga penerapannya dalam kehidupan sehari-hari dan industri. Setiap bab dirancang agar pembaca dapat memahami aspek-aspek teoritis dari fenomena perpindahan sekaligus memahaminya aplikasinya secara praktis.

 www.penerbitwidina.com
 @penerbitwidina
 penerbit widina
 penerbitwidina@gmail.com
 widina store
 widina bookstore

Layanan Pembaca & Penitipan Buku
 0815-7000-699



SCANME

Teknik & Industri

ISBN 978-634-317-107-2



9 786343 171072