

PERPINDAHAN KALOR

Editor: Suci Haryanti



Lusiani

Febri Rismaningsih | Sudirman

Iman Noor | Farah Indrawati

Anisa Budi Putranti | Andry Fitrian

Bergita Gela M Saka | I Putu Tedy Indrayana

Popi Purwanti | Jan Setiawan

Yulianti Malik | Erwinda Fenty Anggraeni

BUNGA RAMPAI

PERPINDAHAN KALOR

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

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

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

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

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

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

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

PERPINDAHAN KALOR

Lusiani
Febri Rismaningsih
Sudirman
Iman Noor
Farah Indrawati
Anisa Budi Putranti
Andry Fitriani
Bergita Gela M Saka
I Putu Tedy Indrayana
Popi Purwanti
Jan Setiawan
Yulianti Malik
Erwinda Fenty Anggraeni

Editor:
Suci Haryanti

Penerbit



CV. MEDIA SAINS INDONESIA
Melong Asih Regency B40 - Cijerah
Kota Bandung - Jawa Barat
www.medsan.co.id

Anggota IKAPI
No. 370/JBA/2020

PERPINDAHAN KALOR

Lusiani
Febri Rismaningsih
Sudirman
Iman Noor
Farah Indrawati
Anisa Budi Putranti
Andry Fitriani
Bergita Gela M Saka
I Putu Tedy Indrayana
Popi Purwanti
Jan Setiawan
Yulianti Malik
Erwinda Fenty Anggraeni

Editor :

Suci Haryanti

Tata Letak :

Mega Restiana Zentrato

Desain Cover :

Syahrul Nugraha

Ukuran :

A5 Unesco: 15,5 x 23 cm

Halaman :

vi, 208

ISBN :

978-623-362-815-0

Terbit Pada :

November 2022

Hak Cipta 2022 @ Media Sains Indonesia dan Penulis

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit atau Penulis.

PENERBIT MEDIA SAINS INDONESIA

(CV. MEDIA SAINS INDONESIA)

Melong Asih Regency B40 - Cijerah

Kota Bandung - Jawa Barat

www.medsan.co.id

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga buku kolaborasi dalam bentuk buku dapat dipublikasikan dan dapat sampai di hadapan pembaca. buku ini disusun oleh sejumlah guru, dosen dan praktisi sesuai dengan kepakarannya masing-masing. Buku ini diharapkan dapat hadir memberi kontribusi positif dalam ilmu pengetahuan khususnya terkait dengan Perpindahan Kalor.

Sistematika buku ini dengan judul “Perpindahan Kalor” terdiri atas 14 bab yang dijelaskan secara rinci dalam pembahasan mengenai konsep dan Aplikasi diantaranya: Konsep dan analisis Energi Kalor, Sumber Kalor, Konduksi Dimensi, Rangkaian Hambatan, konveksi ilmiah konveksi paksa, aliran Fluida dalam Pipa, Sistem Termal pada *Heat Exchanger*, Penukaran kalor jenis Shell and tube, Dasar Radiasi, Energi Surya dan Aplikasinya.

Akhirnya kami mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak yang telah mendukung dalam proses penyusunan dan penerbitan buku ini, secara khusus kepada Penerbit Media Sains Indonesia sebagai inisiator buku bersama ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca sekalian.

Jakarta, 6 Oktober 2022
Editor

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
1 ENERGI KALOR.....	1
Definisi Energi Kalor.....	1
Jenis Kalor Energi.....	5
Konversi Energi.....	6
Perpindahan Kalor.....	7
2 SUMBER ENERGI.....	17
Pengertian Sumber Energi.....	17
Aliran Energi.....	18
Klasifikasi Sumber Energi.....	18
Satuan Energi.....	23
Bentuk-bentuk Energi.....	25
Penggunaan Energi.....	28
3 KONDUKSI SATU DIMENSI <i>STEADY</i> <i>STATE – ONE DIMENSIONAL</i>	33
Pendahuluan.....	33
Konduksi Keadaan Tunak Satu Dimensi.....	34
Ringkasan Materi.....	49
Contoh Soal.....	50
Latihan.....	53
4 KONDUKSI DIMENSI 2.....	55
Persamaan Umum Difusi Panas.....	55
Metode Pemisahan Variabel.....	56

	Metode Beda Hingga	60
	Contoh Soal dan Pembahasan	63
5	RANGKAIAN HAMBATAN	69
	Hambatan Seri.....	71
	Hambatan Paralel	73
	Hambatan Campuran	76
	Latihan Soal	80
6	KONVEKSI ALAMI.....	83
	Konveksi	83
	Contoh Konveksi Alami.....	84
	Konveksi Alami pada Pelat.....	88
	Contoh Soal dan Pembahasan	89
7	KONVEKSI PAKSA (<i>FORCED CONVECTION</i>).....	97
	Pengertian	97
	Bilangan tidak Berdimensi.....	97
	Perhitungan Koefisien Konveksi.....	100
	Contoh Soal di dalam Pipa.....	104
	Contoh Soal di luar Pipa	105
	Contoh Penggunaan Konveksi Paksa pada Zat Cair.....	107
	Contoh Penggunaan Konveksi Paksa pada Gas	107
	Contoh Soal Konveksi Paksa pada Aliran Udara.....	108
8	ALIRAN FLUIDA DALAM PIPA	111
	Fluida	112
	Persamaan Dasar Aliran Fluida dalam Pipa	115

	Persamaan Umum Kehilangan Tekanan Pada Pipa.....	119
	Persamaan Darcy.....	121
9	SISTEM TERMAL PADA <i>HEAT EXCHANGER</i>	125
	Pendahuluan	125
	Definisi Penukaran Panas	129
	Klasifikasi Penukaran Panas	131
	Koefisien Transfer Panas Gabungan	135
	Faktor Pengotor	138
	Metode <i>Log Mean Temperature Difference</i> (LMTD)	139
	Metode <i>Number Of Transfer Unit</i> (NtU)	140
10	PENUKAR KALOR JENIS <i>SHELL AND TUBE</i>	145
	Penelitian Penukaran Kalor.....	145
	Jenis Penukaran Kalor.....	145
	Jenis Aliran Penukar Kalor Tunggal.....	146
	Jenis Penukar Kalor Kompak.....	147
	Jenis Alat Penukar Kalor	149
	Penukar Kalor Jenis <i>Shell and Tube</i>	151
	Komponen Pada <i>Shell and Tube</i>	151
	Perancangan Penukar Kalor <i>Shell and Tube</i>	156
11	DASAR RADIASI	161
	Pendahuluan	161
	Perpindahan Kalor Radiasi Termal.....	164
	Hukum Kirchhoff Radiasi Termal.....	168
	Contoh Soal	169
	Latihan Soal	172

12	ENERGI SURYA	175
	Definisi	175
	Radiasi Surya/Matahari	176
	Konversi Energi Surya	182
	Potensi, Perkembangan Kekurangan dan Kelebihan Energi Surya	186
13	APLIKASI ENERGI SURYA.....	193
	Pengantar	193
	Teknologi Energi Surya Termal	193
	Teknologi Energi Surya Fotovoltaik.....	200

ENERGI KALOR

Lusiani

Akademi Maritim Nusantara Cilacap

Definisi Energi Kalor

Kegiatan sehari-hari yang dilakukan tidak terlepas dari konsep kalor. Beragam peralatan rumah tangga didesain dengan menerapkan prinsip perpindahan kalor. (Rokhimi & Pujayanto, 2015). Salah satu pokok bahasan fisika yang mempunyai beragam aplikasi di kehidupan sehari-hari yakni suhu serta kalor. Topik suhu serta kalor berperan besar dalam perkembangan sains serta teknologi, sehingga suhu serta kalor merupakan salah satu topik penting yang wajib dipahami peserta didik. (Taqwa et al., 2020). Salah satu materi yang penting untuk peserta didik teknik yakni suhu serta kalor. Suhu serta kalor bermanfaat secara luas di bidang keteknikan khususnya terkait dengan sistem termodinamika, sistem pendingin, sirkulasi udara pada suatu ruangan. (Mustofa, 2021)

Kalor berasal dari kata *caloric* yang ditemukan oleh ahli kimia perancis bernama Antonnie laurent lavoiser. Kalor memiliki satuan kalori (kal) serta kilokalori (kkal). 1 kal sama dengan jumlah panas yang dibutuhkan untuk memanaskan 1 gram air naik 1 derajat celcius. Kalor merupakan suatu perpindahan energi internal. Kalor mengalir dari satu bagian sistem menuju bagian lain dengan isitilah lain dari satu sistem menuju sistem

lainnya dikarenakan adanya perbedaan temperatur. (Nabawiyah & Abtokhi, 2010). Kalor merupakan energi yang ditransfer dari suatu benda menuju benda lainnya dikarenakan perbedaan temperatur. (Hersandi et al., 2014). Karena kalor merupakan bentuk energi, maka satuan SI untuk kalor sama seperti energi, yakni Joule. Kalor berpindah dari suhu tinggi menuju suhu rendah. (Galih et al., 2019)

Kalor merupakan salah satu bentuk energi yang bisa berpindah dari benda bersuhu lebih tinggi menuju benda bersuhu lebih rendah. Benjamin Thompson (Count Rumford), Robert Meyer, James Prescott Joule, membuktikan bahwa kalor merupakan suatu bentuk energi. (Yanti et al., 2014). Kalor didefinisikan sebagai energi panas yang terdapat dalam suatu zat. Secara umum dalam mendeteksi adanya kalor yang terdapat pada suatu benda yakni melalui pengukuran suhu benda tersebut. Apabila suhunya tinggi maka kalor yang terkandung pada benda sangat besar, begitu pun sebaliknya apabila suhunya rendah maka kalor yang dikandung sedikit. (Muhsin, 2019)

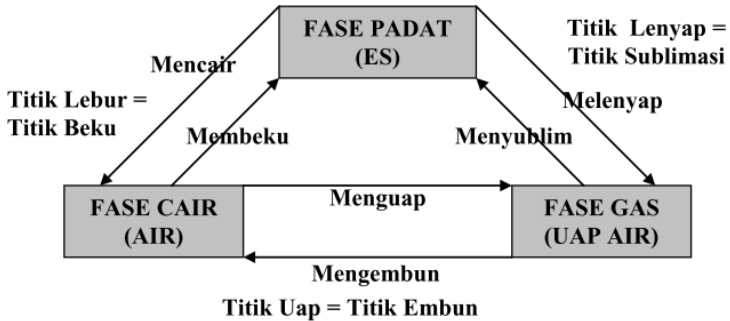
Awalnya kalor dianggap sebagai zat alir (fluida) tanpa bobot serta tidak bisa dilihat. Kalor timbul apabila terdapat bahan yang dibakar. Kalor bisa berpindah dari benda satu menuju benda lain melalui cara konduksi, konveksi, dan atau radiasi. Pengalaman Count Rumford serta Sir James Prescott Joule saat pengeboran laras meriam serta beragam percobaan yang dilakukan bisa disimpulkan, bahwa energi mekanik terus menerus berubah wujudnya menjadi kalor. Hal ini meunjukkan ada kesetaraan antara energi mekanik dengan kalor. Dalam percobaannya Joule menemukan, bahwa 4,186 joule (J) setara dengan 1 kalori. Jadi $1,000 \text{ kal} = 4,186 \text{ J}$. Proses perubahan energi mekanik menjadi kalor merupakan salah satu contoh terdapatnya azas ketetapan

energi. Sebaliknya, kalor dapat diubah menjadi energi mekanik. Jadi, kalor merupakan salah satu bentuk energi. (Hamid, 2007)

Dalam hal kalor bisa dibedakan 2 konsep pokok, yakni:

1. Rasa kepanasan (*hot*) yang dinamakan temperatur atau suhu.
2. Besaran yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan temperatur yang dinamakan kalor (*heat*)/bahang.
3. Jumlah panas yang menyebabkan perubahan rasa kepanasan yang dinamakan kalor/bahang (*heat*).
4. Boleh dinyatakan beberapa hal:
 - a. temperatur yakni tingkat atau derajat panasnya suatu benda yang menentukan arah perpindahan kalor.
 - b. temperatur yakni besaran yang dimiliki oleh dua benda atau lebih yang bersentuhan melalui dinding diatermis yang terdapat dalam keadaan setimbang termal.
5. Perubahan fase yakni perubahan tingkat wujud zat, seperti: tingkat wujud padat menuju cair, tingkat wujud cair menuju gas. Pada proses perubahan fase pada tekanan tetap, temperatur benda selalu tetap. Kalor yang diberikan maupun kalor yang dilepaskan saat perubahan fase harganya juga tetap serta dinamakan sebagai kalor laten.
6. Kalor yang diberikan pada proses kenaikan temperatur bergantung pada jenis benda serta sebanding dengan massa benda serta kenaikan temperatur benda. Jenis benda ditandai dengan besaran yang disebut kapasitas kalor benda. Kapasitas kalor didefinisikan sebagai perbandingan

antara jumlah panas yang diberikan kepada suatu benda dengan kenaikan temperatur benda. (Hamid, 2007)



Gambar 1.1 Perubahan Fase Zat (Benda)
Sumber: (Hamid, 2007)

Saat kita berada di dekat benda panas, pada dasarnya terjadi perpindahan kalor dalam bentuk radiasi dari benda panas tersebut menuju tubuh kita, sehingga kita merasakan panas melalui kulit. Perubahan keadaan dari panas menjadi dingin maupun sebaliknya selalu berkaitan dengan terjadinya perpindahan panas maupun kalor. Panas maupun kalor merupakan energi yang berpindah akibat perbedaan suhu. Satuan SI untuk panas yakni joule. Panas bergerak dari daerah bersuhu tinggi menuju daerah bersuhu rendah. Setiap benda mempunyai energi dalam yang berhubungan dengan gerak acak dari atom-atom maupun molekul penyusunnya. Energi dalam ini berbanding lurus terhadap suhu benda. Saat dua benda dengan suhu berbeda bergandengan, maka akan terjadi pertukaran energi internal sampai suhu kedua benda tersebut seimbang. Jumlah energi yang disalurkan merupakan jumlah energi yang tertukar (Purwadi, 2001). (Supu et al., 2016)

Besarnya entalphy reaksi bisa dinyatakan dengan kalor pembakaran atau dinamakan dengan nilai kalor. Nilai kalor dari bahan bakar menurut Sneedan dan Kerr (1969) merupakan energi yang dapat dibebaskan selama proses pembakaran yang komplek dari sejumlah bahan bakar. Nilai kalor ini bisa diukur sebagai nilai kalor kotor (*gross calorific value*) serta nilai kalor netto (*nett calorivic value*). Nilai kalor kotor mengasumsikan seluruh uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran sepenuhnya terkondensasi menjadi cair. Sedangkan nilai kalor netto mengasumsikan air yang keluar dari produk pembakaran tidak sepenuhnya terkondensasi. Menurut Koesoemadinata (1980), nilai kalor bahan bakar merupakan jumlah panas yang dihasilkan maupun ditimbulkan oleh suatu gram bahan bakar tersebut melalui peningkatan temperatur 1 gr air dari 3,50 C – 4,50 C, dengan satuan kalori. Nilai kalor yakni besarnya panas yang diperoleh dari pembakaran suatu jumlah tertentu bahan bakar. Semakin tinggi berat jenis bahan bakar, menyebabkan semakin tinggi nilai kalor yang diperolehnya. Nilai kalor yakni ukuran panas maupun energi yang dihasilkan, serta diukur sebagai nilai kalor kotor/ *gross calorific value* atau nilai kalor netto/ *nett calorific value*. Kalorimetri merupakan sebuah metode yang mempelajari jumlah panas/kalor berdasarkan perubahan temperatur. (Nabawiyah & Abtokhi, 2010)

Jenis Kalor Energi

Kalor bisa diklasifikasikan menjadi 2 jenis yakni:

1. Kalor yang digunakan untuk menaikkan suhu
2. Kalor yang digunakan untuk mengubah wujud (kalor laten)

Persamaan yang digunakan dalam kalor laten ada dua macam $Q = m \cdot U$ dan $Q = m \cdot L$. Dengan U adalah kalor uap (J/kg) dan L adalah kalor lebur (J/kg). (Muhsin, 2019)

Kalor reaksi merupakan banyaknya kalor yang diserap maupun dilepaskan saat terjadi reaksi kimia. Di laboratorium, penentuan kalor reaksi dilakukan dengan alat yang disebut kalorimeter. Kalor reaksi bisa diperoleh dalam 2 keadaan, yakni pada tekanan tetap atau volume tetap. Kalor reaksi pada tekanan tetap berbeda dengan kalor reaksi volume tetap, kalor reaksi pada tekanan tetap memperhitungkan kerja tekanan-volume, sedangkan kalor reaksi pada volume tetap tidak memperhitungkannya. Kalor reaksi pada tekanan tetap disebut entalpi (H). Kerja tekanan-volume bisa teridentifikasi dari tekanan serta perubahan volume. Kalor reaksi pada tekanan tetap untuk reaksi yang tidak menghasilkan gas mempunyai kalor reaksi yang hampir sama dengan kalor reaksi pada volume tetap, disebabkan perubahan volume untuk reaksi yang hanya melibatkan padatan serta cairan sangat kecil. Lain halnya dengan kalor reaksi untuk reaksi yang melibatkan gas, perubahan volume gas harus diperhitungkan. Penentuan kalor reaksi pada tekanan tetap untuk reaksi yang menghasilkan gas dilakukan dengan memantau perubahan suhu serta perubahan volume gas selama reaksi terjadi. (Manika et al., 2016)

Konversi Energi

Konversi energi yakni kondisi fisis perubahan bentuk energi dari satu bentuk menjadi bentuk lainnya. Salah satu contoh konversi energi merupakan energi listrik bisa berubah menjadi energi panas (kalor), hal ini harus memperhatikan kesetaraan antara satuan energi listrik serta kalor. Kalor merupakan energi yang timbul ketika terjadi perubahan suhu benda, serta merambat dari

bagian yang panas menuju bagian yang dingin. (Kunlestiowati, 2018)

Hukum Kekekalan Energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Hukum ini akan berlaku jika tidak terdapat gaya luar yang bekerja (terisolasi). Konversi energi merupakan suatu proses perubahan bentuk energi dari yang satu menjadi bentuk energi lain. Untuk memperoleh suatu bentuk energi, perlu adanya energi lain yang dikonversikan menjadi energi yang dibutuhkan tersebut. Salah satu contohnya untuk memperoleh energi panas yang tidak dapat diperoleh secara langsung, namun terdapat proses konversi energi sebelum energi panas tersebut diperoleh. (Hersandi et al., 2014)

Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor merupakan perpindahan energi yang dialami benda maupun material dengan suhu tinggi menuju benda maupun material dengan suhu rendah, hingga mencapai kesetimbangan panas. Perpindahan kalor (*heat transfer*) merupakan ilmu yang dapat memberikan gambaran perpindahan energi yang terjadi disebabkan terdapat perbedaan suhu di antara benda maupun material. Jika 2 sistem yang suhunya berbeda disinggungkan maka akan terjadi perpindahan energi. Proses di mana perpindahan energi itu berlangsung disebut perpindahan panas. Perpindahan panas akan terjadi apabila ada perbedaan temperatur antara 2 bagian benda. Panas akan berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah. (Rokhimi & Pujayanto, 2015)

Terdapat 3 macam proses perpindahan energi kalor. Proses tersebut yakni perpindahan energi secara konduksi, konveksi serta radiasi. Konduksi yakni proses

perpindahan kalor dari suatu bagian benda padat atau material menuju bagian lainnya. Pada perpindahan kalor secara konduksi tidak terdapat bahan dari logam yang berpindah. Yang terjadi yakni molekul-molekul logam yang diletakkan di atas nyala api membentur molekul-molekul yang berada di dekatnya serta memberikan sebagian panasnya. Molekul-molekul terdekat kembali membentur molekul molekul terdekat lainnya serta memberikan sebagian panasnya, dan begitu seterusnya pada sepanjang bahan sehingga suhu logam naik. Jika padatan merupakan logam, maka perpindahan energi kalor dibantu oleh elektron-elektron bebas, yang bergerak diseluruh logam, sambil menerima serta memberi energi kalor saat bertumbukan dengan atom-atom logam. Dalam gas, kalor dikonduksikan oleh tumbukan langsung molekul- molekul gas. Molekul di bagian yang lebih panas dari gas mempunyai energi rata-rata yang lebih tinggi bertumbukan dengan molekul berenergi rendah, sehingga sebagian energi molekul berenergi tinggi ditransfer menuju molekul berenergi rendah. (Rokhimi & Pujayanto, 2015)

Perpindahan kalor merupakan proses berpindahnya energi dari suatu daerah menuju daerah lainnya diakibatkan dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut. Perpindahan kalor pada fluida terjadi secara konveksi. Konveksi merupakan proses transport energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi, serta gerakan mencampur. Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat serta cairan atau gas. (Hersandi et al., 2014)

Perpindahan kalor atau panas merupakan proses perpindahan energi dari satu daerah menuju daerah lainnya sebagai akibat dari perbedaan suhu. Seperti dari temperatur yang lebih tinggi ke temperatur lebih rendah.

Kalor dapat berpindah dengan 3 cara yaitu: konveksi, konduksi dan radiasi. Radiasi dapat merupakan suatu proses perpindahan panas dari suatu benda ke benda lain tanpa melalui perantara atau medium. Dalam teori radiasi, gelombang elektromagnetik berperan penting dalam proses terjadinya perpindahan panas dari satu benda menuju benda lainnya. Sehingga dalam proses ini panas yang berpindah tidak membutuhkan perantara maupun medium sama sekali. Bahkan di dalam ruang hampa sekalipun, proses perpindahan panas dapat tetap berlangsung melalui radiasi gelombang elektromagnetik. Panas matahari yang sampai ke bumi merupakan salah satu contoh nyata bentuk perpindahan panas secara radiasi. Jarak antara bumi dan matahari sangatlah jauh. Terdapat ruang hampa yang memisahkan antara bumi serta matahari. Walaupun demikian, panas matahari tetap bisa dirasakan serta sampai menuju bumi melalui pancaran radiasi. Kalor yakni suatu bentuk energi panas yang dapat berpindah dari benda yang bersuhu tinggi menuju benda yang bersuhu lebih rendah. Sementara suhu merupakan derajat panas dinginnya suatu benda. Jadi jika semakin banyak suatu benda menyerap kalor maka suhu benda tersebut akan semakin tinggi begitu pula jika semakin banyak sesuatu benda melepaskan kalor maka suhunya akan semakin rendah. (Nurhayati et al., 2021)

Perpindahan panas merupakan perindahan energi dari satu daerah menuju daerah lainnya sebagai akibat dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut dari temperatur fluida yang lebih tinggi ke fluida lain yang memiliki temperatur lebih rendah. Perpindahan panas pada umumnya diklasifikasikan dalam 3 cara perpindahan panas yang berbeda yakni konduksi (*conduction*; juga dikenal dengan istilah hantaran), radiasi (*radiation*; juga dikenal dengan istilah pancaran), dan konveksi

(*convection*; juga dikenal dengan istilah aliran) (Yunus, 2009). Energi sebenarnya disimpan dalam partikel-partikel fluida serta diangkut sebagai akibat gerakan massa partikel-partikel tersebut. Mekanisme ini untuk operasinya tidak tergantung hanya pada beda suhu serta oleh karena itu tidak secara tepat mencukupi definisi perpindahan panas. Namun hasil bersihnya yakni angkutan energi, serta karena terjadinya dalam arah gradien suhu, maka juga dikeompokkan dalam suatu cara perpindahan panas serta ditunjuk dengan sebutan aliran panas dengan cara konveksi (Ambarita, 2011). (Supu et al., 2016)

Macam-macam Cara Perpindahan Panas:

1. Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan panas tanpa zat perantara. Contoh paling mudah dari perpindahan panas secara radiasi yakni pancaran sinar matahari. Matahari memancarkan panasnya sehingga sampai ke permukaan bumi melalui ruang hampa. Di ruang hampa tidak ada zat yang dapat dilalui dan juga tidak ada zat yang dapat mengalir. Panas matahari tersebut sampai ke bumi secara langsung atau secara pancaran tanpa melalui zat perantara.

2. Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan panas karena terjadinya perpindahan zat. Peristiwa konveksi atau aliran zat terjadi pada perubahan suhu suatu zat. Contohnya yakni air yang sedang direbus. Zat cair dan gas yang terkena panas maka molekul- molekulnya bertambah besar dan beratnya tetap, sehingga akan bergerak ke atas. Gerakan ke atas ini akan diikuti oleh gerakan zat lain secara terus menerus sehingga terjadi aliran zat karena panas. Dari peristiwa aliran inilah, maka panas dapat merambat secara konveksi.

Konduksi

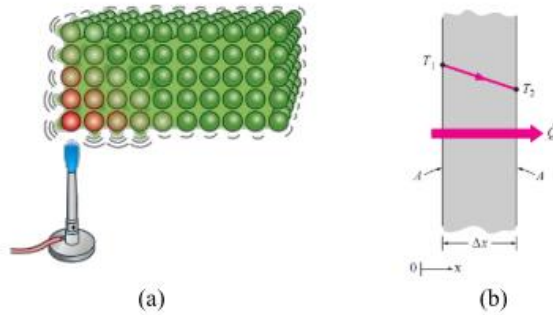
Konduksi merupakan perpindahan panas melalui benda padat. Benda yang dapat menghantarkan panas dengan baik disebut konduktor. Pada umumnya, konduktor terbuat dari logam. Benda yang sukar menghantarkan panas disebut isolator. (Muhsin, 2019)

Bentuk energi yang bisa berpindah dari satu sistem menuju sistem lainnya sebagai akibat adanya perbedaan temperatur. Ilmu yang mempelajarinya mulai dari besar hingga kecepatannya yakni ilmu perpindahan panas (*heat transfer*). Konsep dasarnya dari termodinamika bawah energi dapat berpindah dari satu media dengan temperatur tinggi menuju temperatur rendah serta akan berhenti saat mencapai temperature yang sama. Panas bisa berpindah dengan 3 metode perpindahan panas yakni: *conduction*, *convection*, and *radiation* dimana 3 mode tersebut memerlukan eksistensi perbedaan temperatur untuk proses terjadinya. (Kusuma, 2018)

3 mekanisme dasar perpindahan panas yakni:

a. *Conduction*

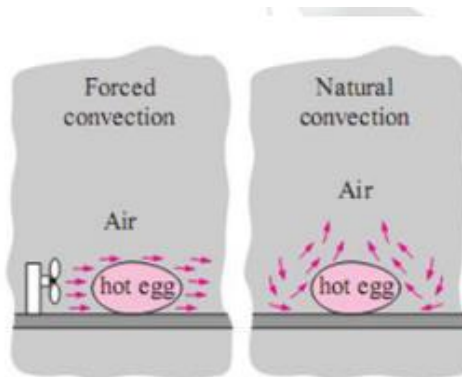
Perpindahan energi dari partikel yang mempunyai energi lebih tinggi menuju partikel didekatnya yang memiliki energi lebih sedikit.



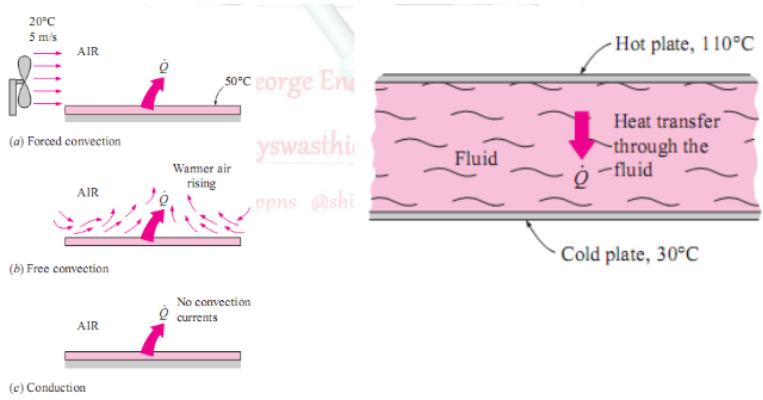
Gambar 1.2 (a) *Energetic Particle* (b)Konduksi melalui bidang Δx dan Area A. Sumber: (Kusuma, 2018)

b. *Convection*

Perpindahan panas dari material padat menuju liquid atau gas yang Bergerak mengenaanya, serta proses perpindahan panas ini akan melibatkan kombinasi efek konduksi dan pergerakan fluidanya. 2 macam perpindahan panas konveksi yakni:



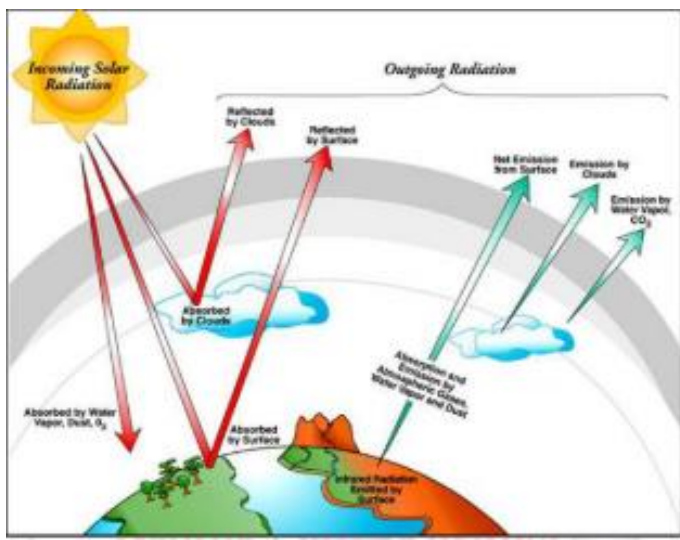
Gambar 1.3 (a) Perpindahan panas konveksi paksa (b) Perpindahan panas konveksi alami
Sumber: (Kusuma, 2018)



Gambar 1.4 Perpindahan panas dari permukaan plat yang lebih panas ke lingkungan sekitar dengan cara konduksi dan konveksi. Sumber: (Kusuma, 2018)

c. *Radiation*

Perpindahan panas dengan cara pancaran dari material dalam bentuk gelombang elektromagnetik (*energy photon*) sebagai akibat perubahan konfigurasi dari atom serta molekul.



Gambar 1.5 Perpindahan panas radiasi Sumber: (Kusuma, 2018)

Daftar Pustaka

- Galih, V., Putra, V., Wijayono, A., & Purnomosari, E. (2019). Studi Penentuan Kalor Jenis Air dan Larutan Garam Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika Dan Riset Ilmiah)*, 3(2), 86–97.
- Hamid, A. A. (2007). Kalor dan Termodinamika. In *Diktat Kuliah Termodinamika*. Jurusan Pendidikan Fisika FKIP Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hersandi, M., Supriyadi, B., & Yushardi. (2014). Pengaruh Bentuk Elemen Pemanas Terhadap Jumlah Kalor Yang Dihasilkan. *Journal Pendidikan Fisika*, 3(1), 23–27.
<https://jurnal.unej.ac.id/index.php/JPF/article/view/23233>
- Kunlestiowati, H. (2018). Analisis penyimpangan konversi energi listrik menjadi kalor pada perangkat eksperimen Hukum Joule. *Jurnal Riset Dan Kajian Pendidikan Fisika*, 5(1), 34.
<https://doi.org/10.12928/jrkipf.v5i1.9210>
- Kusuma, G. E. (2018). *Perpindahan Panas Untuk Politeknik*. Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Manika, R., Fadiawati, N., & Tania, L. (2016). Alat Penentuan Kalor Reaksi pada Tekanan Tetap. *Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran Kimia*, 5(1), 101–113.
- Muhsin, M. (2019). Application of Talking Stick Learning Model to Improve Students' Positive Attitude and Learning Achievement in the Subject of Heat. *Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(1), 32–48.
<https://doi.org/10.26618/jpf.v7i1.1685>

-
- Mustofa, Z. (2021). Pemahaman siswa tentang aplikasi konsep suhu dan kalor yang berkaitan dengan komputer. *Jurnal Pendidikan Fisika Undiksha*, 11(1), 56–65.
- Nabawiyah, K., & Abtokhi, A. (2010). Penentuan Nilai Kalor Dengan Bahan Bakar Kayu Sesudah Pengarangan Serta Hubungannya Dengan Nilai Porositas Zat Padat. *Jurnal Neutrino*, 3(1), 44–55.
- Nurhayati, N., Saputra, F., Asmara, A. P., & Malahayati, M. (2021). Pengukuran Radiasi Kalor pada Beberapa Bohlam yang Berbeda-beda Warnanya. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 5(1), 80. <https://doi.org/10.22373/crc.v5i1.8342>
- Rokhimi, I., & Pujayanto. (2015). Alat Peraga Pembelajaran Laju Hantaran Kalor Konduksi. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Dan Pendidikan Fisika*, 6(1), 270–274.
- Supu, I., Usman, B., Basri, S., & Sunarmi. (2016). PENGARUH SUHU TERHADAP PERPINDAHAN PANAS PADA MATERIAL YANG BERBEDA. *Jurnal Dinamika*, 07(1), 2016.
- Taqwa, M. R. A., Suyudi, A., & Sulur. (2020). Analisis Miskonsepsi Topik Suhu dan Kalor Mahasiswa Pendidikan Fisika Universitas Negeri Malang 1. *BRILIANT: Jurnal Riset Dan Konseptual*, 5(3), 522–530.
- Yanti, R. P., Said L, M., & Ihsan. (2014). Studi Penentuan Nilai Kalori Pada Buah Durian (*Durio zibethinus*). *Jurnal Teknosains*, 8(2), 161–174.

Profil Penulis



Lusiani

Penulis kelahiran Cilacap ini adalah dosen program studi Teknika di Akademi Maritim Nusantara sejak tahun 2015 hingga saat ini.

Muslim yang senang bermain dengan angka ini menyelesaikan pendidikan formal Sarjana Pendidikan Fisika di Universitas Negeri Yogyakarta pada Tahun 2011 dan Magister Pendidikan Sains di Universitas Negeri Yogyakarta pada Tahun 2013.

Penulis memiliki keahlian di bidang fisika dan ilmu sains lainnya. Penulis tertarik dengan ilmu sains sejak duduk di bangku Sekolah Menengah Atas hingga saat ini. Beberapa penelitian yang telah dipublikasikan yakni selingkup dengan bidang fisika serta pendidikan fisika. Penulis juga tertarik menulis beberapa buku bidang fisika, maupun selingkup pendidikan lainnya. Penulis juga aktif dalam kegiatan pengabdian kepada masyarakat seputar penerapan aplikasi media pembelajaran baik daring maupun luring sesuai bidang yakni fisika dan pendidikan fisika. Kolaborasi antara pendidikan fisika yang diterapkan di bidang kemaritiman dan bidang lainnya menjadi fokus utama pengembangan ilmu dalam tahap adaptasi ilmiah.

Email: anilusi0287@gmail.com

SUMBER ENERGI

Febri Rismaningsih

Universitas Islam Syekh-Yusuf

Pengertian Sumber Energi

Indonesia merupakan suatu negara dengan luas wilayah dan jumlah penduduk yang tinggi. Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi, maka kebutuhan energi di Indonesia akan terus mengalami peningkatan. Kebutuhan energi menjadi ujung tombak dari berbagai sektor kehidupan manusia antara lain di bidang ekonomi, pendidikan, pertanian, transportasi dan kesehatan (Azirudin, 2019). Sebagai upaya menghadapi pemenuhan energi, maka sumber daya alam yang dimiliki Indonesia harus dapat menjadi sumber energi alternatif dan dapat dimanfaatkan secara maksimal bagi keberlangsungan hidup. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No.79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, sumber energi adalah segala sesuatu yang dapat menghasilkan energi, baik secara langsung maupun melalui konversi atau transformasi (PP No. 79, 2014). Dalam kehidupan sehari-hari banyak dijumpai contoh konversi energi antara lain energi listrik diubah menjadi energi panas seperti penanak nasi, kompor listrik dan setrika listrik. Maupun sebaliknya energi panas diubah menjadi listrik seperti pembangkit listrik tenaga surya, teknologi termoelektrik dan lain sebagainya.

Aliran Energi

Aliran energi merupakan serangkaian dari urutan pemindahan bentuk energi dari satu bentuk ke bentuk energi lainnya. Aliran energi terdiri atas beberapa komponen sebagai berikut:

1. Energi primer yaitu energi yang secara alami tersedia di lingkungan atau disebut sumber energi primer, contohnya: sumberdaya hidro.
2. Energi sekunder yaitu energi yang siap untuk ditransmisikan atau diangkut, contohnya: listrik pada stasiun Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).
3. Energi akhir yaitu energi yang dibeli atau diterima konsumen, contohnya: energi listrik di pabrik.
4. Energi berguna yaitu energi yang akan diinput dalam aplikasi penggunaan akhir, contohnya: bentuk daya poros untuk penggerak, panas untuk memasak, dan cahaya lampu (Thamrin et al., 2019).

Pada tahap konversi, terdapat sebagian energi yang hilang seperti perubahan energi primer menjadi energi berguna yang relevan. Eliminasi tahap yang tidak diperlukan dari aliran energi bertujuan untuk menghemat biaya dan menghindari kehilangan yang tidak perlu (Sukandarrumidi et al., 2014).

Klasifikasi Sumber Energi

1. Sumber energi berdasarkan ketersediaannya
 - a. Sumber energi terbarukan (*renewable energy*)

Merupakan sumber energi yang tidak pernah habis dan dapat diperbaharui. Sumber ini selalu tersedia dan tidak merugikan lingkungan. Contohnya: angin, air, matahari. Energi baru dan terbarukan disebut juga dengan energi alternatif. Adapun kelebihan dan kekurangan dari sumber

energi baru terbarukan disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Kelebihan dan kekurangan energi terbarukan (Vries et al., 2011)

Kelebihan energi terbarukan	Kekurangan energi terbarukan
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tersedia secara melimpah ▪ Lestari atau tidak akan habis ▪ Ramah lingkungan karena rendah atau tidak ada polusi ▪ Sumber energi dapat dimanfaatkan secara <i>free</i> jika dimbangi dengan teknologi yang tepat ▪ Praktis dalam perawatannya, sehingga dapat meminimalisir biaya operasional ▪ Dapat mendorong perekonomian dan menciptakan lapangan kerja yang baru ▪ Menciptakan kemandirian energi karena tidak perlu mengimpor bahan bakar fosil dari negara lain ▪ Dalam jangka panjang, biayanya lebih terjangkau karena tidak ada fluktuasi harga pasar terbuka bahan bakar fosil ▪ Dapat digunakan di tempat-tempat 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Memerlukan biaya awal yang besar ▪ Sebagian besar energi terbarukan tergantung pada kondisi cuaca sehingga berpengaruh pada kehandalan pasokan ▪ Volume yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan dengan energi konvensional ▪ Energi tambahan yang dihasilkan energi terbarukan belum disimpan secara maksimal ▪ Energi terbarukan masih tergolong teknologi yang masih berkembang, sehingga membutuhkan riset yang lebih lanjut untuk penerapannya ▪ Masih terdapat kekurangan dari masing-masing energi terbarukan baik secara teknis maupun sosial.

Kelebihan energi terbarukan	Kekurangan energi terbarukan
<p>terpencil untuk beberapa teknologi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Proses distribusi yang cepat karena tidak terpusat dan energi dapat diproduksi di berbagai tempat 	

- b. Sumber energi yang tidak dapat diperbaharui atau konvensional (*non-renewable energy*)

Merupakan sumber energi yang dapat habis atau hanya dapat digunakan sekali. Sumber ini hanya tersedia dalam jumlah terbatas di bumi dan tidak dapat diregenerasi. Contohnya: kayu, minyak, gas alam dan batubara. Sumber energi konvensional termasuk sumber energi yang tidak ramah lingkungan karena menimbulkan polusi udara, air, dan tanah yang berdampak kepada penurunan standar hidup dan tingkat kesehatan.

2. Sumber energi berdasarkan asal muasal terjadinya

- a. Sumber energi fosil

Merupakan sumber energi yang berasal dari jasad-jasad organik atau sisa-sisa makhluk hidup seperti tumbuhan dan hewan. Jasad organik ini mengalami proses sedimentasi selama jutaan tahun. Contohnya minyak bumi, gas bumi dan batubara.

- b. Sumber energi non-fosil

Merupakan sumber energi yang pembentukannya bukan berasal dari jasad organik. Contohnya: sinar matahari, air, angin dan panas bumi.

3. Sumber energi berdasarkan pemakaiannya

a. Sumber energi primer

Merupakan sumber energi yang langsung diberikan oleh alam dalam wujud aslinya dan belum mengalami perubahan atau konversi. Contohnya: minyak bumi yang baru diproduksi ke permukaan, gas bumi, batubara, uranium atau nuklir, tenaga air, biomassa, panas bumi, radiasi sinar matahari atau solar, tenaga angin, dan tenaga air laut dalam wujud aslinya.

b. Sumber energi sekunder

Merupakan energi primer yang telah mengalami proses lebih lanjut. Contohnya: hasil olahan minyak bumi seperti bahan bakar minyak dan LPG.

4. Sumber energi berdasarkan segi ekonomi

Klasifikasi ini dapat berbeda-beda tergantung pada waktu dan tempatnya, antara lain:

a. Energi komersial

Merupakan energi yang sudah dapat dipakai dan diperdagangkan dalam skala ekonomis. Contohnya: listrik, minyak, batubara, dan gas.

b. Energi non-komersial

Merupakan energi yang sudah dapat dipakai dan dapat diperdagangkan tetapi belum mencapai skala ekonomis. Contohnya: kayu, sampah, arang, dan jerami.

c. Energi baru

Merupakan energi yang pemanfaatannya masih sangat terbatas dan sedang dalam tahap

pengembangan atau *pilot project*. Energi ini belum dapat diperdagangkan karena belum mencapai skala ekonomis (Abdullah, 2009). Secara ringkas klasifikasi sumber energi ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2.2 Klasifikasi sumber energi (yang telah dimodifikasi) (Widjonarko, 2019)

Jenis sumber energi	Klasifikasi berdasarkan								
	Ketersediaan		Asal muasal terjadi		Pemakaian		Nilai komersial		
	R	NR	F	NF	P	S	K	NK	EB
Minyak bumi		■	■		■		■		
Gas bumi		■	■		■		■		
Batubara		■	■		■		■		
Uranium	■		■		■		■		
Panas bumi	■			■	■			■	■
Tenaga air	■			■	■			■	■
Tenaga surya	■			■	■				■
Tenaga angin	■			■	■				■
Biomassa	■			■		■	■		
BBM		■	■			■	■		
LPG		■	■			■	■		

Keterangan: R: *Renewable Energy* NR: *Non Renewable Energy*

F: Fossil NF: Non Fossil P: Primer S: Sekunder K: Komersial NK: Non Komersial EB: Energi Baru

Satuan Energi

Satuan Internasional untuk energi adalah joule. Satuan joule merupakan satuan yang diturunkan dari satuan gaya dan satuan jarak dalam sistem MKS, yaitu newton dan meter. Dalam fisika ada beberapa satuan lainnya yang dapat dikonversikan ke dalam satuan joule. Satuan-satuan tersebut antara lain: erg, kalori, kilokalori, elektronvolt, MeV, dan kWh (Kandi & Winduono, 2012).

Adapun hubungan antara satuan joule dengan satuan energi secara rinci yaitu:

1. Hubungan Joule-erg

Satuan joule diperoleh dari satuan newton dan meter. Artinya, 1 joule adalah besarnya usaha yang ditimbulkan gaya sebesar 1 newton yang menyebabkan benda berpindah sejauh 1 meter. Untuk menentukan hubungan antara joule dengan erg dapat dilakukan dengan mengkonversikan satuan besaran-besaran energi dalam sistem MKS ke dalam satuan besaran-besaran energi dalam sistem cgs.

$$\begin{aligned} 1 \text{ joule} &= 1 \text{ newton} \times 1 \text{ meter} \\ &= 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2 \times 1 \text{ meter} \\ &= 1000 \text{ gram} \cdot 100 \text{ cm/s}^2 \times 100 \text{ cm} \\ &= 10.000.000 \text{ gram cm}^2/\text{s}^2 \\ &= 10^7 \text{ gram cm}^2/\text{s}^2 = 10^7 \text{ erg} \end{aligned}$$

2. Hubungan Joule-kalori

Satuan kalori digunakan untuk energi panas. Adapun hubungan satuan energi antara joule dengan kalori dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut:

$$1 \text{ joule} = 0,24 \text{ kalori}$$

$$1 \text{ kalori} = 4,2 \text{ joule, karena}$$

$$1 \text{ kalori} = 10^{-3} \text{ kkal}$$

$$1 \text{ kkal} = 10^3 \text{ kalori, maka}$$

$$1 \text{ kkal} = 4,2 \times 10^3 \text{ joule}$$

3. Hubungan Joule-elektronvolt

Satuan elektronvolt sering digunakan untuk perhitungan energi pada kasus sinar katoda, dan sinar-X. Adapun hubungan satuan energi antara joule dengan elektronvolt dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut:

$$1 \text{ joule} = 0,625 \times 10^{19} \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ joule, karena}$$

$$1 \text{ eV} = 10^{-6} \text{ MeV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV, maka}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ joule} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ joule}$$

4. Hubungan Joule-kWh

Satuan kWh sering dipakai pada perhitungan energi listrik yang digunakan di rumah-rumah atau pabrik. Adapun hubungan satuan energi antara joule dengan kWh dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut

$$P = \frac{W}{t}$$

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/s}$$

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ watt} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ watt}$$

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \times 3600 \text{ watt} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ watt} \cdot \text{s}$$

$$\text{watt} \cdot \text{s} = 1/3,6 \times 10^{-6} \text{ kWh}$$

$$\text{watt} \cdot \text{s} = 0,278 \times 10^{-6} \text{ kWh}$$

$$\text{watt} \cdot \text{s} = 2,78 \times 10^{-7} \text{ kWh}$$

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ watt} \cdot \text{s} = 2,78 \times 10^{-7} \text{ kWh}$$

Bentuk-bentuk Energi

Pada dasarnya terdapat dua jenis energi utama yaitu energi potensial atau energi tersimpan yang juga merupakan energi posisi. Energi potensial ini dimiliki pada semua benda. Pada benda yang tidak bergerak tersimpan energi laten, sebagai contoh sebuah buku yang ditaruh di atas meja, buku tersebut menyimpan energi potensial. Namun ketika buku tersebut digerakkan, buku tersebut jatuh ke lantai. Maka energi potensial yang tersimpan dikonversi menjadi energi kinetik.

Energi potensial dan kinetik keduanya merupakan jenis energi utama yang bisa tersimpan dalam berbagai bentuk seperti yang dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 2.3. Bentuk-bentuk energi potensial dan energi kinetik (Vries et al., 2011)

Energi potensial	Energi kinetik
<ul style="list-style-type: none">▪ Energi kimia▪ Energi mekanik▪ Energi nuklir▪ Energi gravitasi▪ Energi listrik	<ul style="list-style-type: none">▪ Energi radiasi▪ Energi thermal▪ Energi gerakan▪ Suara

1. Bentuk-bentuk energi potensial

a. Energi kimia

Energi kimia yaitu energi yang disimpan dalam ikatan atom dan molekul. Contohnya bahan bakar minyak dan biomassa. Energi kimia dikonversi menjadi energi thermal pada saat kayu dibakar ditungku atau pada saat bensin dibakar di dalam mesin sepeda motor.

b. Energi mekanik

Energi mekanik yaitu energi yang disimpan pada benda-benda karena adanya tekanan. Pada saat tugas dikerjakan pada suatu obyek, maka ia akan memperoleh energi mekanik. Contohnya pegas tekan (*compressed spring*) dan tali karet yang ditarik.

c. Energi nuklir

Energi nuklir yaitu energi yang tersimpan dalam inti atom, energi ini bersama-sama menahan inti atom. Energi dalam jumlah yang luar biasa besarnya bisa dilepaskan pada saat inti atom digabungkan (*fusi*) atau dipisahkan (*fisi*). Contohnya energi matahari yang dihasilkan dari reaksi penggabungan nuklir.

d. Energi gravitasi

Energi gravitasi yaitu energi yang tersimpan pada ketinggian suatu benda. Semakin tinggi dan berat benda tersebut, semakin besar energi gravitasinya. Contohnya: tenaga air, dimana energi yang dihasilkan air dari sungai di waduk yang ada di dalam bendungan dapat digunakan untuk menggerakkan turbin.

e. Energi listrik

Energi listrik yaitu energi yang tersimpan dalam aki/baterai. Energi ini diteruskan menggunakan partikel-partikel kecil bermuatan listrik yang disebut elektron, yang biasanya menjalar melalui kabel. Listrik adalah bentuk energi elektromagnetik. Contoh energi listrik yang berada di alam yaitu petir.

2. Bentuk-bentuk energi kinetik

a. Energi radiasi

Energi radiasi yaitu energi elektromagnetik yang bergerak melalui gelombang. Energi ini termasuk cahaya yang dapat dilihat. Contohnya: sinar-X, sinar gamma, gelombang radio, cahaya dan matahari.

b. Energi thermal

Energi thermal atau panas yaitu getaran dan gerakan atom serta molekul di dalam zat. Pada saat suatu benda dipanaskan, maka atom atau molekulnya bergerak dan bertumbukan lebih cepat. Contoh energi thermal yaitu energi panas bumi.

c. Energi gerakan

Energi gerakan yaitu energi yang tersimpan dalam gerakan benda. Semakin cepat Bergeraknya, maka semakin banyak energi yang tersimpan. Untuk menggerakkan benda memerlukan energi, dan energi dilepaskan pada saat suatu benda melambat. Contohnya yaitu angin.

d. Suara

Suara yaitu gerakan energi melalui zat-zat dalam gelombang membujur. Suara dihasilkan pada

suatu daya yang menyebabkan suatu benda atau zat bergetar. Energi dipindahkan melalui zat dalam suatu gelombang. Pada umumnya, energi pada bunyi jauh lebih sedikit dibandingkan dengan bentuk-bentuk energi lainnya (Vries et al., 2011).

Penggunaan Energi

Penggunaan atau konsumsi energi khususnya di Indonesia menurut sektor energi meliputi: sektor industri, sektor rumahtangga, sektor transportasi, sektor pertanian dan sektor lainnya. Energi yang dikonsumsi oleh pengguna energi merupakan energi akhir (*final energy*) (Elinur et al., 2010).

1. Sektor industri

Seiring meningkatnya sektor industri menyebabkan terjadinya peningkatan konsumsi energi dalam proses produksi untuk menghasilkan suatu produk. Jenis energi yang digunakan oleh sektor industri antara lain energi batubara, BBM, biomas, gas dan listrik.

2. Sektor rumahtangga

Energi sangat dibutuhkan pada sektor rumahtangga untuk berbagai keperluan seperti keperluan penerangan, memasak, pemanasan atau pendinginan ruangan, dan berbagai kegiatan rumahtangga yang lain. Energi yang dikonsumsi pada sektor ini meliputi: batubara, BBM, gas, biomassa, dan listrik. Jenis batubara yang dikonsumsi pada sektor rumahtangga adalah briket batubara yang jumlahnya sangat kecil sekali, dan jenis BBM yang dikonsumsi adalah minyak tanah. Energi biomassa yang dikonsumsi pada sektor rumahtangga berupa kayu bakar, arang, dan lainnya yang digunakan untuk memasak.

3. Sektor transportasi

Sarana transportasi sangat diperlukan untuk mobilisasi orang maupun barang dari suatu tempat ke tempat yang lain. Penggunaan energi pada sektor ini mencakup sarana transportasi yang digerakkan oleh mesin atau kendaraan bermotor. Terdapat tiga jenis energi yang digunakan pada sektor ini yaitu BBM, gas, dan listrik.

4. Sektor pertanian

Sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang menghasilkan energi seperti biomassa. Energi biomassa adalah energi yang dihasilkan dari tumbuhan dan kotoran hewan, atau sisa dari hasil pengolahan industri seperti industri tebu. Bahan baku dari biomassa yang dihasilkan oleh sektor pertanian sangat melimpah. Energi inilah yang dapat menggantikan energi fosil yang semakin langka. Di sisi lain, sektor ini merupakan sektor yang mengkonsumsi energi fosil paling rendah dibandingkan sektor-sektor yang lain. Hal inilah yang menjadikan sektor pertanian sangat berperan dalam penyediaan energi nasional.

5. Sektor lainnya

Sektor-sektor yang dimaksud yaitu sektor perdagangan, hotel dan restoran, komersial dan sebagainya. Beberapa sektor ini memiliki komposisi yang kecil dalam penggunaan energi. Energi yang digunakan antara lain: energi BBM, gas, biomassa, dan listrik (Elinur et al., 2010).

Daftar Pustaka

- Abdullah, G. (2009). *Klasifikasi Sumber Energi*.
<http://gamil-opinion.blogspot.com/2009/11/klasifikasi-sumber-energi.html>
- Azirudin, T. (2019). Potensi Energi Angin Di Atas Bangunan Bertingkat Di Pangkalan Kerinci, Kabupaten Pelalawan, Provinsi Riau. *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbarukan*, 18(1), 23–28.
- Elinur, Priyarsono, D. ., Tambunan, M., & Firdaus, M. (2010). Perkembangan Konsumsi Dan Penyediaan Energi Dalam Perekonomian Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Economic (IJAE)*, 2, 97–119. <https://doi.org/2087-409X>
- Kandi, & Winduono, Y. (2012). Energi dan Perubahannya. In L. B. Sinulingga (Ed.), *Pusat Pengembangan dan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan Ilmu Pengetahuan Alam (PPPPTK IPA)* (1st ed.). Pusat Pengembangan dan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan Ilmu Pengetahuan Alam (PPPPTK IPA).
- PP No. 79. (2014). *PP No. 79 Thn 2014*.
- Sukandarrumidi, Kotta, H. Z., & Wintolo, D. (2014). *Energi terbarukan: Konsep dasar menuju kemandirian energi* (1st ed.). Gadjah Mada University Press.
- Thamrin, S., Sari, D. A., & Setioningrum, A. (2019). *Energi Baru dan Terbarukan* (A. H. Tambunan (ed.); 1st ed.). Universitas Pertahanan.
- Vries, P. de, Connors, M., & Jaliwala, R. (2011). Energi Yang Terbarukan. In P. Konings, A. Moanavi, & M. K. Toure (Eds.), *Buku Panduan Energi Terbarukan* (1st ed.). Kementerian Dalam Negeri.
- Widjonarko. (2019). *Mengenal Pengembangan Konversi Energi* (T. S. Press (ed.); 1st ed.). Strada Press.
-

Profil Penulis



Febri Rismaningsih

Lahir di Bantul pada tanggal 16 Februari 1989. Menyelesaikan Pendidikan S1 jurusan Pendidikan Fisika di Universitas Negeri Yogyakarta pada tahun 2010, kemudian melanjutkan Pendidikan S2 Ilmu Fisika di Universitas Gadjah Mada, diselesaikan pada tahun 2014. Sejak tahun 2016 hingga saat ini menjadi dosen tetap Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Syekh-Yusuf. Tangerang.

Penulis memiliki kepakaran di bidang Pendidikan fisika dan metode geofisika elektromagnetik. Untuk mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis pun aktif sebagai peneliti dibidang kepakarannya tersebut. Beberapa penelitian didanai oleh internal perguruan tinggi maupun Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM) seperti Program Kemitraan Masyarakat Stimulus pada tahun 2022. Karya yang telah dipublikasikan antara lain: Teori dan Aplikasi Fisika Dasar, Fisika Optik Umum dan Mata, Fisika Dasar Mekanika, Pengantar Statistika 1 dan lainnya. Pada tahun 2017, penulis terpilih sebagai peserta Magang Dosen Kemenristek DIKTI di Universitas Gadjah Mada dan di tahun yang sama, penulis mendapat penghargaan Best Poster pada Seminar Nasional Sains dan Teknologi yang diselenggarakan oleh Universitas Muhammadiyah Jakarta. Saat ini penulis menjadi editor pada Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik (JIMTEK), selain itu penulis juga menjalankan tugas sebagai asesor Badan Akreditasi Nasional Sekolah/Madrasah Provinsi Banten Tahun 2021-2025.

Email Penulis: frismaningsih@unis.ac.id

KONDUKSI SATU DIMENSI *STEADY STATE – ONE DIMENSIONAL*

Sudirman

UIN Alauddin Makassar

Pendahuluan

Materi pembelajaran pada modul ini menguraikan tentang perpindahan panas konduksi pada kondisi aliran tunak (*steady*) dalam arah satu dan dua dimensi. Pada materi ini diterapkan hukum Fourier tentang konduksi termal, dalam kategori sistem satu dimensi ini termasuk berbagai bentuk fisik yang berlainan: sistem pada pelat datar, sistem-sistem silinder dan bola. Penguasaan materi ini akan membantu mahasiswa dalam menemukan model perpindahan panas dan dituntut kemampuan menyelesaikan masalah-masalah Perpindahan Panas. Untuk mencapai kemampuan mahasiswa yang efektif/efisien akan dirancang proses pembelajaran yang inovatif bernuansa *learning*.

Bentuk pembelajaran dalam bentuk kuliah dibarengi dengan diskusi dan *cooperative learning*, dimana mahasiswa perlu dijelaskan materi perkuliahan bagaimana pentingnya Perpindahan Panas konduksi bagi mahasiswa dan sasaran pembelajaran secara keseluruhan yang harus dicapai setelah mempelajari

matakuliah ini. Dinding berbentuk geometri sederhana, Struktur komposit, Tebal kritis isolasi, Perpindahan panas dari permukaan yang menonjol, Tahanan kontak termal, Sistem dengan sumber panas dan Metode analisis numerik. Setelah mempelajari bahan ajar ini, mahasiswa mampu menemukan tiga model perpindahan panas beserta aplikasinya dan mampu menghitung konduksi dua dimensi dengan metode numerik

Konduksi adalah proses dengan mana panas mengalir dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar menurut teori kinetik. Suhu elemen suatu zat sebanding dengan energi kinetik rata-rata molekul-molekul yang membentuk elemen itu. Energi yang dimiliki oleh suatu elemen zat yang disebabkan oleh kecepatan dan posisi relative molekul-molekulnya disebut energi dalam. Perpindahan energi tersebut dapat berlangsung dengan tumbukan elastic (*elastic impact*), misalnya dalam fluida atau dengan pembauran (*difusi/diffusion*) elektron–elektron yang bergerak secara cepat dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah (misalnya logam). Konduksi merupakan satu-satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak tembus cahaya.

Konduksi Keadaan Tunak Satu Dimensi

Persamaan dasar untuk menganalisis panas konduksi adalah Hukum Fourier, yang mana didasarkan pada pengamatan eksperimen :

$$q_n'' = -k_n \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2-1)$$

Dimana:

q_n = flux panas (W/m^2) k_n = Konduktifitas termal ($W/m.K$)
 $\delta T / \delta n$ = Gradien temperatur (K/m)

A. Dinding yang berbentuk geometri sederhana

Membahas konduksi panas keadaan tunak (steady state) melalui sistem yang sederhana dimana suhu dan aliran panas merupakan fungsi dari satu koordinat saja.

1. Dinding Datar

Perhatikan suatu dinding datar, dimana menerapkan hukum Fourier. Jika persamaan diatas diintegrasikan, maka akan didapatkan:

$$q = -\frac{KA}{\Delta x}(T_2 - T_1)$$

dimana x = tebal dinding (2 - 2)

Jika konduktifitas termal berubah menurut hubungan linier dengan suhu, seperti $k = k_0 (1 + \beta T)$, maka persamaan aliran kalor menjadi:

$$q = -\frac{k_0 A}{\Delta x} \left[(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2) \right] \quad (2-3)$$

2. Silinder berlubang.

Aliran panas radial dengan cara konduksi melalui silinder berpenampang lingkaran yang berlubang merupakan satu lagi soal konduksi satu-dimensi yang besar arti pentingnya dalam praktek.

Contoh yang khas adalah konduksi melalui pipa dan melalui isolasi pipa. Jika silinder itu homogen dan cukup panjang sehingga pengaruh ujung-ujungnya dapat diabaikan dan suhu permukaan-dalamnya konstan pada T_i sedangkan suhu

luarnya dipertahankan seragam pada T_o maka dari pers 1-1 laju konduksi panasnya adalah

$$q_k = -kA \frac{dT}{dr} \quad (2-4)$$

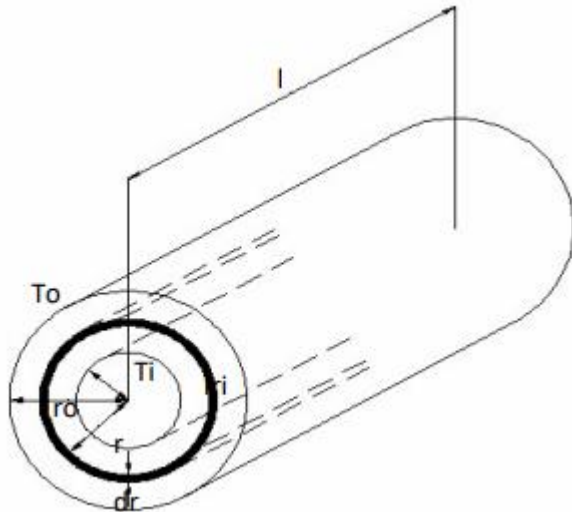
Dimana dT/dr = gradient suhu dalam arah radial.

Untuk silinder berlubang (Gb.2-1), luasnya merupakan fungsi jari-jari dan

$$A=2 \pi r l$$

Dimana r adalah jari-jari dan l panjang silinder. Maka laju aliran panas dengan cara konduksi dapat dinyatakan sebagai

$$q_k = -k2\pi r l \frac{dT}{dr} \quad (2-5)$$



Gambar 2-1 Sketsa yang melukiskan nomenklatur untuk konduksi melalui silinder berlubang

Pemisahan variabel-variabel dan integrasi antara T_o pada r_o dan T_i pada r_i menghasilkan

$$T_i - T_o = \frac{q_k}{2\pi kl} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (2-6)$$

Menyelesaikan Pers. 2-5 untuk q_k menghasilkan

$$q_k = \frac{\frac{T_i - T_o}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}}{2\pi kl} \quad (2-7)$$

Dengan analogi terhadap kasus dinding datar dan hukum Ohm, tahanan termal silinder berlubang adalah

$$R_k = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kl} \quad (2-8)$$

Untuk penggunaan-penggunaan tertentu adalah bermanfaat untuk membuat persamaan ini kita mempersamakan ruas-ruas kanan Pers. 2-1 dan 2-6, tetapi dengan menggunakan $L=(r_o-r_i)$, tebal melalui mana panas berkonduksi, dan $A = A$ dalam Pers. 2-1. Hal ini menghasilkan

$$\frac{kA\Delta T}{r_o-r_i} = \frac{2\pi kl\Delta T}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (2-9)$$

Dari persamaan ini A adalah

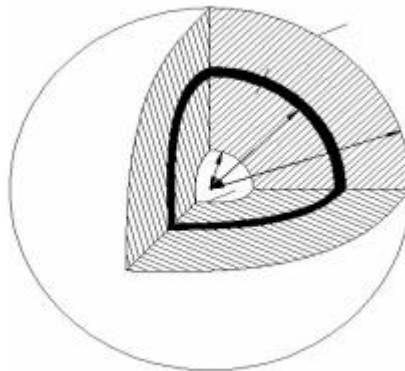
$$A = \frac{2\pi(r_o-r_i)l}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} = \frac{A_o-A_i}{\ln\left(\frac{A_o}{A_i}\right)} \quad (2-10)$$

Luas yang didefinisikan oleh pers.2-8 disebut luas *rata-rata logaritmik*. Maka laju konduksi panas melalui silinder berpenampang lingkaran yang berlubang dapat dinyatakan sebagai

$$q_k = \frac{T_i - T_o}{(r_o-r_i)kA} \quad (2-10)$$

3. Cangkang yang berbentuk bola dan paralelepiped.

Di antara semua bentuk geometri, bola mempunyai volume per luas permukaan luar terbesar. Karena bola berongga kadang-kadang dipergunakan dalam industry kimia untuk pekerjaan suhu rendah, bila kerugian panas harus diusahakan sekecil mungkin. Konduksi melalui cangkang bola adalah juga soal keadaan-stedi satu-dimensi jika suhu permukaan dalam dan luarnya seragam dan konstan. Laju konduksi panas dalam hal ini (Gb. 2-2) adalah

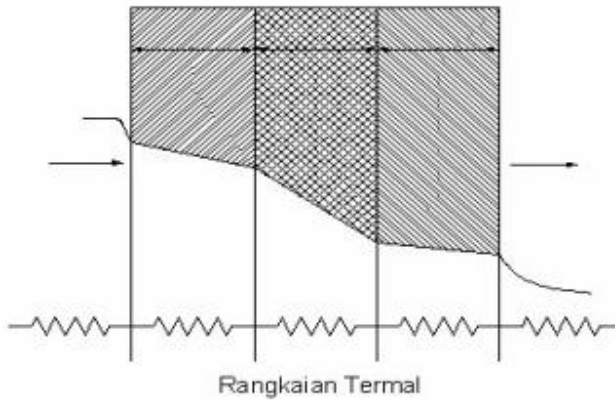


Gambar 2-2. Sketsa yang melukiskan nomenklatur untuk konduksi melalui cangkang yang berbentuk bola.

B. Struktur Komposit

Dinding komposit . Gb. 2-3 menunjukkan dinding komposit dari jenis yang khas dipergunakan pada tanur yang besar. Lapisan dalam yang bersinggungan dengan gas-gas yang bersuhu tinggi terbuat dari bahan tahan api. Lapisanantarnya terbuat dari bata isolasi; menyusul lapisan luar dari bata merah biasa.

T_i ialah suhu gas-gas panas dan adalah konduktansi permukaan satuan pada permukaan dalam. T_o ialah udara disekitar tanur dari adalah konduktansi permukaan satuan pada permukaan luar.



Gb. 2-3 . Distribusi suhu dan rangkaian termal untuk aliran panas melalui dinding datar komposit seri.

Dengan syarat-syarat ini akan terjadi aliran panas seara terus menerus dari gas-gas panas melalui dinding ke sekitarnya. Karena aliran panas melalui luas A yang tertentu sama besarnya untuk bagian dinding yang manapun, maka kita peroleh

$$q = h_i A (T_i - T_1) = \frac{k_1 A}{L_1} (T_1 - T_2) \quad (2-12)$$

$$= \frac{k_2 A}{L_2} (T_2 - T_3) = \frac{k_3 A}{L_3} (T_3 - T_4) = h_o A (T_4 - T_o)$$

Persamaan 2-12 dapat ditulis sebagai fungsi tahanan-tahanan termal dari berbagai bagian dinding, sebagai berikut

$$q = \frac{T_i - T_1}{R_1} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} = \frac{T_2 - T_3}{R_3} = \frac{T_3 - T_4}{R_4} = \frac{T_4 - T_o}{R_5} \quad (2-13)$$

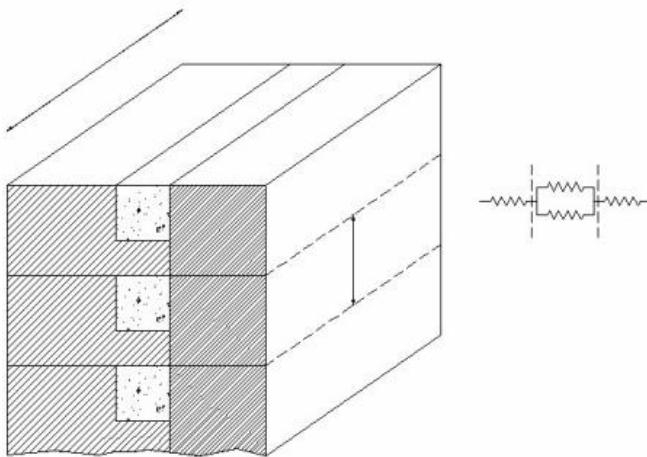
Atau

$$q = \frac{T_i - T_o}{\sum_{n=1}^5 R_n} \quad (2-14)$$

Dalam banyak penerapan praktek, dijumpai kombinasi lintasan-lintasan aliran panas yang terhubung seri dan yang terhubung parallel, Contoh hal yang seperti itu adalah dinding komposit yang ditunjukkan dalam Gb.2-4. Untuk bagian dinding yang tingginya $b_1 + b_2$ (Gb.2-4) konduktansinya adalah

$$K_2 = \frac{k_2 b_1}{L_2} + \frac{k_1 b_2}{L_2} = \frac{1}{R_2} \quad (2 - 15)$$

Per Panjang-satuan dinding, konduktansi satuan keseluruhan U dari permukaan ke permukaan adalah



Gb.2-4 Rangkaian termal untuk dinding komposit parallel-seri

$$U = \frac{1}{(b_1 + b_2)(R_1 + R_2 + R_3)} = \frac{1}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{b_1 + b_2}{\left(\frac{k_1 b_2}{L_2}\right) + \left(\frac{k_2 b_1}{L_2}\right)} + \frac{L_3}{k_3}} \quad (2 - 15)$$

C. Silinder konsentrik.

Aliran panas radial melalui silinder-silinder konsentrik yang konduktivitas termalnya berbeda-beda dijumpai pada instalasi industri. Contoh yang khas dari soal demikian adalah pipa yang diisolasi, dengan fluida panas yang mengalir di dalamnya, dan bersinggungan dengan zat yang lebih dingin di luarnya (Gb. 2-5). Jika pipa tersebut relative panjang, maka aliran panas melalui dinding akan terjadi dalam arah radial. Dalam keadaan stedi, laju aliran panas melalui tiap bagian sama besarnya dan diberikan oleh

Untuk permukaan dalam

$$q = 2\pi r_1 l h_i (T_i - T_1) = \frac{T_{panas} - T_1}{R_1}$$

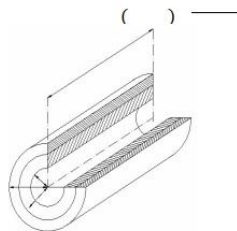
Untuk silinder dalam

$$q = \frac{2\pi k_1 l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{R_2}$$

Untuk silinder luar

$$q = \frac{2\pi k_2 l}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} (T_2 - T_3) = \frac{T_1 - T_2}{R_2}$$

Untuk Permukaan Luar



Gambar 2-5. Sketsa yang melukiskan nomenklatur dinding silinder komposit

Maka rumus yang dihasilkan untuk laju aliran panas melalui dua silinder yang konsentrik menjadi

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{1}{2\pi r_1 h_1 l} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi k_1 l} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi k_2 l} + \frac{1}{2\pi r_3 h_1 l}} = \frac{T_{panas} - T_{dingin}}{\sum_{n=1}^4 R_n}$$

Atau,

$$q = UA_0(T_{panas} - T_{dingin}) \quad (2-16)$$

Dimana

$$U = \frac{1}{\frac{r_3}{r_1 h_i} + \frac{r_3 \ln(r_2/r_1)}{k_1} + \frac{r_3 \ln(r_3/r_2)}{k_2} + \frac{1}{h_0}}$$

D. Sistem dengan Sumber Panas

Dijumpai diberbagai cabang perokayasaan, contoh kumparan listrik, pemanas tahanan, reaktor nuklir dan pembakaran bahan baker dialas bahan bakar tanur ketel.

Pelat datar dengan sumber panas yang terbagi secara seragam. Perhatikanlah sebuah pelat datar dimana terdapat pembangkitan panas yang seragam. Pelat ini berupa elemen pemanas seperti rel (bus bar ; juga dikenal dengan istilah *palangpalang*) datar dimana panas di bangkitkan dengan mengalirkan arus listrik melaluinya. Persamaan energy untuk suatu elemen diferensial dapat dinyatakan dengan kata-kata sebagai berikut

laju konduksi panas Laju pembangkitan panas di Laju konduksi panas mela melalui permukaan kiri ke + elemen yang tebalnya dx = permukaan kanan keluar dari dalam elemen di x elemen di $x + dx$

persamaan matematik yang bersangkutan adalah

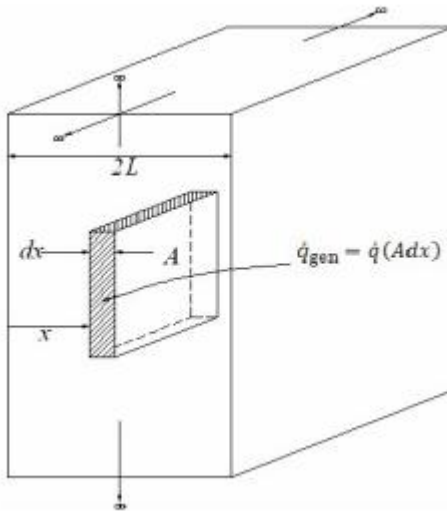
$$-kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x_1} + \dot{q}Adx = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x_1+dx}$$

dimana q adalah kekuatan sumber panas per volume dan waktu satuan. Karena

$$-kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x_1+dx} = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_x + \frac{d}{dx} \left(-kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_x \right) dx$$

$$\dot{q}_{gen} = \dot{q}(Adx)$$

(2-17)



Gambar 2-6. Sketsa yang melukiskan nomenklatur untuk konduksi panas dalam dinding datar dengan pembangkitan panas-dalam.

maka Pers. 2-17 menjadi

$$\dot{q} = -\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) \quad (2-18)$$

jika konduktivitas termal constant dan pembangkitan panas seragam, maka pers.2-17 dapat disederhanakan menjadi

$$-k \frac{d^2T}{dx^2} = \dot{q}$$

Penyelesaian Pers. 2-18 dilaksanakan dengan dua integrasi berturut-turut, integrasi yang pertama menghasilkan gradient suhu

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{\dot{q}}{k}x + c_1$$

dan integrasi yang kedua memberikan distribusi suhu

$$T = -\frac{\dot{q}}{2k}x^2 + c_1x + c_2 \quad (2-19)$$

dimana C_1 dan C_2 adalah konstanta-konstanta integrasi yang harganya ditentukan oleh syarat-syarat batas. jika kita tetapkan bahwa suhu pada kedua permukaan adalah T_0 , maka syarat-syarat batas tersebut adalah pada $x=0$ dan pada $x=2L$

Maka menghasilkan,

$$T_0 = c_2 \quad \text{dan} \quad T_0 = -\frac{\dot{q}}{2k}4L^2 + c_12L + T_0$$

menyelesaikan untuk C_1 kita mendapat

$$c_1 = -\frac{\dot{q}L}{k}$$

mendapatkan rumus-rumus untuk C_1 dan C_2 ini ke dalam pers. 2-19 menghasilkan distribusi suhu, yaitu

$$T = -\frac{\dot{q}}{2k}x^2 + \frac{\dot{q}L}{k}x + T_o$$

$$T - T_o = -\frac{\dot{q}L^2}{2k} \left[2\left(\frac{x}{L}\right) - \left(\frac{x}{L}\right)^2 \right] \quad (2 - 20)$$

jadi, distribusi suhu melintasi pelat tersebut berupa parabola dengan puncaknya di bidang tengah, $x = L$. beda suhu antara bidang tengah dan permukaan pelat adalah

$$(T - T_o)_{maks} = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \quad (2 - 21)$$

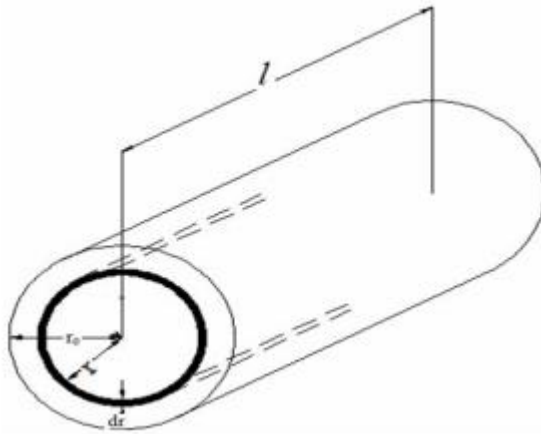
Jika pelat itu terendam di dalam fluida yang suhunya dan konduktansi permukaan pada kedua permukaannya h maka pada keadaan stedi panas yang o, dibangkitkan di dalam separuh pelat harus mengalir secara kontinyu melalui permukaan yang membatasinya. jika dinyatakan secara aljabar untuk satu satuan luas, maka syarat ini ialah

$$\dot{q}L = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{di x=0} = \bar{h}_o (T_o - T_\infty) \quad (2 - 22)$$

dalam pers. 2-21 suku pertama menyatakan laju pembangkitan panas di dalam pelat, suku kedua menyatakan laju konduksi panas ke permukaan, dan suku ketiga laju aliran panas dengan cara konveksi dan radiasi dari permukaan ke medium sekitarnya. maka beda suhu $T_o - T_\infty$ yang diperlukan untuk perpindahan panas dari permukaan tersebut adalah

$$T_0 - T_{\infty \text{ maks}} = -\frac{\dot{q}L}{h_0} \quad (2 - 23)$$

Silinder pejal (solid) yang panjang dengan sumber-sumber panas yang terbagi secara seragam. Silinder lingkaran yang pejal dan panjang dengan pembangkitan panas-dalam yang seragam dapat dipandang sebagai pengidealan system yang nyata, seperti kumparan listrik, dimana pembangkitan panas terjadi dengan pemecahan nuklir (nuclear fission). Persamaan energy untuk elemen berbentuk cincin (Gb.2-10) yang terbentuk diantara silinder-dalam yang berjari-jari r dan silinder luar yang berjari-jari $r + dr$ adalah.



Gambar 2-7. Sketsa yang melukiskan nomenklatur untuk konduksi panas di dalam silinder lingkaran yang panjang dengan pembangkitan panas-dalam.

$$-kA_r \frac{dT}{dr} \Big|_r + \dot{q}/2\pi r dr = -kA_{r+dr} \frac{dT}{dr} \Big|_{r+dr} \quad (2 - 24)$$

dimana $A_r = 2 r l$ dan $A_{r+dr} = 2 (r+dr)l$. dengan menghubungkan gradient suhu pada $r+dr$ dengan gradient suhu pada r dan dengan beberapa penyederhanaan kita peroleh,

$$qr = -k \left(\frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} \right) \quad (2 - 25)$$

integrasi Pers. 2-25 dapat dilakukan sebaik-baiknya dengan mengingat bahwa

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \left(\frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} \right)$$

dan menuliskannya kembali dalam bentuk

$$qr = -k \frac{d}{dr} \left(\frac{dT}{dr} \right)$$

maka integrasi menghasilkan

$$\frac{qr^2}{2} = -kr \frac{dT}{dr} + C_2 \quad (2 - 26)$$

dari mana kita simpulkan bahwa agar syarat batas $dt/dr = 0$ pada $r = 0$ dipenuhi, maka konstanta integrasi C_1 harus nol. integrasi sekali lagi menghasilkan distribusi suhu

$$T = -\frac{qr^2}{4k} + C_2$$

Agar dipenuhi syarat bahwa suhu pada permukaan-luar, yaitu $r = r_o$ adalah T_o , maka $T_o, C_2 = [(r_o^2/4k) + T_o]$. Sehingga distribusi suhunya

$$T = T_o - \frac{qr_o^2}{4k} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right]$$

(2 - 27)

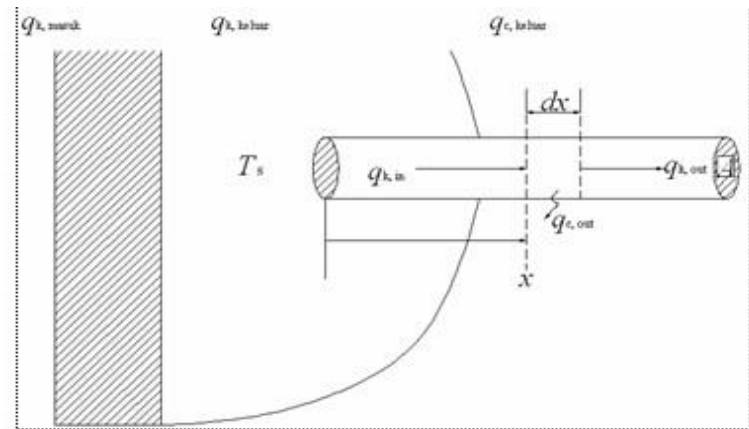
E. Perpindahan panas dari permukaan yang menonjol *sirip dengan penampang ragam*. Sebagai gambaran yang sederhana, perhatikanlah sirip pena yang berbentuk batang yang dasarnya ditempelkan pada dinding yang bersuhu permukaan T_s (Gb. 2-8). Sirip itu didinginkan sepanjang permukaannya oleh fluida yang bersuhu T_∞ , keseimbangan panas

Laju aliran panas secara konduksi ke dalam elemen dari x = laju aliran panas secara konduksi keluar dari elemen di $(x + dx)$

Dalam bentuk symbol-simbol persamaan ini menjadi

$$-kA \frac{dT}{dx} = \left[-kA \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(-kA \frac{dT}{dx} \right) dx \right] + hPdx(T - T_\infty)$$

Laju aliran panas secara konveksi dari permukaan di antara x dan $(x + dx)$ (2 - 28)



Gambar 2-8. Sketsa dan nomenklatur untuk untuk sirip pena yang menonjol dari dinding.

F. Tebal kritis isolasi.

Pemasangan isolasi di sekeliling pipa atau kawat kecil tidak selalu mengurangi perpindahan panas. Untuk pipa berdinding tunggal dengan jari-jari dalam r_i yang

tetap, pembesaran jari-jari luar r_o (misalnya dengan memperbesar tebal isolasi) akan memperbesar tahanan termal yang disebabkan oleh konduksi secara *logaritmik* dan sekaligus memperkecil tahanan termal pada permukaan-luar secara *linear* terhadap r_o karena tahanan termal total sebanding dengan jumlah kedua tahanan ini, maka laju aliran panas dapat bertambah jika isolasi dipasangkan pada pipa atau kawat telanjang. Maka,

$$q = \frac{2\pi k(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i) + k/\hat{h}_o r_o} \quad (2 - 29)$$

Dimana r adalah jari-jari luar, r jari-jari dan k konduktivitas termal isolasi.

Untuk harga r_i yang tetap, laju aliran panas adalah fungsi r_o , yaitu $q = q(r_o)$, dan menjadi maksimum pada harga r sehingga

$$\frac{dq}{dr_o} = \frac{-2\pi k(T_i - T_o)[1/r_o - (k/\hat{h}_o r_o^2)]}{[\ln(r_o/r_i) + k/\hat{h}_o r_o]^2} \quad (2 - 30)$$

Dari pers. 2-30 jari-jari untuk perpindahan panas maksimum, yang disebut jari-jari kritis, adalah

$$r_{\infty} = k/\hat{h}_o$$

Ringkasan Materi

Untuk menganalisis panas konduksi adalah Hukum Fourier yang didasarkan pada pengamatan eksperimen;

$$q_n = -k_n \frac{\partial T}{\partial n}$$

Laju konduksi panas melalui silinder berpenampang lingkaran yang berlubang dapat dinyatakan sebagai;

$$q_k = \frac{T_i - T_o}{(r_i - r_o)kA} \text{ dan laju}$$

konduksi panas bola adalah

$$q_k = \frac{4\pi r_i r_o k (T_i - T_o)}{r_i - r_o} = k \sqrt{A_o A_i} \frac{T_i - T_o}{r_o - r_i}$$

Jika pelat terendam di dalam fluida yang suhunya dan konduktansi permukaan pada kedua permukaannya h maka pada keadaan stedi yang dibangkitkan di dalam separuh pelat harus mengalir secara kontinyu melalui permukaan yang membatasinya untuk satu satuan luas, maka syaratnya;

$$\dot{q}L = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{zix=0} = h_o (T_o - T_\infty)$$

Pemasangan isolasi di sekeliling pipa atau kawat kecil tidak selalu mengurangi perpindahan panas. Laju aliran panas dapat bertambah jika isolasi dipasangkan pada pipa atau kawat telanjang, maka

$$q = \frac{2\pi kl(T_o - T_\infty)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{k}{h_o r_o}}$$

Untuk menganalisis aliran panas keadaan tunak dua dimensi, berlaku persamaan Laplace,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Contoh Soal

1. hitunglah kerugian panas dari pipa yang bergaris tengah nominal 80 mm dan panjangnya 3 m yang ditutup dengan bahan isolasi yang mempunyai konduktivitas termal 0,0070 W/m K setebal 4 cm. Asumsikanlah bahwa suhu permukaan dalam dan luar isolasi masing-masing 475 K dan 300 K.

Penyelesaian ; garis tengah-luar pipa 80 mm nominal adalah 88,9mm. ini adalah juga garis tengah-dalam

isolasi. Garis-tengah-luar isolasi 168,9 mm. luas rata-rata logaritmik adalah

$$\bar{A} = \frac{A_o - A_i}{\ln(A_o/A_i)} = \frac{10\pi(0,1689 - 0,0889)}{\ln(0,1689/0,0889)}$$

Karena $r_o/r_i < 2$, luas rata-rata aritmetik menjadi pendekatan yang dapat diterima dan

$$\bar{A} = \frac{A_o + A_i}{2} = \frac{10\pi(0,1689 + 0,0889)}{2}$$

Menetapkan Pers. 2-9, kerugian panas tersebut besarnya

$$q_k = \frac{475 - 300}{0,04/(0,07)(1,175)} = 359,8 \text{ watt}$$

2. Ruang kerja sebuah tanur laboratorium yang dipanaskan dengan listrik berukuran 6 x 8 x 12 inch dan dinding-dindingnya, yang tebalnya 6 inch pada semua sisinya, terbuat dari bata tahan api ($k = 0,2$ Btu/ h ft F). jika suhu pada permukaan dalamnya harus dipertahankan pada 2000 F sedangkan suhu permukaan luarnya 300 F, perkirakanlah pemakaian daya dalam kilowatt (kW).

Penyelesaian : Dalam keadaan stedi konsumsi daya sama dengan kerugian panas . permukaan dalam A_i adalah

$$A_i = 2 \frac{(6 \times 8) + (6 \times 12) + (8 \times 12)}{144} = 3 \text{ ft}^2$$

Permukaan luar A_o adalah

$$A_o = 2 \frac{(18 \times 20) + (18 \times 24) + (20 \times 24)}{144} = 17,7 \text{ ft}^2$$

Karena $A_i/A_o > 2$, kita dapat menggunakan pers. 2-11 dengan faktor koreksi empirik 0,725, dan kerugian panasnya

$$q_k = (0,2)(0,725)\sqrt{3 \times 17,7} \left(\frac{1700}{\frac{6}{12}} \right) = 3600 \text{ Btu/hr}$$

3. Hitunglah kerugian panas per meter panjang dari pipa baja 80 skedul 40 (garis tengah-luar 89,1 mm, garis tengah-dalam 78,1 mm, $k = 43 \text{ W/m K}$) yang dilapisi dengan isolasi asbes ($k = 0,19 \text{ W/m K}$) setebal 15 mm. di dalam pipa mengalir fluida yang suhunya 420 K. konduktansi permukaan-satuan sebelah dalam 227 W/m K . pipa itu terdapat dalam udara sekitar yang suhunya 300 K. Konduktansi permukaan-satuan rata-rata sebelah luar ialah 22,7 W/m K .
Penyelesaian : Dengan mempergunakan Pers. 2-16, laju perpindahan panas untuk panjang $l = 1 \text{ m}$ adalah

$$\begin{aligned} q &= \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \\ &= \frac{(18 \times 20) + (18 \times 24) + (20 \times 24)}{\frac{1}{\pi(0,0781)(227)} + \frac{\ln(89,1/78,1)}{2\pi(43)} + \frac{\ln(119,1/89,1)}{2\pi(0,19)} + \frac{1}{\pi(0,1191)(22,7)}} \\ &= \frac{120}{0,01795 / 0,00049 / 0,24302 / 0,11774} = 316,4 \text{ W/m} \end{aligned}$$

4. Suatu fluida ($T = 340 \text{ K}$) yang konduktivitas listriknya rendah dipanaskan oleh sebuah pelat besi yang panjang, dengan tebal 15 mm dan lebar 75 mm. panas dibangkitkan secara seragam di dalam pelat dengan laju $q = 1000000 \text{ W/m}$ dengan mengalirkan arus listrik melalui pelat itu. Tentukanlah 3 konduktansi permukaan satuan yang diperlukan untuk mempertahankan suhu pelat tersebut dibawah 420 K.

Penyelesaian : Dengan mengabaikan panas yang terbuang dari tepi-tepi pelat, maka berlaku pers. 2-21 dan beda suhu antara tengah dan permukaan adalah

$$(T - T_o)_{maks} = \frac{qL}{2k} = \frac{(1.000.000)(0,0075)^2}{(2)(43)}$$

jatuh suhu di dalam besi begitu rendah karena konduktivitas termalnya tinggi ($k = 43 \text{ W/m K}$). Dari pers. 2-23 kita mendapat

$$h_0 = \frac{qL}{T_0 - T_\infty} = \frac{(1.000.000)(0,0075)^2}{80} = 94 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

jadi konduktansi permukaan satuan minimum yang akan mempertahankan suhu di dalam pemanas di bawah 420 K adalah $94 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Latihan

1. Dalam masalah konduksi apa yang dimaksud dengan istilah satu dimensi ?
2. Mengapa pengandaian aliran kalor satu dimensi penting dalam analisis sirip ?
3. Bagaimanakah prosedur dasar untuk menyusun penyelesaian numerik soal-soal konduksi dua dimensi?
4. Satu sisi blok tembaga yang tebalnya 5 cm dijaga pada suhu $260 \text{ }^\circ\text{C}$. Sisi yang satu lagi dilapisi dengan kaca serat setebal 2,5 cm. Dinding luar kaca serat dijaga $38 \text{ }^\circ\text{C}$, dan aliran kalor total melalui kombinasi tembaga kaca erat ialah 44 W. Berapakah luas lempeng itu ?
5. Sebuah bola lowong terbuat dari aluminium dengan diameter dalam 4 cm dan diameter luar 8 cm. Suhu bagian dalam adalah $100 \text{ }^\circ\text{C}$ dan suhu luar $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Hitunglah perpindahan panas ?
6. Sebuah sirip siku empat mempunyai panjang 2,0 cm dan tebal 1,5 mm. Konduktivitas termalnya adalah $55 \text{ W/m }^\circ\text{C}$. Sirip itu berada pada lingkungan konveksi yang suhunya $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dan mempunyai $h = 500 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Hitunglah 2 kalor maksimum yang mungkin dilepas bila suhu dasar adalah $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Berapakah rugi kalor sebenarnya ?

7. Jelaskanlah 3 model perpindahan panas konduksi beserta aplikasinya ?

Daftar Pustaka

Frank Kreith, 1997., Prinsip Perpindahan Panas, ed 3, Erlangga, Jakarta.

J.P. Holman, 1997 ., Perpindahan Kalor, ed. 6, Erlangga, Jakarta

Necati Ozisik, 1985., Heat Transfer, Mcgraw-Hill, Singapura Press

Profil Penulis



Sudirman

lahir di Tanete pada tanggal 17 Agustus 1990. Penulis diangkat menjadi Dosen tetap di Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar pada tahun 2018. Selama menempuh Pendidikan magister, penulis juga pernah bekerja sebagai *teaching assistant* pada *Eureka Laboratory, School of Education, University College Cork, Ireland* Tahun 2016 hingga 2017. Penulis melanjutkan studi ke luar negeri dengan beasiswa LPDP (Lembaga Pengelola Dana Pendidikan) pada Tahun 2015 dan menyelesaikan studi *S-2 Program Master by Research* pada Tahun 2017. Penulis aktif menulis dan melakukan penelitian diantaranya, Buku "*Medical Physics Module for Transition Year Student in Ireland*" pada tahun 2017. Buku Belajar dan Pembelajaran pada Tahun 2020. Mendapatkan hibah penelitian dengan judul "*Pengembangan modul fisika dasar berbasis integrasi Al-Quran*" pada tahun 2018-2019 dan pada tahun 2019-2020 dengan judul penelitian "*Pengembangan Asesmen Kinerja Praktikum terintegrasi nilai-nilai keislaman*". Saat ini terdaftar sebagai Mahasiswa Program Doktor di Program Studi Ilmu Pendidikan, Program Pascasarjana Universitas Negeri Makassar.

Email Penulis: Sudirman.raja@uin-alauddin.ac.id

KONDUKSI DIMENSI 2

Iman Noor

Universitas Indraprasta PGRI Jakarta

Persamaan Umum Difusi Panas

Berikut persamaan umum difusi panas dimensi 3:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

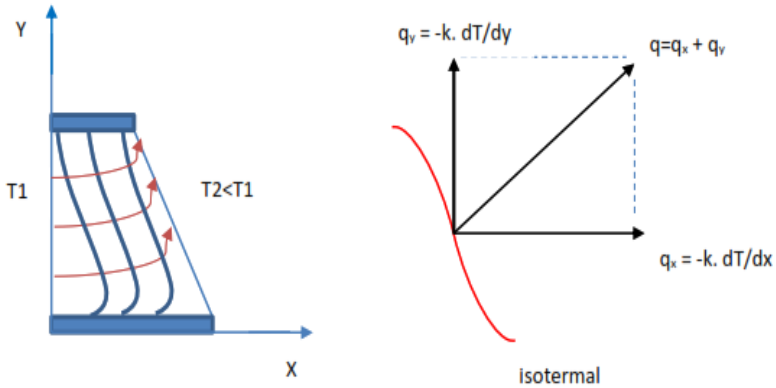
Jika sistem benda dalam keadaan tunak, tanpa ada pembangkitan panas, serta isotropik material, maka persamaan difusi panas 2D adalah:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \cancel{\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)} + \cancel{\dot{q}} = \rho c_p \cancel{\frac{\partial T}{\partial t}}$$

Sehingga panas difusi untuk analisa 2D menjadi:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Persamaan Diferensial Parsial Laplace}) \quad (1)$$

Persamaan di atas adalah persamaan aliran difusi konduksi 2D dalam keadaan tunak, tanpa sumber panas, dan konduktivitas benda yang konstan. (Lienhard,2005)



Gambar 4.2 Sistem Isotermik (Sumber: Penulis)

Adapun persamaan aliran difusi konduksi 2D dalam keadaan tidak tunak, tanpa sumber panas, konduktivitas benda yang konstan, dan α difusivitas termal bahan adalah:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Sebelum menghitung laju transfer panas, terlebih dahulu sebaran temperatur konduksi dapat ditentukan sebagai fungsi dari sumbu x dan y. Distribusi temperatur ini dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan diferensial parsial (1) dan (2) di atas. Persamaan diferensial tersebut dapat diselesaikan dengan 2 metode, yaitu:

1. Metode analitik; Pemisahan variabel
2. Metode numerik; Metode beda hingga

Metode Pemisahan Variabel

Persamaan diferensial parsial diubah dari bentuk:

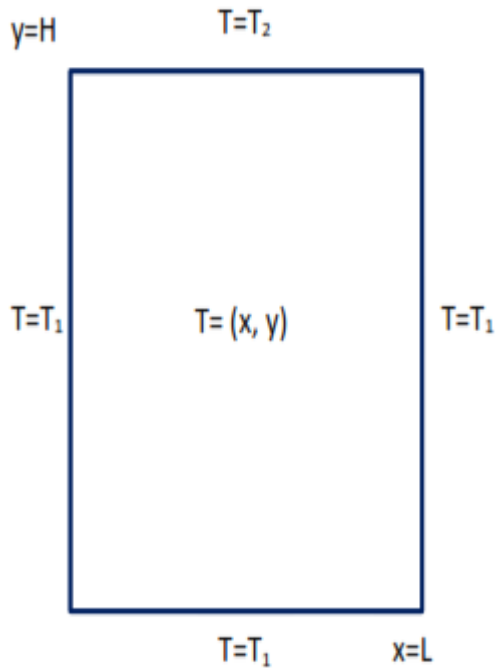
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

menjadi

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

dimana:

$$\theta = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

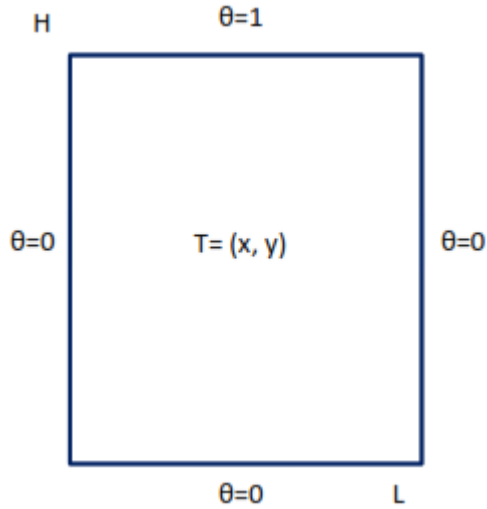


Gambar 4.2 Kondisi Batas Sistem (Sumber: Penulis)

Serta membutuhkan dua syarat batas (*boundary condition*), yaitu:

$$\theta(x, y) = 0 \quad \theta(x, 0) = 0$$

$$\theta(L, y) = 0 \quad \theta(x, H) = 1$$



Solusi persamaan diferensial $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0$ adalah:

$$\theta(x, y) = X(x) \cdot Y(y)$$

Diferensialkan solusi persamaan $\theta(x, y)$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = Y \frac{dX}{dx} ; \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = Y \frac{d^2 X}{dx^2}$$

dan

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = X \frac{dY}{dy} ; \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = X \frac{d^2 Y}{dy^2}$$

Substitusi ke persamaan $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0$, maka:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = 0$$

$$-\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \quad (4)$$

Ruas kiri merupakan fungsi x dan ruas kanan merupakan fungsi y. Oleh karena itu, kedua ruas kiri dan kanan harus memiliki konstanta pemisah (konstanta yang

sama). Konstanta pemisah dari kedua ruas tersebut adalah λ^2 .

$$-\frac{1}{X} \frac{d^2X}{dx^2} = \frac{1}{Y} \frac{d^2Y}{dy^2} = \lambda^2 \quad (5)$$

$$-\frac{1}{X} \frac{d^2X}{dx^2} = \lambda^2$$

$$\frac{d^2X}{dx^2} + \lambda^2 X = 0 \quad (6)$$

dan

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2Y}{dy^2} = \lambda^2$$

$$\frac{d^2Y}{dy^2} - \lambda^2 Y = 0 \quad (7)$$

Syarat dari persamaan (6) dan persamaan (7) dapat diselesaikan jika $\lambda^2 > 0$, sehingga penyelesaian persamaan (6) dan persamaan (7) adalah:

$$X = C_1 \cos \lambda^2 x + C_2 \sin \lambda^2 x$$

$$Y = C_3 e^{-\lambda y} + C_4 e^{\lambda y}$$

Substitusi X dan Y ke persamaan $\theta(x,y) = X(x) \cdot Y(y)$, maka:

$$\theta(x,y) = C_1 \cos \lambda^2 x + C_2 \sin \lambda^2 x + C_3 e^{-\lambda y} + C_4 e^{\lambda y}$$

Berlaku terhadap semua syarat batas di atas:

$$\theta(x,y) = 0 \quad \theta(x,0) = 0$$

$$\theta(L,y) = 0 \quad \theta(x,H) = 1$$

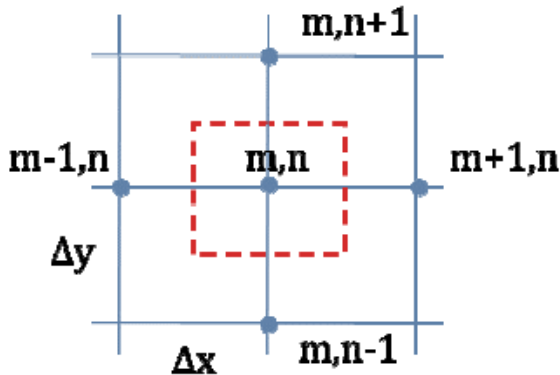
Jadi penyelesaian persamaan diferensial parsial $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0$ adalah:

$$\theta(x, y) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{n} \sin \frac{n\pi x}{L} \frac{\sinh(\frac{n\pi y}{L})}{\sinh(\frac{n\pi H}{L})} \quad (8)$$

Metode Beda Hingga

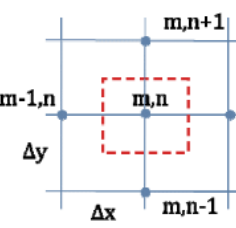
Metode beda hingga merupakan salah satu dari berbagai metode numerik yang digunakan dalam menyelesaikan persamaan diferensial. Metode ini dapat digunakan untuk menghitung dan mengetahui distribusi temperatur panas sistem konduksi 2D. Metode beda hingga terdapat dua jenis indeks perhitungan besar temperatur sistem, yaitu indeks perhitungan temperatur ke- m , dan indeks perhitungan temperatur ke- n . Masing-masing indeks perhitungan temperatur ke- m dan ke- n adalah mewakili dari sumbu koordinat x dan koordinat y .

Pada umumnya semakin banyak bilangan indeks perhitungan untuk masing-masing koordinat x dan y , maka semakin meningkatkan akurasi hasil yang didapat. (Rectenwald,2011)



Gambar 4.3 Skema Domain Titik Indeks koordinat x dan y
(Sumber: Penulis)

Prinsip kerja metode beda hingga adalah mengubah turunan yang ada pada persamaan diferensial parsial dengan diskritisasi berdasarkan deret Taylor.

$$\frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{m,n+1} = \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$


$$\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{m-1,n} = \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{m+1,n} = \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{m,n-1} = \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y}$$

Jadi gradien temperatur konduksi 2D pada koordinat x dan dapat ditentukan. Adapun gradien temperatur konduksi pada koordinat x adalah:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\bigg|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\bigg|_{m+1,n} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\bigg|_{m-1,n}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\bigg|_{m,n} = \frac{\frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} - \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\bigg|_{m,n} = \frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{(\Delta x)^2}$$

Sedangkan gradien temperatur konduksi pada koordinat y adalah:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\bigg|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\bigg|_{m,n+1} - \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\bigg|_{m,n-1}}{\Delta y}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} = \frac{\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} - \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y}}{\Delta y}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} = \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n-1}}{(\Delta y)^2}$$

Berdasarkan metode beda hingga, bentuk persamaan (1) adalah:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

$$\frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n-1}}{(\Delta y)^2} = 0 \quad (9)$$

Jika $\Delta x = \Delta y$, maka persamaan sebaran temperatur konduksi dengan tanpa pembangkitan panas adalah:

$$\begin{aligned} T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} \\ = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Adapun persamaan aliran difusi konduksi 2D dalam keadaan tidak tunak, dan tanpa sumber panas, dibutuhkan indeks perhitungan ke-i untuk dimensi waktu

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{i+1,m,n} = \frac{T_{i+1,m,n} - T_{i,m,n}}{\Delta t}$$

Sehingga persamaan aliran difusi konduksi 2D dalam keadaan tidak tunak, dan tanpa sumber panas berdasarkan metode beda hingga adalah:

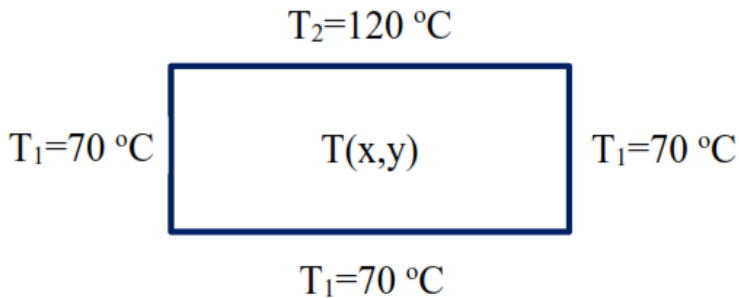
$$\begin{aligned} \frac{T_{i+1,m,n} - T_{i,m,n}}{\Delta t} \\ = \alpha \left(\frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{(\Delta x)^2} \right. \\ \left. + \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n-1}}{(\Delta y)^2} \right) \end{aligned}$$

$$T_{i+1,m,n} = T_{i,m,n} + \alpha \Delta t \left(\frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{(\Delta y)^2} \right)$$

Dimana $T_{i, m, n}$ adalah temperatur sistem mula-mula.

Contoh Soal dan Pembahasan

1. Sebuah pelat tipis persegi panjang mempunyai panjang 2 meter, lebar 1 meter, serta kondisi batas seperti terdapat gambar dibawah ini:



Tentukanlah besar temperatur pada titik tengah pelat dengan menggunakan tiga deret pertama!

Penyelesaian:

Panjang $L = 2 \text{ m}$, Lebar $H = 1 \text{ m}$.

Temperatur di titik tengah pelat: $\theta(x,y) = \theta(1, 0.5)$

$$\theta(x,y) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{n} \sin \frac{n\pi x}{L} \frac{\sinh\left(\frac{n\pi y}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi H}{L}\right)}$$

Tiga bilangan deret ganjil pertama adalah $n = 1, 3, 5$.
Maka:

$$\theta(1,0.5) = \frac{2}{\pi} \left\{ \left[\frac{(-1)^2 + 1}{1} \sin \frac{1 \pi 1 \sinh(1 \pi 0.5/2)}{2 \sinh(1 \pi 1/2)} \right] \right. \\ \left. + \left[\frac{(-1)^4 + 1}{3} \sin \frac{3 \pi 1 \sinh(3 \pi 0.5/2)}{2 \sinh(3 \pi 1/2)} \right] \right. \\ \left. + \left[\frac{(-1)^6 + 1}{5} \sin \frac{5 \pi 1 \sinh(5 \pi 0.5/2)}{2 \sinh(5 \pi 1/2)} \right] \right\}$$

$$\theta(1,0.5) = \frac{2}{\pi} \left\{ \left[2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \frac{\sinh(\pi/4)}{\sinh(\pi/2)} \right] \right. \\ \left. + \left[\frac{2}{3} \sin \left(\frac{3\pi}{2} \right) \frac{\sinh(3\pi/4)}{\sinh(3\pi/2)} \right] \right. \\ \left. + \left[\frac{2}{5} \sin \left(\frac{5\pi}{2} \right) \frac{\sinh(5\pi/4)}{\sinh(5\pi/2)} \right] \right\}$$

$$\theta(1,0.5) = \frac{2}{\pi} \{0.755 - 0.063 + 0.008\}$$

$$\theta(1,0.5) = 0.46$$

Adapun θ adalah:

$$\theta = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

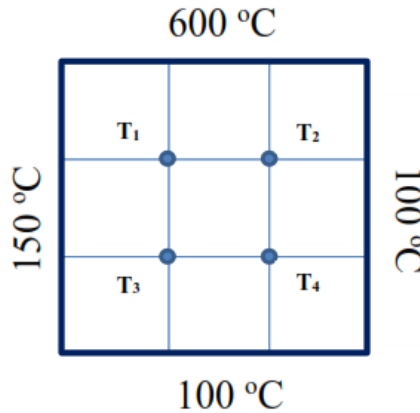
maka:

$$0.46 = \frac{T(1, 0.5) - 70}{120 - 70}$$

$$\mathbf{T(1, 0.5) = 93^\circ\text{C}}$$

Jadi besar temperatur di titik tengah pelat persegi panjang adalah 93 °C

2. Sebuah lempeng diketahui temperatur sisi-sisinya seperti pada gambar berikut:



Tentukanlah besar temperatur T₁, T₂, T₃, dan T₄ dari lempeng tersebut!

Penyelesaian :

Besar temperatur T₁, T₂, T₃, dan T₄ dari lempeng dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan metode beda hingga, yaitu:

$$T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} = 0$$

Sebelumnya tentukan terlebih dahulu persamaan untuk masing-masing titik lempeng.

Titik 1: $600 + T_3 + T_2 + 150 - 4T_1 = 0$

$$-4T_1 + T_2 + T_3 = -750 \quad \text{Node 1}$$

Titik 2: $600 + T_4 + 100 + T_1 - 4T_2 = 0$

$$T_1 - 4T_2 + T_4 = -700 \quad \text{Node 2}$$

Titik 3: $T_1 + 100 + T_4 + 150 - 4T_3 = 0$

$$T_1 - 4T_3 + T_4 = -250 \quad \text{Node 3}$$

Titik 4: $T_2 + 100 + 100 + T_3 - 4T_4 = 0$

$$T_2 + T_3 - 4T_4 = -200 \quad \text{Node 4}$$

Transformasikan masing-masing persamaan node 1, 2, 3, dan 4 kedalam *square equation*.

$$-4T_1 + T_2 + T_3 + 0 = -750$$

$$T_1 - 4T_2 + 0 + T_4 = -700$$

$$T_1 - 0 - 4T_3 + T_4 = -250$$

$$0 + T_2 + T_3 - 4T_4 = -200$$

Ubah dari *square equation* menjadi Matrix Diagonal.

$$\begin{bmatrix} -4 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -750 \\ -700 \\ -250 \\ -200 \end{bmatrix}$$

Temukan matrix T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4 dengan cara invers matrix seperti di bawah ini:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -750 \\ -700 \\ -250 \\ -200 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan penggunaan Matlab, nilai temperatur lempeng T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4 adalah:

```
>> A=[-4 1 1 0; 1 -4 0 1; 1 0 -4 1; 0 1 1 -4];
```

```
>> B=[-750; -700; -250; -200];
```

```
>> T=inv(A)*B
```

T=

306.2500

293.7500

181.2500

168.7500

Jadi nilai temperatur lempeng T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4 adalah:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 306.25 \\ 293.75 \\ 181.25 \\ 168.75 \end{bmatrix} \text{ dalam satuan } ^\circ\text{C}$$

Daftar Pustaka

- Lienhard, John H. (2005). *A heat transfer textbook*. Third edition. Massachusetts, AS: Phlogiston Pressridge.
- Noor I, Irzaman, Syafutra H, Ahmad F. (2016). Simulation of Heat Transfer in Cylinder Husks Furnace with Finite Difference Method. IOP Conf. 31 (2016)012013.
- Rectenwald, Gerald W. (2011). *Finite-difference approximations to the heat equation*. Mechanical Engineering Department Portland State University, Portland: Oregon Press

Profil Penulis

Iman Noor



Ketertarikan penulis terhadap fisika teori dan komputasi bidang pindah panas dimulai pada tahun 2009 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Institut Pertanian Bogor dengan memilih Jurusan S1 Fisika dan berhasil lulus pada tahun 2014. Pada tahun yang sama, penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S2 di prodi Biofisika pada tahun 2016. Setelah menyelesaikan studi S2, penulis pernah bekerja di perusahaan konsultan engineering sebagai analis. Dua tahun kemudian, penulis aktif mengajar menjadi dosen di program studi Pendidikan Fisika Universitas Indraprasta PGRI Jakarta, serta mengajar di Universitas Nusa Bangsa Bogor.

Penulis memiliki kepakaran dibidang Fisika Pindah Panas. Dan untuk mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis pun aktif sebagai peneliti dibidang kepakarannya tersebut. Penelitian – penelitian yang dilakukan terbit di penerbit jurnal nasional dan internasional. Selain peneliti, penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara yang sangat tercinta ini.

Email Penulis: iman.noor009@gmail.com

RANGKAIAN HAMBATAN

Farah Indrawati

Universitas Indraprasta PGRI

Hambatan (*resistor*) adalah komponen elektronika pasif yang berfungsi sebagai penghambat dan pengatur arus listrik dalam suatu rangkaian elektronika. Besarnya hambatan biasanya dipengaruhi oleh luas penampang, panjang, dan jenis bahan penghantar (konduktor, isolator, atau semi konduktor), serta suhu. Hambatan ini dapat berupa lampu, kumparan, elemen panas, dan lain sebagainya. Hambatan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R = \rho \frac{L}{A} = \pi r^2 \quad \text{atau} \quad R_2 = R_1 (1 + (\alpha \Delta T))$$

Keterangan:

- r = Jari-jari kawat (Meter)
- π = 3,14
- ρ = Hambatan Jenis (Ohm Meter)
- L = Panjang kawat (Meter)
- A = Luas penampang kawat (m²)
- α = Koefisien suhu
- ΔT = Perubahan suhu (°C)
- R₁ = Hambatan awal (Ohm)
- R₂ = Hambatan akhir (Ohm)
- R = Hambatan (Ohm)

Hubungan antara hambatan, arus listrik, dan tegangan atau potensial pada suatu rangkaian elektronika dapat dirumuskan dengan menggunakan hukum Ohm sebagai berikut:

$$V = I \cdot R$$

Keterangan:

I = Kuat arus (*Ampere*)

R = Hambatan (*Ohm*)

V = Potensial atau Tegangan (*Volt*)

Selanjutnya daya listrik yang merupakan jumlah energi listrik yang dihasilkan dalam suatu rangkaian elektronika dapat dirumuskan secara umum dan khusus, sebagai berikut:

Umum

$$P = \frac{W}{t}$$

Keterangan:

W = Energi listrik (*Joule*)

t = Waktu (*Detik*)

P = Daya (*Watt*)

Khusus

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R$$

Keterangan:

V = Potensial atau Tegangan (*Volt*)

I = Kuat arus (*Ampere*)

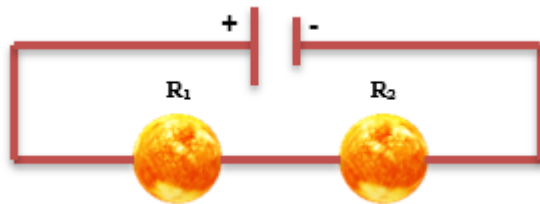
R = Hambatan (*Ohm*)

P = Daya (*Watt*)

Rangkaian hambatan secara umum dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu: 1) Hambatan Seri, 2) Hambatan Pararel, dan 3) Hambatan Campuran (Seri dan Pararel).

Hambatan Seri

Rangkaian hambatan seri adalah suatu rangkaian hambatan yang disusun secara sejajar. Arus yang dialirkan pada rangkaian hambatan seri ini dilakukan melalui satu kabel, sehingga arus masuk dan arus keluar yang dialirkan ke beberapa hambatan dalam satu kabel tersebut mempunyai besar atau kuat yang sama. Rangkaian hambatan seri ini biasanya digunakan pada rangkaian listrik lampu taman, atau lampu hias, setrika listrik, pemanas air, dan kulkas.



Gambar 5.1. Rangkaian Hambatan Seri

$$I_t = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$V_t = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Keterangan:

I = Kuat arus (*Ampere*)

R = Hambatan (*Ohm*)

V = Potensial atau Tegangan (*Volt*)

t = Total

n = Hingga ke-

Contoh Soal :

Jika suatu rangkaian listrik yang disusun secara seri mempunyai hambatan sebesar 1 *Ohm*, 3 *Ohm*, dan 4 *Ohm*, serta tegangan total sebesar 16 *Volt*. Tentukan besar kuat arus pada masing-masing hambatan dan besar kuat arus total yang mengalir pada rangkaian listrik yang disusun secara seri tersebut!

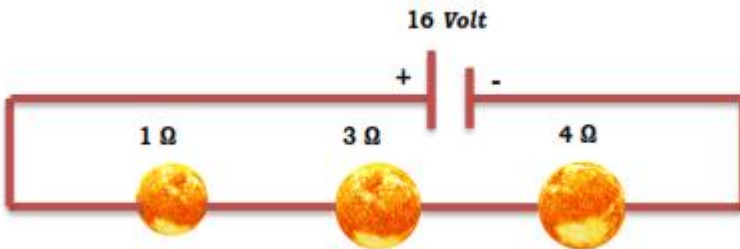
Diketahui:

$$R_1 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 4 \text{ Ohm}$$

$$V_t = 16 \text{ Volt}$$



Ditanyakan :

$$I_t = ?$$

$$I_1 = ?$$

$$I_2 = ?$$

$$I_3 = ?$$

Jawab :

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3$$

$$= 1 \text{ Ohm} + 3 \text{ Ohm} + 4 \text{ Ohm}$$

$$= 8 \text{ Ohm}$$

$$V_t = I_t \cdot R_t$$

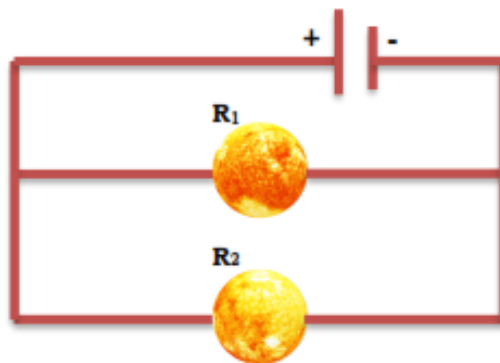
$$I_t = \frac{V_t}{R_t}$$
$$= \frac{16 \text{ Volt}}{8 \text{ Ohm}}$$

$$I_t = 2 \text{ Ampere}$$

$$I_t = I_1 = I_2 = I_3 = 2 \text{ Ampere}$$

Hambatan Paralel

Rangkaian hambatan paralel adalah suatu rangkaian hambatan yang disusun secara bertingkat. Arus yang dialirkan pada rangkaian hambatan paralel ini dilakukan melalui beberapa kabel, sehingga arus masuk dan arus keluar yang dialirkan ke masing-masing hambatan yang ada tersebut mempunyai besar atau kuat yang berbeda, walaupun secara total besar atau kuat arus yang masuk sama dengan arus yang keluar. Rangkaian hambatan paralel ini biasanya digunakan pada rangkaian listrik di rumah, lampu jalan, lampu lalu lintas, *keyboard* komputer, dan transmisi listrik jarak jauh.



Gambar 5.2. Rangkaian Hambatan Paralel

$$I_t = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$V_t = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Keterangan :

I = Kuat arus yang masuk (*Ampere*)

R = Hambatan (*Ohm*)

V = Potensial atau Tegangan (*Volt*)

t = Total

n = Hingga ke-

Contoh Soal:

Jika suatu rangkaian listrik yang disusun secara paralel mempunyai hambatan sebesar 1 *Ohm*, 3 *Ohm*, dan 4 *Ohm*, serta tegangan total sebesar 16 *Volt*. Tentukan besar kuat arus pada masing-masing hambatan dan besar kuat arus total yang mengalir pada rangkaian listrik yang disusun secara paralel tersebut!

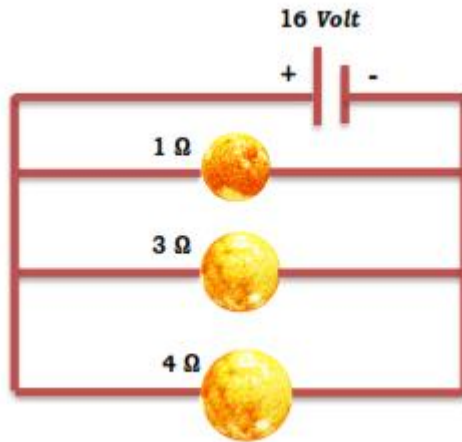
Diketahui:

$$R_1 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 4 \text{ Ohm}$$

$$V_t = 16 \text{ Volt}$$



Ditanyakan:

$$I_t = ?$$

$$I_1 = ?$$

$$I_2 = ?$$

$$I_3 = ?$$

Jawab :

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{1\ \text{Ohm}} + \frac{1}{3\ \text{Ohm}} + \frac{1}{4\ \text{Ohm}}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{12 + 4 + 3}{12}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{19}{12}$$

$$R_t = \frac{12}{19} = 0,63157\ \text{Ohm}$$

$$V_t = I_t \cdot R_t$$

$$I_t = \frac{V_t}{R_t}$$

$$I_t = \frac{16 \text{ Volt}}{0,63157 \text{ Ohm}}$$

$$I_t = 25,333 \text{ Ampere}$$

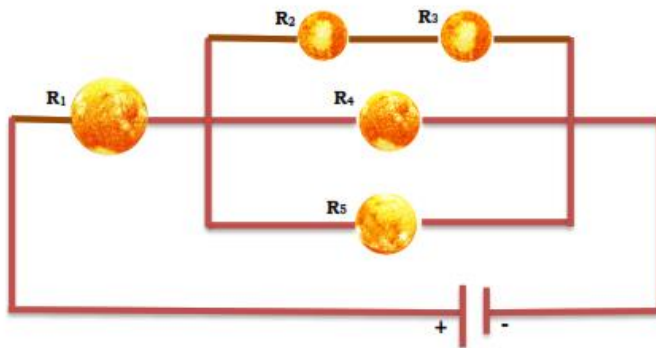
$$I_1 = \frac{V_t}{R_1} = \frac{16 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}} = 16 \text{ Ampere}$$

$$I_2 = \frac{V_t}{R_2} = \frac{16 \text{ Volt}}{3 \text{ Ohm}} = 5,333 \text{ Ampere}$$

$$I_3 = \frac{V_t}{R_3} = \frac{16 \text{ Volt}}{4 \text{ Ohm}} = 4 \text{ Ampere}$$

Hambatan Campuran

Rangkaian hambatan campuran adalah suatu rangkaian hambatan yang disusun secara sejajar (seri) dan bertingkat (pararel). Rangkaian hambatan campuran ini juga disebut sebagai rangkaian hambatan gabungan atau kombinasi. Rangkaian hambatan campuran ini biasanya digunakan pada rangkaian listrik instalasi gedung, instalasi perumahan, kendaraan bermotor, *alarm*, dan beberapa alat elektronik lainnya.



Gambar 5.3. Rangkaian Hambatan Campuran

$$R_s = R_2 + R_3$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}$$

$$R_t = R_1 + R_p$$

Keterangan:

R = Hambatan (Ohm)

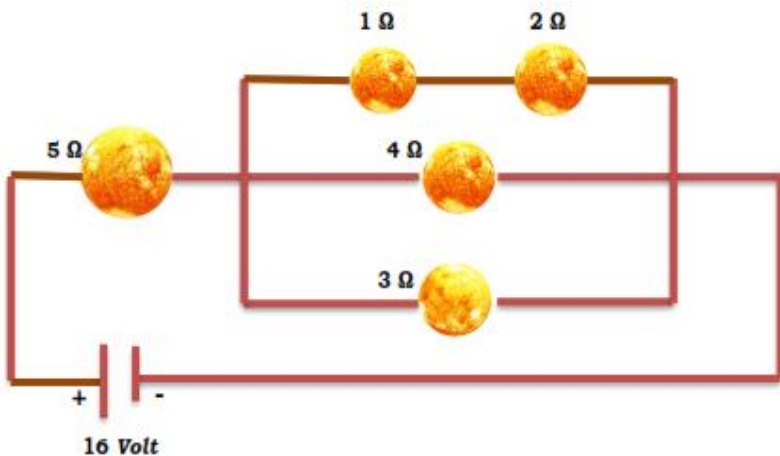
p = Pararel

s = Seri

t = Total

Contoh Soal:

Jika suatu rangkaian listrik yang disusun secara campuran mempunyai hambatan sebesar 1 Ohm, 2 Ohm, 3 Ohm, 4 Ohm, dan 5 Ohm, serta tegangan total sebesar 16 Volt, dengan rangkaian sebagai berikut:



Tentukan besar

- Kuat arus total yang mengalir pada rangkaian listrik !
- Kuat arus yang mengalir pada masing-masing hambatan !

-
- c. Daya listrik total yang dikonsumsi oleh rangkaian listrik campuran tersebut !
- d. Energi listrik total yang dikonsumsi oleh rangkaian listrik campuran tersebut selama 1 jam !

Diketahui :

$$R_1 = 5 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 1 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 2 \text{ Ohm}$$

$$R_4 = 3 \text{ Ohm}$$

$$R_5 = 4 \text{ Ohm}$$

$$V_t = 16 \text{ Volt}$$

Ditanyakan :

$$I_t = ?$$

$$I_1 = ?$$

$$I_2 = ?$$

$$I_3 = ?$$

$$I_4 = ?$$

$$I_5 = ?$$

Jawab :

- a. Kuat arus total yang mengalir pada rangkaian listrik

$$R_s = R_2 + R_3$$

$$R_s = 1 \text{ Ohm} + 2 \text{ Ohm} = 3 \text{ Ohm}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{3 \text{ Ohm}} + \frac{1}{4 \text{ Ohm}} + \frac{1}{3 \text{ Ohm}}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{4 + 3 + 4}{12}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{11}{12}$$

$$R_p = \frac{12}{11} = 1,09090 \text{ Ohm}$$

$$R_t = R_1 + R_p$$

$$R_t = 5 \text{ Ohm} + 1,09090 \text{ Ohm}$$

$$R_t = 6,090 \text{ Ohm}$$

$$V_t = I_t \cdot R_t$$

$$I_t = \frac{V_t}{R_t}$$

$$I_t = \frac{16 \text{ Volt}}{6,090 \text{ Ohm}} = 2,6268 \text{ Ampere}$$

- b. Kuat arus yang mengalir pada masing-masing hambatan

$$I_t = I_1 = I_p = 2,6268 \text{ Ampere}$$

$$V_p = I_p \cdot R_p$$

$$V_p = 2,6268 \text{ Ampere} \cdot 1,09090 \text{ Ohm}$$

$$V_p = 2,86557 \text{ Volt}$$

$$V_p = V_s = V_4 = V_5 = 2,86557 \text{ Volt}$$

$$I_s = \frac{V_s}{R_s} = \frac{2,86557 \text{ Volt}}{3 \text{ Ohm}} = 0,95519 \text{ Ampere}$$

$$I_s = I_2 = I_3 = 0,95519 \text{ Ampere}$$

$$I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{2,86557 \text{ Volt}}{4 \text{ Ohm}} = 0,71639 \text{ Ampere}$$

$$I_5 = \frac{V_5}{R_5} = \frac{2,86557 \text{ Volt}}{3 \text{ Ohm}} = 0,95519 \text{ Ampere}$$

-
- c. Daya listrik total yang dikonsumsi oleh rangkaian listrik campuran tersebut

$$\begin{aligned}P_t &= V_t \cdot I_t \\ &= 16 \text{ Volt} \cdot 2,6268 \text{ Ampere} \\ P_t &= 42,0288 \text{ Watt}\end{aligned}$$

- d. Energi listrik total yang dikonsumsi oleh rangkaian listrik campuran tersebut selama 1 jam!

$$\begin{aligned}W_t &= P_t \cdot t \\ &= 42,0288 \text{ Watt} \cdot (60 \cdot 60) \text{ Detik} \\ W_t &= 151303,68 \text{ Joule} = 0,042 \text{ kWh}\end{aligned}$$

Latihan Soal

1. Tentukan besar hambatan suatu kawat yang mempunyai hambatan jenis $2 \cdot 10^{-5}$ Ohm Meter, Panjang 4 meter, dan luas penampang 10^{-2} cm² !
2. Diketahui suatu rangkaian listrik mempunyai hambatan $R_1 = 3 \text{ Ohm}$, $R_2 = 4 \text{ Ohm}$, $R_3 = 6 \text{ Ohm}$, dan $R_4 = 7 \text{ Ohm}$, serta tegangan total sebesar 27 Volt. Tentukan besar kuat arus pada masing-masing hambatan dan besar kuat arus total yang mengalir pada rangkaian listrik tersebut jika disusun secara :
 - a. Seri!
 - b. Pararel!
3. Suatu rangkaian listrik yang disusun secara campuran mempunyai tegangan total sebesar 20 Volt. Rangkaian listrik tersebut mempunyai besar hambatan $R_1 = 4 \text{ Ohm}$ dan $R_2 = 5 \text{ Ohm}$ yang disusun secara pararel, selanjutnya $R_3 = 2 \text{ Ohm}$, $R_4 = 6 \text{ Ohm}$, dan $R_5 = 8 \text{ Ohm}$ disusun secara seri. Jika kedua rangkaian listrik tersebut disusun secara seri, maka

-
- a. Buatlah gambar rangkaian listrik campuran tersebut !
 - b. Tentukan besar kuat arus yang mengalir pada masing-masing hambatan yang terdapat pada rangkaian listrik campuran tersebut!
 - c. Tentukan daya listrik total yang dikonsumsi oleh rangkaian listrik campuran tersebut!
 - d. Tentukan energi listrik total yang dikonsumsi oleh rangkaian listrik campuran tersebut selama 30 menit!

Daftar Pustaka

- Halliday, David, dkk. (2010). Fisika Dasar, Jilid 2. Jakarta : Erlangga.
- Kresnoadi. (2018). Memahami Hambatan Listrik Hukum Ohm dengan Analogi Perahu. Ruang Guru. <https://www.ruangguru.com/blog/hambatanlistrik>
- Rangga, A. (2022). Hambatan Listrik. Cerdika. <https://cerdika.com/hambatan-listrik/>
- WikiElektronika. (2022). Rumus dan Contoh Soal HambatanListrik. <https://wikielektronika.com>

Profil Penulis



Farah Indrawati

Penulis merupakan dosen tetap Program Studi Pendidikan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indraprasta PGRI. Penulis menyelesaikan Pendidikan S1 di Program Studi Mekanisasi Pertanian, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Institut Teknologi Indonesia pada tahun 1998. Selanjutnya Penulis menyelesaikan Pendidikan S2 di Program Pascasarjana Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indraprasta PGRI pada tahun 2013, dan menyelesaikan Pendidikan S3 Program Studi Manajemen Pendidikan, Sekolah Pascasarjana Universitas Pakuan pada tahun 2022. Penulis aktif dalam dunia pendidikan dengan mengawali karirnya sebagai dosen pada tahun 2010 sampai dengan saat ini. Penulis aktif menulis beberapa artikel dan buku mulai tahun 2015. Beberapa artikel terkait yang dituliskan oleh penulis, diantaranya adalah mengenai kemampuan numerik, kemampuan pemahaman konsep kalkulus dan trigonometri, kemampuan komunikasi matematika, sumber daya manusia yang kompetitif, model pembelajaran, komitmen terhadap profesi, serta beberapa artikel lainnya. Salah-satu buku yang dituliskan oleh penulis adalah buku *chapter* berjudul “Kalkulus Integral” yang dituliskan dan diterbitkan pada tahun 2021.

Email Penulis: farah_indrawati@yahoo.com

KONVEKSI ALAMI

Anisa Budi Putranti

Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas antara permukaan padat yang berbatasan dengan fluida yang mengalir, fluida dapat berupa cair maupun gas. Syarat utama mekanisme perpindahan panas konveksi adalah adanya aliran fluida. (Riupassa dan Allo, 2019). Konveksi secara alami terjadi karena perbedaan temperatur, sehingga terjadi perbedaan massa jenis fluida. Fluida yang suhunya lebih tinggi akan mengalir ke fluida yang suhunya lebih rendah. Sehingga fluida tersebut akan mengalir dengan sendirinya atau tanpa adanya gaya luar.

Proses perpindahan panas secara konveksi ini dipengaruhi oleh tiga hal, yaitu koefisien konveksi termal, luas permukaan zat perantara, dan perubahan suhu yang mengalami aliran panas. Besarnya energi panas (kalor) yang dipindahkan persatuan waktu pada konveksi alami sebanding dengan luas permukaan benda yang bersentuhan dengan fluida dan perbedaan suhu. Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q/t = h \cdot A \cdot \Delta T$$

dengan

Q = jumlah kalor yang dipindahkan (J)

t = waktu terjadi aliran panas (s)

h = koefisien konveksi termal (W/m^2K)

A = luas permukaan zat perantara (m^2)

ΔT = perubahan suhu yang mengalami aliran panas (K)

Koefisien konveksi ini tergantung pada kondisi di lapisan batas yang dipengaruhi oleh geometri permukaan, sifat gerak fluida, dan macam-macam termodinamika fluida dan alirannya. (Bergman, dkk. 2011). Untuk kondisi kompleks, harga h (koefisien konveksi termal) ditentukan secara eksperimen. (Mufarida, 2019).

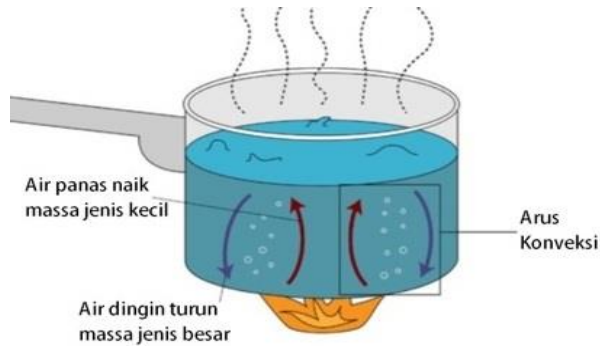
Contoh Konveksi Alami

Contoh dari konveksi alami diantaranya seperti berikut:

a. Air yang mendidih karena dipanaskan.

Air dalam panci yang diletakkan di atas kompor yang dinyalakan akan terjadi perpindahan panas dari api ke air. Panas yang diterima dari api akan memanaskan air sehingga suhu air di dalam panci meningkat. Air yang di bawah paling dekat api, akan mengalami panas terlebih dahulu. Ketika air yang berada di dasar pasar panci mengalami kenaikan suhu, maka massa jenisnya akan berkurang karena adanya penambahan volume akibat pemuain. Massa jenis air di dasar panci menjadi lebih kecil daripada yang di atasnya, sehingga akan mengalir ke atas. Sebaliknya, air di atas yang massa jenisnya lebih besar akan mengalir ke bawah. Pemanasan air ini akan terjadi terus menerus hingga seluruh air mencapai suhu yang sama. Sehingga dalam hal ini

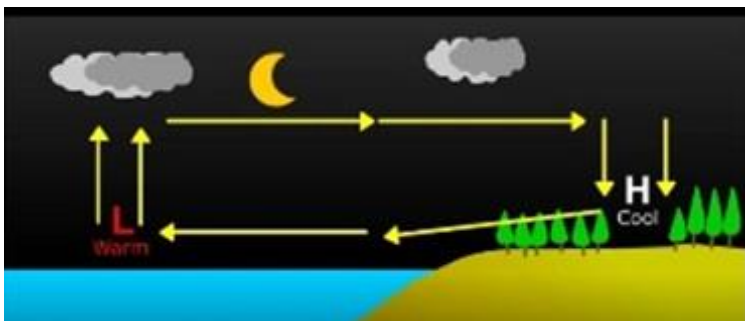
terjadi perputaran secara konveksi. Konveksi pada air mendidih ini dapat dilihat pada Gambar 6.1.



Gambar 6.1. Konveksi alami yang terjadi pada air mendidih
(www.fisika.co.id)

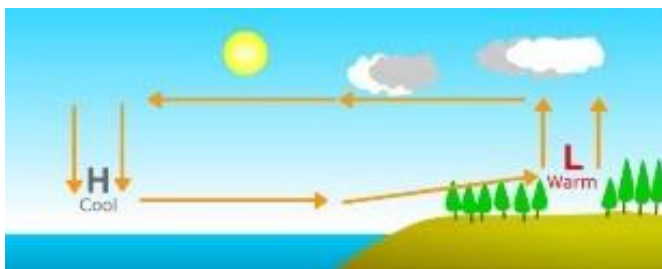
b. Terjadinya angin darat dan angin laut

Perpindahan konveksi secara alami juga dipakai oleh nelayan tradisional untuk mencari ikan. Angin darat terjadi pada malam hari digunakan nelayan untuk berangkat ke laut mencari ikan. Hal ini disebabkan karena pada malam hari, udara di laut lebih panas daripada udara di daratan. Udara yang di laut naik dan menuju ke daratan kemudian turun ke daratan. Udara di daratan tergantikan oleh udara dari laut dan kembali lagi ke laut, sehingga terjadi angin darat. Hal ini dapat dilihat pada gambar 6.2.1.



Gambar 6.2.1 Terjadinya Angin Darat
(<https://sumber.belajar.kemdikbud.go.id>)

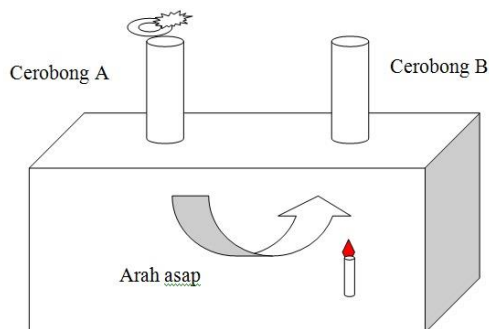
Sedangkan pada siang hari, terjadi angin laut yang digunakan nelayan untuk kembali ke daratan. Udara di laut lebih dingin daripada udara di daratan. Udara yang di daratan akan naik menuju ke laut dan udara di laut tergantikan dengan udara yang di daratan, turun ke laut dan kembali lagi ke daratan, sehingga terjadi angin laut. Perputaran udara yang terjadi pada angin darat dan angin laut inilah yang dinamakan konveksi alami. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 6.2.2 di bawah ini.



Gambar 6.2.2 Terjadinya Angin Laut
(<https://sumber.belajar.kemdikbud.go.id>)

c. Cerobong asap

Perpindahan panas pada cerobong asap terjadi secara konveksi yang ditandai dengan adanya pergerakan asap. Perpindahan panas pada cerobong asap dapat dilihat pada Gambar 6.3.



Gambar 6.3. Perpindahan panas pada cerobong asap.

Pada cerobong A, terdapat obat nyamuk yang dibakar. Jika lilin dinyalakan, maka terjadi aliran panas di dalam alat. Sehingga asap dari obat nyamuk tersebut turun ke bawah, dan naik ke atas melalui cerobong B. Udara yang panas akan naik, dan udara yang dingin akan turun. Peristiwa naik turunnya asap pada cerobong asap tersebut disebut dengan perpindahan panas secara konveksi.

d. Balon udara

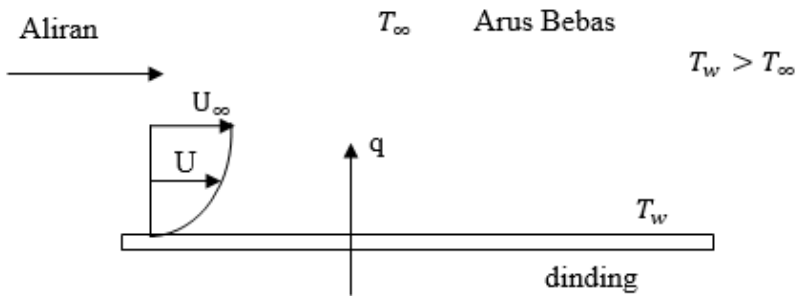
Balon udara panas yang dapat terbang ke angkasa juga merupakan salah satu contoh peristiwa konveksi. Balon dapat terbang naik ke atas karena adanya perbedaan massa jenis total dari balon udara tersebut lebih rendah daripada massa jenis udara di sekitarnya. Massa jenis balon udara tergantung pada perubahan temperatur pada udara di dalam balon. Seseorang mengatur udara dalam balon dengan menggunakan pemanas yang ada di bawah lubang balon. Perpindahan panas dari pemanas menuju balon bagian atas ini terjadi secara konveksi.



Gambar 6.4 Perpindahan Panas Konveksi Alami pada Balon Udara (www.regional.kompas.com)

Konveksi Alami pada Pelat

Sebuah pelat logam panas yang didinginkan di udara sekitar juga disebut dengan perpindahan panas secara konveksi alami. Perpindahan panas konveksi alami dari sebuah pelat dapat dilihat pada gambar 6.5 di bawah ini.



Gambar 6.5. Perpindahan Kalor Konveksi dari Suatu Dinding Pelat.

Kecepatan aliran dapat dilihat pada Gambar 6.5. T_w merupakan suhu pelat dan T_∞ merupakan suhu fluida. Kecepatan aliran akan berkurang sampai nol pada pelat karena adanya efek gaya viskositas. Kalor yang ditransfer pada titik ini hanya dengan cara konduksi karena kecepatan lapisan fluidanya pada dinding nol. Oleh karena itu digunakan persamaan konduktivitas termal fluida dan gradien temperatur fluida pada dinding. Akan tetapi, tetap disebut sebagai konveksi karena gradien temperatur bergantung pada laju fluida dalam mengambil kalor. Efek keseluruhan konveksi dapat dirumuskan menggunakan Hukum Newton tentang pendinginan, yaitu

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

dengan

q = laju perpindahan kalor (W)

T_w = suhu pelat ($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} = suhu fluida ($^{\circ}\text{C}$)

h = koefisien konveksi termal ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)

A = luas permukaan (m^2)

Contoh Soal dan Pembahasan

1. Jelaskan yang dimaksud dengan konveksi alami!

Pembahasan:

Konveksi alami adalah perpindahan panas yang karena adanya perbedaan temperatur, sehingga massa jenis fluida akan berbeda. Fluida yang suhunya lebih tinggi akan mengalir ke fluida yang suhunya lebih rendah. Sehingga fluida tersebut akan mengalir dengan sendirinya atau tanpa adanya gaya luar.

2. Suatu fluida dengan koefisien konveksi termal $0,01 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ memiliki luas permukaan zat perantara 10cm^2 . Hitung laju perpindahan panasnya jika fluida tersebut mengalir dari dinding yang bersuhu 80K ke dinding lainnya yang bersuhu 30K dan kedua dinding sejajar!

Pembahasan:

Diketahui:

$$h = 0,01 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$$

$$A = 10 \text{ cm}^2 = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 80 - 30 = 50\text{K}$$

Ditanya:

$$Q/t = \dots?$$

Jawab:

$$Q/t = h \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q/t = 0,01 \times 10 \times 10^{-4} \times 50$$

$$Q/t = 5 \times 10^{-4}$$

Jadi, laju perpindahan panasnya adalah 5×10^{-4} W.

3. Suatu panci pemanas air terbuat dari bahan tertentu mempunyai luas permukaan yang bersentuhan dengan air $0,01 \text{ m}^2$. Jika suhu bahan tersebut 100K dan suhu air 80K . Besar kalor yang dipindahkan secara konveksi per sekonnya adalah 1 J/s . Hitung besar nilai koefisien konveksi bahan tersebut!

Pembahasan:

Diketahui:

$$A = 0,01 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 100 - 80 = 20\text{K}$$

$$Q/t = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$$

Ditanya:

$$h = \dots?$$

Jawab:

$$Q/t = h \cdot A \cdot \Delta T$$

$$1 = h \cdot 0,01 \cdot 20$$

$$h = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Jadi, besar nilai koefisien konveksi bahan tersebut adalah $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4. Perbedaan suhu di dalam dan di luar ruangan ber-AC sebesar 10K . Jika tetapan konveksi sebesar 8 J/s.m^2 dan luas pintu 2m^2 , berapa laju kalor yang melewati pintu terbuka setiap sekonnya?

Pembahasan:

Diketahui:

$$\Delta T = 10\text{K}$$

$$h = 8 \text{ J/s.m}^2$$

$$A = 2 \text{ m}^2$$

Ditanya:

$$Q/t = \dots?$$

Jawab:

$$Q/t = h.A.\Delta T$$

$$Q/t = 8 \times 2 \times 10 = 160 \text{ J/s}$$

Jadi, berapa laju kalor yang melewati pintu terbuka setiap sekonnya adalah 160J/s.

5. Seseorang memiliki suhu badan 35°C berada pada kamar yang suhunya 24°C . Jika luas permukaan badannya kira-kira $1,5 \text{ m}^2$ dan koefisien konveksi termalnya $7,1 \text{ J/s.m}^2\text{C}$. Hitung kalor yang dilepaskan badan melalui konveksi!

Pembahasan:

Diketahui:

$$h = 7,1 \text{ J/s.m}^2\text{C}$$

$$A = 1,5 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 35^\circ\text{C} = 308\text{K}$$

$$T_2 = 24^\circ\text{C} = 297\text{K}$$

$$\Delta T = 308 - 297 = 11\text{K}$$

Ditanya:

$$Q/t = \dots?$$

Jawab:

$$Q/t = h.A.\Delta T$$

$$Q/t = 7,1 \times 1,5 \times 11$$

$$Q/t = 117,15 \text{ J/s}$$

Jadi, kalor yang dilepaskan badan melalui konveksi adalah 117.15 J/s.

6. Sebuah pelat panas dengan suhu 150°C, dengan luas pelat 0,25 m² didinginkan di udara yang bersuhu 20°C. Koefisien konveksinya 25 W/m²°C.. Hitung berapa perpindahan panasnya!

Pembahasan:

Diketahui:

$$h = 25 \text{ W/m}^2$$

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

$$T_w = 150^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 20^\circ\text{C}.$$

Ditanya:

$$q = \dots?$$

Jawab:

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

$$q = 25 \times 0,25 \times (150 - 20)$$

$$q = 812,5 \text{ W}$$

Jadi, laju perpindahan panasnya adalah 812,5 W.

7. Sebuah pelat yang berada pada posisi vertikal, lebarnya 2 m dan tingginya 6 m, dijaga suhunya agar tetap 80°C. Pelat ini dikelilingi oleh udara yang suhunya 15°C. Koefisien konveksinya adalah 2,12 W/m²°C. Hitung perpindahan panas dari pelat ke udara!

Pembahasan:

Diketahui:

$$h = 2,12 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$A = 2 \times 6 = 12 \text{ m}^2$$

$$T_w = 80^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 15^\circ\text{C}.$$

Ditanya:

$$q = \dots?$$

Jawab:

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

$$q = 2,12 \times 12 \times (80 - 15)$$

$$q = 1.653,6 \text{ W}$$

$$q = 1,6 \text{ kW}$$

Jadi, perpindahan panas dari pelat ke udaranya adalah 1,6 kW.

8. Sebuah lampu memiliki luas permukaan 100 cm^2 dan suhunya 120°C berada di dalam kamar bersuhu 35°C . Koefisien konveksi lampu adalah $10 \text{ J/s.m}^2\text{K}$. Berapa jumlah kalor yang dilepas lampu selama 1 menit?

Pembahasan:

Diketahui:

$$A = 100 \text{ cm}^2 = 0,01 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 120^\circ\text{C} = 393\text{K}$$

$$T_2 = 35^\circ\text{C} = 308\text{K}$$

$$\Delta T = 393 - 308 = 85 \text{ K}$$

$$h = 10 \text{ J/s.m}^2\text{K}$$

$$t = 1 \text{ menit} = 60 \text{ s}$$

Ditanya:

$$Q = \dots?$$

Jawab:

$$Q/t = h \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \cdot t$$

$$Q = 10 \cdot (0,01) \cdot 85 \cdot 60$$

$$Q = 510 \text{ J}$$

Jadi, jumlah kalor yang dilepas lampu selama 1 menit adalah 510 J.

Daftar Pustaka

Bergman, L. Theodore, dkk. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer Seventh Edition*. United State of America: John Wiley & Sons, Inc.

Riupassa, H. and Allo, W.G. (2019) 'Analisis Konveksi Alami dan Paksa dengan Variasi Material', *Jurnal Teknik Mesin*, 8(1), pp. 39–48. Available at: <http://ojs.ustj.ac.id/mesin/article/view/428>.

Mufarida, N.A. (2019) *Perpindahan Panas 1*. Jember: CV. Pustaka Abadi.

<https://www.fisika.co.id/2020/12/konveksi.html>

<https://sumber.belajar.kemdikbud.go.id/repos/FileUpload/Perpindahan%20Kalor-BPSMG/materi2.html>

<https://regional.kompas.com/read/2022/01/16/210316978/mirip-cappadocia-ini-tempat-wisata-balonudara-di-indonesia>

Profil Penulis



Anisa Budi Putranti

Ketertarikan penulis terhadap ilmu sains dimulai pada tahun 2003 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Sekolah Menengah Atas jurusan IPA di SMA Negeri 2 Pati dan berhasil menyelesaikan studinya pada tahun 2006. Penulis kemudian melanjutkan ke Perguruan Tinggi Negeri di Universitas Negeri Yogyakarta jurusan Fisika dan berhasil menyelesaikan S1-nya pada tahun 2011. Pada tahun 2015, penulis berhasil menyelesaikan studi S2-nya di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta jurusan Fisika.

Penulis berharap tulisan yang ditulisnya dapat bermanfaat bagi pembacanya. Selain itu, penulis juga berharap dengan menulis buku dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara yang sangat tercinta ini.

Email Penulis: anisabp18@gmail.com

KONVEKSI PAKSA (*FORCED CONVECTION*)

Andry Fitrian

Universitas Indraprasta PGRI

Pengertian

Saat aliran atau fluida (gas atau cairan/*liquid*) bergerak membawa panas bersama dengan aliran materi maka terjadilah konveksi. Aliran fluida dapat terjadi karena proses eksternal, seperti gaya apung atau gravitasi akibat energi panas mengembangkan volume fluida. Konveksi paksa terjadi jika fluida dipaksa atau direkayasa mengalir menggunakan kipas, pompa, atau cara mekanis lainnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa konveksi paksa merupakan perpindahan kalor secara konveksi yang pergerakan molekul mediumnya terjadi karena gaya eksternal seperti kipas atau pompa.

Konveksi paksa yang termasuk aliran satu fasa adalah perpindahan panas yang mana dialirannya tersebut berasal dari luar, seperti dari blower atau kran dan pompa.

Bilangan tidak Berdimensi

Sebelum berlanjut ke konveksi paksa, sebaiknya lebih mengenal kembali bilangan tak berdimensi dikarenakan untuk menentukan h (koefisien konveksi) yang akan sulit

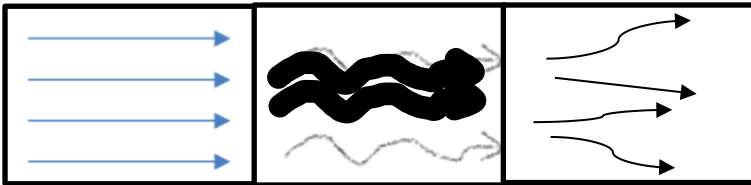
dilakukan karena aliran panas yang terus bergerak. Maka dapat kita peroleh dari 3 bilangan tak berdimensi (*dimensionless number*) yaitu:

1. Reynolds Number (N_{Re})

Berfungsi untuk menggambarkan jenis aliran dari fluida (gas atau cairan/*liquid*) dan membagi jenis aliran fluida berupa laminer, transisi atau turbulen.

- a. Aliran fluida laminer adalah aliran tenang
- b. Aliran fluida transisi adalah aliran tenang menuju beriak
- c. Aliran fluida turbulen adalah aliran yang beriak dengan arah liar

Aliran fluida dapat digambarkan seperti arah aliran berikut:



Gambar 7.1 Aliran fluida laminer, transisi dan turbulen

Dengan persamaan:

$$N_{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4 \dot{m}}{\pi \mu D}$$

Dimana:

ρ = densitas fluida

v = kecepatan aliran fluida

D = diameter pipa

μ = viskositas fluida

\dot{m} = laju aliran massa

Jika:

$N_{Re} < 2100$ maka termasuk aliran laminar

$2100 < N_{Re} < 10.000$ maka termasuk aliran transisi

$N_{Re} > 10.000$ maka termasuk aliran turbulen

2. Nusselt Number (N_{Nu})

Berfungsi sebagai rasio antara pindah panas konveksi dan konduksi

Dengan persamaan:

$$N_{Nu} = \frac{h D}{k}$$

Dimana:

h = koefisien konveksi

D = karakteristik dimensi seperti diameter pipa

k = konduktivitas termal

Dikarenakan koefisien konveksi sulit untuk dicari maka membutuhkan penyelesaian bertahap.

3. Prandtl Number (N_{Pr})

Berfungsi sebagai rasio antara difusivitas momentum dan difusivitas termal

Dengan persamaan:

$$N_{Pr} = \frac{\mu C_p}{k}$$

Dimana:

μ = viskositas fluida

C_p = panas spesifik

k = konduktivitas termal

Perhitungan Koefisien Konveksi

Dalam perkembangan zaman pada proses industri pangan menggunakan konveksi paksa (*forced convention*) untuk membantu mempercepat proses penurunan suhu. Dalam menghitung koefisien konveksi, identifikasi terlebih dahulu bentuk geometri aliran apakah permukaan solid yang berkontak dengan fluida bentuknya kotak, pipa, bola, atau plat. Kemudian identifikasi lanjutan terhadap jenis fluida dan sifatnya yang berupa air ataupun udara. Selanjutnya dapat menentukan aliran dari menghitung Reynolds Number yang berguna untuk menentukan rumus empiris yang sesuai.

Sifat fluida ditentukan oleh suhu (rata-rata) dengan persamaan:

$$T_{\infty} = \frac{T_i + T_e}{2}$$

Dimana:

T_{∞} = suhu total

T_i = suhu masuk

T_e = suhu keluar

Suhu ini menentukan viskositas, densitas, k, dan sebagainya yang dapat dilihat pada sumber tabel berikut:

Table Physical Properties of Water at the Saturation Pressure

Temperature		Density ρ (kg/m ³)	Coefficient of volumetric thermal expansion β ($\times 10^{-4}$ K ⁻¹)	Specific heat c_p (kJ/ kg°C)	Thermal conductivity k (W/(m°C))	Thermal diffusivity α ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	Absolute viscosity μ ($\times 10^{-4}$ Pa s)	Kinematic viscosity ν ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	Prandtl number N_{Pr}
T (°C)	T (K)								
0	273.15	999.9	-0.7	4.226	0.558	0.131	1793.636	1.789	13.7
5	278.15	1000.0	-	4.206	0.568	0.135	1534.741	1.535	11.4
10	283.15	999.7	0.95	4.195	0.577	0.137	1296.439	1.300	9.5
15	288.15	999.1	-	4.187	0.587	0.141	1135.610	1.146	8.1
20	293.15	998.2	2.1	4.182	0.597	0.143	993.418	1.006	7.0
25	298.15	997.1	-	4.178	0.606	0.146	880.637	0.884	6.1
30	303.15	995.7	3.0	4.176	0.615	0.149	792.377	0.805	5.4
35	308.15	994.1	-	4.175	0.624	0.150	719.808	0.725	4.8
40	313.15	992.2	3.9	4.175	0.633	0.151	658.626	0.658	4.3
45	318.15	990.2	-	4.176	0.640	0.155	605.670	0.611	3.9
50	323.15	988.1	4.6	4.178	0.647	0.157	555.056	0.556	3.55
55	328.15	985.7	-	4.179	0.652	0.158	509.946	0.517	3.27
60	333.15	983.2	5.3	4.181	0.658	0.159	471.650	0.478	3.00
65	338.15	980.6	-	4.184	0.663	0.161	435.415	0.444	2.76
70	343.15	977.8	5.8	4.187	0.668	0.163	404.034	0.415	2.55
75	348.15	974.9	-	4.190	0.671	0.164	376.375	0.386	2.23
80	353.15	971.8	6.3	4.194	0.673	0.165	352.059	0.364	2.25
85	358.15	968.7	-	4.198	0.676	0.166	328.523	0.339	2.04
90	363.15	965.3	7.0	4.202	0.678	0.167	308.909	0.326	1.95
95	368.15	961.9	-	4.206	0.680	0.168	292.238	0.310	1.84
100	373.15	958.4	7.5	4.211	0.682	0.169	277.528	0.294	1.75
110	383.15	951.0	8.0	4.224	0.684	0.170	254.973	0.268	1.57
120	393.15	943.5	8.5	4.232	0.684	0.171	235.360	0.244	1.43
130	403.15	934.8	9.1	4.250	0.685	0.172	211.824	0.226	1.32
140	413.15	926.3	9.7	4.257	0.686	0.172	201.036	0.212	1.23
150	423.15	916.9	10.3	4.270	0.684	0.173	185.346	0.201	1.17
160	433.15	907.6	10.8	4.283	0.680	0.173	171.616	0.191	1.10
170	443.15	897.3	11.5	4.306	0.679	0.172	162.290	0.181	1.05

Tabel 7.1. Tabel sifat fisik air pada tekanan saturasi
 Sumber: Introduction to Food Engineering Fourth Edition (Singh & Heldman: 2009)

Table Physical Properties of Dry Air at Atmospheric Pressure									
Temperature t (°C)	T (K)	Density (ρ) (kg/m ³)	Volumetric coefficient of expansion (β) (× 10 ⁻³ K ⁻¹)	Specific heat (c _p) (kJ/kg K)	Thermal conductivity (k) (W/m K)	Thermal diffusivity (α) (× 10 ⁻⁶ m ² /s)	Viscosity (μ) (× 10 ⁻⁴ N s/m ²)	Kinematic viscosity (ν) (× 10 ⁻⁶ m ² /s)	Prandtl number (N _{Pr})
-20	253.15	1.365	3.97	1.005	0.0226	16.8	16.279	12.0	0.71
0	273.15	1.252	3.65	1.011	0.0237	19.2	17.456	13.9	0.71
10	283.15	1.206	3.53	1.010	0.0244	20.7	17.848	14.66	0.71
20	293.15	1.164	3.41	1.012	0.0251	22.0	18.240	15.7	0.71
30	303.15	1.127	3.30	1.013	0.0258	23.4	18.682	16.58	0.71
40	313.15	1.092	3.20	1.014	0.0265	24.8	19.123	17.6	0.71
50	323.15	1.057	3.10	1.016	0.0272	26.2	19.515	18.58	0.71
60	333.15	1.025	3.00	1.017	0.0279	27.6	19.907	19.4	0.71
70	343.15	0.996	2.91	1.018	0.0286	29.2	20.398	20.65	0.71
80	353.15	0.968	2.83	1.019	0.0293	30.6	20.790	21.5	0.71
90	363.15	0.942	2.76	1.021	0.0300	32.2	21.231	22.82	0.71
100	373.15	0.916	2.69	1.022	0.0307	33.6	21.673	23.6	0.71
120	393.15	0.870	2.55	1.025	0.0320	37.0	22.555	25.9	0.71
140	413.15	0.827	2.43	1.027	0.0333	40.0	23.340	28.2	0.71
150	423.15	0.810	2.37	1.028	0.0336	41.2	23.732	29.4	0.71
160	433.15	0.789	2.31	1.030	0.0344	43.3	24.124	30.6	0.71
180	453.15	0.755	2.20	1.032	0.0357	47.0	24.909	33.0	0.71
200	473.15	0.723	2.11	1.035	0.0370	49.7	25.693	35.5	0.71
250	523.15	0.653	1.89	1.043	0.0400	60.0	27.557	42.2	0.71

Source: Adapted from Ruzjovic (1993)

Tabel 7.2. Tabel sifat fisik udara pada tekanan saturasi
 Sumber: Introduction to Food Engineering Fourth Edition
 (Singh & Heldman: 2009)

N_{Nu} adalah fungsi dari N_{Re} dan N_{Pr}

Terdapat beberapa skenario pada konveksi paksa saat mencari tipe aliran. Yaitu sebagai berikut:

1. Tipe aliran laminar dalam Pipa ($N_{Re} < 2100$)
 - a. Jika aliran *fully developed* dan temperatur permukaan konstan maka $N_{Nu} = 3,66$
 - b. Jika aliran *fully developed* (*heat flux uniform*)/seragam maka $N_{Nu} = 4,36$
 - c. Jika *entry region* dan *fully developed* alirannya maka memakai persamaan:

$$N_{Nu} = 1.86 \left(N_{Re} \times N_{Pr} \times \frac{d_c}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Dimana d_c adalah diameter pipa, L adalah panjang pipa, μ_b yang dapat kita cari di tabel berdasarkan suhu rata-ratanya dan μ_w yang dapat kita cari di tabel berdasarkan suhu permukaan dinding pipa.

2. Tipe aliran transisi dalam pipa ($2100 < N_{Re} < 10.000$)

Tipe aliran ini memakai persamaan:

$$N_{Nu} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (N_{Re} - 1000) N_{Pr}}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(N_{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

Dan

$$f = \frac{1}{(0.790 \ln N_{Re} - 1.64)^2}$$

3. Tipe aliran turbulen dalam pipa ($N_{re} > 10.000$)

Tipe aliran ini memakai persamaan:

$$N_{Nu} = 0.023 N_{Re}^{0.8} \times N_{Pr}^{0.33} \times \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

4. Konveksi pada *non circular duct*

$$D_e = \frac{4 \times \text{free area}}{\text{wetted perimeter}}$$

5. Aliran melewati suatu objek (jika objek terbenam dalam aliran)

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

Dimana T_f adalah suhu film, T_s adalah suhu permukaan dan T_∞ adalah suhu lingkungan. Dan untuk mencari Nusselt Number nya:

$$N_{Nu} = 2 + 0.60 N_{Re}^{0.5} \times N_{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

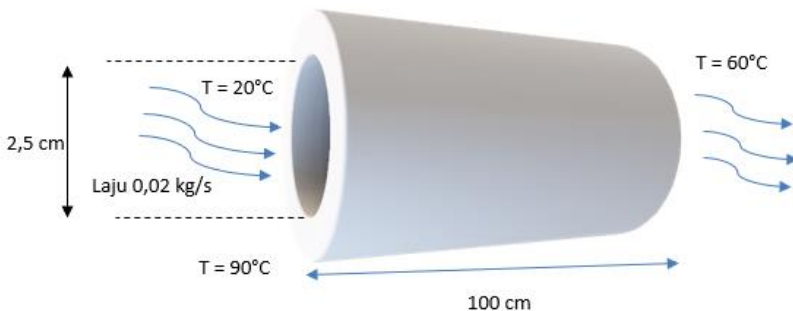
Untuk $1 < N_{Re} < 70.000$ dan $0.6 < N_{Pr} < 400$

Contoh Soal di dalam Pipa

Diketahui kelajuan aliran air 0,02 kg/s dipanaskan dari suhu 20°C menjadi 60°C dalam sebuah pipa horizontal dengan diameter 2,5 cm. Jika suhu bagian dalam permukaan pipa adalah 90°C. Tentukan koefisien konveksi proses tersebut jika diketahui panjang pipa adalah 100 cm!

Jawaban

Prosesnya



Dari identifikasi, maka diperoleh geometri adalah pipa dan jenis fluida adalah air. Lalu untuk mencari sifat-sifat fluida:

$$T_{\infty} = \frac{T_i + T_e}{2} = \frac{20 + 60}{2} = 40^{\circ}\text{C}$$

Lalu lihat di tabel 7.1 dengan suhu 40°C sehingga diperoleh:

ρ = densitas fluida = 992,2 kg/m³

c_p = panas spesifik = 4,175 kJ/kg°C

k = konduktivitas termal = 0,633 W/m°C

μ = viskositas air = 658,026 x 10⁻⁶ Pa s

N_{Pr} = Prandtl Number = 4,3

Lalu kita hitung Reynold Number:

$$N_{Re} = \frac{4\dot{m}}{\pi \mu D} = \frac{4 \times 0,02}{\pi \times 658,026 \cdot 10^{-6} \times 0,025} = 1547,9$$

Jadi $N_{Re} < 2100$ sehingga alirannya laminar

Lalu kita hitung menggunakan

$$N_{Nu} = 1.86 \left(N_{Re} \times N_{Pr} \times \frac{d_c}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Ingat, μ_w dicari berdasarkan suhu permukaan dinding = $90^\circ\text{C} = 308,909 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$

Setelah dihitung maka didapat $N_{Nu} = 11,2$

Dan terakhir kita cari koefisien konveksi (h)

$$N_{Nu} = \frac{h D}{k} \quad \longrightarrow \quad 11,2 = \frac{h \times 0,025}{0,633} \text{ sehingga } h = \mathbf{284 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}}$$

Contoh Soal di luar Pipa

Suatu sirip plat tembaga yang tipis dan datar menempel pada tabung yang memiliki ukuran 51 mm x 51 mm persegi. Suhunya dapat dianggap sama pada $82,2^\circ\text{C}$. Udara pendingin bersuhu $15,6^\circ\text{C}$ dan bertekanan 1 atm dihembuskan paralel terhadap sirip plat tembaga tersebut dengan kecepatan 12,2 m/s.

1. Tentukan nilai koefisien film jika sirip plat tembaga adalah plat yang halus!
2. Tentukan nilai koefisien film jika sirip plat tembaga cukup kasar sehingga seluruh lapisan film di sekitar sirip plat tembaga beraliran turbulen!

Jawaban

Tentukan sifat fisik fluida dengan:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{82,2 + 15,6}{2} = 48,9^\circ\text{C}$$

Dengan melihat tabel, diperoleh nilai

$$k = 0,0280 \text{ W/m.K}$$

$$\rho = 1,097 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,95 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$$

$$N_{Pr} = 0,704$$

Lalu Reynolds Number (N_{Re})

$$N_{Re} = \frac{L v \rho}{\mu} = 3,49 \times 10^4$$

Sehingga;

1. Dengan N_{Re} yang sudah diperoleh, jika sirip plat tembaga adalah plat yang halus maka persamaan yang berlaku adalah aliran laminar

$$N_{Nu} = \frac{h L}{k} = 0,664 N_{Re}^{0,5} N_{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{h(0,051)}{(0,0280)} = 0,664(3,49 \times 10^4)^{0,5}(0,704)^{\frac{1}{3}}$$

$$h = 60,7 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

2. Jika sirip plat tembaga adalah plat cukup kasar beraliran turbulen, maka persamaan yang berlaku adalah

$$N_{Nu} = 0,0366 N_{Re}^{0,8} N_{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

Sehingga $h = 77,2 \frac{W}{m^2} \cdot K$

Contoh Penggunaan Konveksi Paksa pada Zat Cair

Konveksi paksa pada zat cair umumnya digunakan di sistem pendingin mesin/radiator. Sistem pendingin biasanya digunakan pada mesin mobil. Perpindahan kalor secara konveksi paksa banyak digunakan pada sistem pendingin mesin atau yang dikenal dengan istilah radiator. Sistem pendingin ini digunakan pada mesin mobil. Tanpa menggunakan sistem pendingin (radiator) maka mobil akan cepat rusak, karena suhu yang diterima mesin mobil dari proses pembakaran mencapai 1.600°C . Akibatnya mesin mobil yang terbuat dari logam akan memuai melebihi batas keamanan sehingga bagian-bagian mesin akan menjadi lemah.

Contoh Penggunaan Konveksi Paksa pada Gas

Benda panas yang dikelilingi oleh udara dingin, maka panas tersebut akan berpindah ke udara. Pada tungku pabrik biasanya dipasang cerobong asap agar selalu ada tarikan oleh udara ke atas. Sebelum ada pemanasan di dalam tungku, massa jenis udara dalam cerobong sama dengan massa jenis udara di luar cerobong. Setelah ada pemanasan, udara di dalam tungku memuai sehingga udara dari luar cerobong yang lebih dingin dan massa jenisnya lebih besar akan mendesak udara panas dalam cerobong ke atas. Semakin tinggi cerobong semakin besar tarikannya, sebab perbedaan massa jenis gas dalam cerobong dan massa jenis udara dari luar makin besar.

Besarnya energi (kalor) yang dipindahkan persatuan waktu pada konveksi secara paksa sama seperti pada konveksi alamiah yakni akan sebanding dengan luas permukaan benda yang bersentuhan dengan fluida dengan beda suhu ΔT . Secara matematis ditulis:

$$\frac{Q}{t} = h \cdot A \cdot \Delta T$$

dengan:

Q = jumlah kalor yang dipindahkan

t = waktu terjadi aliran kalor

h = koefisien konveksi

A = luas permukaan

ΔT = beda suhu antara benda dan fluida

Contoh Soal Konveksi Paksa pada Aliran Udara

Udara pada 27°C dan 1 atm mengalir di atas sebuah plat rata dengan kecepatan 2 m/s, jika plat dipanaskan secara keseluruhan panjangnya hingga mencapai suhu 60 °C. Hitunglah panas yang dipindahkan pada jarak 20 cm pertama plat, jika viskositas udara pada suhu diatas adalah 1,85x10⁻⁵ kg/m.s!

Jawaban

$$T_f = \frac{(27 + 60)^\circ\text{C}}{2} = 43,5^\circ\text{C} = 316,5 \text{ K}$$

Dari tabel 7.2 maka didapat

v = viskositas = 17,36x10⁻⁶ m²/s

k = konduktivitas = 0,02749 W/m

$N_{pr} = 0,7$

$C_p \text{ udara} = 1,006 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

Pada x = 20 cm maka:

$$N_{Re} = \frac{u x}{\nu} = \frac{2(0,2)}{17,36 \times 10^{-6}} = 23,041$$

Lalu

$$N_{Nu} = \frac{h \cdot x}{k} = 0,332 N_{Re}^{\frac{1}{2}} N_{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$N_{Nu} = \frac{h \cdot x}{k} = 0,332 (23,04)^{\frac{1}{2}} (0,7)^{\frac{1}{3}} = 44,74$$

Maka

$$h_x = N_{Nu} = \frac{(44,74)(0,02749)}{0,2} = 6,15 \frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C$$

$$h = 2 h_x = 2 \times 6,15 \frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C = 12,3 \frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C$$

$$q = h \cdot A (T_\infty - T_u) = (12,3 \frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C)(0,2 \text{ m})(60-27) \text{ } ^\circ C$$

$$q = 81,18 \text{ W}$$

Daftar Pustaka

- Cengel, Y. (1994). *Heat Transfer a Practical Approach (2th ed)*. United States of America: J.W.Inc, Ed.
- Holman, J.P., E. Jasfi. (1988). *Perpindahan Kalor*. Jakarta: Erlangga.
- Kutz, M. (2004). *Heat Transfer Calculations*. McGraw-Hill,Ed.
- Moran, M.S. (2011). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics (7th ed)*. United States of America: J.W.Inc, Ed.
- Singh, Paul & Heldman, Dennis. (2009). *Introduction to Food Engineering Fourth Edition*. London: Elsevier.

Profil Penulis



Andry Fitrian

Ketertarikan penulis terhadap ilmu fisika dimulai pada tahun 2004 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Sekolah Menengah Kejuruan di SMK Sumber Daya Bekasi dengan memilih Jurusan Elektronika dan berhasil lulus pada tahun 2007. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di prodi PENDIDIKAN FISIKA UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA pada tahun 2013. Kemudian, penulis menyelesaikan studi S2 di prodi PENDIDIKAN FISIKA UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA.

Penulis saat ini bekerja menjadi dosen di Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Indraprasta PGRI dengan selalu aktif pada kegiatan Tridarma Perguruan Tinggi.

Email Penulis: andryakira@gmail.com

ALIRAN FLUIDA DALAM PIPA

Bergita Gela M Saka

Universitas Kristen Indonesia Toraja

Sistem perpipaan dalam industri, pertambangan dan distribusi air minum banyak menggunakan percabangan pipa. Pipa-pipa tersebut dirangkai sedemikian rupa sehingga mampu memenuhi kebutuhan pendistribusian fluida. Distribusi aliran fluida dapat berbeda-beda dikarenakan adanya berbagai jenis dan sudut percabangan dalam sistem perpipaan (Nurcholis, 2008).

Banyak penelitian yang dilakukan mengenai aliran fluida dalam pipa. Pengujian pipa bercabang tiga yang dilakukan oleh Bingham dan Blair (1985) pada kondisi aliran steady dengan melakukan variasi sudut untuk menentukan rugi tekanan untuk masing-masing percabangan. Basset dkk (1998) melakukan pengujian dan simulasi tekanan pada pipa bercabang tiga dengan sudut percabangan 90° dengan model tekanan percabangan sama dan tekanan percabangan berbeda. Koefisien rugi tekanan juga dihitung oleh Basset dkk (2001) untuk pipa percabangan antara titik masuk dan keluar percabangan.

Secara umum sistem perpipaan merupakan suatu sistem yang banyak digunakan untuk memindahkan fluida, baik cair, gas maupun campuran cair dan gas dari suatu tempat ke tempat yang lain. Sistem perpipaan yang

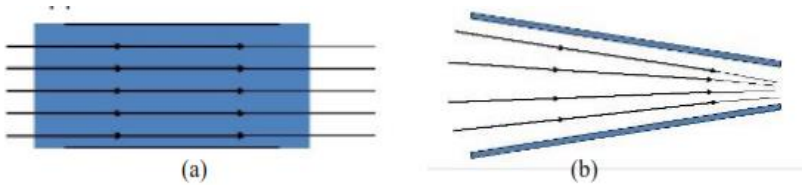
lengkap terdiri atas pipa, sambungan-sambungan (*fitting*), peralatan pipa (pompa), dan lain-lain.

Fluida

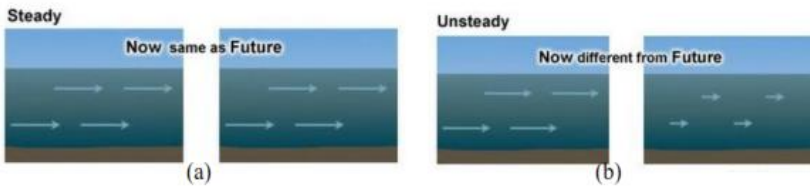
Seperti yang diketahui, fluida merupakan suatu zat yang mampu mengalir dan menyesuaikan diri dengan bentuk wadah tempatnya atau zat yang akan berubah bentuk / berdeformasi terus menerus. Fluida memiliki derajat kompresibilitas dan memberikan tahanan kecil terhadap perubahan bentuk (Wahyudi, 2014). Terdapat dua jenis aliran fluida dalam saluran yaitu aliran yang dibatasi oleh permukaan-permukaan keras dan aliran sekitar benda yang dikelilingi oleh fluida yang selanjutnya tidak terbatas (Ridwan, 1999),.

Aliran fluida dapat dikelompokkan berdasarkan sifat pergerakannya yaitu:

1. *Uniform Flow*, merupakan aliran fluida yang terjadi dimana besar dan arah dari vector kecepatan konstan dari suatu titik ke titik selanjutnya
2. *Non Uniform Flow*, merupakan aliran yang terjadi dimana besar dari arah vector kecepatan fluida selalu berubah terhadap lintasan saluran fluida tersebut, hal ini terjadi karena luas penampang medium fluida juga berubah.
3. *Steady Flow*, merupakan aliran yang terjadi apabila kecepatannya tidak dipengaruhi oleh waktu, sehingga kecepatannya konstan pada setiap titik pada aliran tersebut.
4. *Non Steady Flow*, merupakan aliran yang terjadi apabila ada suatu perubahan kecepatan aliran tersebut terhadap perubahan waktu.



Gambar 8.1 (a) *Uniform Flow* (b) *Non Uniform Flow* (Sumber: <https://slidetodoc.com/chapter-5-fluid-dynamic-classification-of-fluid-flow/>)



Gambar 8.2 (a) *Steady Flow* (b) *Unsteady Flow*
 (Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Steady-vs-Unsteady-flow-courtesy-to-COMET_fig4_341378189)

Fluida juga dapat digolongkan menjadi dua berdasarkan pengaruh tekanan terhadap volumenya, yaitu:

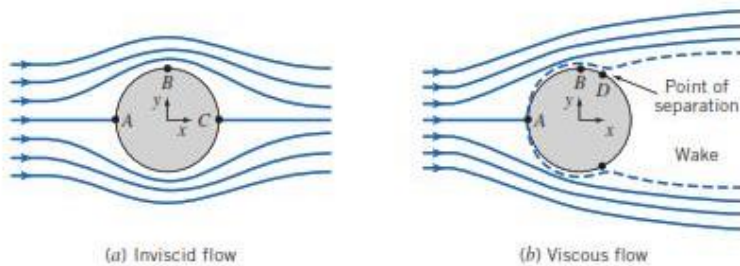
1. Fluida tak termampatkan (*Incompressible*), merupakan fluida yang tidak mengalami perubahan karena adanya perubahan tekanan.
2. Fluida termampatkan (*compressible*), merupakan fluida yang mengalami perubahan volume dikarenakan adanya perubahan tekanan.

Aliran fluida dapat dibagi menjadi beberapa bagian, diantaranya yaitu:

1. Aliran *Inviscid* dan *Viscous*

Pada aliran *inviscid* efek dari viskositas diabaikan $\mu = 0$, sedangkan pada aliran *viscous* untuk aliran fluida dimana viskositas sangat penting atau diperhatikan. Aliran *Inviscid* pada Gambar 3 sebagai suatu aliran fluida tanpa dipengaruhi gesekan terhadap dinding permukaan bola sehingga profil kecepatan aliran akan

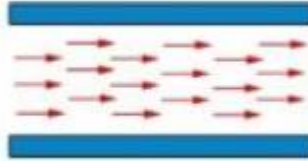
menyatu kembali setelah melewati titik B. Pada aliran *Viscous* terdapat titik separasi pada titik D, ketika aliran utama dilawan oleh *adverz pressure* maka kecenderungan aliran akan terseparasi/ terpisah karena momentum aliran utama tidak mampu melawannya sehingga memicu terjadinya *vortex* (kerugian karena berkurangnya aliran yang mengalir).



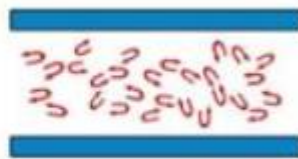
Gambar 3. Ilustrasi aliran *Inviscid* dan aliran *Viscous*.
(Sumber : Fox dan Mc. Donald, 2011)

2. Aliran Laminar dan Turbulent

Aliran fluida dibedakan menjadi aliran laminar dan turbulensi ditinjau berdasarkan strukturnya. Aliran laminar terjadi pada partikel-partikel fluida bergerak dalam lintasan-lintasan yang sangat teratur, yang mengakibatkan pertukaran momentum dari satu bagian ke bagian lainnya. Sedangkan turbulensi membangkitkan tegangan geser yang lebih besar di seluruh fluida dan mengakibatkan lebih banyak ketidakmampuan balikan atau kerugian (Wahyudi, 2014). Aliran laminar kecepatan pada suatu titik akan tetap terhadap waktu sedangkan pada aliran turbulensi kecepatannya akan mengindikasikan suatu fluktuasi yang acak.



Gambar 4. Aliran laminar (Sumber: (Munson et al., 1994)



Gambar 5. Aliran turbulen (Sumber: (Munson et al., 1994)

3. Aliran Internal dan Eksternal

Aliran internal merupakan aliran fluida dengan tempat aliran fluida dibatasi/dikelilingi permukaan padat sedangkan aliran eksternal adalah aliran yang berada di luar melalui objek/benda padat yang dikelilingi aliran fluida. Contoh aliran eksternal adalah aliran melalui permukaan padat, *airfall*, mobil kincir angin, lambung kapal, dan lain-lain(Ghurri, 2015).

4. Aliran 2 Fasa

Aliran 2 fasa merupakan aliran yang terjadi dalam suatu system yang mengandung cairan dan gas. Kriteria dari aliran ini ialah adanya perbedaan densitas dan viskositas. Aliran 2 fasa ini dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok yaitu aliran gas-cair dan cair-cair(Wahyudi, 2014).

Persamaan Dasar Aliran Fluida dalam Pipa

Bilangan *Reynolds* (Re)

Bilangan tidak berdimensi yang dapat mengelompokkan jenis aliran fluida disebut dengan bilangan *Reynolds*.

Bilangan Reynolds biasanya digunakan untuk membedakan antara aliran laminar dan aliran turbulen. Umumnya batasan antara aliran laminar dan turbulen terjadi pada bilangan *Reynolds* sebesar 2100. Secara umum. Bilangan *Reynolds* dapat ditulis sebagai berikut:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Keterangan: V = Kecepatan fluida yang mengalir (m/s)

D = Diameter dalam pipa (m)

ν = Kekentalan kinematik fluida (m²/s)

Lain halnya untuk fluida yang melewati pipa yang tidak berbentuk *circular*, maka diameternya menggunakan diameter hidrolis (Dh), dimana Dh dihitung menggunakan rumus:

$$Dh = \frac{4A}{\rho}$$

Persamaan Kontinuitas

Prinsip kekekalan massa dapat menghasilkan persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas menyatakan hubungan antara kecepatan fluida yang masuk pada suatu pipa terhadap kecepatan fluida yang keluar.

$$Q = A \cdot V$$

Keterangan: A = luas penampang (m²)

V = kecepatan (m/s)

Debit merupakan besaran yang menyatakan volume fluida yang mengalir tiap satuan waktu.

$$Q = \frac{v}{t}$$

Keterangan: v = volume (m³)

t = waktu (s)

Penggabungan dua persamaan tersebut diatas akan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{v}{t.A}$$

Keterangan: V = volume (m³)

t = waktu (s)

A = luas penampang (m²)

v = kecepatan (m/s)

Jika fluida bergerak dalam pipa yang mengalir dengan luas penampang yang berbeda maka volume yang mengalir:

$$V = A . v . t$$

$$A_1 . v_1 . t_1 = A_2 . v_2 . t_2$$

Densitas (ρ)

Densitas merupakan ukuran yang digunakan untuk konsentrasi suatu zat. Cara menentukan sifat tersebut ialah dengan menghitung ratio massa zat yang terkandung dalam suatu bagian tertentu terhadap volume bagian zat tersebut. Densitas bisa juga dikatakan sebagai jumlah atau kuantitas dari suatu zat. Semakin tinggi temperatur maka kerapatan suatu fluida dikatakan semakin berkurang yang disebabkan oleh adanya gaya-gaya kohesi dari molekul-molekul fluida semakin berkurang. Berdasarkan uraian tersebut maka dapat dikatakan bahwa nilai densitas dapat dipengaruhi oleh temperatur. Densitas sendiri dapat dinyatakan sebagai berikut (Wahyudi, 2014) :

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Keterangan: ρ = berat jenis (kg/m^3)

m = massa fluida (kg)

v = volume fluida (m^3)

Viskositas

Hasil dari gaya-gaya antara molekul yang timbul pada saat lapisan-lapisan fluida berusaha menggeser satu sama lainnya disebut dengan viskositas. Sifat zat cair melawan tegangan geser pada saat zat tersebut mengalir (Nurcholis, 2008).

Laju Aliran Massa

Debit air adalah volume fluida yang dikeluarkan tiap detiknya, persamaannya sebagai berikut:

$$Q = \frac{v}{t}$$

$$Q = V.A \text{ maka } V = \frac{Q}{A}$$

Dari debit tersebut maka selanjutnya akan didapatkan kecepatan aliran fluida. Setelah diketahui besar kecepatan aliran fluida, selanjutnya dapat menghitung besar laju aliran massa fluida (Wahyudi, 2014).

$$m = \rho.V.A$$

Keterangan : Q = debit aliran (m^3/s)

ρ = berat jenis (kg/m^3)

V = kecepatan aliran (m/s)

A = luas penampang (m^2) dengan $A = \frac{1}{4}\pi D^2$

v = volume fluida (m^3)

D = diameter pipa (m)

M = laju aliran massa fluida (kg/s)

Faktor Gesekan (λ)

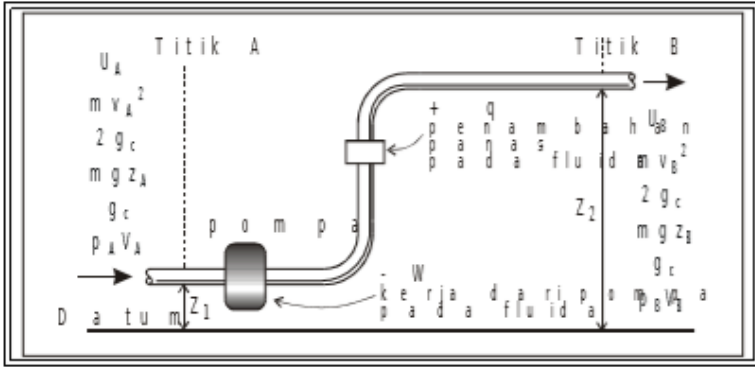
Gesekan pada pipa dapat menyebabkan hilangnya energi mekanik fluida. Gesekan tersebut yang akan menentukan aliran fluida dalam pipa, apakah termasuk aliran laminar atau turbulen. Gesekan juga dapat menimbulkan adanya panas pada pipa sehingga dapat merubah energi mekanik menjadi energi kalor (panas).

Koefisien gesek laminar dan turbulen berbeda dikarenakan distribusi kecepatan pada aliran laminar dan turbulen berbeda. Koefisien gesek dipengaruhi oleh kecepatan.

Persamaan Umum Kehilangan Tekanan Pada Pipa

Keseimbangan energi antara dua titik dalam sistem aliran fluida merupakan teori dasar dari persamaan fluida dalam pipa yang dikembangkan dengan persamaan energi. Persamaan ini mengikuti hukum konversi energi. Bunyi hukum konversi energi ialah energi yang masuk ke titik 1 dalam pipa ditambah dengan kerja yang dilakukan oleh fluida antara titik 1 dan 2 dikurangi dengan energi yang hilang antara titik 1 dan 2 sama dengan energi yang keluar dari titik 2.

Pada saat penggunaan prinsip mekanika fluida yaitu aliran fluida pada pipa selalu terjadi kerugian energi. Kerugian-kerugian tersebut umumnya disebabkan karena adanya gesekan dengan dinding, perubahan luas penampang, sambungan, katup-katup, belokan pipa dan kerugian-kerugian khusus lainnya.



Gambar 8.6 Sistem aliran fluida dalam pipa (Sumber: Wahyudi, 2014)

Gambar 8.6 merupakan sistem aliran fluida dalam pipa dengan menganggap sistem tersebut adalah *steady state*, maka kesetimbangan energi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 U_1 + p_1 \cdot V_1 + \frac{mv_1^2}{2g_c} + \frac{m \cdot g \cdot z_1}{g_c} + q \cdot w \\
 = U_2 + p_2 \cdot V_2 + \frac{m \cdot v_2^2}{2g_c} + \frac{m \cdot g \cdot z_2}{g_c}
 \end{aligned}$$

Keterangan: U = energi dalam yang dibawa oleh fluida

pV = Energi ekspansi tau energi kompresi yang terjadi selama aliran

mv_1^2 = energi kinetic

$m \cdot g \cdot z_1$ = Energi potensial

q = Perpindahan panas

W = kerja yang dilakukan fluida

z = ketinggian yang dihitung dari suatu datum tertentu.

Persamaan Darcy

Prinsip kehilangan energi akibat gesekan (friksi) dalam saluran pipa dapat dijelaskan pada persamaan Darcy-Weisbach sebagai berikut (BPSDM Kementerian PU, 2021):

$$hf = f \frac{L v^2}{d 2g}$$

keterangan: hf = kehilangan energi (m)

f = faktor gesekan yang tergantung dari angka *Reynolds* (diagram Moody), diameter dan kekasaran pipa

L = Panjang pipa (m)

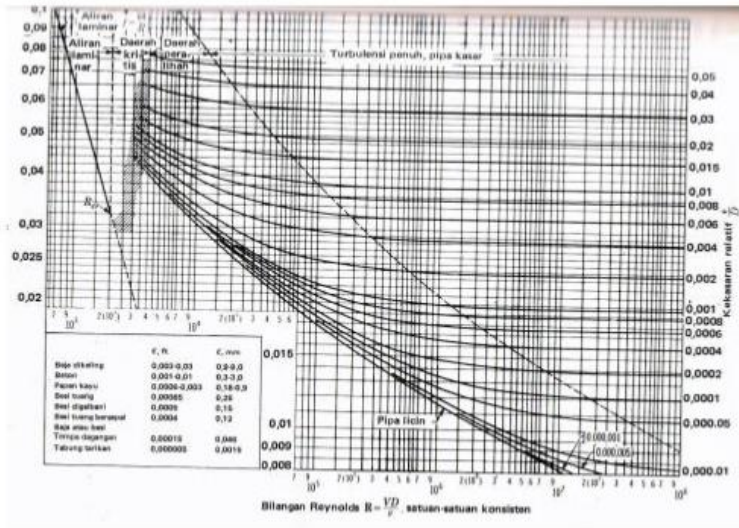
v = kecepatan aliran fluida dalam pipa (m/s)

d = diameter pipa (m)

g = gaya gravitasi

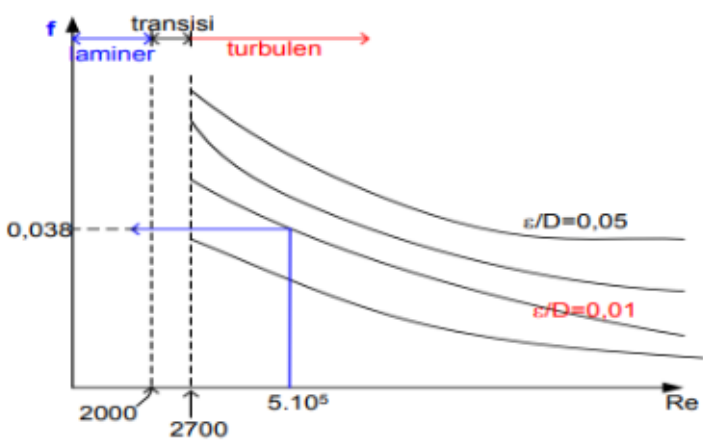
Berdasarkan rumus diatas, dapat dilihat bahwa kehilangan energi berbanding lurus dengan kecepatan aliran dan berbanding terbalik dengan diameter pipa. Semakin besar kecepatan aliran dalam pipa, maka semakin besar pula kehilangan energinya. Semakin kecil diameter pipa, maka semakin besar kehilangan energi, artinya bahwa dengan aliran debit yang sama dengan diameter pipa yang semakin kecil maka semakin besar kehilangan energi.

Berikut merupakan diagram Moody yang telah digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran fluida dalam pipa dengan menggunakan factor gesekan pipa.



Gambar 7. Diagram Moody (Sumber: BPSDM Kementerian PU, 2021)

Cara membaca diagram Moody:



Untuk aliran laminar dimana bilangan *Reynolds* kurang dari 2000, factor gesekan dihubungkan dengan bilangan *Reynolds*, dinyatakan dengan rumus:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Daftar Pustaka

- BPSDM Kementerian PU. (2021). Perencanaan Jaringan Pipa Transmisi dan Distribusi Air Minum. *Perencanaan Teknis Air Minum Dengan Menggunakan Program Aplikasi Pengenalan Program Epanet Modul 5*, 1–16.
- Dasar, K. (1999). *Aliran Fluida*. 2(2), 4–21.
- Ghurri, A. (2015). *Aliran Fluida Internal dan Eksternal*. 1–71.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1994). Fundamentals of fluid mechanics. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1201/b15874-2>
- Nurcholis, L. (2008). Perhitungan Laju Aliran fluida Pada Jaringan Pipa. *ISSN: 1693 - 3451 Vol. 7 Juni 2008*, 7(1), 13.
- Wahyudi. (2014). Bab ii dasar teori 2.1. *Pengaruh Perlakuan Panas Dan Penuaan*, 5–18.

Profil Penulis



Bergita Gela M Saka

Penulis lahir di Ujung Pandang (Makassar) pada tanggal 28 april 1984. Anak ke 3 dari 4 bersaudara ini merupakan lulusan Sarjana Geofisika di Universitas Hasanuddin Makassar tahun 2008 dan juga telah menyelesaikan pendidikan Pascasarjana jurusan ilmu Fisika di Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta tahun 2015. Saat ini penulis merupakan pengajar dan aktif melaksanakan tridharma pada Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Kristen Indonesia Toraja yang terletak di Kabupaten tana Toraja, Sulawesi Selatan. Matakuliah yang diajarkan yaitu Fisika Dasar, Statistika, Fisika Komputasi, Metode Numerik, Pembelajaran Online, Bahasa Inggris fisika, Mekanika, Pengetahuan lingkungan, Medan elektromagnetik, Fisika Modern dan Pengetahuan komputer. Buku yang telah diterbitkan yaitu Buku Panduan Praktikum Fisika untuk Perguruan Tinggi. Saat ini penulis juga aktif sebagai editor di jurnal Pendidikan Fisika Universitas Kristen Indonesia Toraja.

Email Penulis: bergitagelasukumusaka@gmail.com

SISTEM TERMAL PADA *HEAT EXCHANGER*

I Putu Tedy Indrayana

Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Udayana

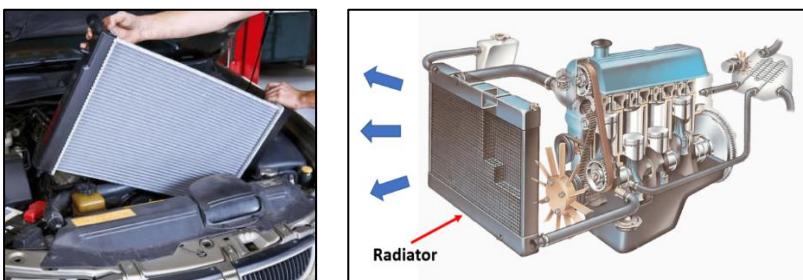
Pendahuluan

Temperatur suatu benda merepresentasikan derajat panas yang dimiliki benda tersebut. Semakin tinggi temperatur sebuah benda maka semakin tinggi pula derajat panas benda tersebut. Sebaliknya, semakin rendah temperatur benda maka semakin rendah derajat panasnya. Ketika sebuah benda memiliki dua titik yang mengalami perbedaan temperatur maka pada benda tersebut akan terjadi perpindahan panas dari titik yang bertemperatur lebih tinggi ke titik yang bertemperatur lebih rendah. Begitu juga ketika dua buah benda yang berbeda temperatur saling kontak, maka perpindahan panas akan terjadi dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah. Perpindahan panas tersebut dapat terjadi melalui tiga cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi, seperti yang telah secara detail dibahas pada Bab 3 – Bab 7.

Fenomena perpindahan panas terjadi pada hampir seluruh bagian kehidupan kita. Satu contoh yang paling sederhana adalah perpindahan panas matahari ke permukaan Bumi yang terjadi secara radiasi. Begitu pula dalam berbagai peralatan elektronik seperti kulkas, AC

(*air conditioning*), pemanas air, TV, radio, komputer, dan lain-lain juga terjadi perpindahan panas. Pada sistem otomotif, seperti mesin mobil dan sepeda motor beserta seluruh komponen didalamnya juga mengalami perpindahan panas, baik secara konduksi, konveksi, atau radiasi. Contoh menarik untuk sistem otomotif ini adalah radiator pada mobil (Gambar 9.1).

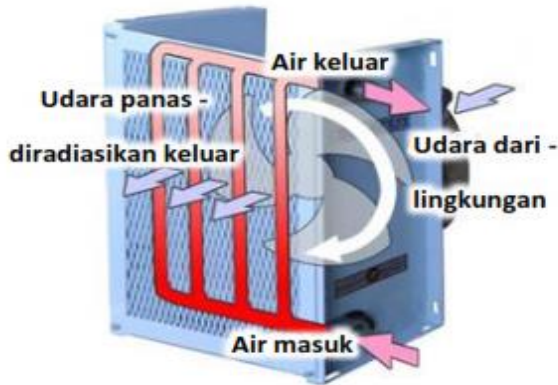
Radiator pada mobil adalah komponen sistem pendingin mesin mobil. Radiator berfungsi sebagai penstabil temperatur mesin mobil pada saat menyala sehingga tidak mengalami *overheat*. Radiator akan mengalirkan air (*coolant*) bertemperatur ruang ($\pm 30^{\circ}\text{C}$) ke seluruh bagian mobil melalui saluran-saluran yang sudah terangkai. Air tersebut akan menyerap panas yang dihasilkan dari proses pembakaran pada mesin tanpa kontak langsung bahkan bercampur (*mixing*) dengan udara panas yang diradiasikan oleh mesin. Akibatnya, pertukaran panas (*heat exchange*) akan terjadi antara air dan udara panas tersebut melalui dinding pemisah, yaitu dinding saluran air. Proses perpindahan panas dari mesin ke air terjadi secara konveksi. Temperatur air akan meningkat. Sementara itu, udara di sekitar mesin akan mengalami penurunan temperatur akibat pertukaran panas sehingga mampu menjaga stabilitas temperatur mesin mobil.



Gambar 9.1. Radiator mobil (kiri) dan ilustrasi rangkaian sistem pendingin mobil yang terangkai dengan radiator (kanan) (Material Handling Inc, 2022).

Setelah melalui seluruh bagian mesin, air panas akan kembali menuju radiator, yaitu bagian *upper tank* atau dikenal juga dengan istilah reservoir tank. Air panas akan ditampung terlebih dahulu di dalam *upper tank* lalu dialirkan menuju *lower tank* melalui inti radiator (*radiator core*). Ketika melalui inti radiator, air tersebut akan melepaskan panas secara paksa ke udara luar secara konveksi (*forced convection*). Pelepasan panas secara paksa terjadi dengan bantuan kipas yang terpasang di belakang radiator (*radiator core*) (Gambar 9.2). Dengan demikian, pada keadaan ini terjadi pertukaran panas antara air panas pada saluran inti radiator dan udara luar. Kemudian, air yang bertemperatur lebih rendah ini selanjutnya dialirkan menuju *lower tank* untuk kembali dialirkan seluruh bagian mesin mobil secara kontinu. Siklus aliran air tersebut terjadi secara kontinu selama mesin mobil menyala.

Berdasarkan uraian tersebut, radiator pada mobil berfungsi sebagai penukar panas (*heat exchanger*). Radiator merupakan salah satu contoh alat penukar panas yang paling banyak diketahui. Kulkas, AC (*air conditioning*), TV, komputer, serta pemanas ruangan juga menggunakan alat penukar panas (Gambar 9.3). Dengan demikian, alat penukar panas tersebut sangat penting dan menarik untuk dibahas dalam rangka memperoleh pemahaman secara mendalam tentang konsep dasar fisika yang diimplementasikan serta prinsip kerjanya.



Gambar 9.2. Ilustrasi mekanisme kerja radiator yang meradiasikan kalor dari air panas ke udara yang berasal dari lingkungan (KAMUI. Co. Ltd. (2022).



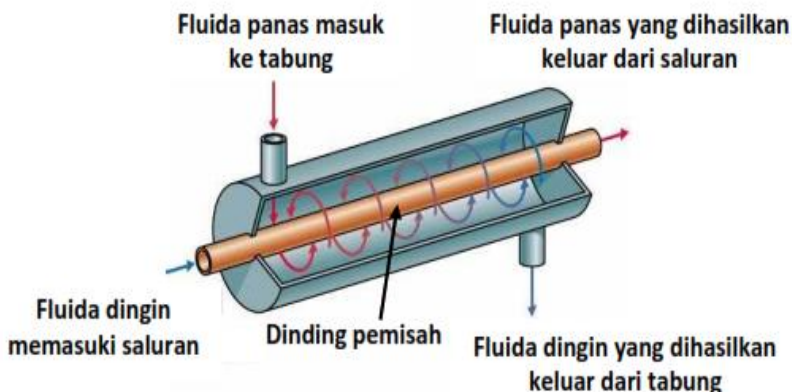
Gambar 9.3. Rangkaian penukar panas pada kulkas (kiri) dan *mother board* komputer (kanan) (Bolaji, 2020).

Pada bab ini diuraikan secara detail tentang definisi alat penukar panas, konsep-konsep fisika relevan yang diimplementasikan pada alat penukar panas, jenis-jenis alat penukar panas, analisis termal untuk setiap jenis alat penukar panas, serta berbagai contoh kasus dan

penyelesaiannya berkaitan dengan alat penukar panas. Oleh karena itu, para pembaca diharapkan mampu menguasai konsep-konsep fisika yang relevan serta menyelesaikan berbagai kasus berkaitan dengan alat penukar panas. Bahkan, setelah memahami isi bab ini, pembaca diharapkan mampu mendesain alat penukar panas yang efisien untuk berbagai aplikasi dalam kehidupan sehari-hari.

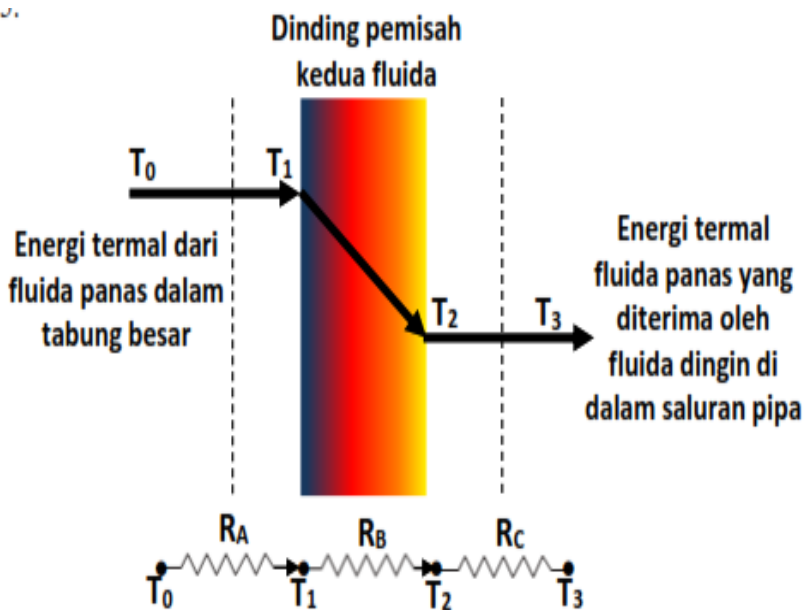
Definisi Penukaran Panas

Penukar panas adalah perangkat yang dirancang untuk tujuan memungkinkan terjadinya perpindahan panas dari satu medium ke medium lainnya yang memiliki temperatur berbeda. Medium ini berupa fluida, baik gas maupun cairan. Kedua fluida terpisah oleh dinding pemisah yang terbuat dari logam. Dinding pemisah ini berfungsi sebagai penghantar panas yang baik dari fluida yang bertemperatur lebih tinggi ke fluida yang bertemperatur lebih rendah (Gambar 9.4). Perpindahan panas pada kedua fluida melalui dinding pemisah terjadi melalui proses gabungan konveksi dan konduksi.



Gambar 9.4. Ilustrasi alat penukar panas dan proses pertukaran panas.

Berdasarkan Gambar 9.4, kedua fluida mengalir melalui dua saluran yang berbeda. Fluida dingin masuk ke dalam penukar panas melalui saluran pipa logam kecil. Sementara itu, pada tabung besar dimasukkan fluida panas. Fluida dingin akan menyerap panas yang dilepaskan oleh fluida panas melalui permukaan dinding saluran pipa kecil. Oleh karena itu, fluida dingin akan mengalami peningkatan temperatur dan keluar sebagai fluida panas. Sebaliknya, fluida panas akan mengalami penurunan temperatur dan keluar dari tabung besar sebagai fluida dingin. Secara termal, proses perpindahan panas sistem ini dapat diilustrasikan seperti Gambar 9.5.



Gambar 9.5. Ilustrasi perpindahan panas antara kedua fluida dalam penukar panas.

Klasifikasi Penukaran Panas

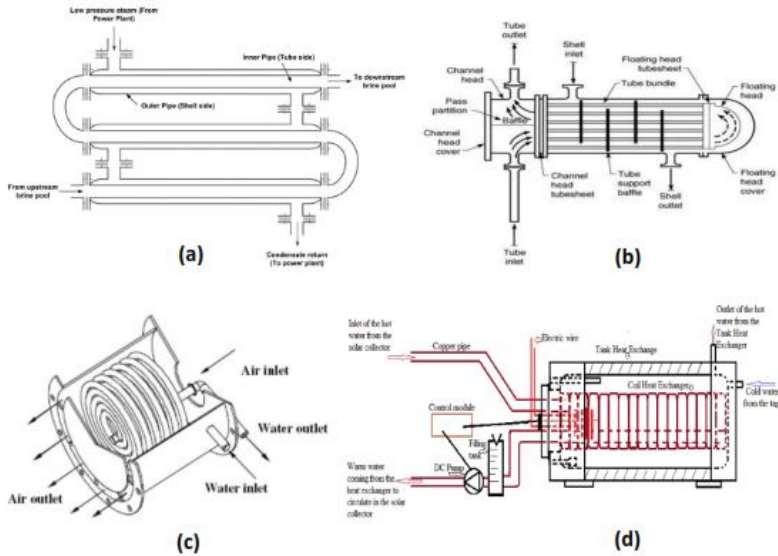
Klasifikasi penukar panas dapat ditentukan berdasarkan dua kriteria, meliputi:

1. Bentuk desain
2. Konfigurasi aliran fluida

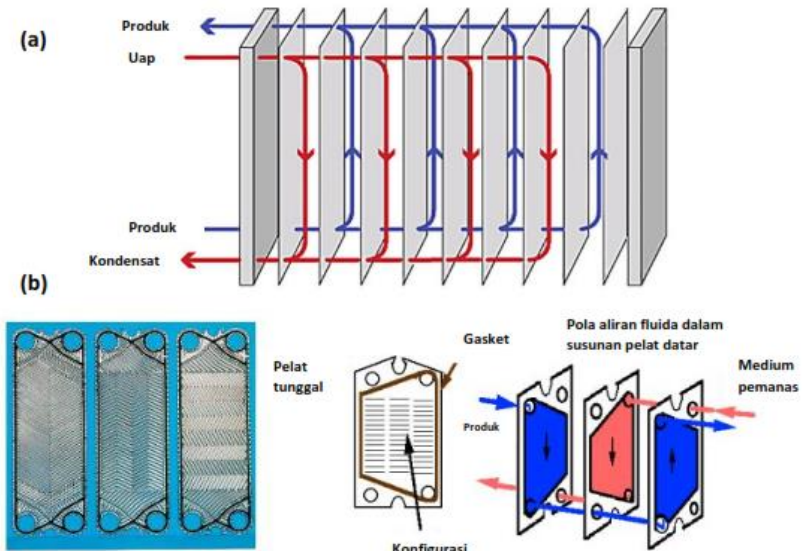
Klasifikasi penukar panas berdasarkan bentuk desain

Terdapat tiga tipe penukar panas berdasarkan bentuk desainnya, yaitu: 1) *tubular* (tabung); 2) pelat datar (*plate*); serta 3) permukaan yang diperluas (*extended surface*). Penukar panas tipe *tubular* memiliki bentuk seperti tabung dengan beragam susunan pipa saluran fluida, seperti *double-pipe*, *shell-and-tube*, *spiral tube*, dan *pipe-coils* (Gambar 9.6).

Sementara itu, penukar panas tipe pelat datar terdiri dari empat model, seperti *plate-heat-exchanger* (PHE), *spiral*, *plate coils*, dan *printed circuit*. Pelat penukar panas terbuat dari beberapa pelat logam tipis yang disusun secara paralel dan terdapat ruang pemisah antara dua pelat, seperti ditampilkan pada Gambar 9.7. Setiap pelat memiliki pola saluran aliran fluida yang berbeda-beda serta dikelilingi oleh gasket untuk mengontrol aliran fluida dan menghasilkan turbulensi untuk perpindahan panas yang lebih baik. Gasket diatur sedemikian rupa sehingga kedua fluida tidak saling terkontaminasi. Seperti yang terlihat dari Gambar 9.7, di antara setiap dua pelat yang berurutan terdapat ruang pemisah sehingga fluida panas dan fluida dingin dapat mengalir secara bersama melalui pelat. Dengan cara ini, fluida panas dan fluida dingin melewati setiap bagian dari penukar panas baik bagian depan maupun belakang pelat dan keduanya mengalami pertukaran panas.

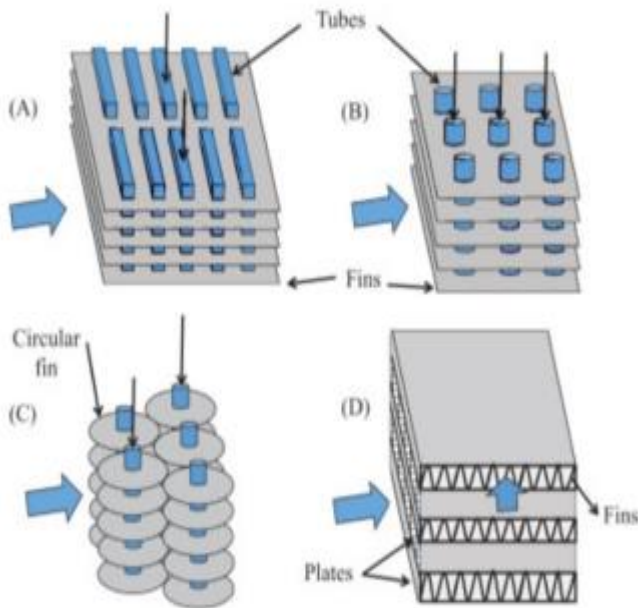


Gambar 9.6. Desain penukar panas tipe tubular: (a) *double-pipe* (Choi, 2016), (b) *shell-and-tube* (Kumareswaran, 2014), *spiral-tube* (Pote and Kulkarni, 2016), dan *pipe-coils* (Twite et al., 2019).



Gambar 9.7. (a) Desain penukar panas tipe pelat datar (*plate*) model *assembly* dan (b) detail desain setiap pelat datar, posisi gasket, serta konfigurasi pelat dalam *assembly* (Jouhara et al., 2018).

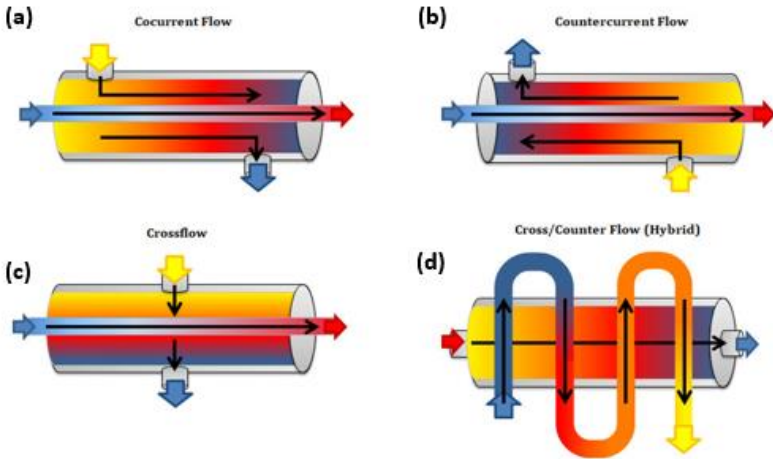
Penukar panas dalam bentuk permukaan diperluas (*extended surface*) adalah tipe penukar panas yang dimaksudkan untuk menambah luas permukaan perpindahan panas. Penukar panas ini memiliki *fin* (sirip) yang terhubung dengan permukaan utama alat. *Fin* tersebut digunakan untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan panas ketika koefisien perpindahan panas pada sisi fluida itu relatif rendah, sehingga laju total perpindahan panas akan meningkat. Penukar panas tipe ini memiliki dua jenis model, yaitu *plate-fin* dan *tube-fin* (Gambar 9.8). Penukar panas model *plate-fin* memiliki bentuk *fin* seperti pelat. Sementara penukar panas model *tube-fin* (diistilahkan juga sebagai *finned tube*) memiliki bentuk *fin* berupa tabung. Terdapat pula penukar panas yang memiliki *fin* berbentuk cakram (*circular fin*).



Gambar 9.8 Variasi bentuk *fin* penukar panas tipe permukaan diperluas (*extended surface*) (Balaji *et al.*, 2021).

Klasifikasi penukar panas berdasarkan konfigurasi aliran fluida

Berdasarkan konfigurasi aliran kedua fluida, maka terdapat empat jenis penukar panas, yaitu *cocurrent flow/ parallel flow*, *counter flow*, *cross flow*, dan *cross counter flow (hybrid)*, seperti ditampilkan pada Gambar 9.9. Pertama, penukar panas tipe *cocurrent flow/ parallel flow* memiliki arah aliran fluida saling parallel, seperti ditampilkan pada Gambar 9.9a. Fluida pada tabung besar masuk melalui *inlet* bagian atas, sementara keluar melalui *outlet* bawah. Kedua, penukar panas tipe *counter flow* memiliki arah aliran fluida saling berlawanan arah seperti ditampilkan pada Gambar 9.9b. Fluida pada tabung besar masuk melalui *inlet* pada bagian bawah dan keluar melalui *outlet* pada bagian atas. Kedua tipe penukar panas tersebut memiliki posisi *inlet* dan *outlet* pada tabung besar yang tidak segaris. Ketiga, penukar panas tipe *cross flow*. Pada prinsipnya, penukar panas tipe ini mirip dengan penukar panas tipe *parallel flow*, tetapi posisi *inlet* dan *outlet* pada tabung besar adalah segaris (Gambar 9.9c). Keempat, penukar panas tipe *hybrid*. Penukar panas tipe ini menggabungkan desain penukar panas tipe *cross flow* dan *counter flow*, seperti ditampilkan pada Gambar 9.9d.



Gambar 9.9 Tipe penukar panas berdasarkan konfigurasi aliran fluida (Unuareokpa *et al.*, 2021).

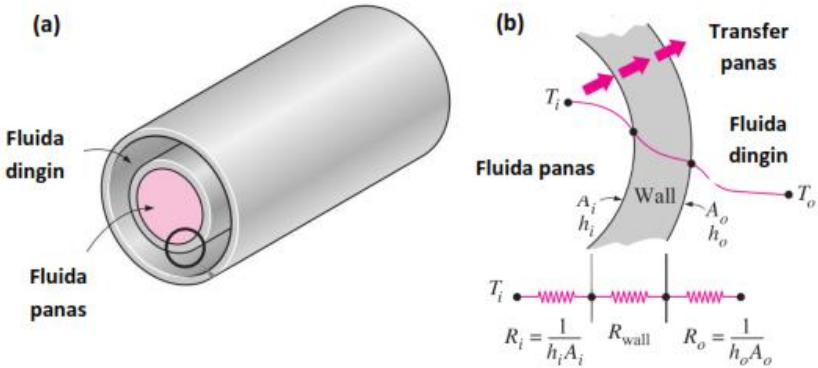
Koefesien Transfer Panas Gabungan

Pada penukar panas terjadi proses perpindahan panas dari fluida bertemperatur lebih tinggi ke fluida bertemperatur lebih rendah yang dibatasi oleh dinding pemisah. Dengan demikian, proses perpindahan panas yang terjadi tidak saja melalui satu cara yaitu konveksi, melainkan juga terjadi secara konduksi seperti diuraikan sebelumnya pada pendahuluan. Perpindahan panas yang terjadi bergantung pada nilai hambatan termal setiap medium, baik kedua fluida maupun material dari dinding pemisah (Dewadi, dkk., 2022). Misalkan kedua fluida dialirkan melalui penukar panas tipe *double-pipes* seperti diilustrasikan oleh Gambar 9.10a. Dengan demikian, rangkaian termal sistem ini dapat digambarkan seperti Gambar 9.10b.

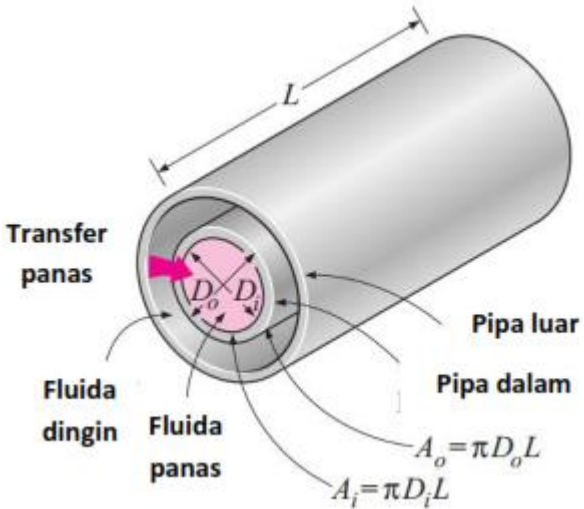
Dalam rangka menghitung nilai koefesien perpindahan panas gabungan, maka kita tentukan terlebih dahulu besaran-besaran fisika dari penukar panas itu. Misalkan lingkaran bagian dalam pipa yang dialiri fluida panas memiliki diameter D_i sedangkan diameter permukaan luarnya adalah D_o , seperti ditampilkan oleh Gambar 9.11.

Maka luas penampang pipa untuk permukaan bagian dalam dan luar masing-masing adalah $A_i = \pi D_i L$ dan $A_o = \pi D_o L$. Hambatan termal dinding pipa bagian dalam adalah

$$R_{dinding} = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi kL} \dots\dots\dots(9.1)$$



Gambar 9.10. Ilustrasi perpindahan panas secara gabungan konveksi dan konduksi dari fluida panas ke fluida dingin yang dibatasi dinding pemisah (Çengel, 2008).



Gambar 9.11. Ilustrasi diameter permukaan dalam D_i dan permukaan luar dari pipa dalam yang dialiri fluida panas (Çengel, 2008).

Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 9.10b, maka total hambatan termal penukar panas ini menjadi,

$$R = R_{total} = R_i + R_{dinding} + R_o$$

$$R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \dots\dots\dots(9.2)$$

dimana h_i dan h_o masing-masing menyatakan koefisien konveksi fluida panas dan fluida dingin. Perpindahan panas terjadi dari fluida panas ke fluida dingin. Besarnya laju perpindahan panas ini dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \dots\dots\dots(9.3)$$

U merupakan koefisien perpindahan panas gabungan dengan satuan $W/m^2 \cdot ^\circ C$. Satuan besaran U identik dengan satuan koefisien konveksi h . Besaran U_i menyatakan koefisien perpindahan panas yang dimiliki oleh permukaan dalam pipa. Sementara U_o menyatakan koefisien perpindahan panas permukaan luar pipa. Nilai $U_i \neq U_o$ karena $A_i \neq A_o$, tetapi $U_i A_i = U_o A_o$.

Berdasarkan persamaan (9.3), kita akan memperoleh nilai U secara gampang yaitu memenuhi persamaan (9.4),

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \dots\dots\dots(9.4)$$

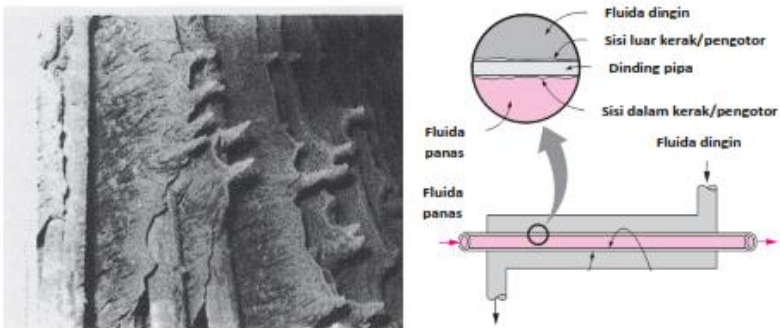
Ketika dinding pemisah fluida panas dan fluida dingin sangat tipis dan memiliki konduktivitas termal tinggi, maka kita dapat mengasumsikan bahwa $R_{dinding} \approx 0$, sehingga $A_i \approx A_o \approx A$. Oleh karena itu, nilai koefisien perpindahan panas gabungan dalam hal ini menjadi

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \dots\dots\dots(9.5)$$

Apabila $h_i \ll h_o$, maka $U \approx h_i$. Kondisi ini mengindikasikan bahwa transfer panas dari fluida panas ke fluida dingin terjadi dengan sangat mudah.

Faktor Pengotor

Perangkat penukar panas tidak selalu dalam keadaan baik, seperti adanya pengotor berupa karat maupun kerak yang terjadi pada saluran aliran fluida (Gambar 9.12). Kondisi ini tentu mempengaruhi nilai tahanan termal pipa. Umumnya, kerak terjadi pada bagian permukaan dalam pipa yang dialiri fluida. Kerak maupun karat tersebut bisa disebabkan oleh faktor kimiawi (korosi) maupun biologis (deposit jamur atau alga). Dengan demikian, pengotor tersebut akan berkontribusi terhadap peningkatan nilai tahanan termal sistem. Besarnya tahanan termal oleh pengotor setiap satuan luas permukaan pipa diistilahkan sebagai faktor pengotor (*fouling factor*) R_f .



Gambar 9.12. Pengotor pada permukaan dalam pipa (kiri) dan ilustrasi pada penukar panas (kanan) (Çengel, 2008).

Berdasarkan uraian tersebut, nilai tahanan termal total penukar panas seperti diungkapkan dengan persamaan (9.2) akan berubah menjadi,

$$R = \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \dots\dots\dots (9.6)$$

dimana $R_{f,i}$ dan $R_{o,i}$ masing-masing menyatakan faktor pengotor (*fouling factor*) untuk permukaan dalam pipa dan luar pipa. Dengan demikian, koefisien perpindahan panas gabungan seperti dimuat persamaan (9.4) akan menjadi,

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \dots\dots\dots(9.7)$$

Metode Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Perbedaan temperatur fluida panas dan fluida dingin sepanjang titik pada saluran penukar panas adalah berbeda-beda. Dengan demikian, kita misalkan nilai rata-rata perbedaan temperatur tersebut adalah ΔT_m . Besarnya laju perpindahan panas yang terjadi seperti persamaan (9.3) akan menjadi

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = U A_s \Delta T_m \dots\dots\dots(9.8)$$

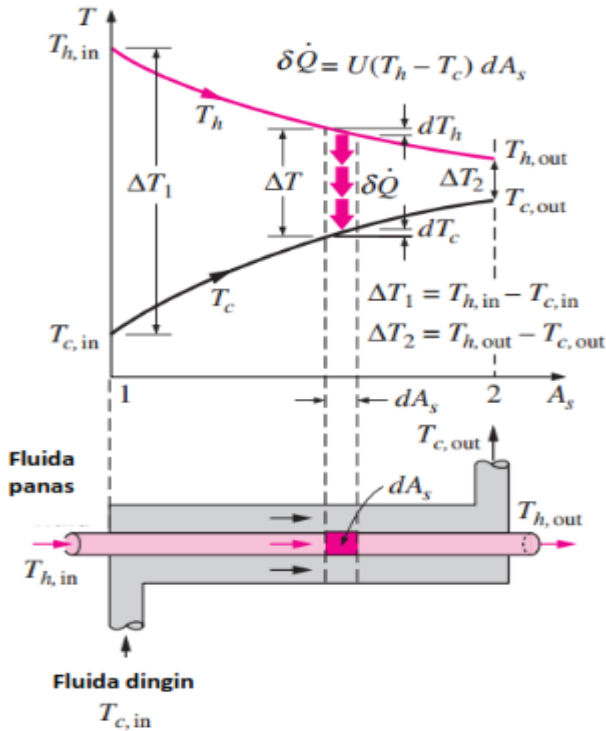
Misalnya, kita tinjau penukar panas tipe *parallel-flow double-pipe* seperti diilustrasikan pada Gambar 9.13, maka laju perpindahan panas yang terjadi berbanding lurus dengan log rata-rata beda temperatur antara kedua fluida (ΔT_{lm}), yaitu,

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = U A_s \Delta T_{lm} \dots\dots\dots(9.9)$$

dimana

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \dots\dots\dots(9.10)$$

ΔT_1 dan ΔT_2 masing-masing menyatakan beda temperatur fluida panas dan fluida dingin pada posisi *inlet* dan *outlet* penukar panas.



Gambar 9.13. Variasi temperatur fluida dalam penukar panas tipe *parallel-flow double-pipe* (Çengel, 2008).

Metode Number Of Transfer Unit (NTU)

Metode LMTD (*Log Mean Temperature Difference*) sangat cocok dan powerful digunakan untuk menganalisis laju perpindahan panas yang terjadi pada perangkat penukar panas asalkan perbedaan temperatur kedua fluida pada bagian *inlet* dan *outlet* telah diketahui. Akan tetapi, pada umumnya sering ditemukan kendala untuk mendapatkan nilai perbedaan temperatur fluida pada bagian *outlet* penukar panas tersebut. Oleh karena itu, pada kondisi ini metode LMTD sangat sulit dipakai menganalisis laju perpindahan panas diantara kedua fluida. Sementara itu, metode alternatif untuk menyelesaikan kasus ini adalah metode NTU (*Number Of Transfer Unit*). Metode ini

didasarkan atas sebuah parameter tak berdimensi yaitu efektivitas transfer panas (*heat transfer effectiveness*) ε ,

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{mak}} \dots\dots\dots(9.11)$$

dimana Q_{mak} menyatakan laju transfer panas maksimum dan \dot{Q} menyatakan laju transfer panas aktual. Berdasarkan Gambar 9.13, maka nilai ε dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{mak}} = \frac{C_c(T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min}(T_{h,out} - T_{h,in})} \dots\dots\dots(9.12)$$

dimana C_c menyatakan laju kapasitas panas fluida dingin dan C_{min} menyatakan laju minimum kapasitas panas fluida (*the minimum fluid capacity rate*). Hubungan matematis C_c terhadap C_{min} dirumuskan sebagai berikut,

$$c = \frac{C_c}{C_{min}} \dots\dots\dots(9.13)$$

yang menyatakan rasio kapasitas panas fluida. Dengan demikian, nilai NTU dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} = \frac{UA_s}{(\dot{m}c_p)_{min}} \dots\dots\dots(9.14)$$

NTU menyatakan besarnya laju perpindahan panas pada permukaan seluas A_s . Jadi, semakin besar nilai NTU maka semakin besar ukuran permukaan perangkat penukar panas tersebut. Secara umum, nilai efektivitas transfer panas dirumuskan sebagai,

$$\varepsilon = \varepsilon(NTU, c, \text{susunan aliran}) \dots\dots\dots(9.15)$$

Dengan demikian, nilai ε akan berbeda untuk setiap tipe susunan (konfigurasi) aliran kedua fluida seperti diilustrasikan pada Gambar 9.9.

Daftar Pustaka

- Balaji, C., Srinivasa, B., & Gedupudi, S. (2021). *Heat Transfer Engineering: Heat Exchanger*. Academic Press: 199 – 231. Tersedia pada: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128185032000071>.
- Bolaji, B. O. (2020). Theoretical Assessment of New Low Global Warming Potential Refrigerant Mixtures as Eco-Friendly Alternatives in Domestic Refrigeration Systems. *Scientific African*. 10. e00632.
- Çengel, Y.A. (2008). *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer* (Second Edition). United State of America: The McGraw-Hill Company, Inc.
- Choi, S. H. (2016). On the Brine Re-utilization of a Multi-stage flashing (MSF) Desalination Plant. *Desalination*. 398: 64–76.
- Dewadi, F. M., dkk. (2022). *Perpindahan Panas: Dasar dan Praktis dari Perspektif Akademisi dan Praktisi*. Bandung: Indie Press.
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S.A. (2018). Waste Heat Recovery Technologies and Applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 6: 268–289.
- KAMUI. Co. Ltd. (2022). Radiator Type Heat Exchanger. *Artikel*. Tersedia pada: <http://www.kamui.co.jp/english/products/rajeta/>
- Kumareswaran, S. (2014). Design of a Shell and Tube Heat Exchanger. *Report*. Department of Chemical and Process Engineering, University of Moratuwa.
- Material Handling Inc. (2022). Forklift Engine Cooling Tips. *Artikel*. Tersedia pada: <https://mhiusa.net/forklift-engine-cooling-tips/>

- Pote, S.S & Kulkarni, P. P. (2016). Review of Experiment on Spiral Heat Exchanger. *International Journal for Innovative Research in Multidisciplinary Field*. 2(8): 171-174.
- Twite, M. F., Snyman, L.W., Koker, J. D., & Yusuff, D. (2019). Development of a Large-Area, Low-Cost Solar Water-Heating System for South Africa With a High Thermal Energy Collection Capacity. *Journal of Energy in Southern Africa*. 30(1): 49-59.
- Unuareokpa, O. J., Madu, J. C., Edo-Taiwo, S. A., & Peters, S. D. (2021). Design, Modelling and Construction of a Shell and Tube Heat Exchanger for Laboratory Experiments. *Proceeding of the 1st International Conference of the Nigerian Institution of Professional Engineers and Scientists*. 7th-8th Oct. 2021: 223-240.

Profil Penulis



I Putu Tedy Indrayana

Penulis lahir di Desa Gunaksa, Kecamatan Dawan, Kabupaten Klungkung Bali pada tanggal 23 Agustus 1991. Penulis menyelesaikan studi sarjana dari Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA Universitas Pendidikan Ganesha Singaraja pada tahun 2013 dan jenjang magister di Program studi S2 Fisika Departemen Fisika FMIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada tahun 2016. Saat ini penulis menjadi Staf Dosen Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Udayana. Penulis menekuni bidang Fisika Material dan Instrumentasi. Selain meneliti, penulis juga aktif menulis buku ajar, referensi, serta monograf dibidang fisika dan kependidikan fisika. Bagi pembaca yang ingin mengetahui profil penulis secara lebih detail maka dapat mengunjungi laman website penulis melalui link <https://bit.ly/SidewiTedyFisika>.

Email Penulis: tedyindrayana@gmail.com

PENUKAR KALOR JENIS *SHELL AND TUBE*

Popi Purwanti

Universitas Indraprasta PGRI

Penelitian Penukaran Kalor

Penukar kalor (*heat exchanger*) ialah suatu alat yang memungkinkan perpindahan panas dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai uap lewat panas (*super heated steam*) dan air biasa sebagai air pendingin (*cooling water*). Penukar kalor dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran kalor terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung begitu saja. Penukar kalor sangat luas dipakai dalam industri seperti kilang minyak, pabrik kimia maupun petrokimia, industri gas alam, refrigerasi, pembangkit listrik.

Jenis Penukaran Kalor

Jenis umum dari penukar kalor, biasanya digunakan dalam kondisi tekanan relatif tinggi, yang terdiri dari sebuah selongsong yang di dalamnya disusun suatu anulus dengan rangkaian tertentu (untuk mendapatkan luas permukaan yang optimal). Fluida mengalir di selongsong maupun di anulus sehingga terjadi

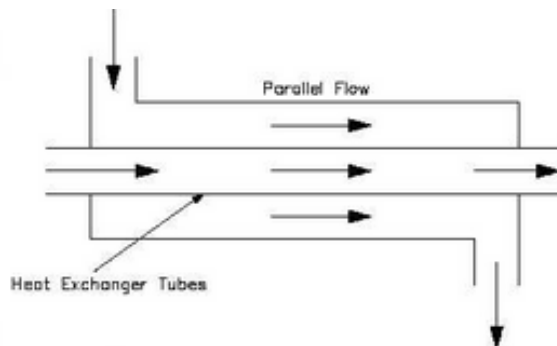
perpindahan kalor antar fluida dengan dinding anulus sebagai perantara. Beberapa jenis rangkaian anulus misalnya; triangular, segi empat, dll.

Jenis Aliran Penukar Kalor Tunggal

Alat penukar kalor (*heat exchanger*) secara tipikal diklasifikasikan berdasarkan susunan aliran (*flow arrangement*) dan tipe konstruksi. Penukar kalor yang paling sederhana adalah satu penukar kalor yang mana fluida panas dan dingin bergerak atau

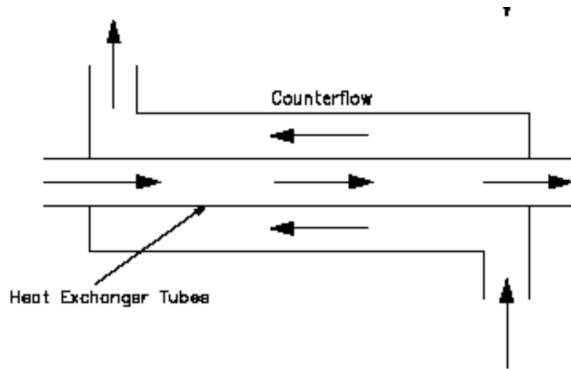
mengalir pada arah yang sama atau berlawanan dalam sebuah pipa berbentuk bundar (atau pipa rangkap dua).

Pada susunan aliran sejajar (*parallel-flow arrangement*) yang ditunjukkan gambar 10.1 adalah fluida panas dan dingin masuk pada ujung yang sama, mengalir dalam arah yang sama dan keluar pada ujung yang sama.



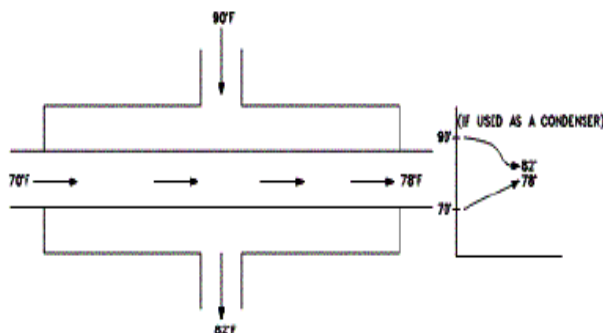
Gambar 10.1 Tipe aliran sejajar
Sumber: Mestri, M.T. (2016)

Pada susunan aliran berlawanan (*counterflow arrangement*) yang ditunjukkan gambar 10.2, kedua fluida tersebut pada ujung yang berlawanan, mengalir dalam arah yang berlawanan, dan keluar pada ujung yang berlawanan.



Gambar 10.2 Tipe aliran berlawanan
 Sumber: Mestri, M.T. (2016)

Pada susunan aliran silang (*cross flow*) adalah apabila fluida-fluida yang mengalir sepanjang permukaan bergerak dalam arah saling tegak lurus.



Gambar 10.3 Tipe aliran berlawanan
 Sumber: Mestri, M.T. (2016)

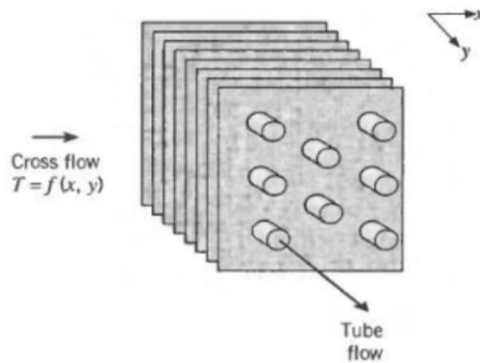
Jenis Penukar Kalor Kompak

Jenis penukar kalor ini dirancang untuk memungkinkan area permukaan perpindahan panas yang besar per satuan volume. Rasio luas permukaan perpindahan panas dari penukar panas dengan volumenya disebut densitas luas β . Penukar panas dengan $\beta > 700$. Tingkat transfer panas yang tinggi antara cairan dalam volume yang kecil. Oleh karena itu, mereka paling cocok untuk aplikasi

dengan batasan ketat pada berat dan volume penukar panas. Sebagian besar digunakan dalam penukar panas gas menjadi gas dan gas menjadi cair untuk menangkalkan koefisien perpindahan panas yang rendah yang terkait dengan aliran fluida dengan luas permukaan yang meningkat. Jenis aliran ini dapat diklasifikasikan sebagai aliran tidak dicampur atau dicampur.

a. Aliran Campur

Fluida yang mengalir didalam tabung digunakan untuk memanaskan, sedangkan fluida yang dipanaskan dialirkan menyilang berkas tabung. Aliran yang menyilang berkas tabung disebut arus campuran karena dapat bergerak dengan bebas selama proses perpindahan panas.

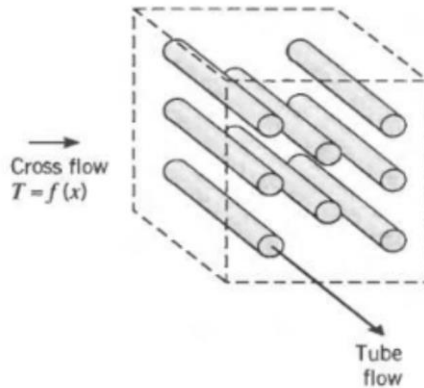


Gambar 10.4 Tipe Aliran Campur
Sumber: Franks.P.Incropera, (1996)

b. Aliran Tidak Campur

Untuk penukaran kalor ini, fluida pemanas dan fluida yang akan dipanaskan terkurung didalam saluran-saluran sehingga fluida tidak dapat bergerak bebas selama proses perpindahan kalor. fluida disebut fluida tak campur karena sirip-sirip

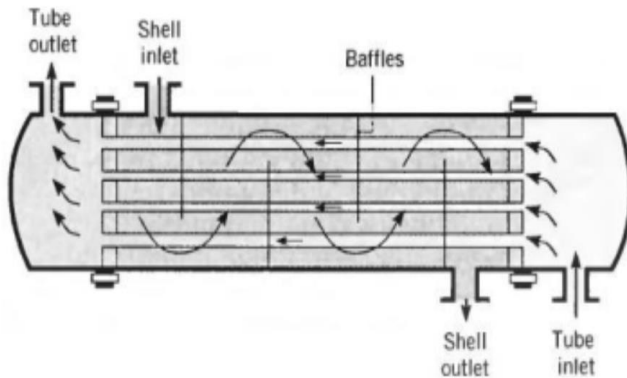
menghalangi gerakan fluida dalam satu arah (y) gerak tersebut melintang ke arah aliran utama (x).



Gambar 10.5 Tipe Aliran Tak Campur
Sumber: Franks.P.Incropera, (1996)

Jenis Alat Penukar Kalor

Berdasarkan konstruksinya alat penukar kalor dengan desain dan konfigurasi yang sederhana. Terdiri dari dua pipa atau tabung silinder, salah satu pipa berukuran besar dan salah satu pipa berukuran lebih kecil. Pipa kecil dipasang di tengah pipa besar. Masing-masing pipa dialiri fluida dengan temperatur yang berbeda sehingga terjadi perpindahan kalor. Kasus ini temperatur fluida bervariasi terhadap sumbu (x) dan (y). Gerakannya memungkinkan untuk fluida bercampur dan variasi temperaturnya semata-mata hanya pada arah aliran utama. Karena aliran dalam pipa tidak bercampur, maka kedua fluida tidak bercampur untuk alat penukar kalor bersirip, sementara untuk satu fluida campur dan satu fluida lagi tidak bercampur untuk alat penukar kalor tidak bersirip. Sifat dari kondisi pencampuran itu secara signifikan bisa mempengaruhi performa penukar kalor.



Gambar 10.6 Penukar kalor Shell and Tube dengan satu laluan shell dan satu laluan tube
 Sumber: Franks.P.Incropera, (1996)

Berdasarkan kerapatan permukaannya (*Surface Compactness*) penukar kalor dapat dibagi menjadi empat macam pada fase cair dengan gas, yaitu :

1. *Compact Heat Exchanger*

Penukar kalor Kompak mempunyai kerapatan luas permukaan perpindahan panas lebih besar dari $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ atau diameter hidraulik $D_h \leq 6\text{mm}$ untuk pengoperasian pada aliran sisi gas, dan $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ atau lebih tinggi untuk pengoperasian pada aliran sisi cair.

2. *Meso Heat Exchanger*

Penukar kalor Kompak mempunyai kerapatan luas permukaan perpindahan panas lebih besar dari $3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ atau diameter hidraulik $100\mu\text{m} \leq D_h \leq 1\text{mm}$.

3. *Mikro Heat Exchanger*

Penukar kalor Mikro mempunyai kerapatan luas permukaan perpindahan panas lebih besar dari $15000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ atau diameter hidraulik $1\mu\text{m} \leq D_h \leq 1000\text{mm}$.

4. *Shell and Tube Heat Exchanger*

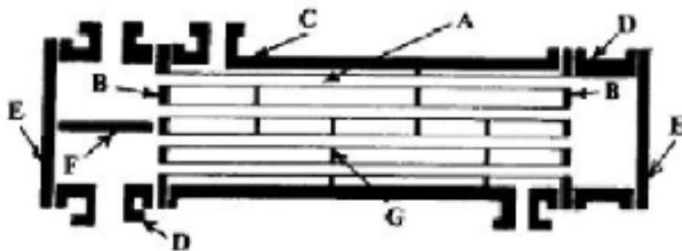
Penukar kalor *Shell and Tube* mempunyai kerapatan luas permukaan perpindahan panas kurang dari 100 m²/m³ pada satu sisi fluida dengan pipa biasa.

Penyuar Kalor Jenis *Shell and Tube*

Penukar kalor jenis *shell and tube* (*shell and tube heat exchanger*) menjadi satu tipe paling mudah dikenal, merupakan jenis yang paling umum digunakan untuk peralatan perpindahan kalor didalam industri kimia dan industri lainnya yang terhubung dengan pemindahan kalor. Penukar jenis *shell and tube* terdiri dari berkas pipa (*tube*) yang ditutupi oleh silindercangkang (*shell*). Ujung-ujung pipa dipasang tube sheet, yang memisahkan sisi *shell* dan sisi cairan pipa (*tube*). Baffle yang terdapat dalam *shell* digunakan untuk mengarahkan aliran fluida dan menyokong pipa.

Komponen Pada *Shell and Tube*

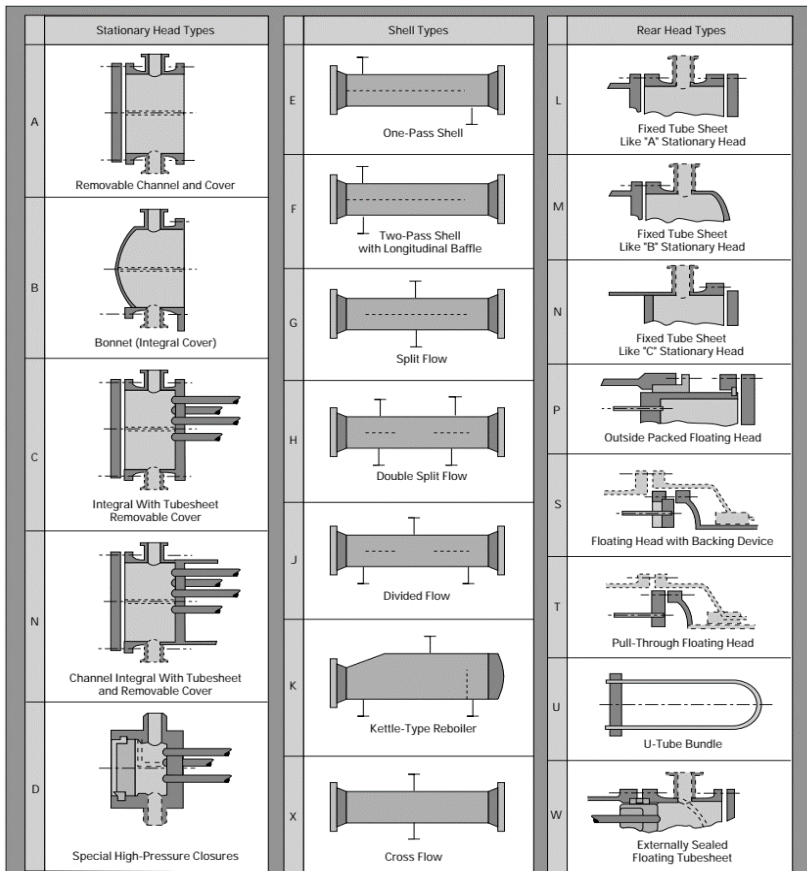
Alat penukar kalor tipe *Shell and Tube* memiliki komponen yang sangat berpengaruh pada konstruksinya. Adapun beberapa komponen dari alat penukar kalor tipe ini adalah:



Gambar 10.6 Komponen *Shell and Tube*
Sumber: Mukherjee, R. (1998)

- A: Tubes
- B: Tube Sheet
- C: Shell and shell side nozzles
- D: Tube side channels and nozzles
- E: Channel Covera
- F: Pass divider
- G: Baffles

Jenis-jenis Alat Penukar Kalor Shell and Tube



Gambar 10.7 Jenis shell dan tube berdasarkan TEMA
Sumber: Mukherjee, R. (1998)

Diameter pipa didalam cangkang (*shell*)

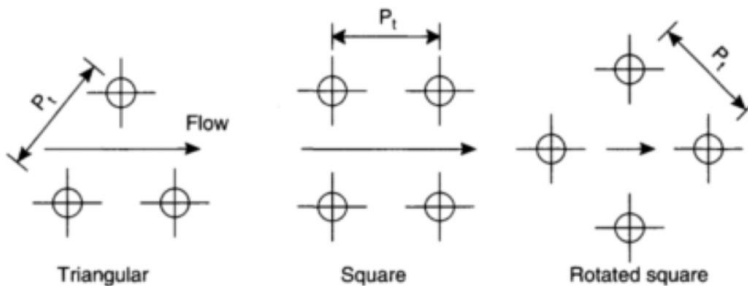
Duis Diameter pipa merupakan faktor penting dalam perancangan panas jenis *shell and tube*. Pemilihan diameter pipa akan mempengaruhi beberapa besaran yang digunakan dalam perhitungan penukar panas seperti: kecepatan aliran fluida, koefisien perpindahan panas sisi pipa, koefisien perpindahan panas sisi cangkang, pressure drop sisi pipadan sisi cangkang, dll. Diameter kecil banyak dipilih untuk kebanyakan fungsi, karena akan membentuk susunan yang rapi, dan karena lebih murah. Sedangkan dengan menggunakan pipa yang lebih besar alat penukar panas akan lebih mudah untuk dibersihkan dengan metode mekanis dan biasanya ukuran pipa yang besar dipilih untuk cairan pengotor yang banyak. Pemilihan ketebalan pipa biasanya digunakan untuk menahan tekanan dalam pipa dan memberikan penyisihan korosi yang memadai. Salah satu standar yang biasa digunakan dalam menentukan diameter dan ketebalan pipa adalah TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturing Association*). Standar diameter dan ketebalan dinding pipa yang direkomendasikan oleh TEMA untuk penukar panas jenis *shell and tube* seperti pada Tabel 10.1.

Tabel 10.1. Dimensi standar ketebalan pipa

Outside diameter (in)	0.405	Wall thickness
0.54		0.068
0.675		0.088
0.84		0.091
1.05		0.109
1.315		0.113
1.66		0.133
1.9		0.14
2.375		0.145
2.875		0.154

Susunan Berkas Pipa

Susunan berkas pipa merupakan salah satu faktor penting dalam perancangan penukar panas. Ada tiga macam susunan berkas pipa pada penukar panas jenis shell and tube, yaitu susunan sejajar (*aligned*), susunan selang-seling (*staggered*) dan susunan persegi putar (*rotated square*) lihat Gambar 10.8.



Gambar 10.8 Susunan berkas pipa
Sumber: Mukherjee, R. (1998)

Pola *staggered* dan pola *rotated square* memberikan tingkat perpindahan panas yang lebih tinggi, tetapi dengan penurunan tekanan yang lebih tinggi daripada *square pattern* (pola persegi). Pola persegi (*square*), atau pola persegi putar (*rotated square*), digunakan untuk cairan fluida yang berat, dimana perlu mekanisme pembersihan dibagian luar pipa. Jarak antar pipa (*pitch*) yang disarankan bervariasi mulai dari 1,25 kali diameter luar pipa hingga 3 kali diameter luar pipa. Pemilihan jarak pipa biasanya memperhitungkan penggunaan penukar panas dan penurunan tekanan maksimum yang diijinkan.

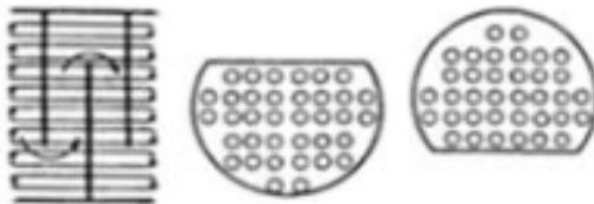
Sekat (*Baffle*)

Sekat merupakan komponen penukar panas jenis shell and tube yang berfungsi sebagai penumpu berkas pipa dan pengatur arah aliran fluida sehingga fluida tidak selalu bergerak sejajar dengan arah pipa. Jarak sekat

yang semakin dekat akan meningkatkan koefisien perpindahan panas dan memperbesar penurunan tekanan (*pressure drop*) sisi cangkang (*shell*). Jarak antar sekat biasanya memiliki Batasan maksimum dan minimum untuk menghasilkan desain penukar panas yang baik dari segi termohidrolik dan konstruksi. Ada dua macam sekat yang sering digunakan pada penukar panas jenis shell and tube, yaitu:

1. Sekat lingkaran terpotong (*segmental baffle*)

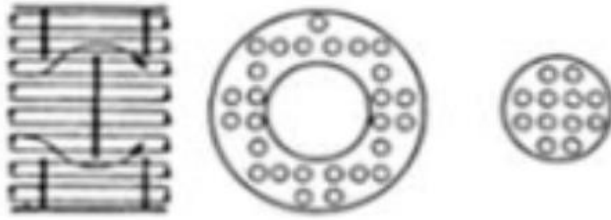
Sekat jenis ini paling umum digunakan pada penukar panas jenis shell and tube. Perbandingan bagian yang terpotong (*baffle cut ratio*) pada sekat jenis ini bermacam-macam (15%, 25%, 35%, dan 45%) dan yang paling banyak digunakan adalah sekat dengan *baffle cut ratio* 25%.



Gambar 10.9 Sekat lingkaran terpotong
Sumber: Costa, A. L., & Queiroz, E. M. (2008)

2. Sekat cakram dan donat (*disc and doughnut baffle*)

Penurunan tekanan fluida kerja yang diakibatkan oleh jenis sekat ini sangat rendah (60% lebih rendah) jika dibandingkan dengan sekat yang biasa digunakan. Biasanya sekat jenis ini digunakan untuk desain dengan batasan penurunan tekanan maksimum yang sangat rendah.



Gambar 10.10 Sekat cakram dan donat
Sumber: Costa, A. L., & Queiroz, E. M. (2008)

Secara skematik jenis sekat lingkaran terpotong (*segmental baffle*) dan sekat cakram dan donat (*disc and doughnut baffle*) dapat dilihat pada Gambar 2.12. Jarak baffle yang biasa digunakan berkisar 0,2 - 1,0 kali diameter shell. Jarak baffle yang dekat akan memberikan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi tetapi dengan kerugian penurunan tekanan yang lebih tinggi juga. Jarak optimal biasanya antara 0,3 hingga 0,5 kali diameter shell. TEMA merekomendasikan bahwa jarak antar sekat minimum tidak boleh lebih dari $1/5$ diameter dalam cangkang dan harus lebih dari 50 mm.

Perancangan Penukar Kalor *Shell and Tube*

Data dari laju aliran, temperature masuk dan temperature keluar dan tekanan operasi kedua fluida. Data ini dibutuhkan terutama untuk fluida gas jika densitas gas tidak diketahui. Untuk fluida berupa cairan, data tekanan operasi tidak terlalu dibutuhkan karena sifat-sifatnya tidak banyak berubah apabila tekanannya berubah. Langkah- langkah yang biasa dilakukan dalam merencanakan atau mendesain alat penukar kalor adalah:

1. Penentuan heat duty (Q) yang diperlukan penukar kalor yang direncanakan harus memenuhi atau melebihi syarat ini.

-
2. Menentukan ukuran (size) alat penukar kalor dengan perkiraan yang masuk akal untuk koefisien perpindahan kalor keseluruhannya.
 3. Menentukan fluida yang akan mengalir di sisi *tube* atau *shell*. Biasanya sisi tube direncanakan untuk fluida yang bersifat korosif, beracun, bertekanan tinggi, atau bersifat mengotori dinding. Hal ini dilakukan agar lebih mudah dalam proses pembersihan atau perawatannya.
 4. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan jumlah *tube* yang digunakan.
 5. Menentukan ukuran shell. Langkah ini dilakukan setelah kita mengetahui jumlah tube yang direncanakan. Kemudian perkiraan jumlah pass dan tube pitch yang akan digunakan.
 6. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan jumlah baffle dan jarak antar baffle yang akan digunakan. Biasanya baffle memiliki jarak yang seragam dan minimum jaraknya $1/5$ dari diameter shell tapi tidak kurang dari 2 inchi.
 7. Langkah yang terakhir adalah memeriksa kinerja dari alat penukar kalor yang telah direncanakan. Hitung koefisien perpindahan panas di sisi tabung dan sisi *shell*. Hitung factor pengotornya apakah sesuai dengan standar yang diizinkan, dan penurunan tekanan di sisi *tube dan shell*.

Daftar Pustaka

- Bizzy, I., & Setiadi, R. (2013). Studi perhitungan alat penukar kalor tipe shell and tube dengan program heat transfer research inc.(HTRI). *Jurnal Rekayasa Mesin Universitas Sriwijaya*, 13(1), 67-76.
- Costa, A. L., & Queiroz, E. M. (2008). Design optimization of shell-and-tube heat exchangers. *Applied thermal engineering*, 28(14-15), 1798-1805.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. 6, p. 116). New York: Wiley.
- Mahdi, J.M., Mohammed, H.I., Hashim, E.T., Talebizadehsardari, P., & Nsofor, E.C. (2020). Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system. *Applied Energy*, 257, 113993.
- Mestri, M.T. (2016). *Experimental Investigation of Parallel and Counter flow Heat Exchanger*.
- Mukherjee, R. (1998). Effectively design shell-and-tube heat exchangers. *Chemical Engineering Progress*, 94(2), 21-37.
- Ozden, E., & Tari, I. (2010). Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 1004-1014.
- SEPTIAN, B., Rey, P. D., & AZIZ, A. (2021). Desain dan rancang bangun alat penukar kalor (heat exchanger) jenis shell dan tube. *Baut dan Manufaktur*, 3(01), 52-60.
- Yang, X., Wang, X., Liu, Z., Luo, X., & Yan, J. (2021). Effect of fin number on the melting phase change in a horizontal finned shell-and-tube thermal energy storage unit. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.

Profil Penulis



Popi Purwanti

Ketertarikan penulis terhadap fisika dimulai pada tahun 2009 silam. Hal tersebut membuat penulis mengikuti lomba Olimpiade Sains tingkat Kabupaten Bekasi pada tahun 2009 dan 2010. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di prodi PENDIDIKAN FISIKA pada tahun 2012 di UNIVERSITAS INDRAPRASTA PGRI. penulis menyelesaikan studi S2 di prodi PENDIDIKAN MIPA PROGRAM PASCA SARJANA UNIVERSITAS INDRAPRASTA PGRI. Menjadi Dosen mulai 2019 dan sebelumnya mengajar SMK Negeri dengan bidang fisika di jurusan Teknik.

Penulis memiliki kepakaran dibidang Pendidikan fisika, laboratorium virtual dan media pembelajaran fisika. Untuk penunjang mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis pun aktif sebagai peneliti dibidang kepakarannya tersebut. Beberapa penelitian yang telah dilakukan didanai oleh internal perguruan tinggi dan juga Kemenristek DIKTI. Peneliti tertarik menulis buku ini untuk berkontribusi bersama teman sejawat di universitas. Penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara yang sangat tercinta ini. Semoga penulis selalu rajin dan dimampukan untuk menulis yang bermanfaat.

Email Penulis: popi.purwanti20@gmail.com

Jan Setiawan

Universitas Pamulang-Badan Riset dan Inovasi Nasional

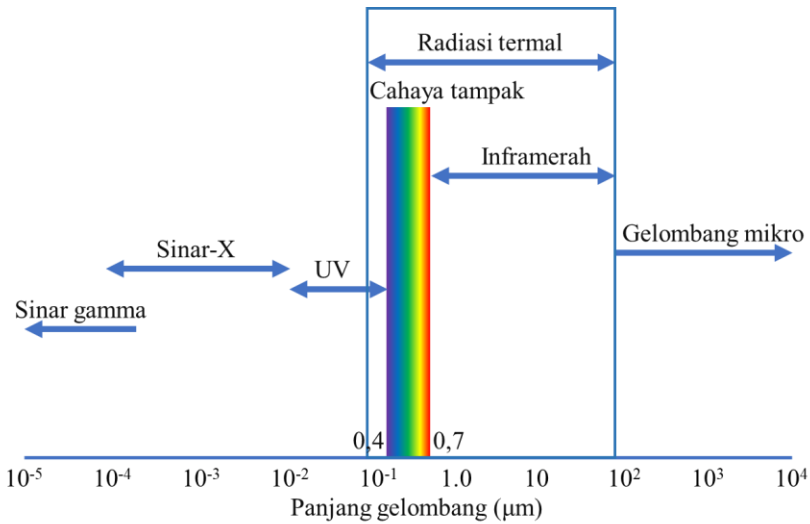
Pendahuluan

Energi memancar dari berbagai benda dalam segala kondisi dan setiap saat. Radiasi termal muncul dari fluktuasi acak dalam kondisi kuantisasi energi internal dari bahan yang pemancarnya. Temperatur adalah ukuran tingkat energi dalam benda, dan fluktuasi alamiah dari energi internal ini dapat dikaitkan dengan temperatur benda. Pada saat energi dipancarkan, akan merambat dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bila gelombang ini menumbuk benda maka energi gelombang elektromagnetik akan hilang sebagian dan meningkatkan energi dalam dari benda yang menerimanya, peristiwa ini dikenal sebagai *absorpsi*. Jumlah radiasi yang dipancarkan dan diserap merupakan fungsi dari sifat fisik dan kimia bahan sebagaimana juga tingkat energi dalam yang merupakan kuantifikasi dari temperaturnya.

Gelombang elektromagnetik juga dapat mengalami hamburan pada saat merambat melalui media yang heterogen. Hamburan gelombang yang dialami seperti refleksi, refraksi, difraksi, atau kombinasi dari fenomena tersebut tanpa meningkatkan energi dalam bahan atau media yang menghamburkannya. Setiap bahan akan

memancarkan dan menyerap radiasi dalam segala kondisi, dimana selalu ada transfer energi radiasi, meskipun dalam sistem isothermal (Howell, Mengüç, Daun, & Siegel, 2021). Bila dua objek dengan temperatur yang berbeda, maka akan ada transfer energi radiasi total diantara keduanya, meskipun tidak ada benda lain diantara keduanya. Sebagai contoh adalah radiasi yang dipancarkan matahari, yang merambat melalui media vakum di angkasa dan sebagian radiasinya mengalami penyerapan dan hamburan ketika memasuki atmosfer bumi.

Radiasi dapat dipancarkan melalui berbagai mekanisme. Untuk radiasi termal disebabkan oleh fluktuasi yang spontan dari kuantifikasi tingkat energi, dan besaran rerata dari tingkat ini dibuktikan dengan perubahan temperatur benda. Fenomena ini benda dengan radiasi termal dikenal berpijar (*incandescence*). Fenomena radiasi juga terjadi pada kondisi yang tidak melibatkan termal. Radiasi semacam ini, melibatkan reaksi kimia yang dikenal sebagai *chemiluminescence*, dan *bioluminescence*. Radiasi yang dipancarkan tidak melibatkan termal, dimana transisinya disebabkan oleh reaksi kimia dan biokimia dan tidak disebabkan oleh transisi termal yang acak atau temperatur benda pemancarnya. Mekanisme lainnya yang bukan bagian dari perpindahan radiasi termal adalah *electroluminescence*. Fenomena ini disebabkan oleh bahan yang menerima arus listrik seperti pada *light emitting diodes* (LED). Pada Gambar 11.1 diberikan spektrum radiasi gelombang elektromagnetik. Dalam bab ini pembahasan hanya difokuskan pada radiasi termal.



Gambar 11.1 Spektrum gelombang elektromagnetik (panjang gelombang dalam vakum) (Han & Wright, 2022).

Kecepatan merambat radiasi elektromagnetik dalam vakum sebesar

$$c = \lambda v = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1)$$

dengan λ adalah panjang gelombang dan v adalah frekuensi dari radiasi.

Ketika energi radiasi sampai ke suatu permukaan, sebagian akan diserap, dipantulkan maupun ditransmisikan. Didefinisikan α sebagai fraksi radiasi yang diserap atau absorptivitas, ρ sebagai fraksi radiasi yang dipantulkan atau reflektivitas dan τ sebagai fraksi radiasi yang ditransmisikan atau transmisivitas (Frederick & Eugene, 1997). Dengan demikian hubungan ketiga fraksi ini adalah,

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

Pada kebanyakan benda padat yang tidak bersifat transparan akan menghambat rambatan radiasi sehingga persamaannya menjadi,

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3)$$

Untuk kebanyakan cairan dapat menggunakan persamaan 3, meskipun memiliki sifat transparannya bergantung pada ketebalan. Sedangkan untuk gas secara umum sedikit memantulkan energi radiasi sehingga persamaan 2 menjadi,

$$\alpha + \tau = 1 \quad (4)$$

Perpindahan Kalor Radiasi Termal

Konsep yang sangat penting dalam perpindahan kalor dari radiasi adalah radiasi benda hitam. Benda hitam merupakan salah satu yang memungkinkan menyerap seluruh radiasi yang mengenainya. Secara teknis nilai $\alpha = 1$ dan untuk $\rho = \tau = 0$. Kebutuhan kualifikasi lebih lanjut dari definisi benda hitam ini adalah berlaku untuk semua panjang gelombang dan radiasi datang dari berbagai arah. Konsep benda hitam ini sebagai pembanding dimana benda menyerap seluruh radiasi. Sedangkan pada benda nyatanya akan memiliki kemampuan menyerap radiasi yang lebih rendah. Sebagai contoh, benda hitam adalah, lampu hitam, platina hitam, emas hitam dan cat spesial (Balaji, 2014). Dalam kesetimbangan termal, sebuah benda akan memancarkan energi sebesar yang diserapnya. Dengan demikian emisivitas (ϵ) dari benda hitam sangat tinggi (bernilai 1), meskipun benda dalam kenyataannya hanya akan lebih rendah. Daya emisi total untuk permukaan hitam (permukaan ideal) (Frederick & Eugene, 1997) adalah,

$$E_b = \pi I_b = \sigma T^4 \quad (5)$$

sedangkan pada permukaan nyata adalah,

$$E = \pi I = \varepsilon \sigma T^4 \quad (6)$$

dimana I adalah intensitas, σ adalah konstanta Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) dan T adalah temperatur. Sebuah permukaan abu-abu merupakan sebuah permukaan yang emisivitas permukaannya bergantung pada panjang gelombang. Permukaan yang dapat membaaur merupakan permukaan dengan emisivitas permukaannya bergantung pada arah. Secara umum data eksperimen menunjukkan bahan yang tidak konduktif memiliki emisivitas lebih tinggi dibandingkan bahan konduktif. Intensitas merupakan fungsi dari panjang gelombang dan temperatur Plank menuliskan daya emisi benda hitam menjadi,

$$E_{\lambda,b} = \pi I_{\lambda,b} = \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 (e^{hC_0/\lambda kT} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (7)$$

$$C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2 \quad (8)$$

$$C_2 = hC_0/k = 1,4389 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (9)$$

dengan C_0 adalah kelajuan cahaya dalam vakum, h adalah konstanta Plank ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) dan k adalah konstanta Boltzmann ($1,3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$). Bila diintegrasikan untuk seluruh panjang gelombang pada persamaan 7 akan diperoleh kembali persamaan 5 dan 6. Emisivitas permukaan beberapa benda diberikan pada Tabel 11.1.

Tabel 11.1. Emisivitas permukaan pada temperatur kamar (Venkateshan,2021)

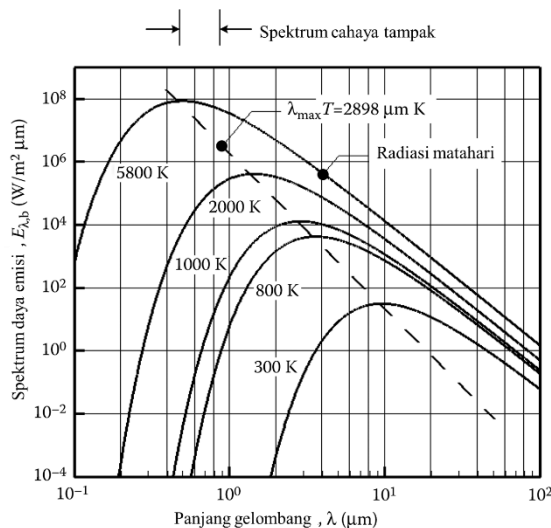
Permukaan	Emisivitas (ϵ)
Aluminium (permukaan dianodisasi)	0,77
Aluminium (permukaan teroksidasi)	0,11
Aluminium (permukaan dipoles)	0,05
Aluminium (permukaan kasar)	0,17
Gelas	0,92
Emas	0,02
Besi oksida	0,56
Kertas	0,93
Aluminium foil	0,03
Aluminium mylar	0,03
Beton	0,85
Tembaga (permukaan teroksidasi)	0,87
Tembaga (permukaan dipoles)	0,04
Air	0,95
Asbestos	0,94
Kuningan	0,22
Kuningan (permukaan dipoles)	0,03
Bata (gelap)	0,90
Lempung-api	0,75
Porselain	0,92
Perak murni (dipoles)	0,020-0,032
Baja galvanis	0,23
Baja teroksidasi	0,79
Baja dipoles	0,07

Permukaan	Emisivitas (ϵ)
Keramik	0,97
Tungsten	0,03
Palster	0,98

Distribusi daya emisi benda hitam memiliki nilai maksimum berkaitan pada panjang gelombang λ_{max} yang bergantung temperatur. Dengan melakukan diferensiasi terhadap $I_{\lambda,b}$ terhadap panjang gelombang dan hasil mendekati nol, diperoleh hukum pergeseran Wien,

$$\lambda_{max}T = C_3 = 2898 \mu\text{m.K} \quad (10)$$

dengan C_3 adalah tetapan Wien. Perubahan temperatur benda, intensitas radiasi benda akan berubah, sehingga terjadi pergeseran. Pergeseran ini menunjukkan pada peningkatan temperatur, intensitas maksimumnya akan menggeser ke panjang gelombang yang lebih pendek. Ilustrasi dari pergeseran Wien diberikan pada Gambar 11.2.



Gambar 11.2. Spektrum daya emisi benda hitam (Han & Wright, 2022).

Terlihat radiasi matahari memiliki puncak disekitar panjang gelombang cahaya tampak. Perlu diperhatikan, warna merupakan fungsi dari serapan dan refleksi, bukan emisi.

Hukum Kirchhoff Radiasi Termal

Permukaan nyata memiliki daya emisi total yang lebih rendah dari benda hitam. Rasio daya emisi total sebuah benda terhadap benda hitam pada temperatur yang sama merupakan emisivitas total yang dituliskan sebagai,

$$\varepsilon \equiv \frac{E}{E_b} \quad (11)$$

Untuk emisivitas monokromatik, digunakan untuk permukaan nyata pada panjang gelombang tertentu dituliskan sebagai,

$$\varepsilon_\lambda \equiv \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}} \quad (12)$$

Dalam kondisi kesetimbangan energi dimana absorpsi sebanding dengan emisivitas dikenal sebagai Hukum Kirchhoff (Pitts & Sissom, 2011) yang dituliskan sebagai,

$$\alpha = \frac{E}{E_b} = \varepsilon \quad (13)$$

persamaan ini diperoleh dalam kondisi kesetimbangan termal dalam penutup hitam yang isothermal. Untuk nilai monokromatik Hukum Kirchhoff (Pitts & Sissom, 2011) dapat dituliskan sebagai,

$$\alpha_\lambda(T) = \varepsilon_\lambda(T) \quad (14)$$

yang spesifik terhadap panjang gelombang tertentu.

Contoh Soal

1. Total energi radiasi yang jatuh pada suatu permukaan benda sebesar 2200 W/m^2 . Dari jumlah ini, 450 W/m^2 dipantulkan dan 900 W/m^2 diserap benda. Tentukan transmisivitasnya!

Jawab:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

$$\tau = 1 - \alpha - \rho$$

$$\tau = 1 - \frac{900}{2200} - \frac{450}{2200} = 0,386$$

Jadi nilai transmisivitasnya sebesar 0,386.

2. Tentukan daya emisi total dari benda hitam pada temperatur (a) 900 K dan (b) 1200 K.

Jawab:

$$(a) E_b = \sigma T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot (900)^4 = 37,2 \text{ kW/m}^2$$

$$(b) E_b = \sigma T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot (1200)^4 = 117,6 \text{ kW/m}^2$$

3. Sebuah bola dengan diameter 4,0 cm yang bertindak sebagai benda hitam. Bola ini dalam keadaan setimbang dengan sekelilingnya dan menyerap 30 kW dari lingkungannya. Tentukan temperatur bola tersebut!

Jawab:

- Luas permukaan bola (A) = $4\pi r^2 = 4\pi(0,02)^2 = 5,03 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.
- Temperatur benda hitam dihitung dari,

$$E_b = A\sigma T^4$$

$$T^4 = \frac{E_b}{A\sigma} = \frac{30000}{5,03 \times 10^{-3} \cdot 5,67 \times 10^{-8}} = 1,05 \times 10^{14}$$

$$T = \sqrt[4]{1,05 \times 10^{14}} \approx 3200 \text{ K}$$

-
4. Sebuah bola dengan diameter 3,0 cm memiliki temperatur tetap 600 °C. Dengan asumsi sebagai benda hitam, tentukan energi yang diradiasikan dari permukaannya!

Jawab:

- Luas permukaan bola (A) = $4\pi r^2 = 4\pi(0,015)^2 = 2,83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.
- Ubah 600 °C ke dalam Kelvin dengan menambahkan 273 menjadi 873 K.
- Hitung energi dengan persamaan berikut,

$$E_b = A\sigma T^4 = 2,83 \times 10^{-3} \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot (873)^4 = 93,2 \text{ W}$$

5. Luas permukaan benda sebesar 1,80 m² dengan emisivitasnya sebesar 0,85 memiliki temperatur permukaan 37 °C dan berada pada ruangan dengan temperatur 20 °C. Tentukan energi yang hilang per menit dari benda.

Jawab:

- Ubah temperatur dalam Kelvin
 - 20 °C = 293 K
 - 37 °C = 310 K
- Hitung perubahan energi dengan persamaan berikut,

$$E = \varepsilon A\sigma(T_{benda}^4 - T_{ruangan}^4)$$

- Untuk kelihangan energi persatuan waktu persamaan ini menjadi,

$$\begin{aligned} E &= \varepsilon A\sigma(T_{benda}^4 - T_{ruangan}^4)\Delta t \\ &= (0,85) (1,80) (5,67 \times 10^{-8}) (310^4 - 293^4) (60) = 9,71 \text{ kJ} \end{aligned}$$

-
6. Dari sebuah benda hitam yang dijaga temperaturnya pada 120 °C, tentukan (a) daya emisi total, (b) panjang gelombang pada saat daya emisi monokromatik maksimumnya, dan (c) daya emisi monokromatik maksimumnya.

Jawab:

$$(a) E_b = \sigma T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot (120 + 273)^4 = 1,35 \text{ kW/m}^2$$

$$(b) \lambda_{max} T = 2898 \text{ } \mu\text{m.K}$$

$$\lambda_{max}(393 \text{ K}) = 2898 \text{ } \mu\text{m.K}$$

$$\lambda_{max} = 7,374 \text{ } \mu\text{m}$$

- (c) Menggunakan hukum Plank

$$E_{\lambda,b} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

dengan $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, dan $C_2 = 1,4389 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m.K}$, penyelesaiannya adalah,

$$\begin{aligned} E_{\lambda,b} &= \frac{3,742 \times 10^8}{(7,374)^5 (e^{1,4389 \times 10^4 / 7,374 \times 393} - 1)} \\ &= 120,58 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m} \end{aligned}$$

7. Tentukan daya emisi monokromatik pada 2,30 μm dari benda hitam pada temperatur 1600 K.

Jawab:

Menggunakan hukum Plank,

$$E_{\lambda,b} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

dengan $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, dan $C_2 = 1,4389 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m.K}$, penyelesaiannya adalah,

$$\begin{aligned} E_{\lambda,b} &= \frac{3,742 \times 10^8}{(2,30)^5 (e^{1,4389 \times 10^4 / 2,30 \times 1600} - 1)} \\ &= 118,89 \text{ kW/m}^2 \cdot \mu\text{m} \end{aligned}$$

8. Sebuah permukaan dengan karakteristik $\varepsilon_\lambda = 0,3$ untuk $0 \leq \lambda \leq 4 \mu\text{m}$ dan $\varepsilon_\lambda = 0,7$ untuk $4 \mu\text{m} \leq \lambda$, dikondisikan tetap pada temperatur 500 K di dalam tungku tertutup yang dindingnya dikondisikan tetap pada temperatur 1500 K. Abaikan pengaruh konveksi.
- (a) Tentukan emisivitas total permukaan dan absorptivitasnya!
- (b) Tentukan fluks panas total ke permukaan! ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

Jawab:

(a) $\lambda_{max}T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

$$\lambda_{max}(500 \text{ K}) = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

$$\lambda_{max} = 5,796 \mu\text{m}$$

$$\text{Untuk } 0 \leq \lambda \leq 4 \mu\text{m}, E_\lambda = 0,3E_{b\lambda}$$

$$\text{Untuk } 4 \mu\text{m} \leq \lambda, E_\lambda = 0,7E_{b\lambda}$$

$$\text{Emisivitas total } \varepsilon = 0,3 F_{0-4} + 0,7(1 - F_{0-4})$$

dengan F_{0-4} untuk $\lambda T_s = 2000 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ adalah 0,066728. (Han & Wright, 2022)

$$\varepsilon = 0,3 F_{0-4} + 0,7(1 - F_{0-4}) = 0,673$$

$$\text{Absorptivitas } \alpha = 0,3 F_{0-4} + 0,7(1 - F_{0-4})$$

dengan F_{0-4} untuk $\lambda T_s = 6000 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ adalah 0,737818. (Han & Wright, 2022)

$$\alpha = 0,3 F_{0-4} + 0,7(1 - F_{0-4}) = 0,405$$

(b) $q''_{total} = aG - E = a\sigma T_{tungku}^4 - \varepsilon\sigma T_{permukaan}^4$

$$q''_{total} = \sigma(aT_{tungku}^4 - \varepsilon T_{permukaan}^4)$$

$$= 5,67 \times 10^{-8} \cdot [0,405 (1500)^4 - 0,673 (500)^4] = 1,16 \times 10^5 \text{ W/m}^2.$$

Latihan Soal

1. Total energi radiasi yang tiba pada suatu permukaan sebesar 4000 W/m^2 . Jika diketahui 1000 W/m^2 dipantulkan dan 2700 W/m^2 diserap oleh benda, maka tentukan transmisivitasnya!

-
2. Total energi radiasi yang tiba pada suatu permukaan sebesar 2400 W/m^2 . Jika diketahui 800 W/m^2 diteruskan dan 1100 W/m^2 diserap oleh benda, maka tentukan reflektivitasnya!
 3. Sebuah lubang di tungku bertindak sebagai benda hitam. Luasan lubang tersebut sebesar $1,00 \text{ cm}^2$, dan temperturnya sebesar 2000 K . Tentukan berapa besar energi yang diradiasikan keluar dari lubang tersebut setiap detiknya!
 4. Sebuah bola dengan jari-jari $3,0 \text{ cm}$ yang bertindak sebagai benda hitam. Bola ini berada dalam kesetimbangan dengan lingkungannya dan menyerap daya dari radiasi sebesar 20 kW . Tentukan temperatur bola tersebut!
 5. Tentukan daya emisi total dari benda hitam pada (a) 800 K dan (b) 1800 K .
 6. Tentukan daya emisi monokromatik pada $3,5 \mu\text{m}$ dari benda hitam pada temperatur 2000 K !
 7. Sebuah benda hitam memiliki temperatur 600 K , tentukan (a) daya emisi total, (b) panjang gelombang pada saat daya emisi monokromatik maksimum, dan (c) daya emisi monokromatik maksimum.
 8. Sebuah permukaan dengan karakteristik $\epsilon_\lambda = 0,4$ untuk $0 \leq \lambda \leq 3 \mu\text{m}$ dan $\epsilon_\lambda = 0,8$ untuk $3 \mu\text{m} \leq \lambda$, dikondisikan tetap pada temperatur 500 K di dalam tungku tertutup yang dindingnya dikondisikan tetap pada temperatur 1500 K . Abaikan pengaruh konveksi.
 - a. Tentukan emisivitas total permukaan dan absorptivitasnya!
 - b. Tentukan fluks panas total ke permukaan! ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
-

Daftar Pustaka

- Balaji, C. (2014). *Essentials of radiation heat transfer*. Wiley.
- Frederick, J. B., & Eugene, H. (1997). *Schaum's outline of Theory of College Physics 9th Edition*. McGraw Hill.
- Han, J. C., & Wright, L. M. (2022). *Analytical Heat Transfer 2nd edition*. CRC Press.
- Howell, J. R., Mengüç, M. P., Daun, K., & Siegel, R. (2021). *Thermal radiation heat transfer 7th edition*. CRC press.
- Pitts, D. R., & Sissom, L. E. (2011). *Schaum's Outline of Heat Transfer 2nd Edition*. McGraw Hill.
- Venkateshan, S. P. (2021). *Heat Transfer 3rd edition*. Springer, Cham.

Profil Penulis



Jan Setiawan

Penulis lahir di Jakarta pada tahun 1980. Saat ini penulis adalah staf Peneliti Ahli Madya pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis menyelesaikan studi S1 di prodi Fisika Institut Pertanian Bogor pada tahun 2003. Pada tahun 2008, penulis berkesempatan melanjutkan studi S2 melalui program beasiswa pegawai BATAN di prodi Ilmu Bahan-bahan Universitas Indonesia yang diselesaikan tahun 2010. Melalui beasiswa Kemenristek Dikti, penulis melanjutkan studi S3 di prodi Ilmu Bahan-bahan Universitas Indonesia pada tahun 2012 dan menyelesaikannya di tahun 2015. Bidang kepakaran penelitian Penulis adalah teknik material. Selain berkarir sebagai peneliti dengan membangun kompetensi kepakaran bidang teknik material, penulis juga aktif menjadi pengajar pada Program Studi Teknik Elektro - Universitas Pamulang.

Email Penulis: jansetiawan.lecturer@gmail.com

Yulianti Malik

Politeknik Industri Logam Morowali

Definisi

Surya atau matahari merupakan sumber energi terbesar di alam semesta. Hal tersebut menjadikan sinar matahari sebagai bentuk sumber energi yang tepat untuk dikembangkan, karena merupakan sumber energi yang berkapasitas tinggi, terus menerus dan tidak polutif serta dapat diperoleh secara gratis (Supriyadi, 1989). Berkaitan dengan potensi dan kemampuan yang dimilikinya, terdapat beberapa definisi tentang energi surya itu sendiri. Energi surya adalah salah satu energi terbarukan yang berasal dari sinar dan panas matahari yang tidak polutif, bersifat kontinyu. Energi surya merupakan radiasi energi dalam bentuk panas dan cahaya yang dipancarkan oleh matahari yang dapat diperoleh dengan cara mengubah energi panas surya melalui perlatan tertentu menjadi sumberdaya dalam bentuk lain. Oleh karena itu, energi surya menjadi salah satu bentuk energi yang sangat berlimpah di muka bumi dan merupakan salah satu sumber pembangkit daya selain air, uap, angin, biogas, batubara, dan minyak bumi. Energi ini dapat dimanfaatkan dengan menggunakan serangkaian teknologi seperti pemanas surya, fotovoltaiik surya, listrik panas surya, arsitektur surya, dan fotosintesis buatan.

Tanpa energi yang datang dari matahari, maka bumi sebagai planet yang dihuni oleh manusia dan makhluk hidup lainnya tidak akan mampu mendukung kehidupan di dalamnya.

Energi matahari atau energi surya dapat pula didefinisikan sebagai energi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari. Energi ini termasuk energi alternatif yang memiliki keunggulan yang menyebabkan energi ini banyak diminati, misalnya energi ini bebas polutan dan tersedia di alam bebas dalam jumlah yang sangat besar dan terdapat di hampir seluruh penjuru dunia. Energi matahari merupakan energi yang dianggap tidak dapat habis, dapat dipercaya dalam memberikan kehidupan, serta diperoleh secara cuma-cuma. (Tjahjono, 2013)

Definisi lain tentang energi surya yakni berupa energi yang dikumpulkan secara langsung dari cahaya matahari. Oleh karena matahari tidak memberikan energi yang konstan untuk setiap titik di bumi, maka penggunaan energi matahari juga bisa terbatas pada waktu dan tempat tertentu. Meskipun matahari adalah sumber energi yang memancarkan energi sangat besar ke permukaan bumi (permeter persegi permukaan bumi menerima hingga 1000 watt energi matahari) tidak dapat terhindar dari keterbatasan yang dimiliki, seperti sel surya sering digunakan untuk mengisi daya baterai, di siang hari dan daya dari baterai tersebut digunakan di malam hari ketika cahaya matahari tidak tersedia. (AP, Aulia, & P, 2017)

Radiasi Surya/Matahari

Perpindahan kalor adalah perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu diantara dua benda atau material. Perpindahan kalor pada umumnya terdiri dari perpindahan kalor secara konduksi, konveksi dan radiasi. Matahari sebagai salah satu sumber energi panas

umumnya memindahkan kalor melalui radiasi. Radiasi elektromagnetik berjalan dengan kecepatan cahaya dan ditandai oleh panjang gelombang dan frekuensi, yang hubungannya dinyatakan sebagai berikut :

$$c = \lambda f$$

(12.1)

di mana: c = kecepatan cahaya (3×10^{10} cm/detik)

λ = panjang gelombang (cm)

f = frekuensi (cps).

Energi matahari diradiasikan ke segala arah dan hanya sebagian kecil saja yang diterima oleh bumi. Energi matahari yang dipancarkan ke bumi berupa energi radiasi. Disebut radiasi dikarenakan aliran energi matahari menuju ke bumi tidak membutuhkan medium untuk mentransmisikannya. Energi matahari yang jatuh ke permukaan bumi berbentuk gelombang elektromagnetik yang menjalar dengan kecepatan cahaya. Panjang gelombang radiasi matahari sangat pendek dan biasanya dinyatakan dalam micron. (Wiraatmaja, 2017). Radiasi matahari merupakan suatu bentuk termal yang mempunyai kontribusi panjang gelombang khususnya dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang dapat merambat dalam kondisi ruang hampa di angkasa luar, dan memberi pancaran radiasi dengan panjang gelombang yang berbeda-beda yaitu antara 0,2 - 2,6m (Junaidi, Zulfadli, & Yusuf, 2021). Besar rentang panjang gelombang dan frekuensi untuk berbagai jenis radiasi elektromagnetik berbeda-beda yang dapat ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 12.1 Radiasi Elektromagnetik

Jenis radiasi	Efek besar pada materi	Panjang Gelombang (μm)*	Frekuensi (cps)
Sinar Cosmic	Transmisi	1×10^{-6}	3×10^{20}
Sinar Gamma	Absorbpsi, refleksi, transmisi	1×10^{-6}	3×10^{20}
Sinar-X	transmisi	140×10^{-6}	2×10^{18}
Ultraviolet	Diserap dengan kuat	6×10^{-6}	5×10^{19}
Cahaya Tampak	Absorbpsi, refleksi, transmisi	100.000×10^{-6}	1×10^{15}
Infrared	Absorbpsi, refleksi, transmisi	0,014 – 0,4	2×10^{16}
Radio	Absorbpsi, refleksi, transmisi	0,4 – 0,8	8×10^{14}
	Absorbpsi, refleksi, transmisi	0,8 – 400	8×10^{14}
	Absorbpsi, refleksi, transmisi	10×10^8	4×10^{14}
	Diserap dengan kuat	30.000×10^6	4×10^{14}
	Absorbpsi, refleksi, transmisi		8×10^{14}
	Absorbpsi, refleksi, transmisi		3×10^8
	Absorbpsi, refleksi, transmisi		1×10^4

* $1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,001 \text{ mm}$ (Arda & In Datta AK and Anantheswaran RC, 2001)

Semua benda memancarkan radiasi elektromagnetik, jumlah dan panjang gelombangnya tergantung pada kondisi fisik dan suhu benda. Untuk tujuan perbandingan perlu untuk mendefinisikan benda yang memancarkan jumlah energi maksimum yang mungkin pada suhu tertentu. Benda teoritis ini disebut benda hitam (Black Body). Energi yang dipancarkan oleh suatu benda hitam diberikan oleh Stefan- Boltzmann dengan persamaan:

$$\frac{q}{A} = \sigma T^4 \quad (12.2)$$

dengan:

q = energi radiasi (W)

A = luas penampang (m^2)

σ = konstanta Stefan-Boltzman ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

T = temperatur mutlak (K)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa jumlah panas yang dipancarkan sangat tergantung pada suhu, berubah dengan pangkat empat suhu mutlak. Oleh karena tidak ada benda nyata berperilaku seperti benda hitam, maka perlu dilakukan dikoreksi pada persamaan di atas, dengan memberikan catatan bahwa benda memiliki emisivitas. Emisivitas adalah rasio energi yang dipancarkan oleh suatu benda yang nyata dengan yang dipancarkan oleh benda hitam pada suhu yang sama, dan bernilai kurang dari 1,0, sehingga radiasi kemudian diberikan dengan persamaan:

$$\frac{q}{A} = \epsilon \sigma T^4 \quad (12.3)$$

Benda yang mengikuti persamaan (12.3) di atas biasa dikenal sebagai *grey body* (benda abu-abu). Setiap benda memiliki emisivitas yang berbeda-beda. Selain emisivitas, pada benda juga mengalami penyerapan (absorpsi) yang terjadi jika benda berada dalam kesetimbangan termal terhadap pemancar radiasi, maka benda tersebut menyerap radiasi sebanyak benda itu memancarkan radiasi. Absorptivitas adalah bagian/proporsi radiasi yang diserap oleh suatu benda nyata dibandingkan dengan benda hitam (benda penyerap sempurna $\alpha=1$). Untuk benda abu-abu dapat ditunjukkan bahwa $\alpha = \epsilon$. Pada *grey body* jumlah energi yang diserap dinyatakan oleh persamaan:

$$\frac{q}{A} = \alpha \sigma T^4 \quad (12.4)$$

Energi radiasi yang ditransfer antara dua permukaan tergantung pada perbedaan suhu permukaan, susunan geometrik, dan emissivitasnya. Meskipun efek dari geometri yang bervariasi pada perpindahan panas radiasi terlalu kompleks. (Arda & In Datta AK and Anantheswaran RC, 2001)

Radiasi termal atau *heat rays* merupakan radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang dapat diserap dan diubah menjadi energi panas. Karena radiasi surya seperti inframerah ditransmisikan dengan cepat ke permukaan bahan, sehingga inframerah sering digunakan terutama untuk pemanasan permukaan. Proses perpindahan kalor secara radiasi sistemnya berbeda dengan mekanisme konduksi dan konveksi dimana perpindahan kalor terjadi melalui bahan perantara, tetapi pada proses perpindahan kalor radiasi panas dapat berpindah melalui ruang hampa dimana kalor berbentuk sinar atau radiasi gelombang elektro-magnetik. Perhitungan besarnya radiasi kalor yang diberikan dengan menuliskan kembali persamaan (12. 2) menjadi:

$$q_r = \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (12.5)$$

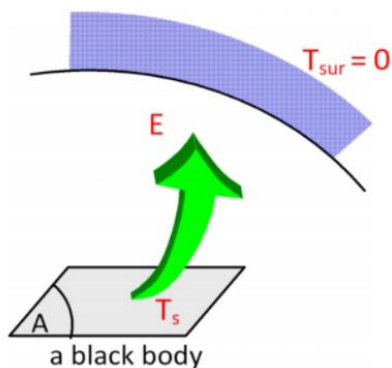
di mana :

q_r = Perpindahan kalor radiasi (Watt)

σ = Konstanta Stefan-boltzman ($5,669 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

A = Luas penampang (m^2)

T_s = Temperatur absolut benda yang dikenai radiasi (K)



Gambar 12.1 Proses perpindahan kalor secara radiasi (Tjahjono, 2013)

Energi radiasi yang ditransfer antara dua permukaan tergantung pada perbedaan suhu permukaan, susunan geometrik, dan emisivitasnya. Meskipun efek dari geometri yang bervariasi pada perpindahan panas radiasi sangat kompleks, akan tetapi pada beberapa aplikasi untuk industri dapat dibuat penyederhanaan. Emisivitas (ϵ) digambarkan melalui hubungan antara permukaan kelabu dengan permukaan hitam sempurna (pada gambar). Radiasi dari suatu permukaan tidak seluruhnya sampai ke permukaan lain karena radiasi elektromagnetik berjalan menurut garis lurus dan sebagian hilang ke lingkungan. Untuk menghitung situasi seperti itu diberikan persamaan :

$$q = F_{\epsilon} F_G \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (12.6)$$

dimana :

F_{ϵ} = Faktor emisivitas

F_G = “Faktor Pandangan”(View Factor) geo-metric (Tjahjono, 2013)

Persamaan (12.6) umumnya digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas di oven infra merah, radiasi perpindahan panas di saluran pembekuan atau pengeringan, maupun situasi lain yang sama. Jika satu benda tidak sepenuhnya dikelilingi oleh benda lainnya, maka luas permukaan benda yang mengarah ke benda lain juga harus diperhitungkan dengan memperhatikan faktor bentuk yang tergantung pada geometri dari sistem.

Energi yang ditransfer oleh matahari setiap waktu dapat diketahui melalui intensitas radiasi matahari. Intensitas radiasi matahari merupakan ukuran distribusi flux radiasi pada setiap satuan luas di suatu tempat. Dengan mengetahui intensitas radiasi matahari yang terjadi, maka besar energy yang ditransfer pada waktu tertentu di lokasi

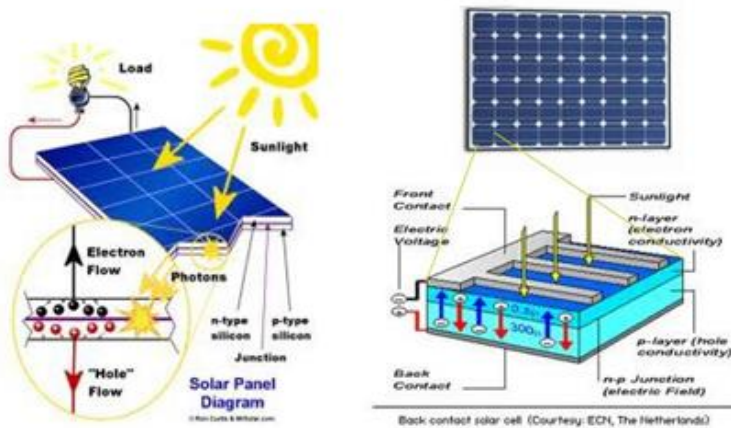
tersebut dapat diketahui sehingga informasi intensitas radiasi tersebut banyak digunakan untuk kebutuhan perancangan dan perakitan sistem dengan sumber energi matahari. Informasi distribusi intensitas radiasi matahari yang lengkap dan presisi akan sangat bermanfaat seperti pada bidang pertanian, perubahan iklim, kesehatan, hidrologi, material, oceanografi, fotobiologi, dan energi terbarukan. Intensitas radiasi energi matahari dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya radiasi global (*global radiation*), radiasi hamburan (*diffuse radiation*), radiasi langsung (*direct radiation*), temperatur, kelembaban dan tekanan udara, kecepatan dan arah angin, kecepatan hembusan, presipitasi air, dan massa udara. Radiasi total pada suatu permukaan merupakan hasil kombinasi dari berbagai faktor tersebut. Secara umum, terdapat tiga metode utama untuk mengukur radiasi matahari di suatu tempat, yaitu (1) arah normal (*direct*) yang diukur dengan sebuah pyrliometer, (2) horisontal global yang diukur dengan sebuah pyranometer, dan (3) hamburan yang diukur dengan suatu pyranometer tirai. (Saroja, Nuriyah, Widodo, & Novananta, 2018). Radiasi elektromagnetik dalam rentang frekuensi tertentu yang dimiliki oleh surya/matahari menjadikannya dapat digunakan untuk menghasilkan panas dalam benda yang efisien menyerap gelombang panjang. Konversi energi panas yang dimiliki oleh surya/matahari kemudian dimanfaatkan untuk berbagai sistem maupun peralatan untuk mendukung kegiatan dan kehidupan umat manusia.

Konversi Energi Surya

Berbagai jenis peralatan telah dihasilkan dengan mengubah atau melalui konversi energi surya menjadi energi jenis lain, diantaranya konversi energi surya menjadi energi listrik yang dapat dilakukan baik secara langsung menggunakan efek fotovoltaik maupun tidak

langsung melalui pemusatan energi matahari. Proses langsung dilakukan dengan mengubah energi cahaya dari matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan fotoelektrik. Cara tidak langsung (pemusatan energi surya) dilakukan dengan menggunakan sistem cermin atau lensa yang dikombinasikan dengan sistem pelacak agar dapat memfokuskan energi matahari ke satu titik untuk menggerakkan mesin kalor.

Efek fotovoltaiik dapat dilihat pada sel surya fotovoltaiik yang merupakan suatu alat untuk mengubah energi sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik. Pada sel tersebut merupakan suatu diode semikonduktor yang bekerja menurut suatu proses khusus yang dinamakan proses tidak seimbang (*non-equilibrium process*). Pada sel surya terdapat *junction* antara dua lapisan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor yang masing-masing diketahui sebagai semikonduktor jenis p (positif) dan semikonduktor jenis n (negatif). (Terraningtyas, Dwiatmoko, Widiyanti, & Munawaroh, 2017).

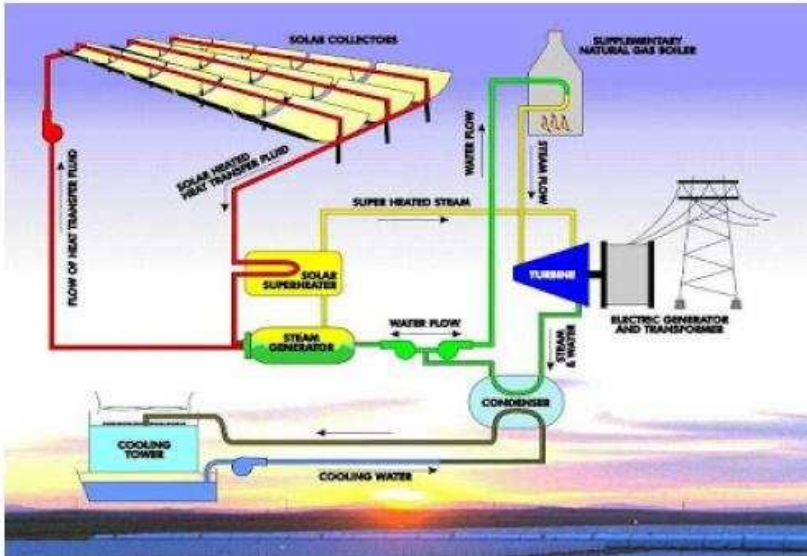


Gambar 12.1 Skema Sistem Solar Fotovoltaiik (Widayana, 2012)

Ketika *junction* disinari, photon yang mempunyai energi sama atau lebih besar dari lebar pita energi material tersebut akan menyebabkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan akan meninggalkan *hole* pada pita valensi. Elektron dan *hole* ini dapat bergerak dalam material sehingga menghasilkan pasangan elektronhole. Apabila ditempatkan hambatan pada terminal sel surya, maka elektron dari area-n akan kembali

ke area-p sehingga menyebabkan perbedaan potensial dan arus akan mengalir.

Konversi energi surya menjadi energi listrik secara tidak langsung dapat dilihat pada pembangkit listrik termal surya yang dapat bekerja dalam berbagai cara. Pembangkit ini juga biasa dikenal sebagai pembangkit listrik surya terkonsentrasi (*concentrated solar power plants*). Desain parabola cekung menjadi tipe yang paling banyak digunakan pada pembangkit listrik termal surya. Cermin parabola dirancang untuk menangkap dan memfokuskan berkas cahaya ke satu titik focus. Pada titik fokus tersebut terdapat pipa hitam sepanjang cermin tersebut yang di dalamnya dialiri oleh fluida yang dipanaskan hingga temperatur yang sangat tinggi, seringkali di atas 150 °C. Fluida panas tersebut dialirkan dalam pipa menuju ke ruang pembangkitan energi listrik untuk memasak air, menghasilkan uap air dan menghasilkan energi listrik. Proses tersebut digambarkan pada diagram alir berikut:



Gambar 12.2 Diagram alir pembangkit listrik termal surya (Terraningtyas, Dwiatmoko, Widiyanti, & Munawaroh, 2017)

Energi surya fotovoltaik digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik, pompa air, televisi, telekomunikasi, dan lemari pendingin di Puskesmas dengan kapasitas total ± 6 MW. Energi surya termal pada umumnya digunakan untuk memasak (kompor surya), mengeringkan hasil pertanian (perkebunan, perikanan, kehutanan, tanaman pangan) dan memanaskan air. (Widayana, 2012)

Energi surya juga dapat dikonversi menjadi energi gerak yang diaplikasikan pada mobil tenaga surya (*solar car*). Daya matahari ditangkap dengan memakai panel cell surya yang digunakan untuk menggerakkan motor listrik untuk memutar roda. Agar dapat stabil digunakan, maka pada mobil surya dilengkapi dengan area untuk menyimpan energi (*energy storage*) seperti *accu*/aki atau baterai. Selain itu mobil tenaga surya juga dilengkapi dengan alat control pengatur kecepatan sehingga mobil ini dapat melaju dengan kecepatan sesuai sama dengan kecepatan yang dirancang. Mobil ini dapat memanfaatkan

tenaga surya dengan menggunakan konsentrator khusus yang bertindak seperti kaca pembesar, mengarahkan sinar matahari ke panel-panel surya pada atap mobil. Sebuah sel surya mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Konversi ini didasarkan pada fenomena efek fotovoltaik. Sinar matahari terdiri dari foton dengan tingkat energi yang berbeda, tergantung darimana spektrum mereka berasal. Ketika sinar matahari datang, permukaan bahan fotovoltaik menyemburkan elektron yang menghasilkan generasi listrik.

Konversi energi surya sederhana dan mudah untuk diaplikasikan yakni pada kompor tenaga surya yang mengubah energi cahaya matahari menjadi panas. Prinsip yang digunakan pada kompor tenaga surya yakni pemusatan cahaya matahari dengan memanfaatkan cermin atau jenis logam lainnya yang dapat memantulkan cahaya. Dengan memusatkan cahaya hanya pada area memasak menjadikan energi lebih terkonsentrasi dan lebih berpotensi menghasilkan panas untuk memasak. Konversi energi surya menjadi panas juga dapat diaplikasikan pada pemanas air tenaga surya yang berdasarkan pada dua fenomena yakni warna hitam penyerap panas dan air panas mengalir ke atas. (Terraningsyas, Dwiatmoko, Widiyanti, & Munawaroh, 2017)

Potensi, Perkembangan Kekurangan dan Kelebihan Energi Surya

Istilah energi surya dan tenaga surya masih sering disamakan, meskipun keduanya memiliki makna yang berbeda karena energi surya merupakan sumber energi yang berasal dari matahari/surya sementara tenaga surya mengacu pada konversi sinar matahari menjadi energi lain seperti energi listrik (dalam banyak kasus menggunakan photovoltaic). Pemanfaatan energi surya

memiliki potensi masa depan yang sangat besar, tidak hanya dalam menyediakan listrik dan panas tetapi juga untuk digunakan pada proses industri serta pengembangan kendaraan surya. (Terraningtyas, Dwiatmoko, Widiyanti, & Munawaroh, 2017)

Energi surya umumnya merujuk pada penggunaan radiasi surya untuk kebutuhan praktis, meskipun semua energi terbarukan selain geotermal dan pasang surut, berasal dari matahari. Radiasi energi yang diterima oleh bumi dari matahari berbentuk gelombang elektromagnetik dengan panjang yang bervariasi (5000-290 milimikron). Rangkaian spektrum matahari ini dapat dikelompokkan berdasarkan panjang gelombangnya. Cahaya matahari hanya merupakan bagian dari energi cahaya yang memiliki panjang gelombang tampak bagi mata manusia sekitar 390-760 nanometer. Berdasarkan sifat partikel dari cahaya yang dinyatakan dalam bentuk kuantum dan foton (yaitu paket energi yang terpotong-potong dan masing-masing mempunyai panjang gelombang tertentu) menjadikan kualitas cahaya berkaitan erat dengan panjang gelombang, dimana panjang gelombang ungu dan biru mempunyai foton yang lebih berenergi bila dibandingkan dengan panjang gelombang jingga dan merah. Kualitas cahaya dibedakan berdasarkan panjang gelombang menjadi:

- Warna merah (panjang gelombang 750-626 nm)
- Warna orange/jingga (panjang gelombang 626-595 nm)
- Warna kuning (panjang gelombang 595-574 nm)
- Warna hijau (panjang gelombang 574-490 nm)
- Warna biru (panjang gelombang 490-435 nm)
- Warna Ungu (panjang gelombang 435-400 nm).

(Wiraatmaja, 2017)

Teknologi energi surya secara umum dikategorikan menjadi dua kelompok, yakni teknologi pemanfaatan pasif dan teknologi pemanfaatan aktif. Pengelompokan ini tergantung pada proses penyerapan, pengubahan, dan penyaluran energi surya. Contoh pemanfaatan energy surya secara aktif adalah penggunaan panel fotovoltaik dan panel penyerap panas. Pemanfaatan energi surya secara pasif meliputi mengarahkan bangunan ke arah matahari, memilih bangunan dengan massa termal atau kemampuan dispersi cahaya yang baik, dan merancang ruangan dengan sirkulasi udara alami. Tenaga surya dapat digunakan untuk:

- Menghasilkan listrik menggunakan sel surya
- Menghasilkan listrik menggunakan menara surya
- Memanaskan gedung secara langsung
- Memanaskan gedung melalui pompa panas
- Memanaskan makanan melalui oven surya

(AP, Aulia, & P, 2017)

Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia, radiasi surya di Indonesia dapat diklasifikasikan berturut-turut sebagai berikut: untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran di Kawasan Barat Indonesia (KBI) sekitar 4,5 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 10%, dan dikawasan Timur Indonesia (KTI) sekitar 5,1 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%. Mengacu pada data tersebut, maka rata-rata potensi energi surya di Indonesia sekitar 4,8 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%. Energi surya memiliki potensi besar dan sudah banyak teknologi surya yang berkembang dengan sangat cepat. Meski demikian masih dibutuhkan banyak waktu sebelum energi surya menjadi pesaing yang nyata untuk bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Hal ini karena sektor energi surya

masih kalah dalam hal paritas biaya dibandingkan bahan bakar fosil. Badan Energi Internasional pada tahun 2011 menyatakan bahwa "perkembangan teknologi energi surya yang terjangkau, tidak habis, dan bersih akan memberikan keuntungan jangka panjang yang besar. Perkembangan tersebut akan meningkatkan keamanan energi negara-negara melalui pemanfaatan sumber energi yang sudah ada, tidak habis, dan tidak tergantung pada impor, meningkatkan kesinambungan, mengurangi polusi, mengurangi biaya mitigasi perubahan iklim, dan menjaga harga bahan bakar fosil tetap rendah dari sebelumnya. (Terraningtyas, Dwiatmoko, Widiyanti, & Munawaroh, 2017)

Matahari merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk menjawab kebutuhan energi global yang semakin meningkat dan keterbatasan cadangan energi khususnya energi fosil yang termasuk dalam energi yang tidak dapat diperbaharui. Hal ini karena surya matahari merupakan sumber energi yang besar, berkelanjutan, tidak polutif dan gratis. Secara tidak langsung, manfaat dari matahari yakni dapat menyebabkan adanya angin dan hujan. Sedangkan secara langsung, energi ini telah lama digunakan, antara lain; untuk menjemur pakaian yang basah, hasil-hasil pertanian, proses pembuatan garam, proses pembuatan ikan kering dan lain sebagainya. Beberapa bentuk peningkatan pemanfaatan energi matahari dengan menggunakan sistem pengumpul surya dan fotovoltaic diantaranya; kompor pemasak nasi, pemanas air; pemanas dan pendingin bangunan, pompa air, alat-alat telekomunikasi, piranti-piranti elektronik, pusat pembangkit tenaga listrik, baik dari surya langsung maupun melalui satelit. (Supriyadi, 1989)

Energi panas matahari memiliki potensi yang mencapai 207,9 GW sementara pemanfaatannya hanya sekitar 78,5

MW. Dengan tantangan penyediaan energi dan potensi energi surya tersebut, banyak dilakukan penelitian untuk dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi surya. Salah satu pemanfaatan energi surya adalah penggunaan kolektor surya untuk mengumpulkan energi panas matahari. Solar water heater (pemanas air surya) merupakan salah satu alat yang menggunakan radiasi matahari dan menggubahnya menjadi energi panas, yang berfungsi untuk memanaskan air. Berdasarkan Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1405/menkes/sk/xi/2002 standar temperatur air panas untuk keperluan mandi dan mencuci tangan adalah 40° – 45°C. (Junaidi, Zulfadli, & Yusuf, 2021)

Besarnya potensi pengembangan energi surya karena didukung oleh ketersediaannya yang melimpah dan gratis dengan persediaan energi yang hampir tak terbatas dan tak dapat habis jika dibandingkan dengan energi fosil, tanpa polusi dan emisi gas rumah kaca sehingga mencegah perubahan iklim dan dapat dibangun hingga di pelosok daerah terpencil karena tidak memerlukan transmisi energi. Meskipun energi surya adalah bentuk energi paling berlimpah yang tersedia di planet bumi, energi surya tetap bukanlah sumber energi yang sempurna. Hal ini tidak hanya merujuk pada kalahnya paritas biaya dibandingkan bahan bakar fosil tetapi juga karena masalah intermitten (tidak kontinyu). Energi surya tidak tersedia pada malam hari dan karenanya membutuhkan solusi agar energi tersebut tersimpan dengan baik dan dapat dimanfaatkan pada kondisi dan waktu serta tempat yang tidak mendapat sinar matahari. Kekurangan lain dari energi surya disebabkan oleh kebutuhan investasi awal yang tergolong mahal, membutuhkan area yang luas untuk pembangunannya, efisiensi yang dihasilkan bergantung pada kondisi cuaca, terbatas oleh waktu maupun cuaca. (Terraningtyas, Dwiatmoko, Widiyanti, & Munawaroh, 2017)

Daftar Pustaka

- AP, E., Aulia, N., & P, N. (2017). *Menenal Energi Terbarukan*. Universitas Negeri Jakarta.
- Arda, G., & In Datta AK and Anantheswaran RC, e. (2001). *Prinsip Dasar Perpindahan Panas (Terjemahan dari Handbook of Microwave Technology for Food Applications)*. Program Studi Pertanian, Universitas Udayana.
- Junaidi, R., Zulfadli, T., & Yusuf, M. (2021, Desember). Kajian Perpindahan Panas Pada Solar Water Heater Dengan Sudut Kemiringan Kolektor 40o. *JITU (Jurnal Ilmiah Teknik Unida, Vol.2 No.2)*.
- Saroja, G., Nuriyah, L., Widodo, C. S., & Novananta, M. (2018, April). Estimasi Intensitas Radiasi Matahari Sesaat dengan Metode Konversi Energi. *NATURAL, Vol. 4 no. 3*.
- Supriyadi, E. (1989, Agustus). Energi Surya. *Cakrawala Pendidikan No. Edisi Khusus*.
- Terraningtyas, A., Dwiatmoko, F., Widiyanti, N., & Munawaroh, T. (2017). *Energi Baru dan Tebarukan-Energi Surya*. Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Negeri Surabaya.
- Tjahjono, T. (2013, Juli). PEMANAS FLUIDA MENGGUNAKAN ENERGI MATAHARI DENGAN KOLEKTOR SEPERTIGA SILINDER PADA SISTEM KOMPOR Dual System. *Media Mesin, 2*, 43-50.
- Widayana, G. (2012, Januari). Pemanfaatan Energi Surya. *JPTK, UNDIKSHA, Vol. 9 No. 1*.
- Wiraatmaja, I. W. (2017). *BUKU AJAR "Suhu, Energi Matahari dan Air dalam Hubungan dengan Tanaman"*. Dnpasar, Bali: Universitas Udayana.

Profil Penulis



Yulianti Malik

Anak ke-3 dari 6 bersaudara, lahir dan menyelesaikan pendidikan dasar di Raha-Kabupaten Muna, Sulawesi Tenggara. Kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Halu Oleo Kendari. Sebelum melanjutkan pendidikan ke jenjang S2 penulis mencari pengalaman dengan mengabdikan diri di almamater sebagai asiten pada Laboratorium Fisika UPT Lab. Dasar dan Balitbangda Prov. Sulawesi Tenggara. Mengingat *basic* ilmu yang dimiliki juga menjadi dasar untuk mempelajari ilmu lain terutama di bidang teknik, akhirnya penulis memutuskan untuk melanjutkan studi di Departemen Material dan Metalurgi-FTI Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Sejak 2018 hingga kini penulis menjadi dosen tetap di Jurusan Teknik Kimia Mineral-Politeknik Industri Logam Morowali, yang selain ditugaskan untuk mengampu mata kuliah yang berkaitan dengan bidang ilmu, penulis juga mengampu mata kuliah dasar seperti fisika dan matematika. Selain mengajar, penulis juga telah melakukan beberapa penelitian dan pengabdian kepada masyarakat terutama yang berkaitan dengan bidang ilmu yang dimiliki. Menulis *book chapter* merupakan salah satu sarana yang digunakan oleh penulis untuk terus belajar dan berbagi ilmu serta sebagai upaya menjalin silaturahmi dan berbagi pengalaman dengan para rekan-rekan dosen maupun penulis lainnya.

Email: yulianti_malik@yahoo.com, yuliantimalik04@gmail.com

APLIKASI ENERGI SURYA

Erwinda Fenty Anggraeni
Universitas Teknologi Yogyakarta

Pengantar

Kebutuhan akan energi listrik dalam kehidupan sehari-hari sangatlah tinggi, mulai dari kebutuhan listrik pada rumah tangga, perkantoran, hingga industri. Menilik akan kebutuhan energi listrik yang sangat besar maka tidak menutup kemungkinan terjadinya krisis energi listrik. Oleh karenanya, sebagai salah satu sumber energi, sinar matahari atau energi surya ini dapat menjadi alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi listrik.

Indonesia merupakan negara tropis sehingga potensi energi surya yang cukup besar ini bisa dimanfaatkan dalam potensi energi terbarukan. Pemanfaatan potensi energi surya yang sudah diterapkan yakni teknologi energi surya termal dan energi surya fotovoltaik (Anonymus, 2010)

Teknologi Energi Surya Termal

Di Indonesia, pemanfaatan energi surya termal masih dilakukan secara tradisional, antara lain dimanfaatkan oleh nelayan dan petani untuk mengeringkan hasil perikanan dan pertanian pasca panen. Seiring perkembangan teknologi, saat ini teknologi surya termal

dimanfaatkan mulai dari teknologi sederhana hingga menengah.

Aplikasi teknologi sederhana untuk skala kecil (temperatur kerja $\leq 60^{\circ}\text{C}$) dapat dibuat oleh bengkel pertukangan kayu/besi biasa. Sedangkan aplikasi untuk skala menengah atau industri (temperatur kerja $60^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$) dapat dilakukan oleh industri manufaktur nasional dengan teknologi tinggi.

Widayana (2012) menyebutkan beberapa peralatan yang telah menggunakan energi surya termal antara lain:

1. Pengering pasca panen (bidang pertanian, perkebunan, kelautan)
2. Pemanas air domestik
3. Oven surya / kompor tenaga surya
4. Pompa air (dengan siklus Rankline dan fluida kerja isopentane)
5. penyuling air (*solar distillation/ still*)
6. Pendingin (radiatif, absorpsi, evaporasi, termoelektrik, kompresip, tipe jet)
7. Sterilisator surya
8. Pembangkit listrik dengan menggunakan konsentrator dan fluida kerja dengan titik didih rendah.

▪ **Pengering hasil pertanian/perkebunan**

Gambar 13.1 merupakan *solar dryer dome* pada proses pengeringan biji kopi. Misalnya pada proses pengeringan biji kopi, dimana proses pengeringan bertujuan untuk mengurangi kadar air pada biji kopi agar rasa biji kopi yang dihasilkan stabil, tahan terhadap serangan jamur, dan tidak membusuk. Dalam prosesnya, ternyata pengeringan secara konvensional ini cukup memakan waktu yang lama.



Gambar 13.1. *Solar dryer dome* pada proses pengeringan biji kopi

Sumber: <https://www.impack-pratama.com/solar-dryer-dome-pengeringan-kopi/>

Jika biasanya pengeringan biji kopi dilakukan secara konvensional dengan cara menjemur dibawah terik sinar matahari langsung, maka dengan adanya *solar dryer dome* pada proses pengeringan akan lebih efisien waktu dan meningkatkan kualitas hasil produksi. Pengaturan sirkulasi udara *solar dryer dome* menjadi kunci dalam proses pengeringan sehingga dapat menghasilkan panas yang merata, serta pengurangan persentase uap air pada penggunaan SDD dapat mempercepat proses pengeringan. Selain itu, kelebihan dari SDD yang berbentuk kubah adalah melindungi dari kontaminasi debu dan hama.

▪ **Pemanas air**

Solar water heater adalah pemanas air yang menggunakan tenaga atau sinar matahari sebagai sumber energi untuk memanaskan air. *Solar water heater* bekerja menggunakan prinsip *thermosiphon*. Sistem kerja *solar water heater* dibantu oleh yang namanya tabung air panas atau *storage tank* yang fungsinya menyerupai sebuah termos (Gambar 13.2). Prinsip kerja *solar water heater* adalah:

-
1. *Storage tank* (tabung) disambungkan dengan sebuah panel konektor yang fungsinya sebagai tempat untuk memanaskan air.
 2. Panel ini terdiri dari *plate absorber* yang bertindak seakan sebagai kompor serta pipa-pipa penghubung yang mengalirkan air panas dari panel konektor ke tabung air.
 3. Pipa air dingin yang menuju ke tabung air mengalir ke panel konektor ini dan terjadilah proses pemanasan air.
 4. Panas air yang ada di dalam tabung bersuhu sekitar 60°C dan karena adanya dorongan air dingin, maka air panas itu akan mengalir menuju ke kran. Proses ini juga ada percampuran antara air panas dengan air dingin agar diperoleh suhu air panas yang aman dan tidak berlebihan.



Gambar 13.2. *Solar water heater*

Sumber: <https://www.ecowatch.com/solar-water-heater-2654835447.html>

▪ **Oven surya atau kompor tenaga surya**

Oven surya atau kompor tenaga surya adalah peralatan memasak dengan sinar matahari sebagai sumber energi (Gambar 13.3). Adapun prinsip kerja dari kompor tenaga surya ini adalah:

1. Pemusatan cahaya (refleksi)

Dalam hal ini bagian kompor tenaga surya yang berguna sebagai reflektor atau pemantul terbuat dari bahan yang mengkilap (seperti: kromium, perak, aluminium foil) yang bertujuan agar dapat memantulkan cahaya matahari ke satu titik, sehingga mempercepat proses akumulasi panas Pada benda.

2. Penyerapan (kemampuan menyerap panas)

Bagian kompor surya dan panci sebaiknya berwarna gelap (hitam), hal ini bertujuan agar penyerapan panas sinar matahari semakin baik atau terserap semua. Ketebalan panci juga berpengaruh, semakin tipis panci maka panci semakin cepat mentransfer panas dan merata.

3. Retensi (menahan panas)

Penggunaan tutup panci berbahan kaca ataupun plastik bening memungkinkan cahaya masuk ke dalam panci. Cahaya yang terserap berubah menjadi panas dan terperangkap di dalam panci, hal ini bertujuan agar suhu di dalam panci tetap terjaga pada saat terjadi perubahan temperatur di sekitarnya

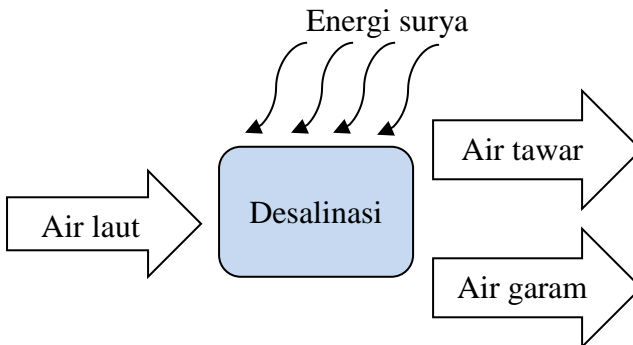


Gambar 13.3. Kompor tenaga surya
Sumber: <http://www.obengplus.com/>

Oleh karena itu, adanya teknologi oven surya atau kompor tenaga surya ini dapat menjadi alternatif dalam memasak selain penggunaan kompor gas maupun kompor listrik yang sudah ada saat ini.

▪ **Penyuling air**

Ketersediaan air laut yang melimpah di Indonesia merupakan suatu keuntungan bagi kita. Akan tetapi, sering terjadinya krisis air bersih merupakan masalah yang tidak bisa diabaikan. Sebagai solusi, agar air laut dapat dikonsumsi oleh makhluk hidup maka dilakukan proses desalinasi. Desalinasi merupakan suatu proses untuk menghilangkan kadar garam yang berlebih yang membuat air laut menjadi air tawar, sehingga layak dikonsumsi manusia.



Gambar 13.4. Input, proses, dan output desalinasi energi surya

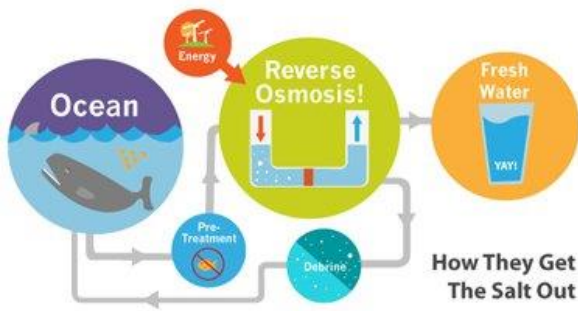
Sumber: Dewantara et al (2018)

Pada proses desalinasi, selain menghasilkan air layak minum, pada proses ini juga dapat menghasilkan garam dapur. Proses desalinasi ini merupakan salah satu alternatif untuk mendapatkan air bersih selain dari air tanah yang sudah diterapkan di Indonesia.

Gambar 13.4 menunjukkan gambaran sederhana dari *input*, proses desalinasi hingga *output* yang dihasilkan dari proses tersebut. Ketika garam dididihkan, maka garam akan terlarut dan air akan

menguap. Air yang menguap akan menghasilkan uap yang dapat berubah fasa ketika temperatur menurun. Perubahan fasa yang terjadi adalah kondensasi yang dapat merubah uap air kembali (Dewantara et al, 2018).

Proses desalinasi ini sudah banyak diterapkan di Indonesia. Aplikasi dari proses desalinasi ini salah satunya menggunakan metode osmosis terbalik (*reverse osmosis* atau RO). Osmosis terbalik dianggap yang paling efektif dalam melakukan desalinasi dalam skala besar. Prinsip kerja metode ini adalah dengan mendesak air laut melewati membran-membran semi-permeabel untuk menyaring kandungan garamnya. Gambar 13.5 merupakan proses pada metode osmosis terbalik (*reverse osmosis*)



Gambar 13.5. Metode osmosis terbalik (*reverse osmosis*)

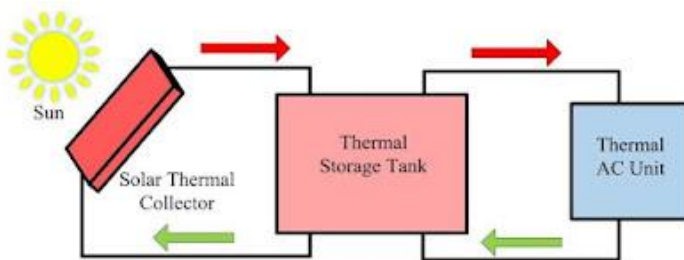
Sumber: <https://environment-indonesia.com/>

- **Solar thermal cooling**

Solar thermal cooling lebih populer sebagai *thermal solar collector* karena mampu mengkonversi sinar matahari menjadi panas. *Solar thermal cooling* terdiri dari 4 komponen utama yaitu rangkaian *solar collector*, tangki penyimpan panas, unit AC *thermal* dan *heat exchanger*. Sistem *Solar thermal*

cooling dapat dilihat pada Gambar 13.6, prinsip kerjanya yaitu:

1. *Solar collector* menerima energi cahaya dari matahari dan menaikkan suhu, hasilnya *refrigerant* dalam tabung kolektor menjadi panas akibat proses perpindahan panas.
2. Tangki penyimpan panas digunakan untuk menyimpan *refrigerant* panas dari tabung kolektor.
3. *Thermal AC unit* mulai bekerja setelah menerima *refrigerant* panas dari tabung penyimpanan panas
4. Selanjutnya, *refrigerant* terus bergerak dalam sistem.
5. *Heat exchanger* berfungsi mentransfer panas antara ruang panas dan dingin.



Gambar 13.6. Sistem *solar thermal cooling*
Sumber:<http://www.mekanisasikp.web.id/2019/12/teknologi-pendinginan-berbasis-energi.html>

Teknologi Energi Surya Fotovoltaik

Energi surya (matahari) merupakan salah satu sumber energi alternatif terbarukan yang dimanfaatkan sebagai sumber listrik. Energi surya yang bersumber dari sinar matahari dikonversikan menjadi energi listrik dengan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan panel surya atau fotovoltaik (*photovoltaic*). Panel surya merupakan suatu sistem atau perangkat

(kumpulan dari sel surya) yang berfungsi untuk menangkap sinar matahari (Gambar 13.7).

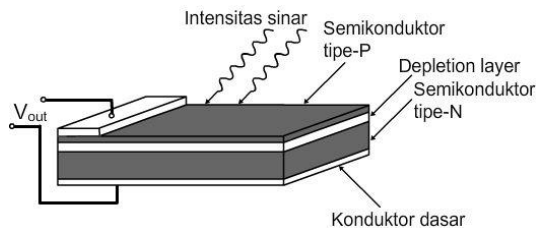


Gambar 13.7. Panel surya (*solar cell system*)

Sumber : <https://www.inti.co.id/>

Sel surya (*solar cell*) adalah komponen yang dapat merubah energi surya berupa cahaya menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip kerja fotovoltaiik. Efek fotovoltaiik merupakan suatu fenomena munculnya tegangan listrik yang timbul karena adanya kontak dua elektroda yang dihubungkan dengan suatu padatan atau cairan pada saat mendapatkan energi dari cahaya matahari. Gambar 13.8 merupakan penampang sel surya (*solar cell*).

Prinsip kerja sel surya yakni apabila cahaya mengenai permukaan pada sel surya, maka akan terjadi pengurangan *depletion layer* dan elektron berpindah melalui hubungan “PN”. *Depletion layer* adalah pertemuan antara substrat tipe P dan substrat tipe N. Jika intensitas cahaya semakin besar, maka arus yang mengalir juga sebanding.



Gambar 13.8. Penampang *solar cell*

Sumber: <https://m-edukasi.kemdikbud.go.id/medukasi/>

Panel surya terbuat dari bahan semikonduktor dengan bahan silikon dan dilapisi dengan bahan khusus (Ridwan et al, 2021). Pada saat sinar matahari mengenai permukaan panel surya maka elektron pada atom silikon akan terlepas dan mengalir membentuk sirkuit listrik sehingga energi listrik dapat dibangkitkan (Rif'an et al, 2012).

▪ **Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

Solar Home System merupakan salah satu jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang dapat diterapkan pada setiap rumah. Komponen yang digunakan dalam rangkaian SHS antara lain: panel surya, *solar charge controller*, baterai atau aki, dan inverter. Adapun prinsip kerja dari rangkaian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (pada *Solar Home System*) dapat dilihat pada Gambar 13.9 dengan uraian sebagai berikut:

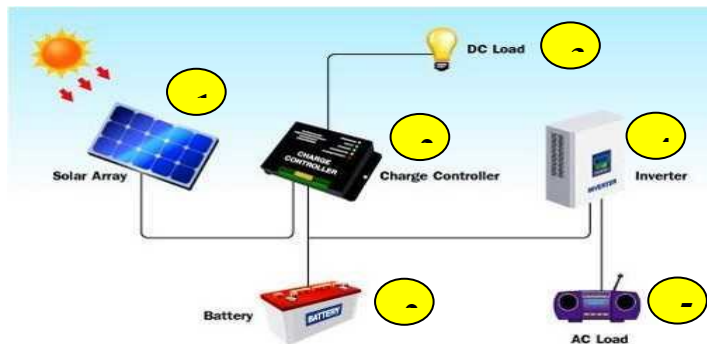
1. radiasi dari sinar matahari ditangkap oleh modul panel surya
2. modul panel surya akan menghasilkan arus DC (*Direct Current*) dan dikontrol oleh *charge controller* untuk disimpan ke baterai

Pada proses pengisian muatan listrik dari panel surya ke baterai (proses menyimpan cadangan energi listrik) dan pengosongan muatan listrik dari baterai ke beban dapat dikontrol secara otomatis oleh *solar charge controller* sehingga dapat menjaga kualitas atau ketahanan baterai dari pengisian daya yang berlebihan. Jenis *solar charge controller* yang sering digunakan yakni jenis PWM (*pulse width modulation*) dan MPPT (*maximum power point tracking*).

-
3. selanjutnya, arus DC yang masuk ke baterai dapat digunakan pada beban yang menggunakan arus DC
 4. arus AC (*Alternating Current*) dapat dihasilkan dengan menggunakan inverter DC ke AC

Inverter adalah piranti listrik yang mampu mengubah sistem tegangan input arus searah (DC) menjadi tegangan output arus bolak-balik (AC).

5. selanjutnya, arus AC yang dihasilkan oleh inverter dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik



Gambar 13.9. Rangkaian sederhana pada PLTS (pada *Solar Home System*). Sumber: Santoso (2018) tersedia di <https://www.kompasiana.com/>

Kinerja panel surya dapat ditinjau berdasarkan besarnya intensitas sinar matahari yang ditangkap oleh panel surya. Semakin tinggi intensitas sinar matahari yang ditangkap, maka efisiensi energi listrik yang dihasilkan lebih baik (Ridwan et al, 2021).

Efisiensi energi yang dibangkitkan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\text{Luas panel surya: } A_a = \frac{E}{I_{av} \cdot \eta_m}$$

$$\text{Jumlah modul: } n = \frac{A_a}{A_{cm}}$$

Daya yang dibangkitkan oleh PLTS:

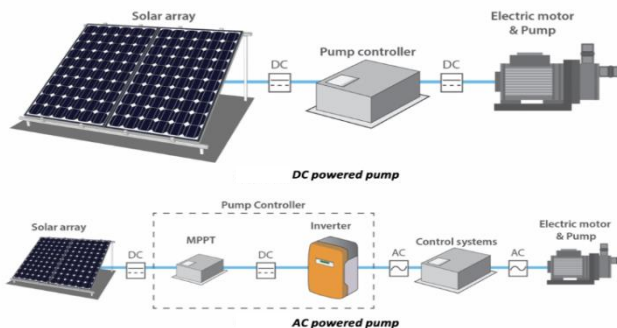
$$P = n \cdot P_m$$

Dimana:

- P = Daya yang dibangkitkan oleh PLTS (W)
- n = Jumlah modul
- P_m = Daya maksimum sebuah modul
- E = Energi (Wh)
- I_{av} = Intensitas cahaya rata-rata (W/m^2)
- η_m = Efisiensi modul (%)
- A_a = Luas panel surya (m^2)
- A_{cm} = Luas efektif sebuah modul (m^2)

▪ Pompa Air Tenaga Surya (PATS)

Pompa air merupakan suatu alat yang digunakan untuk memindahkan air dari sumbernya ke tujuan tertentu sesuai dengan kebutuhan. Sumber energi pada pompa air pada umumnya menggunakan tenaga diesel dan listrik dari PLN.



Gambar 13. 10. Rangkaian pompa air tenaga surya motor DC dan motor AC. Sumber: <https://climatebiz.com/solar-water-pumping/>

Seiring berkembangnya teknologi, teknologi panel surya dapat dimanfaatkan untuk pompa air. Gambar 13.10 merupakan rangkaian pompa air tenaga surya.

Prinsip kerja dari pompa air adalah dengan cara mengalirkan air melalui pipa hisap menuju saluran keluar dengan memanfaatkan impeller sebagai alat penghisapnya. Akibatnya, seluruh ruang udara terisi air sehingga tercipta tekanan fluida untuk ditarik dari sumber menuju lokasi tujuan yang dikehendaki. Untuk penggunaan mesin pompa air, air yang ada di dalam ruang impellar akan digerakkan menggunakan sebuah motor. Air akan terus di dorong keluar menuju pipa.

Jika selama ini pompa air menggunakan energi listrik dari PLN dan tenaga diesel, kini mulai dikembangkan pompa air dengan memanfaatkan sinar matahari dengan teknologi panel surya. Pompa air tenaga surya ini sangat cocok digunakan dalam irigasi sawah dan pompa air untuk kebutuhan sehari-hari khususnya di daerah yang masih belum terjangkau oleh listrik.

Gambar 13.11 merupakan contoh penggunaan pompa air tenaga surya untuk irigasi sawah. Energi matahari yang diterima oleh panel surya digunakan untuk menggerakkan pompa air yang dapat mengangkat air ke tangki yang posisinya lebih tinggi dari sumber air. Selanjutnya, air tersebut dapat digunakan sebagai irigasi.



Gambar 13.11. Pompa air tenaga surya untuk irigasi sawah
Sumber: <https://climatebiz.com/solar-water-pumping/>

Manfaat lain dalam menggunakan panel surya, antara lain:

1. menghemat tagihan listrik karena kebutuhan listrik dapat dipenuhi sendiri,
2. ramah lingkungan, karena energi surya terus tersedia di alam, dan
3. mudah diterapkan di Indonesia yang merupakan negara tropis karena setiap rumah bisa mempunyai pembangkit listrik mandiri.

Daftar Pustaka

- Anonymus. (2010). Tersedia di esdm.go.id dengan judul "Pemanfaatan Energi Surya di Indonesia", <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemanfaatan-energi-surya-di-indonesia>, diakses pada tanggal 31 Agustus 2022.
- Dewantara, I. G. Y., Suyitno, B. M., & Lesmana, I. G. E. (2018). Desalinasi Air Laut Berbasis Energi Surya Sebagai Alternatif Penyediaan Air Bersih. *Jurnal Teknik Mesin*, 7 (1).
- Mahardika, I. G. N. A., Wijaya, I. W. A., & Rinas, I. W. (2016). Rancang Bangun Baterai Charge Control Untuk Sistem Pengangkat Air Berbasis Arduino Uno Memanfaatkan Sumber PLTS. 3(1), 26–32.
- Ridwan, R. et al (2021). Pemanfaatan Sinar Matahari Sebagai Energi Alternatif untuk Kebutuhan Energi Listrik. *Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, 1(1), 68 - 176.
- Rif'an, M. et al. Optimasi Pemanfaatan Energi Listrik Tenaga Matahari di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya. *Jurnal EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems)*, 6 (1), 44 - 48.
- Santoso, A. B. (2018). Tersedia di Kompasiana.com dengan judul "Berbagai Cara Merancang "Solar Home System" Sesuai Kebutuhan", <https://www.kompasiana.com/trojanganjen/5b20c0fcf13344243b3a1552/berbagai-cara-merancang-solar-home-system-sesuai-kebutuhan> diakses pada tanggal 31 Agustus 2022.
- Widayana, G. (2012). Pemanfaatan Energi Surya. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Kejuruan Undiksha*, 1(1), 37 - 46.
- Yuhendri, M., Aswardi, & Ahyanuardi. (2020). Implementasi Pompa Air Tenaga Surya Menggunakan Inverter Boost Satu Fasa. *Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, 20 (3).

Profil Penulis



Erwinda Fenty Anggraeni

Penulis kelahiran Grobogan tahun 1988 ini mempunyai ketertarikan dibidang sains dan matematika dimulai di bangku SMA. Penulis telah menempuh pendidikan di Universitas Negeri Yogyakarta Prodi Pendidikan Fisika, kemudian melanjutkan pendidikan S2 Ilmu Fisika di Universitas Gadjah Mada. Sejak tahun 2016, penulis aktif sebagai pengajar di Universitas Teknologi Yogyakarta.

Penulis memiliki kepakaran di bidang pendidikan fisika dan geofisika khususnya kegempaan. Untuk mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis pun aktif sebagai peneliti dibidang kepakarannya tersebut. Bekerjasama dengan Pusat Survei Geologi Bandung, penulis pernah melakukan penelitian di daerah patahan aktif Sumatera (Sesar Semangko). Selain sebagai pengajar dan peneliti, penulis juga aktif menulis buku dalam bidang fisika, statistika, dan matematika dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara ini. Beberapa karya yang telah dipublikasikan antara lain: Fisika Magnet untuk Teknik dan Pengantar Statistika 2.

Email Penulis: erwindafentya@gmail.com

- 1 ENERGI KALOR
Lusiani
- 2 SUMBER ENERGI
Febri Rismaningsih
- 3 KONDUKSI SATU DIMENSI STEADY STATE – ONE DIMENSIONAL
Sudirman
- 4 KONDUKSI DIMENSI 2
Iman Noor
- 5 RANGKAIAN HAMBATAN
Farah Indrawati
- 6 KONVEKSI ALAMI
Anisa Budi Putranti
- 7 KONVEKSI PAKSA (FORCED CONVECTION)
Andry Fitriani
- 8 ALIRAN FLUIDA DALAM PIPA
Bergita Gela M Saka
- 9 SISTEM TERMAL PADA HEAT EXCHANGER
I Putu Tedy Indrayana
- 10 PENUKAR KALOR JENIS SHELL AND TUBE
Popi Purwanti
- 11 DASAR RADIASI
Jan Setiawan
- 12 ENERGI SURYA
Yulianti Malik
- 13 APLIKASI ENERGI SURYA
Erwinda Fenty Anggraeni

Editor :

Suci Haryanti

Untuk akses **Buku Digital**,
Scan **QR CODE**



Media Sains Indonesia
Melong Asih Regency B.40, Cijerah
Kota Bandung - Jawa Barat
Email : penerbit@medsan.co.id
Website : www.medsan.co.id



ISBN 978-623-362-815-0 (PDF)

