BIDANG PROSES PENDIDIKAN DAN PENGAJARAN :

BERITA ACARA PERKULIAHAN

Kuliah Online (*E-Learning*)

Periode Semester Ganjil 2020/2021

MATAKULIAH :

Perpindahan Kalor dan Massa-2

LAMPIRAN BERITA ACARA PERKULIAHAN :

1. Presensi Kehadiran Dosen dan Materi Ajar (SAP)
2. Presensi Kehadiran Kuliah Mahasiswa
3. Presensi Kehadiran Ujian Tengah Semester (UTS)
4. Hasil Evaluasi Belajar Mahasiswa (Nilai Akhir)
5. Contoh Hand-out Bahan Ajar

Program Studi Teknik Mesin – S1
Fakultas Teknologi Industri
Institut Sains dan Teknologi Nasional
J a k a r t a
2 0 2 1

	BERITA ACARA PERKULIAHAN (PRESENSI KEHADIRAN DOSEN) SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2020/2021 PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN S1 -FTI ISTN		
	MATA KULIAH	: Perpindahan Kalor dan Massa-2	SEMESTER: 5
	DOSEN	: Ir. Komarudin, MT.	SKS : 2
	HARI/JAM	: Senin / 08.00 - 09.40	KELAS : A

No.	Tanggal	Materi	Jumlah mhs	Ttd dosen
1	21–09-2020	Pengantar (Silabus/RPS dan Kontrak Perkuiahan)	30	
2	28-09-2020	Pendahuluan (Mata kuliah ini membahas tentang kelanjutan dari Perpindahan Kalor dan Massa 1 yang telah dilaksanakan pada semester genap dengan pokok bahasan sebagai berikut : Pendahuluan, Perpindahan Kalor dan Massa Konveksi (Alran Fluida), Konsep Dasar Konveksi, Konveksi Paksa Aliran Luar Pada Plat Sejajar, Konveksi Paksa Aliran Silang, Konveksi Paksa Aliran Dalam Saluran Tertutup, Konveksi Bebas (Alamiah), Perpindahan Kalor dan Massa Gabungan, Perpindahan Kalor dan Massa Radiasi, Alat Penukar Panas	30	
3	05-10-2020	Modul Konveksi : Pendahuluan: Materi ini membahas tentang konsep dasar mekanisme perpindahan panas melalui aliran pada fluida (Cair dan Gas)	31	
4	12-10-2020	Konveksi Paksa Pada Plat Datar	32	
5	19-10-2020	Konveksi Paksa Aliran Silang	31	
6	26-10-2020	Tugas-1 : Makalah dan Presentasi	31	
7	02-11-2020	Konveksi Paksa Aliran Dalam Saluran tertutup	30	
8	18-01- 2021	Ujian Tengah Semester (UTS)	32	
[redacted]				

	BERITA ACARA PERKULIAHAN (PRESENSI KEHADIRAN DOSEN) SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2020/2021 PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI S1 -FTI ISTN		
	MATA KULIAH	: CAD/CAM dan Pemrograman NC	SEMESTER: 5
	DOSEN	: Ir. Komarudin, MT.	SKS : 2
	HARI/JAM	: Senin / 13.00 - 14.40	KELAS : A

No.	Tanggal	Materi	Jumlah mhs	Ttd dosen
9	16–11-2020	Ujian Tengah Semester (UTS) Susulan	30	
10	23-11-2020	Konveksi Bebas	31	
11	30-12-2020	Perpindahan Panas Gabungan (Koefisien Perpindahan Panas Gabungan)	30	
12	07-12-2020	Perpindahan Panas Gabungan (Beda Temperatur Rata-rata Logaritma, LMTD)	31	
13	14-12-2020	Tugas – 2 : Kerjakan soal perancangan APK	31	
14	23-12-2020	Perpindahan Panas Radiasi	31	
15	30-12-2020	Perpindahan Massa	32	
16	18-01- 2021	Ujian Akhir Semester (UAS)	32	
[redacted]				

Mengetahui,

(Ir. Ucok Mulyo Sugeng, MT.)
Ka. Prodi Teknik Mesin-FTI

Dosen Pengampu,

(Ir. Komarudin, MT)

DAFTAR HADIR MAHASISWA

SEMESTER GANJIL REGULER TAHUN 2020/2021

Program Studi : Teknik Mesin S1
Matakuliah : Perpindahan Kalor dan Massa-2
Kelas / Peserta : A
Perkuliahan : Kampus ISTN Bumi Srengseng Indah
Dosen : Komarudin, Ir.MT

No	NIM	N A M A	Pertemuan															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	15210001	**Andhika Cahya Supriatna**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
2	15210013	**Tulus Siregar**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
3	16210010	**Septyan Eka Chandra**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
4	16210015	**Muhammad Septian Hariwibowo**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
5	16210021	**Syarul Ridho Fauzi**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
6	16210030	**Moch.Syamsul Aripin**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
7	16210037	**Dito Bagas Prakoso**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
8	16210038	**Muhammad Ridwan**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
9	16210042	**Muhammad Satriadi**	-	-	-	v	v	-	v	UTS	-	-	-	v	-	v	v	UAS
10	16210046	**Khairul Fajri**	-	-	v	v	-	v	-	UTS	-	v	-	-	v	-	v	UAS
11	16210047	**Irsyad Yudha Khanafi**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
12	16210048	**Taufan Firdhaus**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
13	17210002	**Dimas Adi Prasetyo**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
14	17210005	**Muhammad Iqbal Fauzi**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
15	17210014	**Eki Aditiyo Pratomo**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
17	18210001	**Faiq Raihan Muhammad**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
18	18210003	**Gustria Alifia Achmad**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
19	18210004	**Gangsar Maulana**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
20	18210005	**Ahkdyath Rico Kurniansyah**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
21	18210006	**Maulana Sugi Budiyarto**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
22	18210007	**Fajar Novanto**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
23	18210008	**Syandrianthi Lavendra**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
24	18210009	**Dwi Naufal Prakoso**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
25	18210011	**Ferry Nusa Dharma**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS

Jakarta, Januari 2021

Dosen Pengajar

Komarudin, Ir.MT

DAFTAR HADIR MAHASISWA

SEMESTER GANJIL REGULER TAHUN 2020/2021

Program Studi : Teknik Mesin S1
Matakuliah : Perpindahan Kalor dan Massa-2
Kelas / Peserta : . A
Perkuliahan : Kampus ISTN Bumi Srengseng Indah
Dosen : Komarudin, Ir.MT

No	NIM	N A M A	Pertemuan															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
26	18210013	**Muhammad Ramadhan Adhie Pratama**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
27	18210014	**Sami Syahiir Suyonoputro**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
28	18210015	**Alief Rahman Aziz**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
29	18210016	**Geraldi Aqila Langgini**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
30	18210017	**Lanjut Martupa Dimmers Lumban T**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
31	18210018	**Adrian Fadil Genata**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS
32	19210501	**Muhammad Rizky Agung**	v	v	v	v	v	v	v	UTS	v	v	v	v	v	v	v	UAS

Jakarta, Januari 2021

Dosen Pengajar

Komarudin, Ir.MT

Security ID 48ef6bfb6abf7ec72426815b7364aae6

Nilai Hasil Evaluasi Belajar Mahasiswa

Mata Kuliah :

Perpindahan Kalor dan Masa-2

Kelas A

Dosen :

Ir. Komarudin, MT.

Program Studi Teknik Mesin – S1
Fakultas Teknologi Industri
Institut Sains dan Teknologi Nasional
J a k a r t a
2 0 2 1

DAFTAR HADIR
UJIAN AKHIR SEMESTER
SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2020/2021

Program Studi	:	**Teknik Mesin S-1, Reg., Kls : A, FTI – ISTN**
Mata Kuliah	:	**Perpindahan Kalor dan Massa 2**
Hari/Tanggal	:	**Senin, 25 Januari 2021**
Jam	:	**08.00 - 09.40 WIB**
Ruang	:	**Virtual (Online)**
Sifat Ujian	:	**Take Home Test**
Dosen	:	**Ir. Komarudin, MT**

NO	NAMA LENGKAP	NIM	HADIR/TIDAK HADIR
1	Adrian Fadil Genata	18210018	Hadir
2	Ahkdyath Rico Kurniansyah	18210005	Hadir
3	Alief Rahman Aziz	18210015	Hadir
4	Andhika Cahya Supriatna	15210001	Hadir
5	Dimas Adi Prasetyo	17210002	Hadir
6	Dito Bagas Prakoso	16210037	Hadir
7	Dwi Naufal Prakoso	18210009	Hadir
8	Eki Aditiyo Pratomo	17210014	Hadir
9	Faiq Raihan Muhammad	18210001	Hadir
10	Fajar Novanto	18210007	Hadir
11	Ferry Nusa Dharma	18210011	Hadir
12	Gangsar Maulana	18210004	Hadir
13	Geraldi Aqila Langgini	18210016	Hadir
14	Gustria Alifia Achmad	18210003	Hadir
15	Irsyad Yudha Khanafi	16210047	Hadir
16	Khairul Fajri	16210046	Hadir
17	Lanjut Martupa Dimmers Lumban T	18210017	Hadir
18	Maulana Sugi Budiyarto	18210006	Hadir
19	Moch.Syamsul Aripin	16210030	Hadir
20	Morrys P. Sianipar	18210012	Hadir
21	Muhammad Iqbal Fauzi	17210005	Hadir
22	Muhammad Ramadhan Adhie Pratama	18210013	Hadir
23	Muhammad Ridwan	16210038	Hadir
24	Muhammad Rizky Agung	19210501	Hadir
25	Muhammad Satriadi	16210042	Hadir
26	Muhammad Septian Hariwibowo	16210015	Hadir
27	Sami Syahiir Suyonoputro	18210014	Hadir
28	Septyan Eka Chandra	16210010	Hadir
29	Syandrianthi Lavendra	18210008	Hadir

DAFTAR HADIR
UJIAN AKHIR SEMESTER
SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2020/2021

30	Syarul Ridho Fauzi	16210021	Hadir
31	Taufan Firdhaus	16210048	Hadir
32	Tulus Siregar	15210013	Hadir

Jakarta, 25 Januari 2021
Dosen Pengampu

Ir. Komarudin, MT
NIDN : 0323016303

DAFTAR NILAI

SEMESTER GANJIL REGULER TAHUN 2020/2021

Program Studi : Teknik Mesin S1
Matakuliah : Perpindahan Kalor dan Massa 2
Kelas / Peserta : A
Perkuliahan : Kampus ISTN Bumi Srengseng Indah
Dosen : Komarudin, Ir.MT

No	NIM	N A M A	ABSEN	TUGAS	UTS	UAS	MODEL	PRESENTASI	NA	HURUF
			10%	20%	30%	40%	0%	0%		
1	15210001	**Andhika Cahya Supriatna**	100	30	65	60	0	0	59.5	**C**
2	15210013	**Tulus Siregar**	100	40	100	50	0	0	68	**B**
3	16210010	**Septyan Eka Chandra**	100	25	60	63	0	0	58.2	**C**
4	16210015	**Muhammad Septian Hariwibowo**	100	32	58	60	0	0	57.8	**C**
5	16210021	**Syarul Ridho Fauzi**	100	50	100	60	0	0	74	**B+**
6	16210030	**Moch.Syamsul Aripin**	100	80	80	60	0	0	74	**B+**
7	16210037	**Dito Bagas Prakoso**	100	70	70	60	0	0	69	**B**
8	16210038	**Muhammad Ridwan**	100	30	75	60	0	0	62.5	**C+**
9	16210042	**Muhammad Satriadi**	43	0	60	68	0	0	49.5	**D**
10	16210046	**Khairul Fajri**	43	0	75	60	0	0	50.8	**D**
11	16210047	**Irsyad Yudha Khanafi**	100	25	80	60	0	0	63	**C+**
12	16210048	**Taufan Firdhaus**	100	60	70	60	0	0	67	**B-**
13	17210002	**Dimas Adi Prasetyo**	100	35	75	60	0	0	63.5	**C+**
14	17210005	**Muhammad Iqbal Fauzi**	100	32	60	60	0	0	58.4	**C**
15	17210014	**Eki Aditiyo Pratomo**	100	40	55	60	0	0	58.5	**C**
16	18210001	**Faiq Raihan Muhammad**	100	70	58	65	0	0	67.4	**B-**
17	18210003	**Gustria Alifia Achmad**	100	70	100	65	0	0	80	**A**
18	18210004	**Gangsar Maulana**	100	70	100	65	0	0	80	**A**
19	18210005	**Ahkdyath Rico Kurniansyah**	100	62	70	65	0	0	69.4	**B**
20	18210006	**Maulana Sugi Budiyarto**	100	50	80	10	0	0	48	**D**
21	18210007	**Fajar Novanto**	100	70	100	65	0	0	80	**A**
22	18210008	**Syandrianthi Lavendra**	100	70	100	65	0	0	80	**A**
23	18210009	**Dwi Naufal Prakoso**	100	43	100	65	0	0	74.6	**B+**
24	18210011	**Ferry Nusa Dharma**	100	75	65	65	0	0	70.5	**B**
25	18210012	**Morrys P. Sianipar**	100	70	100	65	0	0	80	**A**

Rekapitulasi Nilai							
A	6	B+	4	C+	3	D+	0
A-	1	B	5	C	5	D	3
		B-	2	C-	0	E	2

Jakarta,2 February 2021

Dosen Pengajar

Komarudin, Ir.MT

DAFTAR NILAI

SEMESTER GANJIL REGULER TAHUN 2020/2021

Program Studi : Teknik Mesin S1
Matakuliah : Perpindahan Kalor dan Massa 2
Kelas / Peserta : A
Perkuliahan : Kampus ISTN Bumi Srengseng Indah
Dosen : Komarudin, Ir.MT

No	NIM	N A M A	ABSEN	TUGAS	UTS	UAS	MODEL	PRESENTASI	NA	HURUF
			10%	20%	30%	40%	0%	0%		
26	18210013	**Muhammad Ramadhan Adhie Pratama**	100	37	0	10	0	0	21.4	**E**
27	18210014	**Sami Syahiir Suyonoputro**	100	45	100	65	0	0	75	**A-**
28	18210015	**Alief Rahman Aziz**	100	70	100	65	0	0	80	**A**
29	18210016	**Geraldi Aqila Langgini**	100	0	0	10	0	0	14	**E**
30	18210017	**Lanjut Martupa Dimmers Lumban T**	100	45	85	65	0	0	70.5	**B**
31	18210018	**Adrian Fadil Genata**	100	87	65	65	0	0	72.9	**B+**
32	19210501	**Muhammad Rizky Agung**	100	0	0	0	0	0	0	

Rekapitulasi Nilai							
A	6	B+	4	C+	3	D+	0
A-	1	B	5	C	5	D	3
		B-	2	C-	0	E	2

Jakarta,2 February 2021

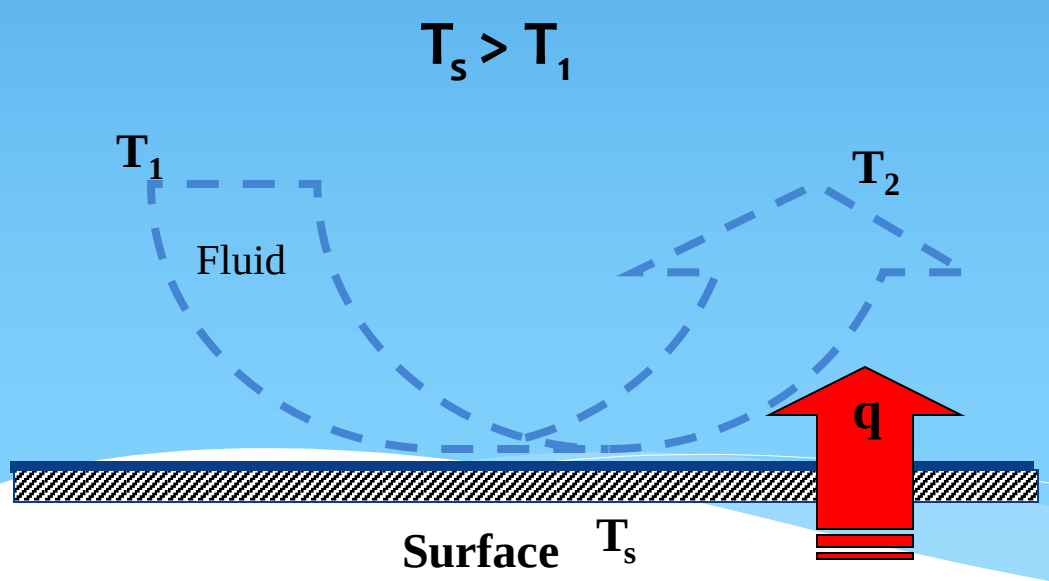
Dosen Pengajar

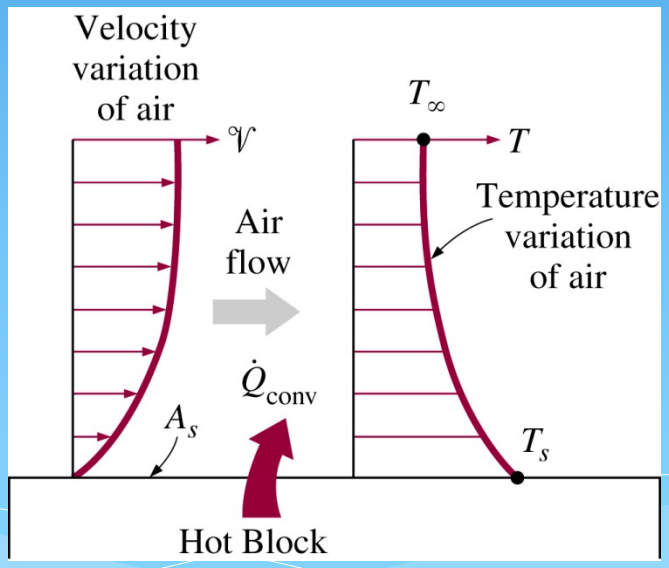
Komarudin, Ir.MT

PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI

PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI

Perpindahan panas (kalor) yang terjadi melalui aliran suatu fluida (cair dan gas) karena adanya perubahan sifat fluida (massa jenis) akibat adanya perbedaan temperatur





KONVEKSI

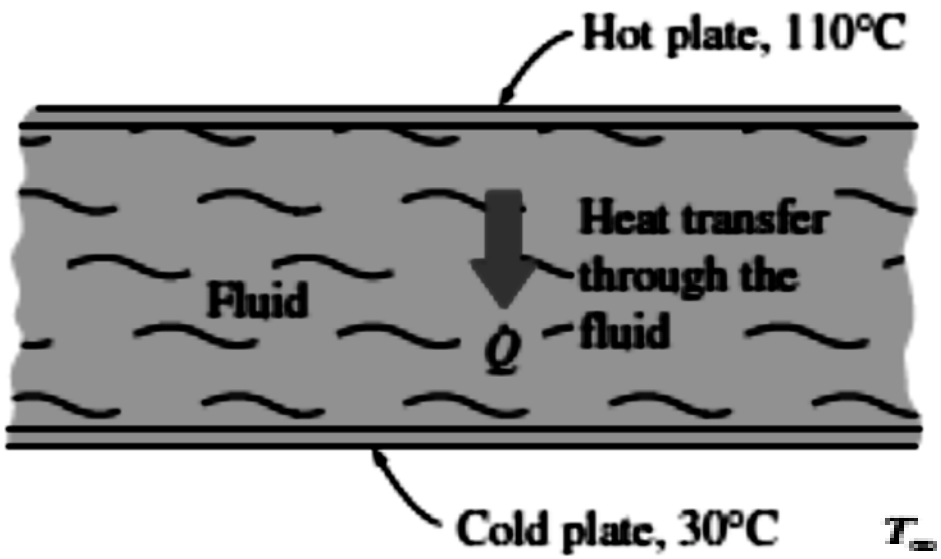
ALAMIAH/NATURAL/Free

PAKSA/FORCED

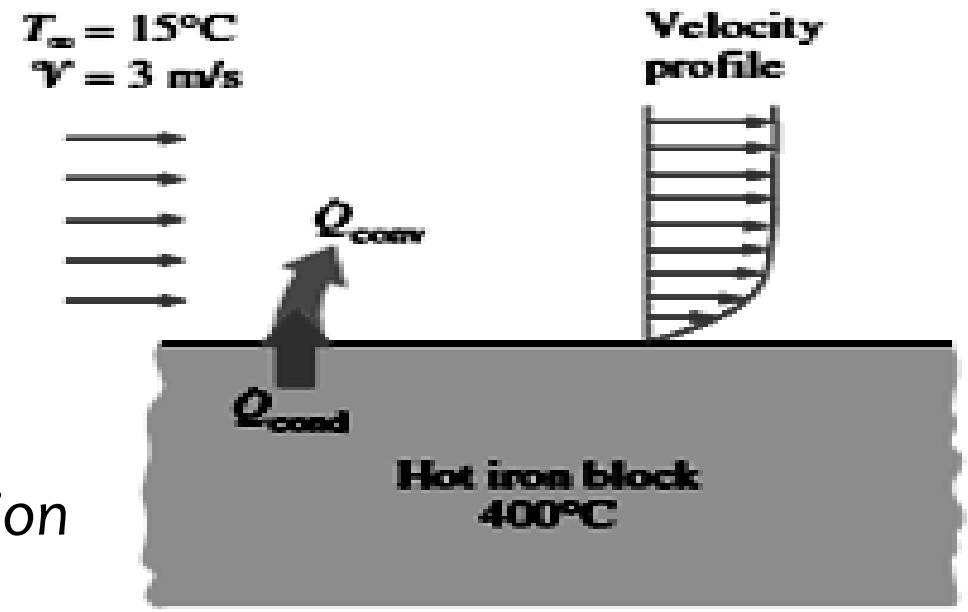
ALIRAN LUAR/*External Flow*

ALIRAN DIDALAM/Internal Flow

Mekanisme Konveksi



Konveksi Alamiah/*Natural/Free*



Konveksi Paksa/*Forced Convection*

Konveksi Alamiah/*Natural*/*Free*

Konveksi Paksa/*Forced Convection*

Besar Laju Aliran Panas Konveksi

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \qquad (W/m^2)$$

$$q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \qquad (W)$$

Dimana :

h = koefisien perpindahan panas konveksi, $W/m^2.°C$

As = luas permukaan perpindahaan panas, m^2

Ts = temperature of the surface, °C

T∞ = temperature fluida pada permukaan terjauh, °C

KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI (*h*)

Dilihat dari unit nya, koefisien perpindahan panas konveksi *h* dapat didefinisikan sebagai laju perpindahan panas antara permukaan padat dan cairan per satuan luas penampang permukaan akibat perbedaan suhu yang tergantung pada beberapa variabel, dengan demikian sulit untuk menentukannya

PRINSIP DASAR DALAM PENENTUAN NILAI *h*

1. Klasifikasi Aliran Fluida

- **Aliran Internal**
- **Aliran Luar/*External***
- **Aliran *Viscous* versus *Inviscid***
- **Aliran Mampu Mampat (*Compressible*)**
- **Aliran Tak Mampu Mampat (*Incompressible*)**
- **Aliran Alamiah/Natural (*or Unforced*)**
- **Aliran Paksa (*Forced*)**

PRINSIP DASAR DALAM PENENTUAN NILAI *h (cont.)*

2. Sifat Fisik Fluida dan Permukaan

1. Permukaan Bidang Konduksi/Benda Padat (termasuk kekasaran)
2. Kecepatan Aliran
3. Sifat Fisik Fluida :
    1. Viscosity
    2. Density
    3. Konductivity
    4. Specific heat
4. Perbedaan Temperatur

PRINSIP DASAR DALAM PENENTUAN NILAI *h (cont.)*

3. Beberapa Metoda Analisis

1. Analisa dimensional yang digabungkan dengan Eksperimental.
2. Penyelesaian matematis terhadap persamaan-persamaan lapisan batas.
3. Analisa pengira-iraan terhadap lapisan batas dgn metode integral.
4. Analogi antara perpindahan panas, massa dan momentum.

PRINSIP DASAR DALAM PENENTUAN NILAI *h (cont.)*

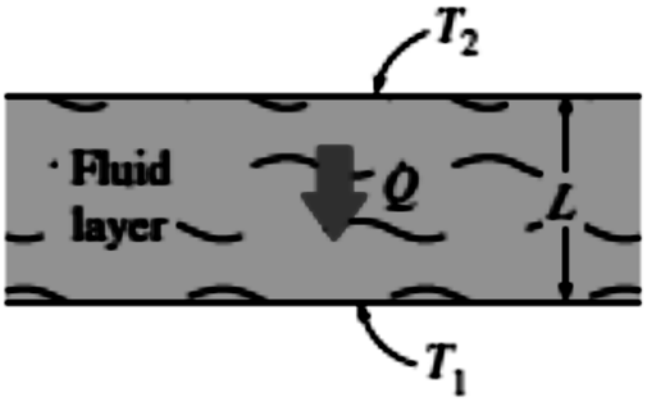
4. Bilangan Tak Berdimensi

Dari beberapa analisis yang dilakukan analisis pertama yang lebih sering digunakan

- **Bilangan Nusselt**
- **Bilangan Prandtl**
- **Bilangan Reynold**
- **Bilangan Grashoft**
- **Dan lain-lain**

Bilangan Nusselt

❑ Bilangan Nusselt Pada Plat Datar



$\Delta T = T_2 - T_1$

$$\mathbf{Nu} = \frac{hL_c}{k}$$

Lc =Panjang Karakteristik

k = konduktivitas termal fluida

❑ Bilangan Nusselt Pada Silinder/Tabung

$$\mathbf{Nu} = \frac{h\,D}{k}$$

D = Diamater Karakteristik

Semakin besar bilangan Nusselt, proses konveksi menjadi lebih efektif

Bilangan Prandtl

Ketebalan relatif dari kecepatan dan lapisan batas termal digambarkan dengan parameter bilangan Prandtl

$$\mathrm{Pr} = \frac{\text{Molecular diffusivity of momentum}}{\text{Molecular diffusivity of heat}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

TABLE 6–2

Typical ranges of Prandtl numbers for common fluids

Fluid	Pr
Liquid metals	0.004–0.030
Gases	0.7–1.0
Water	1.7–13.7
Light organic fluids	5–50
Oils	50–100,000
Glycerin	2000–100,000

Bilangan Reynold

Transisi aliran dari laminar menjadi turbulen tergantung pada geometri permukaan, kekasaran permukaan, streaming pada kecepatan bebas, suhu permukaan, dan jenis cairan.

✓ Aliran diatas permukaan : $$R_e = \frac{gaya\ inersia}{viskositas} = \frac{V.L.\rho}{\mu} = \frac{V.L}{\nu}$$

Re < 1x10^5 Aliran Laminer

Re > 1x10^6 Aliran Turbulen

Re = 5x10^6 Aliran Transisi/kritis

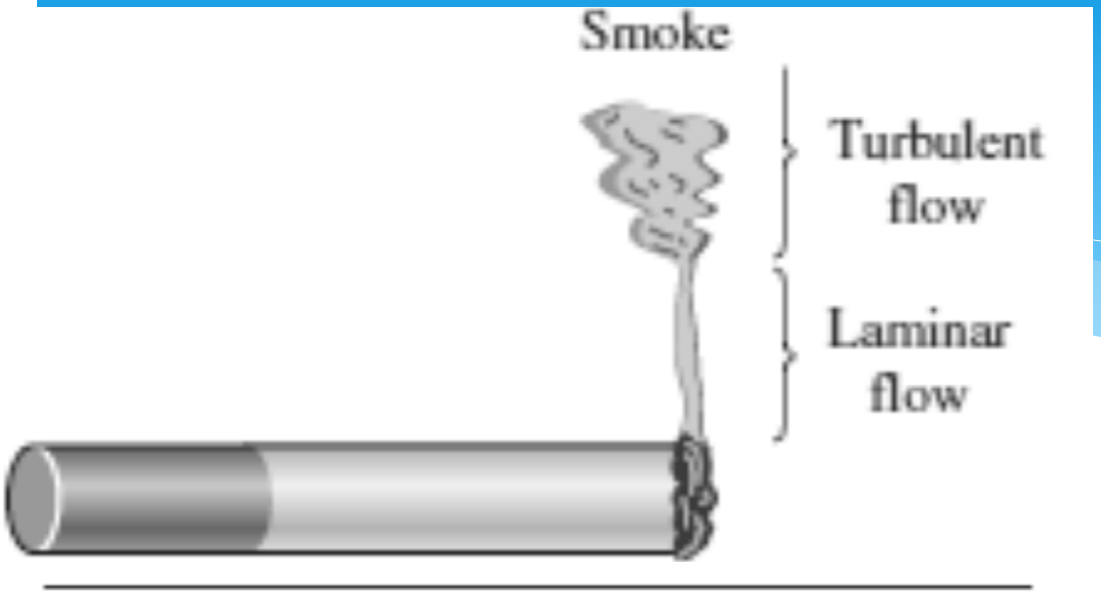
✓ Aliran didalam saluran/pipa : $$R_e = \frac{gaya\ inersia}{viskositas} = \frac{V.D.\rho}{\mu} = \frac{D.L}{\nu}$$

Re < 2300 Aliran Laminer

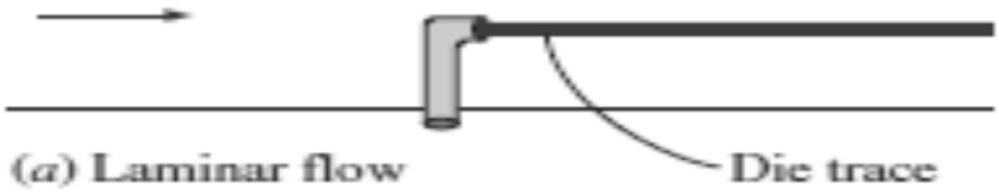
Re > 2300 Aliran Turbulen

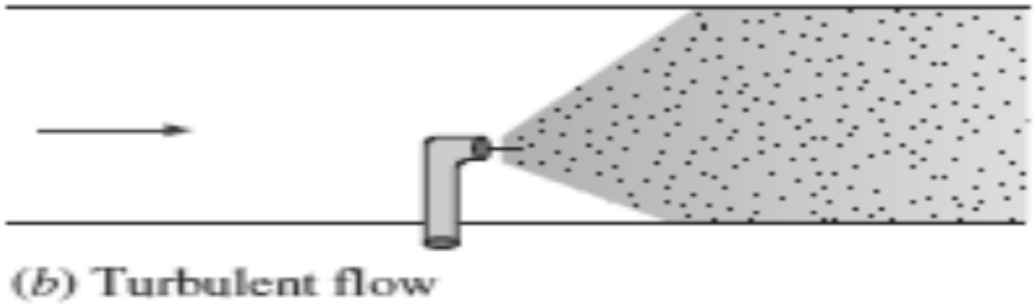
Re = 2300 Aliran Transisi/kritis

Pembentukan Aliran Laminer dan Turbulen



Aliran pada ruang terbuka





Aliran dalam saluran tertutup

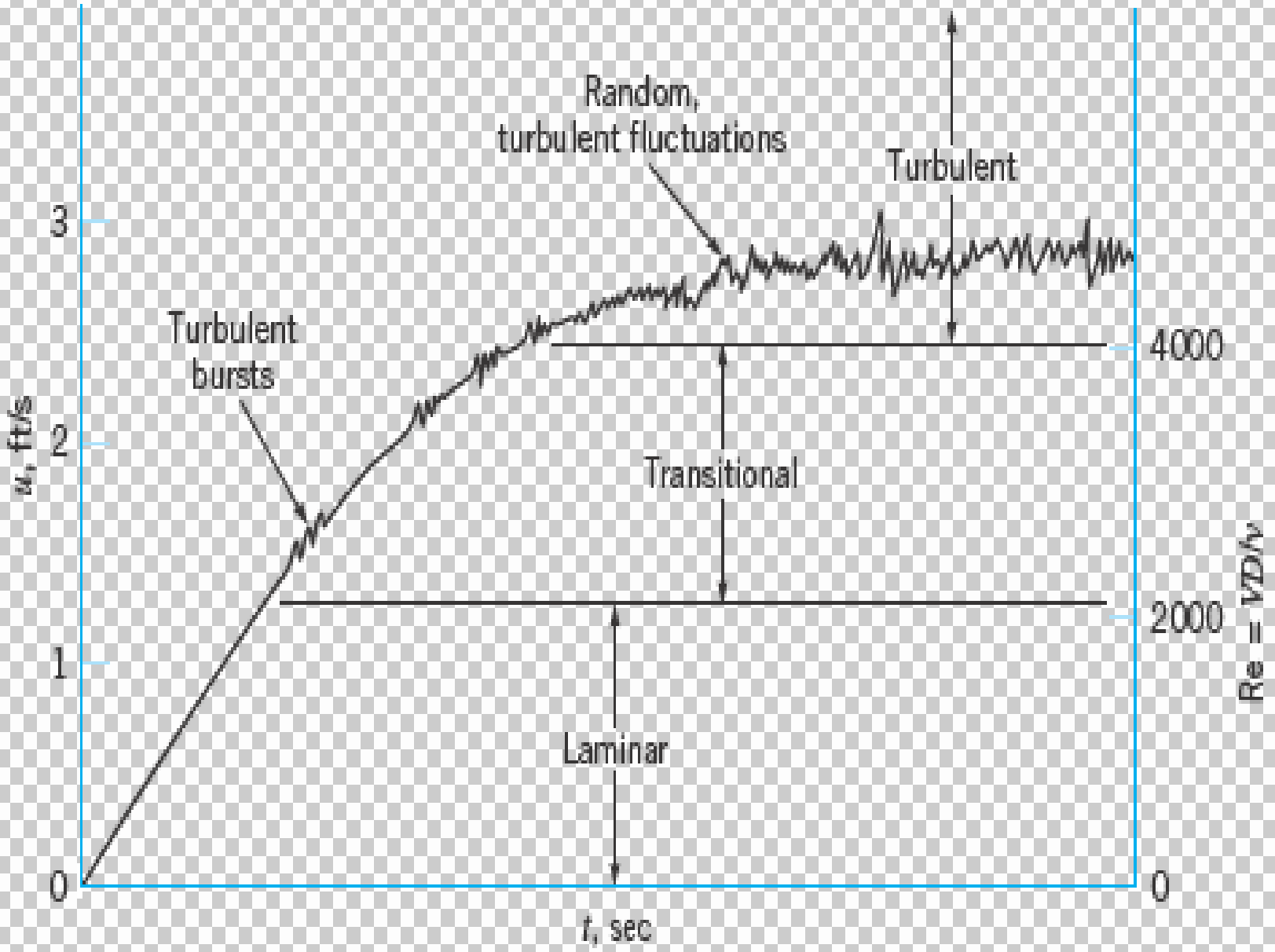
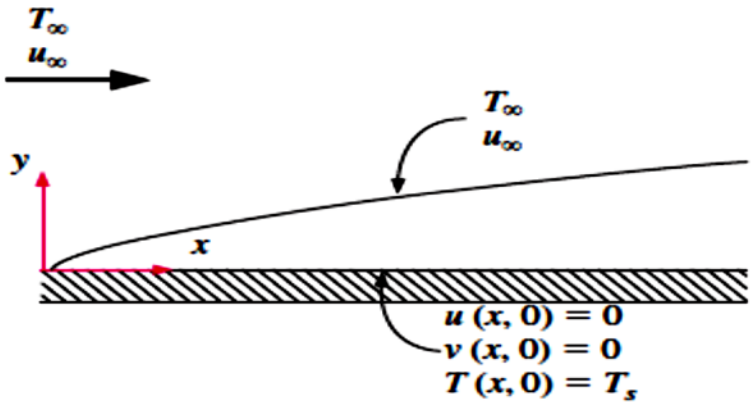


FIGURE 8.11 Transition from laminar to turbulent flow in a pipe.

Penyelesaian Persamaan Konveksi Pada Plat Datar

Sebuah fluida mengalir diatas permukaan plat datar seperti terlihat pada gambar 10 dibawah, yang bergerak dengan kecepatan u_∞ menuju ujung lain pada arah koordinat x.



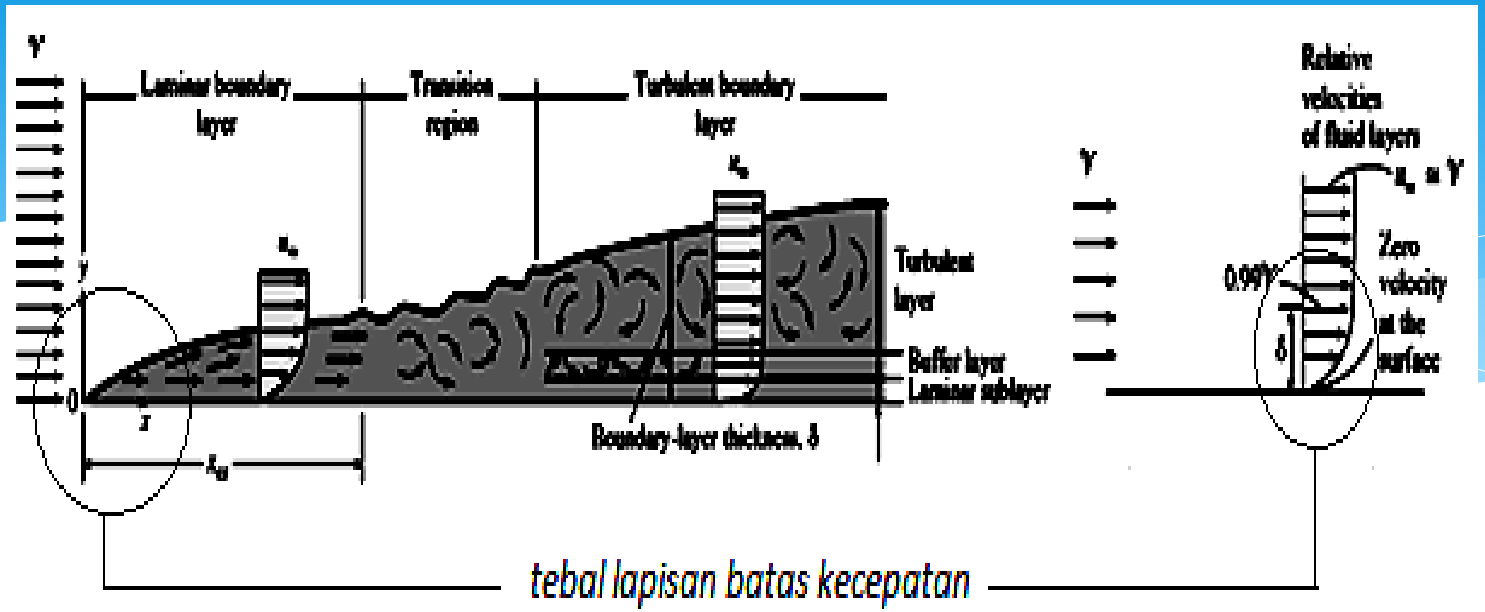
Asumsi jika mengalir dalam aliran laiminer, fluida mampu mampat, aliran tunak (*steady state*) dan sifat fluida konstan, maka :

Continuity:
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Momentum:
$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Energy:
$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

1. Kondisi Lapisan Batas Kecepatan (*Boundary Layer*)



Besar ketebalan lapisan batas kecepatan pada jarak yang diukur dari ujung plat :

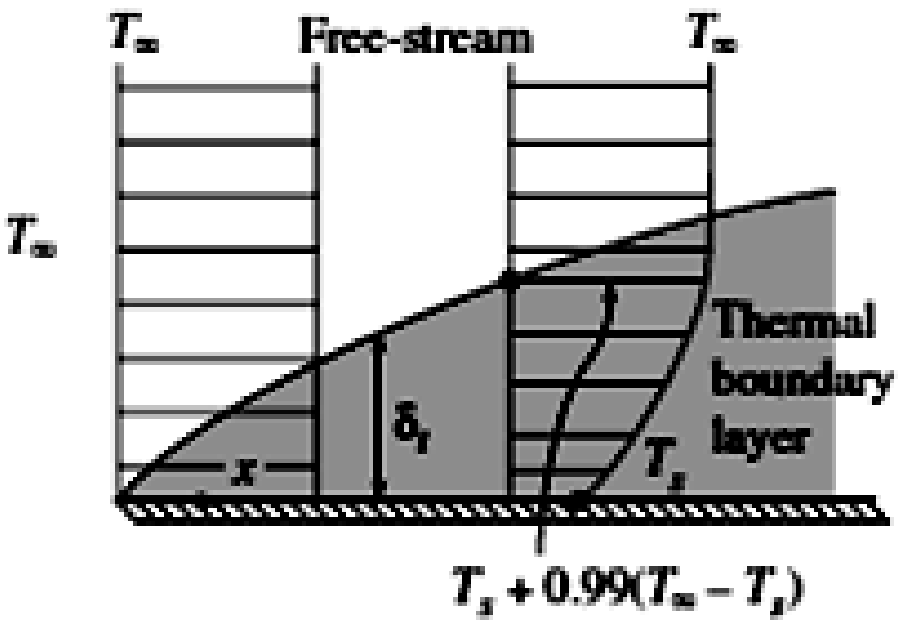
$$\delta = \frac{5.0}{\sqrt{u_\infty / \nu x}} = \frac{5.0}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$$

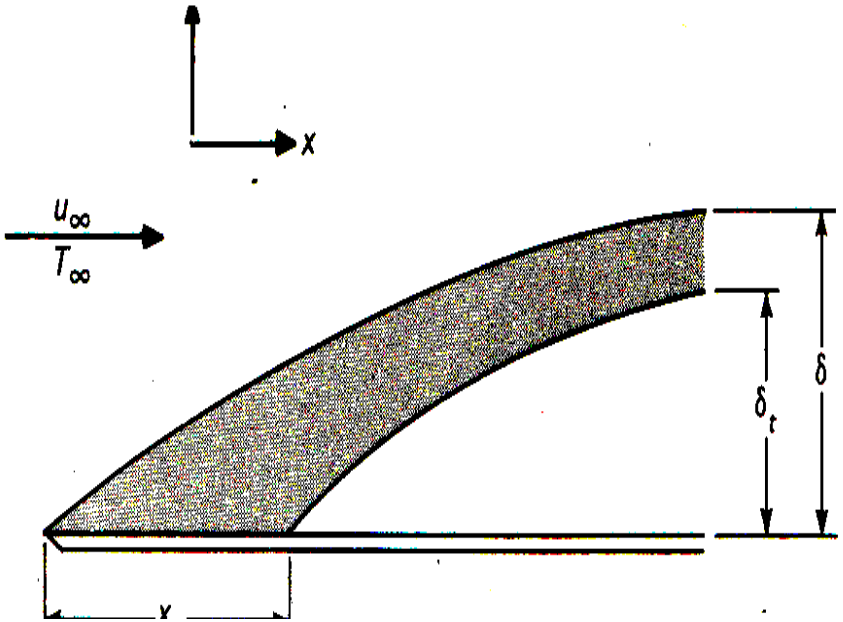
Besar tegangan geser untuk tebal lapisan batas laminar

$$\tau_w = 0.332 u_\infty \sqrt{\frac{\rho \mu u_\infty}{x}} = \frac{0.332 \rho u_\infty^2}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$$

Koefisien gesek local $c_{f,x} = \frac{\tau_w}{\rho V^2 / 2} = \frac{\tau_w}{\rho u_\infty^2 / 2} = 0{,}664\, \mathrm{Re}_x^{-1/2}$

2. Kondisi Lapisan Batas Termal (*Thermal Boundary Layer*)





koefisien perpindahan panas konveksi lokal dan bilang Nusseltnya

$$h_x = \frac{q_s}{T_s - T_\infty} = \frac{-k(\partial T/\partial y)|_{y=0}}{T_s - T_\infty} = 0.332\,\mathrm{Pr}^{1/3} k \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}}$$

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = 0{,}332\,\mathrm{Pr}^{1/3}\,\mathrm{Re}^{1/2} \qquad \mathrm{Pr} > 0{,}6$$

2. Kondisi Lapisan Batas Termal (*Thermal Boundary Layer*) (cont.)

Hubungan antara lapisan batas kecepatan dengan lapisan batas termal

$$\delta/\delta_t \cong \mathrm{Pr}^{1/3}$$

Maka diperoleh tebal lapisan termalnya menjadi :

$$\delta_t = \frac{\delta}{\mathrm{Pr}^{1/3}} = \frac{5{,}0x}{\mathrm{Pr}^{1/3}\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$$

Untuk perubahan sifat fluida yang bervariasi, maka ditentukan berdasarkan pada temperatur film yaitu :

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Dimana : T_s = temperatur permukaan; T_∞ = temperatur fluida

Hubungan Persamaan Kefisien Gesekan Dan Koefisien Konveksi

Gesekan dan koefisien perpindahan panas rata-rata ditentukan dengan mengintegrasikan *Cf*, *x* dan Nu_x di atas permukaan plat sepanjang x dari 0 ke L, dimana koefisien gesek dapat dinyatakan sebagai fungsi dari bilangan Reynolds itu sendiri, sedangkan bilangan Nusselt sebagai fungsi bilangan Reynolds dan Prandtl, yang dinyatakan sebagai,

$$C_f = f_4(\mathrm{Re}_L) \qquad \text{and} \qquad \mathrm{Nu} = g_3(\mathrm{Re}_L, \mathrm{Pr})$$

Data eksperimen untuk perpindahan panas menggunakan relasi yang sederhana dalam bentuk :

$$Nu = C.\mathrm{Re}_L^m.\mathrm{Pr}^n$$

Untuk bilangan Nusselt lokal : $Nu = fungsi\ (x^n.Re_L.Pr)$

Untuk bilangan Nusselt rata-rata : $Nu = fungsi\ (Re_L.Pr)$

Dimana *m* dan *n* konstanta eksponensial (biasamya antara 0 – 1) dan konstanta C tergantung bentuk/geometri.

Analogi Antara Momentum Dengan Perpindahan Panas

Dalam analisis konveksi paksa, terutama pada penentuan jumlah C_f (untuk menghitung tegangan geser pada dinding) dan *Nu* (untuk menghitung kecepatan laju aliran panas) dimana hubungan antara C_f dan *Nu* dikembangkan atas dasar kesamaan antara laju aliran panas dan momentum dalam lapisan batas, dan dikenal sebagai analogi Reynolds, Colburn dan analogi Chilton, dimana hubungannya dituliskan menjadi :

$$C_{f,x}\frac{\mathrm{Re}_L}{2} = \mathrm{Nu}_x \qquad (\mathrm{Pr} = 1)$$

Analogi ini penting karena memungkinkan kita untuk menentukan koefisien perpindahan panas untuk cairan dengan Pr=1. Analogi Reynolds juga menyatakan bahwa :

$$\frac{C_{f,x}}{2} = \mathrm{St}_x \qquad (\mathrm{Pr} = 1)$$

dimana :

$$\mathrm{St} = \frac{h}{\rho C_p V} = \frac{\mathrm{Nu}}{\mathrm{Re}_L \mathrm{Pr}}$$

Koefisien gesekan dan angka Nusselt untuk pelat datar ditentukan dalam bentuk persamaan :

$$C_{f,x} = 0.664\,\mathrm{Re}_x^{-1/2} \qquad \text{and} \qquad \mathrm{Nu}_x = 0.332\,\mathrm{Pr}^{1/3}\,\mathrm{Re}_x^{1/2}$$

Analogi Antara Momentum Dengan Perpindahan Panas

Untuk, 0.6<Pr<60,

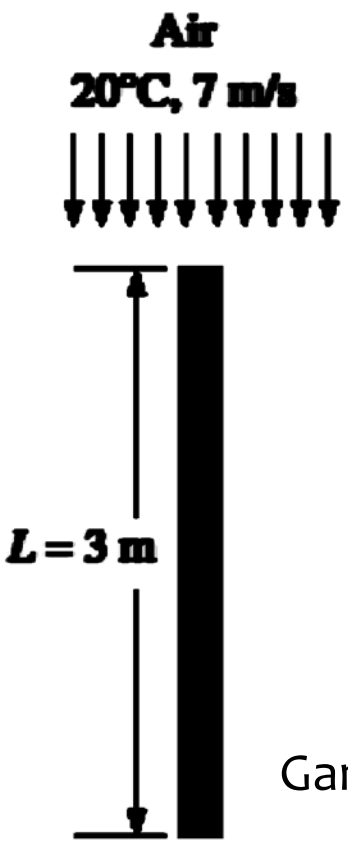
$$C_{f,x}\frac{Re_L}{2} = Nu_x Pr^{-1/3} \quad \text{or} \quad \frac{C_{f,x}}{2} = \frac{h_x}{\rho C_p V} Pr^{2/3} = j_H$$

Analogi Reynold yang dimodifikasi dengan analogi Colburn dan analogi Chilton

Analogi antara C_f dan *Nu* dikembangkan menjadi lebih akurat jika dapat digunakan terhadap rata-rata dari jumlah lokal.

Contoh 1.

Sebuah plat datar berukuran 2x3 m, mengalir udara diatas disepanjang plat 3 m yang bertemperatur 20°C dan kecepatannya 7 m/detik (gambar 13). Gaya hambat pada ujung plat 0,86 Newton. Hitung koefisien perpindahan panas rata-rata pada plat tersebut



Gambar 13. Udara mengalir pada permukaan pelat

Jawab :

Besar koefisien perpindahan panas konveksi dari persamaan :

$$C_{f,x}\frac{Re_L}{2} = \mathrm{Nu}_x \mathrm{Pr}^{-1/3} \qquad \text{or} \qquad \frac{C_{f,x}}{2} = \frac{h_x}{\rho C_p \mathcal{V}}\mathrm{Pr}^{2/3} = j_H$$

Dari sifat fluida pada temperature 20°C dan tekanan 1 atm, diperoleh :

$$\rho = 1.204\ \mathrm{kg/m^3}, \quad C_p = 1.007\ \mathrm{kJ/kg \cdot K}, \quad \mathrm{Pr} = 0.7309$$

Udara mengalir sepanjang 3 meter pada 2 sisi pelat, maka luas penampang pelat :

$$A_s = 2WL = 2(2\ \mathrm{m})(3\ \mathrm{m}) = 12\ \mathrm{m^2}$$

Gaya hambat pada pelat datar yang terjadi : $F_f = C_f A_s \frac{\rho \mathcal{V}^2}{2}$

Koefisien gesek diperoleh :

$$C_f = \frac{F_f}{\rho A_s \mathcal{V}^2/2} = \frac{0.86\ \mathrm{N}}{(1.204\ \mathrm{kg/m^3})(12\ \mathrm{m^2})(7\ \mathrm{m/s})^2/2}\left(\frac{1\mathrm{kg \cdot m/s^2}}{1\ \mathrm{N}}\right) = 0.00243$$

Maka koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata diperoleh :

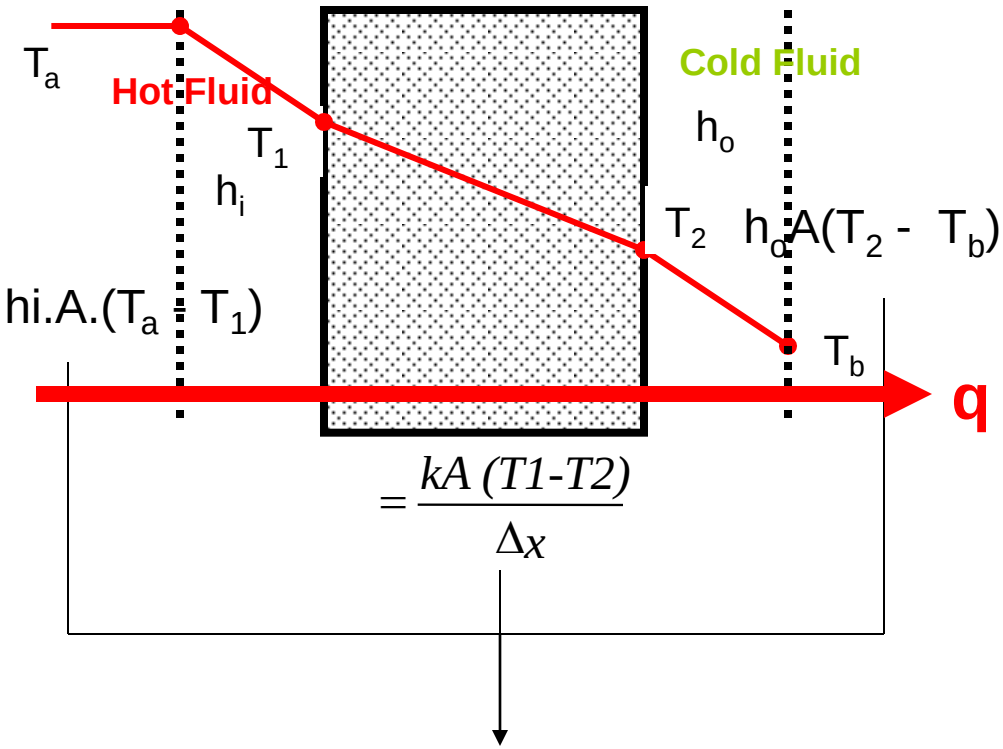
$$h = \frac{C_f}{2}\frac{\rho \mathcal{V} C_p}{\mathrm{Pr}^{2/3}} = \frac{0.00243}{2}\frac{(1.204\ \mathrm{kg/m^3})(7\ \mathrm{m/s})(1007\ \mathrm{J/kg \cdot °C})}{0.7309^{2/3}} = 12.7\ \mathrm{W/m^2 \cdot °C}$$

PERPINDAHAN PANAS GABUNGAN

Develop a mathematical equation useful in designing a heat exchanger

I. Koefisien Perpindahan Panas Gabungan

1. Bidang Datar



Heat transfer through individual layers

Secara Umum Laju Perpindahan Panas

$$q = U.A.\Delta T_m$$

Dimana :

U = Koefisien Perpindahan Panas Gabungan

A = Luas bidang aliran kalor

ΔT_m = Beda temperatur rata-rata

Laju Perpindahan Panas Gabungan :

$$q = h_i A(T_a - T_1) = \frac{kA}{\Delta X}(T_1 - T_2) = h_o A(T_2 - T_b)$$

Dari persamaan : $\boxed{q = U.A.\Delta T}$

$$q = \frac{A\Delta T}{R_{kvi} + R_{kd} + R_{kvo}}$$

$$q = \frac{\Delta T}{(1/h_i A + \Delta x / kA + 1/h_o A)}$$

Koefisien Perpindahan Panas Gabungan

(*The Overall Coefficient.*)

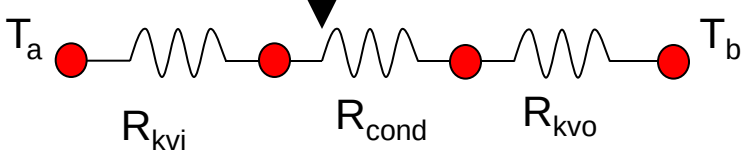
$$\boxed{U = \frac{1}{1/h_i + \Delta x / k + 1/h_o}}$$

Similar expression obtained when an overall thermal resistance is calculated

$$R_{kvi} = \frac{1}{h_i A}$$

$$R_{cond} = \frac{\Delta x}{kA}$$

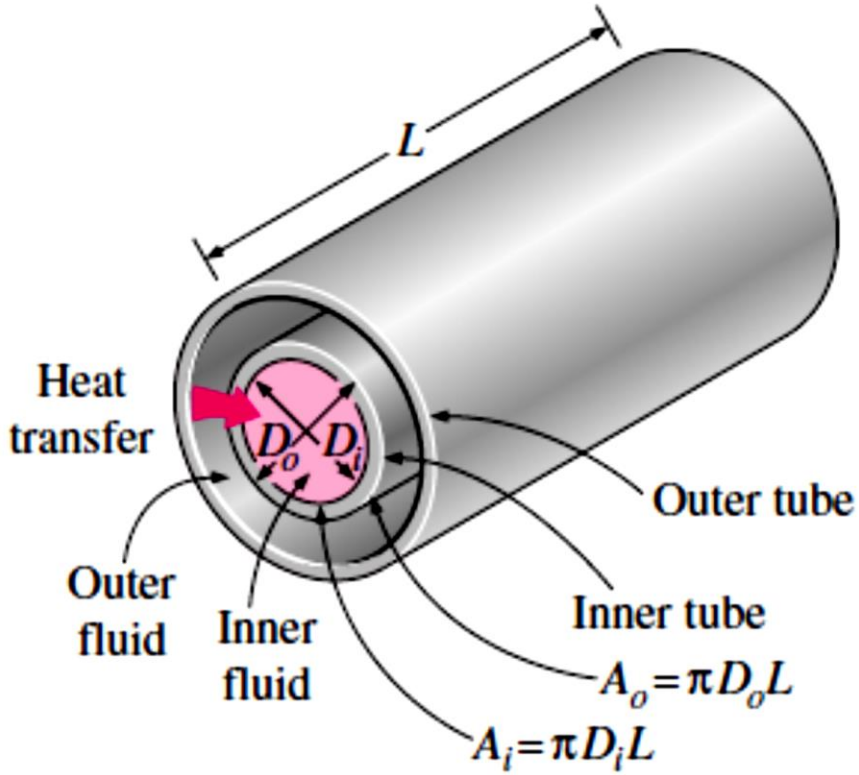
$$R_{kvo} = \frac{1}{h_o A}$$



$R_T = R_{conv1} + R_{cond} + R_{conv2}$

$$R_T = 1/h_i.A + \Delta x / k.A + 1/h_o.A$$

Silinder



A = Transfer kalor secara konveksi dari fluida dalam pipa ke permukaan bagian dalam pipa

B = Transfer kalor secara konduksi dari permukaan bagian dalam ke permukaan bagian luar pipa

C = Transfer kalor secara konveksi dari permukaan bagian luar pipa ke udara fluida yang berada di sekitar pipa.

t_0 = Temperatur fluida dalam pipa

t_1 = Temperatur permukaan bagian dalam pipa

t_2 = Temperatur permukaan bagian luar pipa

t_3 = Temperatur fluida di luar pipa

L = Panjang pipa

r_0 = Jari jari bagian dalam pipa

r_i = Jari jari bagian luar pipa

Aliran kalor yang terjadi dari fluida ke permukaan bagian dalam pipa :

$$q_A = h_A \; A_A \, (t_0 - t_1)$$

Aliran kalor dari permukaan bagian dalam ke permukaan bagian luar :

$$q_B = - \frac{t_2 - t_1}{\left(\frac{\Delta x}{2\pi L k_B} \right)}$$

Aliran kalor dari permukaan bagian luar ke fluida di sekeliling pipa :

$$q_C = h_C \; A_C \, (t_2 - t_3)$$

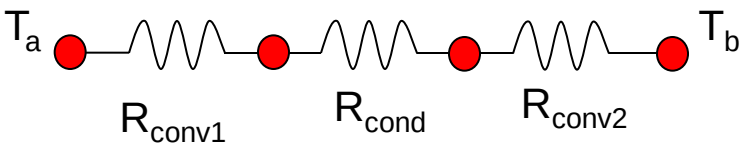
Asumsi bahwa : $\boldsymbol{q_A = q_B = q_C = q}$, maka :

$$q = \frac{t_0 - t_3}{\frac{1}{A_0 \, h_A} + \frac{\left(ln \; {}^{r_0}/_{r_1} \right)}{2\pi L k_B} + \frac{1}{A_1 \, h_C}}$$

Maka koefisien perpindahan kalor menyeluruh untuk pipa :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{A_0 h_A} + \frac{(\ln {}^{r_0}/_{r_1})}{2\pi L k_B} + \frac{1}{A_1 h_C}}$$

Tahanan Panas Total :



$$R_T = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L k} + \frac{1}{h_o A_o} = \frac{1}{UA}$$

Untuk ketebalan dinding yang diabaikan, maka :

$R_{cond} \approx 0$, koefisien perpindahan panas total menjadi : $\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$

Koefisien Perpindahan Panas Gabungan didasarkan pada bagian dalam dan bidang luar :

- bidang dalam

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{A_i}{A_o}\frac{1}{h_o}}$$

- bidang luar

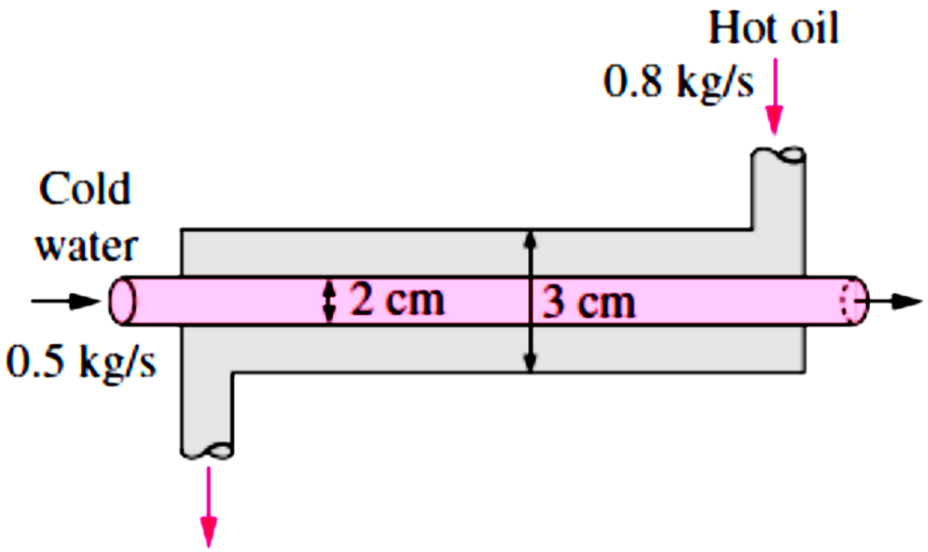
$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i}\frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}}$$

Tabel: Typical Values of U in Shell-Tubes Exchanger

System	U, W/m^2K	System	U, W/m^2K
Water-water	1140-1700	Diesel-diesel	110-285
Water-brine	570-1140	Steam-boiling water	1420-2270
Water-Org. Liquids	570-1140	Water-air(finned tube)	110-230
Water-gasoline	1420-2270	Light org. – light org.	230-425
Water-diesel	340-570	Heavy org.-heavy org.	55-230
Water-veg. oil	140-340	Air-air	2 – 30

Contoh Soal :

Minyak panas harus didinginkan didalam penukar panas dengan tabung tembaga ganda aliran berlawanan memiliki diameter 2 cm dan ketebalan diabaikan. Diameter bagian dalam dari tabung luar (shell) adalah 3 cm. Air mengalir melalui tabung dengan laju aliran massa 0,5 kg/s, dan minyak melalui shell dengan laju aliran massa 0,8 kg/s. Dengan asumsi suhu rata-rata masing-masing air dan minyak adalah 45°C dan 80°C dan tebal dinding diabaikan, tentukan koefisien perpindahan panas keseluruhan dari penukar panas.



Penyelesaian :

Sifat air pada temperature 45°C adalah :

ρ = 990 kg/m^3; Pr = 3.91; k = 0.637 W/m·°C; $\nu = \mu/\rho = 0.602 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}$

Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh, untuk ketebalan dinding diabakan :

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

Dimana h_i dan h_o adalah koefisien perpindahan panas konveksi pada bagian dalam dan luar saluran.

Kecepatan aliran air didalam tabung :

$$\mathcal{V}_m = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} = \frac{\dot{m}}{\rho(\frac{1}{4}\pi D^2)} = \frac{0.5\ \mathrm{kg/s}}{(990\ \mathrm{kg/m^3})[\frac{1}{4}\pi(0.02\ \mathrm{m})^2]} = 1.61\ \mathrm{m/s}$$

Aliran air didalam tabung : $\mathrm{Re} = \frac{\mathcal{V}_m D_h}{\nu} = \frac{(1.61\ \mathrm{m/s})(0.02\ \mathrm{m})}{0.602 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}} = 53{,}490$ (*Turbulen*)

Konveksi paksa, maka : $\mathrm{Nu} = \frac{hD_h}{k} = 0.023\ \mathrm{Re}^{0.8}\mathrm{Pr}^{0.4} = 0.023(53{,}490)^{0.8}(3.91)^{0.4} = 240.6$

Jadi koefisien perpindahan panas konveksi air :

$$h_i = \frac{k}{D_h}\mathrm{Nu} = \frac{0.637\ \mathrm{W/m \cdot °C}}{0.02\ \mathrm{m}}(240.6) = 7663\ \mathrm{W/m^2 \cdot °C}$$

Sifat minyak pada temperature 80°C, adalah :

$$\rho = 852\ \text{kg/m}^3 \qquad \text{Pr} = 490$$
$$k = 0.138\ \text{W/m} \cdot {}^\circ\text{C} \qquad \nu = 37.5 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$$

Diameter annular pada shell : $D_h = D_o - D_i = 0.03 - 0.02 = 0.01\ \text{m}$

Kecepatan aliran minyak didalam shell :

$$\mathcal{V}_m = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} = \frac{\dot{m}}{\rho[\frac{1}{4}\pi(D_o^2 - D_i^2)]} = \frac{0.8\ \text{kg/s}}{(852\ \text{kg/m}^3)[\frac{1}{4}\pi(0.03^2 - 0.02^2)]\ \text{m}^2} = 2.39\ \text{m/s}$$

Aliran minyak didalam shell : $\text{Re} = \frac{\mathcal{V}_m D_h}{\nu} = \frac{(2.39\ \text{m/s})(0.01\ \text{m})}{37.5 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}} = 637$ (*Laminer*)

Dengan assumsi bahwa aliran berkembang penuh dan bilangan Nusselt pada sisi dbung dan shell memiliki perbandingan $D_i/D_o = 0.02/0.03 = 0.667$, dari interpolasi pada table 7.2 berikut diperoleh :

Tabel 7.2.

Nusselt number for fully developed laminar flow in a circular annulus with one surface insulated and the other isothermal (Kays and Perkins, Ref. 8.)

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0.00	—	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

$$\text{Nu} = 5.45$$

Maka koefisien perpindahan panas minyak pada

$$h_o = \frac{k}{D_h}\text{Nu} = \frac{0.138\ \text{W/m} \cdot {}^\circ\text{C}}{0.01\ \text{m}}(5.45) = 75.2\ \text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$$

Dengan demikian koefisien perpindahan panas menyeluruh menjadi :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} = \frac{1}{\frac{1}{7663\ \text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}} + \frac{1}{75.2\ \text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}}} = 74.5\ \text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$$

Faktor Pengotoran (*Fouling)*

Padatan/gel yang lengket pada permukaan perpindahan panas yang berasal dari fluida yang mengandung kotoran akan menurunkan koeffisien perpindahan panas total U. Penurunan ini diakibatkan oleh pengotoran (*fouling*).

Persamaan koefisien perpindahan panas keseluruhan yang diberikan di atas berlaku untuk permukaan bersih dan perlu dimodifikasi untuk memperhitungkan efek pengotoran pada dua bagian yaitu permukaan dalam dan luar tabung. Untuk *unfinned* shell-dan-tabung penukar panas, hal itu dapat dinyatakan sebagai

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln (D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Dimana : $A_i = \pi D_i L$ and $A_o = \pi D_o L$ yaitu luas permukaan dalam dan luar dan R_{fi} dan R_{fo} adalah tahanan panas pada factor pengotoron permukaan dalam dan luar.

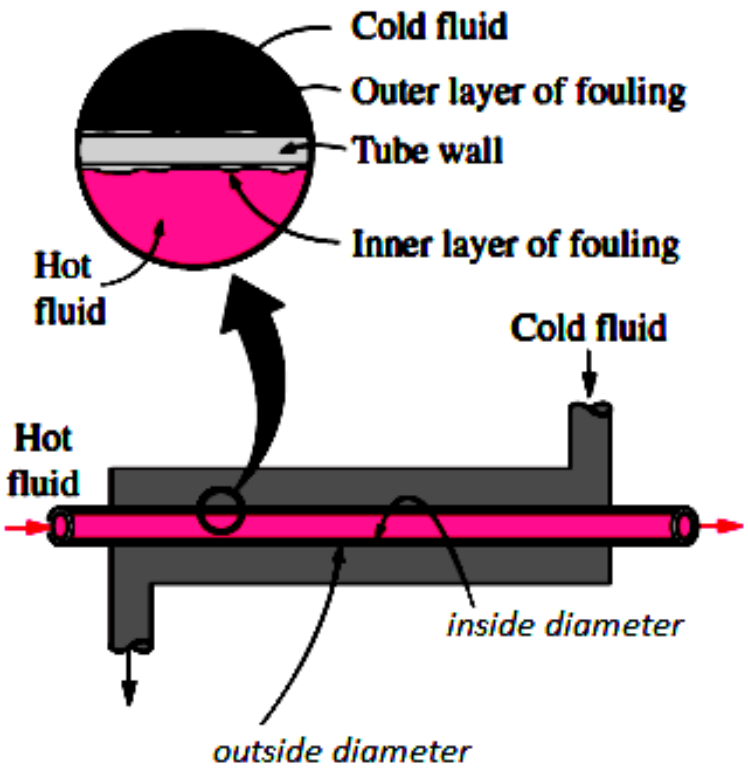
Representative fouling factors (thermal resistance due to fouling for a unit surface area)

(*Source:* Tubular Exchange Manufacturers Association.)

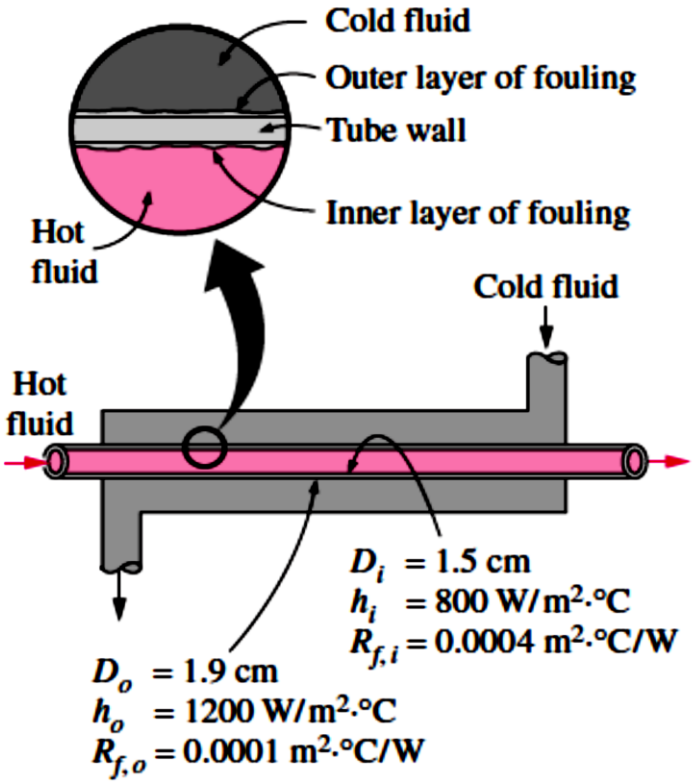
Fluid	R_f, m^2 · °C/W
Distilled water, sea water, river water, boiler feedwater:	
Below 50°C	0.0001
Above 50°C	0.0002
Fuel oil	0.0009
Steam (oil-free)	0.0001
Refrigerants (liquid)	0.0002
Refrigerants (vapor)	0.0004
Alcohol vapors	0.0001
Air	0.0004

Contoh :

Sebuah alat penukar panas pipa ganda (shell-dan-tabung) terbuat dari stainless steel (k = 15,1 W/m.°C), diameter dalam tabung 1,5 cm dan diameter luarnya 1,9 cm serta kulit terluar memiliki diameter dalam 3,2 cm. Koefisien perpindahan panas Konveksi permukaan bagian dalam dari tabung 800 W/m^2.°C dan pada permukaan luarnya h_o = 1200 W/m^2·°C. Untuk faktor pengotoran dari R_{fi} = 0,0004 m^2·°C/W pada sisi tabung dan R_{fo} = 0,0001 m^2·°C/W pada sisi shell, tentukan (a) tahanan panas dari penukar panas persatuan panjang dan (b) koefisien perpindahan panas keseluruhan, U_i dan U_o berdasarkan daerah permukaan dalam dan luar tabung, masing-masing.



Penyelesaian :



(a). Tahanan Panas pada Shell-Tabung Alat Penukar Panas dengan adanya pengotoran:

$$R = \frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_iA_i} = \frac{1}{U_oA_o} = \frac{1}{h_iA_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_oA_o}$$

Dimana : $A_i = \pi D_i L = \pi(0.015\text{ m})(1\text{ m}) = 0.0471\text{ m}^2$

$A_o = \pi D_o L = \pi(0.019\text{ m})(1\text{ m}) = 0.0597\text{ m}^2$

Maka :

$$R = \frac{1}{(800\ \mathrm{W/m^2 \cdot {}^\circ C})(0.0471\ \mathrm{m^2})} + \frac{0.0004\ \mathrm{m^2 \cdot {}^\circ C/W}}{0.0471\ \mathrm{m^2}}$$
$$+ \frac{\ln(0.019/0.015)}{2\pi(15.1\ \mathrm{W/m \cdot {}^\circ C})(1\ \mathrm{m})}$$
$$+ \frac{0.0001\ \mathrm{m^2 \cdot {}^\circ C/W}}{0.0597\ \mathrm{m^2}} + \frac{1}{(1200\ \mathrm{W/m^2 \cdot {}^\circ C})(0.0597\ \mathrm{m^2})}$$
$$= (0.02654 + 0.00849 + 0.0025 + 0.00168 + 0.01396)\mathrm{{}^\circ C/W}$$
$$= 0.0532\mathrm{{}^\circ C/W}$$

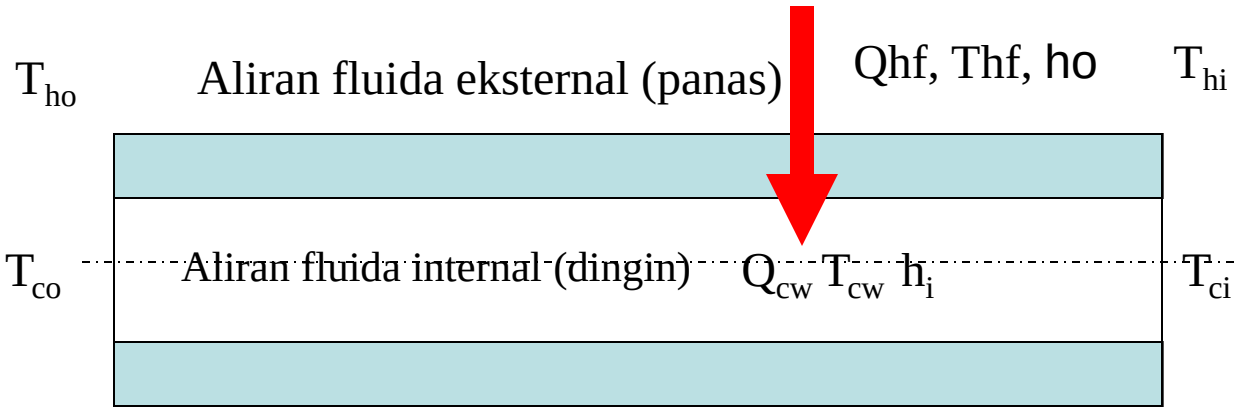
Perhatikan bahwa sekitar 19 persen dari jumlah tahanan termal dalam hal ini adalah karena fouling dan sekitar 5 persen dari itu adalah karena tabung baja memisahkan dua cairan. Sisanya (76 persen) adalah karena resistensi konveksi pada dua sisi dari tabung bagian dalam.

(*b*) Tahanan termal total dan luas perpindahan panas diketahui maka koefisien perpindahan panas menyeluruh (*the overall heat transfer coefficient*) pada permukaan dalam dan luar tabung :

- Pada permukaan dalam : $U_i = \frac{1}{RA_i} = \frac{1}{(0.0532\ \mathrm{{}^\circ C/W})(0.0471\ \mathrm{m^2})} = 399\ \mathrm{W/m^2 \cdot {}^\circ C}$

•Pada permukaan luar : $U_o = \frac{1}{RA_o} = \frac{1}{(0.0532\ \mathrm{{}^\circ C/W})(0.0597\ \mathrm{m^2})} = 315\ \mathrm{W/m^2 \cdot {}^\circ C}$

II. Beda Temperatur Rata-rata (ΔT_m) (*Logaritmic Mean Temperature Difference/LMTD)*



The Fluid Energy Balances.

Kalor yang dipindahkan melalui unsur luas *dA :*

$$dq = -m_h.cp_h.dT_h = m_c.c_c.dT_c$$

h = hot (panas) ; c = cold (dingin)

$$dq = U.dA.(T_h - T_c)$$

$$dT_h = -\frac{dq}{m_h.c_h} \qquad dT_c = \frac{dq}{m_c.c_c}$$

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -dq\left(\frac{1}{m_h.c_h} + \frac{1}{m_c.c_c}\right)$$

$$d(T_h - T_c) = -U.dA.(T_h - T_c).\left(\frac{1}{m_h.c_h} + \frac{1}{m_c.c_c}\right)$$

$$\frac{d(T_h - T_c)}{(T_h - T_c)} = -U.dA.(\frac{1}{m_h.c_h} + \frac{1}{m_c.c_c})$$

$$\int_1^2 \frac{d(T_h - T_c)}{(T_h - T_c)} = -U.dA.(\frac{1}{m_h.c_h} + \frac{1}{m_c.c_c})$$

$$\ln(T_{h_2} - T_{c_2}) - \ln(T_{h_1} - T_{c1}) = -U.dA.(\frac{1}{m_h.c_h} + \frac{1}{m_c.c_c})$$

$$\ln\frac{(T_{h2} - T_{c2})}{(T_{h1} - T_{c1})} = -U.dA.(\frac{1}{m_h.c_h} + \frac{1}{m_c.c_c})$$

dari : $m_h.c_h = -\frac{dq}{T_{h2} - T_{h1}} = \frac{dq}{T_{h1} - T_{h2}}$ dan $m_c.c_c = \frac{dq}{T_{c2} - T_{c1}}$

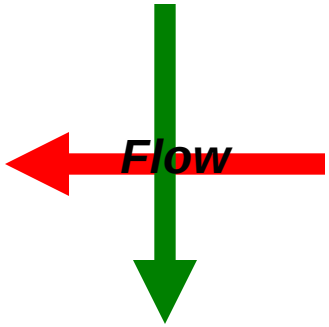
Maka : $q = U.A.\frac{(T_{h1} - T_{c1}) - (T_{h2} - T_{c2})}{\ln[\frac{(T_{h1} - T_{c1})}{(T_{h2} - T_{c2})}}$ → ***ΔTm = LMTD***

Konfigurasi aliran dan profil temperatur fluida pada perpindahan panas gabungan

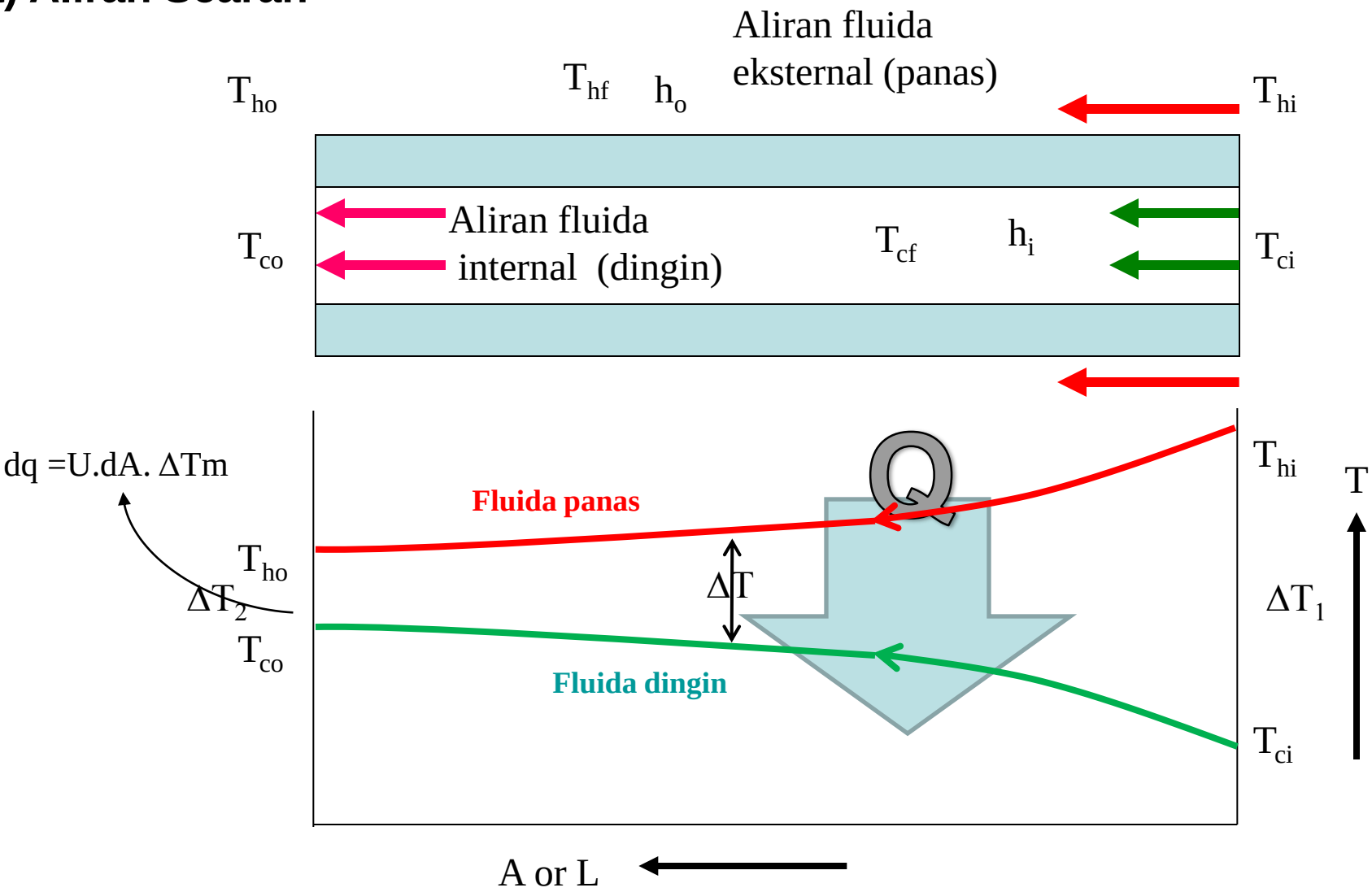
a) Aliran searah antara fluida panas dan dingin (Parallel Flow)

b) Aliran berlawanan arah antara fluida panas dan dingin (Counter Flow)

c) Aliran silang antara fluida panas dan dingin (Cross Flow)

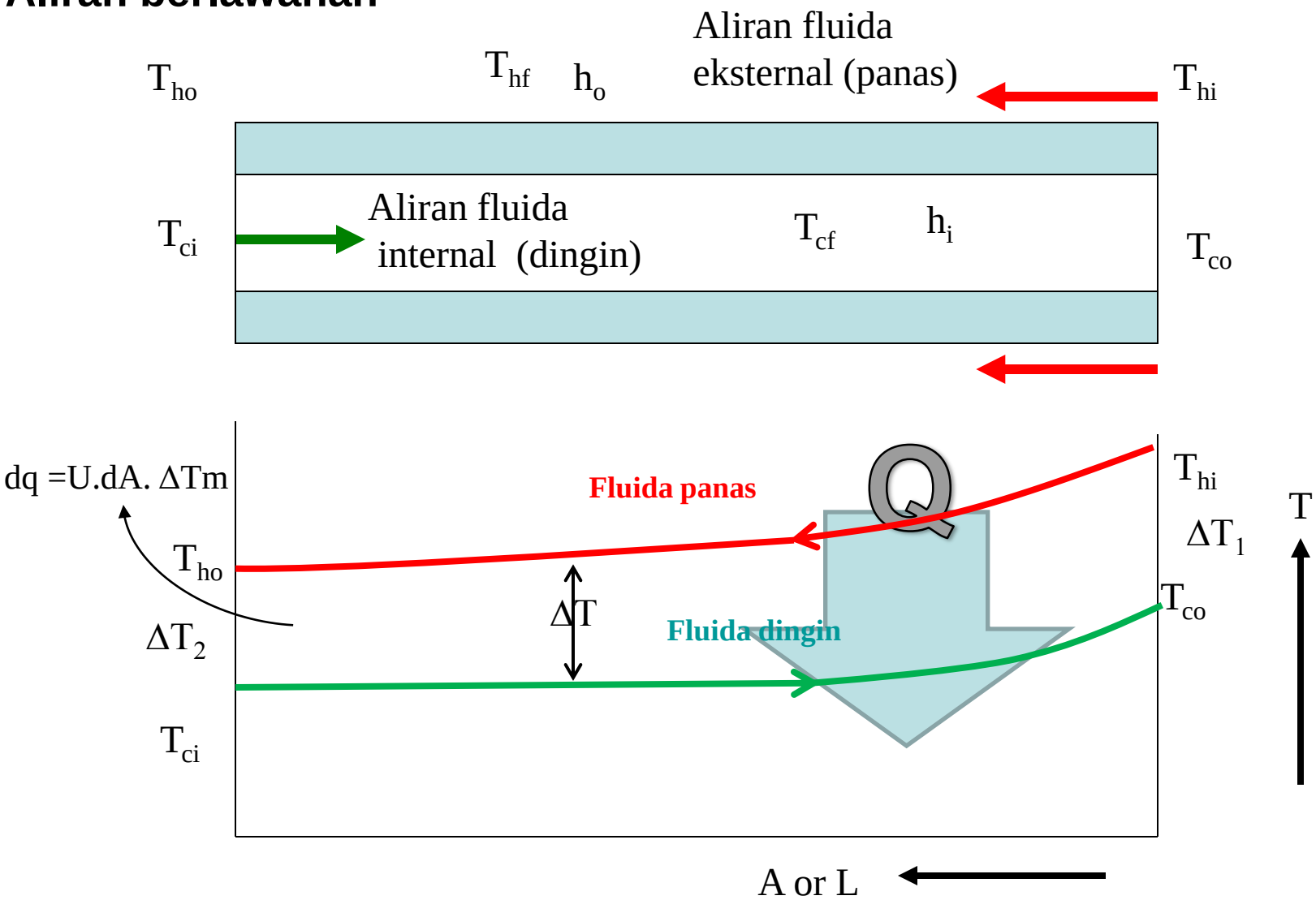


a) Aliran Searah



$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(T_{hi} - T_{ci}) - (T_{ho} - T_{co})}{\ln[\frac{(T_{hi} - T_{ci})}{(T_{ho} - T_{co})}}$$

b) Aliran berlawanan



$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln[\frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

c) Aliran Silang (Cross Flow)

LMTD = F x LMTD counter flow

$$LMTD = Fx\frac{(T_{hi}-T_{co})-(T_{ho}-T_{ci})}{\ln[\frac{(T_{hi}-T_{co})}{(T_{ho}-T_{ci})}}$$

F = faktor koreksi → Perpotongan garis grafik

$$p = \frac{(T_{co}-T_{ci})}{(T_{hi}-T_{ci})} \qquad R = \frac{(T_{hi}-T_{ho})}{(T_{co}-T_{ci})}$$