

**TUGAS AKHIR**

**KAJIAN EKSPERIMEN PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP  
KONDUKTIVITAS TERMAL KULIT BUAH PISANG AMBON LUMUT  
(*Musa paradisiaca L.*)**

**Oleh:**

**MUH. NOOR FUAD AL ARIFSYAH**

**D211 15 016**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2020**

**TUGAS AKHIR**

**KAJIAN EKSPERIMEN PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP  
KONDUKTIVITAS TERMAL KULIT BUAH PISANG AMBON LUMUT  
(*Musa paradisiaca L.*)**

**Oleh:**

**MUH. NOOR FUAD AL ARIFSYAH**

**D211 15 016**

Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2020**

## LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

**JUDUL:**

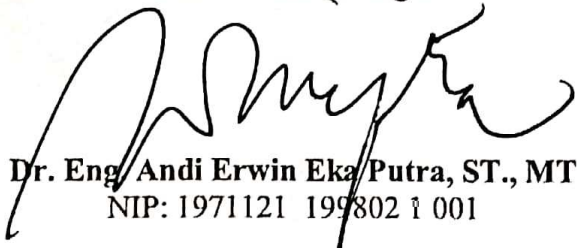
**KAJIAN EKSPERIMEN PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP  
KONDUKTIVITAS TERMAL KULIT BUAH PISANG AMBON LUMUT  
(*Musa paradisiaca L.*)**

**MUH. NOOR FUAD AL ARIFSYAH**


**D211 15 016**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I


  
**Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT**  
NIP: 1971121 199802 1 001

Dosen Pembimbing II

  
**Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT**  
NIP: 19791112 200812 2 002

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

  
**Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT.**  
NIP: 19720825 200003 1 001

## ABSTRAK

Penanganan yang kurang tepat pada buah, seperti menyimpan buah pisang di bawah temperatur  $11^{\circ}\text{C}$  dapat menyebabkan buah mengalami kerusakan (*chilling injury*). Salah satu bagian penting dari pisang yaitu kulit yang memiliki peranan penting dalam menjaga kualitas buah pisang, sehingga diperlukan perlakuan dan pengetahuan sifat-sifat termal dalam menentukan proses pendinginan yang optimal pada pisang. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut dan menganalisis pengaruh perubahan temperatur terhadap konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut (*Musa paradisiaca L.*). Buah pisang ambon lumut ditempatkan dalam ruangan selama 240 menit pada masing-masing variasi temperatur ruangan  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $22^{\circ}\text{C}$  dan  $24^{\circ}\text{C}$ . Perubahan temperatur ruangan, kulit dalam dan kulit luar tersebut direkam oleh termometer digital dan termokopel dengan interval waktu 5 menit. Nilai konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut berkisar  $0,048 \text{ W/m.K}$  hingga  $0,527 \text{ W/m.K}$  lebih kecil dibandingkan dengan nilai konduktivitas termal buah pisang. Peningkatan temperatur penyimpanan memiliki hubungan dengan naiknya nilai konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut.

Kata Kunci: konduktivitas termal, pisang ambon lumut, proses pendinginan

## ABSTRACT

Improper handling of the fruit such as storing banana under temperatur 11°C can cause the fruit to be damaged (chilling injury). One important part of a banana is the peel which has an important role in maintaining the quality of bananas, therefore it requires treatment and thermal properties to determine the optimal cooling process on banana. This study aims to determine the thermal conductivity value of ambon lumut banana peel and to analyze the effect of temperatur changes on the thermal conductivity of ambon lumut banana peel (*Musa paradisiaca L.*). Ambon lumut banana is placed in the room for 240 minutes at each room temperatur variation 20°C, 22°C dan 24°C. The temperatur changes of room, inner peel and outer peel are recorded by digital thermometers and thermocouples at intervals of 5 minutes. The thermal conductivity value of ambon lumut banana peels ranges from 0.048 W/m.K to 0.527 W/m.K smaller than the thermal conductivity value of banana. The increase in storage temperatur has a relationship with the increase on the thermal conductivity value of ambon lumut banana peel.

Keywords: thermal conductivity, ambon lumut banana, cooling process

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh. Puji syukur senantiasa kita panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada setiap hamba-Nya, terkhusus sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Kajian Eksperimen Pengaruh Temperatur Terhadap Konduktivitas Termal Kulit Buah Pisang Ambon Lumut (*Musa paradisiaca L.*)”** yang mana merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Shalawat dan salam tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW., yang telah membawa agama Islam sebagai rahmatan lil ‘aalamiin dan membawa umat ke cahaya Islam.

Tulisan ini penulis dedikasikan teruntuk kedua orang tua tercinta (Bapak Muhammad Arifin dan Ibu Syamsuriah Sidjaya) yang senantiasa memberikan semangat, harapan dan doa agar kelak anaknya menjadi manusia yang bermanfaat bagi agama, keluarga, dan orang lain. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada saudara kandung (Muh. Noor Alim Nyau) atas doa dan dukungannya. Selama proses pengerjaan skripsi ini penulis menerima banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis juga menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. sebagai Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan dan kemudahan yang diberikan
2. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT., dan Dr. Eng. Noviany Amaliyah, ST., MT., sebagai Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktu, arahan, dan saran selama proses pengerjaan skripsi ini.
3. Ir. H. Baharuddin Mire, MT., sebagai Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan ilmu dan nasehat sejak menjadi mahasiswa baru.
4. Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, nasehat dan pengalaman kepada penulis selama menempuh studi di dunia perkuliahan

5. Sesario Oktobianra dan Suhandi, kawan seperjuangan Pondok Manggis 09, yang telah memberikan ilmu, semangat, inspirasi dan pengalaman berharga selama kurang lebih 5 tahun terakhir.
6. Teman-teman Teknik Mesin angkatan 2015/HYDRAULIC'15 yang senantiasa mendukung dan berjuang bersama sejak mahasiswa baru hingga saat ini.
7. HMM FT-UH, yang telah menjadi tempat belajar dan mencoba banyak hal di kampus tercinta.
8. Komunitas Aksi Indonesia Muda, Rintara Jaya Sulsel dan AIESEC in Universitas Hasanuddin yang menjadi tempat belajar dan berkarya selama masa-masa perkuliahan.
9. Teman-teman KKN Gelombang 99 Desa Ampekale, Kec. Bontoa, Kab. Maros serta rekan-rekan Kerja Praktik PT. Badak NGL dan PT. Pertamina (Persero) RU-VI Balongan
10. Serta seluruh pihak yang telah membantu yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Peneliti menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna walaupun telah menerima bantuan dari berbagai pihak. Apabila terdapat kesalahan-kesalahan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis dan bukan para pemberi bantuan. Kritik dan saran yang membangun akan lebih menyempurnakan skripsi ini.

Gowa, 13 Juli 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Pisang Ambon Lumut.....	4
2.2 Indeks Skala Warna Kulit Buah .....	5
2.3 Pascapanen Pisang.....	6
2.4 Penyimpanan Dingin .....	7
2.5 Perpindahan Panas.....	12
2.5.1 Konduksi.....	12
2.5.2 Konveksi.....	19
2.6 Konduktivitas Termal.....	24
<b>BAB III. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>28</b>
3.1 Tempat dan Waktu .....	28
3.2 Alat dan Bahan .....	28
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	33
3.4 Pelaksanaan Penelitian .....	34
3.5 Analisis Data .....	36



<b>BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>39</b>
4.1 Hasil Pengambilan Data .....	39
4.2 Perhitungan.....	43
4.3 Pembahasan .....	50
<b>BAB V. KESIMPULAN.....</b>	<b>62</b>
5.1 Kesimpulan.....	62
5.2 Saran.....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>63</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>64</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Pisang ambon lumut .....	5
Gambar 2. Variasi kadar air terhadap panas spesifik buah pisang Gros Michel.....	9
Gambar 3. Variasi kadar air terhadap nilai konduktivitas termal buah pisang Gros Michel .....	9
Gambar 4. Variasi kadar air terhadap nilai difusivitas termal buah pisang Gros Michel.....	10
Gambar 5. Hubungan antara temperatur pemanasan dan konduktivitas termal untuk pisang ambon .....	11
Gambar 6. Konduksi pada dinding dengan ketebalan $\Delta x$ dan luas A .....	13
Gambar 7. Konduksi <i>steady</i> dan transien pada dinding.....	14
Gambar 8. Konduksi pada dinding satu dimensi .....	15
Gambar 9. Pipa silinder dengan temperatur dalam ( $T_1$ ) dan luar ( $T_2$ ) .....	16
Gambar 10. Gambaran temperatur transien pada permukaan dinding.....	17
Gambar 11. Konveksi bebas dan konveksi paksa .....	20
Gambar 12. Variasi konduktivitas termal pada beberapa padatan.....	24
Gambar 13. Pengaruh temperatur pada konduktivitas termal material.....	25
Gambar 14. Pisang ambon lumut hijau yang telah disortir .....	28
Gambar 15. Skala tingkat kematangan pisang .....	28
Gambar 16. Air Conditioner .....	29
Gambar 17. Termometer Lutron TM-946.....	29
Gambar 18. Termokopel Tipe K.....	30
Gambar 19. Kabel RS232 .....	30
Gambar 20. Laptop.....	31
Gambar 21. Tampilan awal <i>software</i> SW-DL2005.....	31
Gambar 21. Ruang laboratorium gedung mesin FT-UH.....	32

Gambar 23. Model pengambilan data .....	35
Gambar 24. <i>Setup</i> eksperimen termokopel pada kulit pisang ambon lumut.....	35
Gambar 25. Sejarah temperatur pendinginan pisang ambon lumut pada temperatur 20°C .....	50
Gambar 26. Perbedaan temperatur kulit luar dan kulit dalam pisang ambon lumut pada temperatur 20°C .....	51
Gambar 27. Sejarah temperatur pendinginan pisang ambon lumut pada temperature 22°C.....	52
Gambar 28. Perbedaan temperatur kulit luar dan kulit dalam pisang ambon lumut pada temperatur 22°C .....	53
Gambar 29. Sejarah temperatur pendinginan pisang ambon lumut pada temperature 24°C .....	54
Gambar 30. Perbedaan temperatur kulit luar dan kulit dalam pisang ambon lumut pada temperatur 24°C .....	54
Gambar 31a. Hubungan temperatur ruangan terhadap konduktivitas termal kulit dan buah pisang ambon lumut .....	58
Gambar 31b. Hubungan temperatur temperatur kulit luar terhadap konduktivitas termal kulit dan buah pisang ambon lumut .....	58
Gambar 31c. Hubungan temperatur kulit dalam terhadap konduktivitas termal kulit dan buah pisang ambon lumut .....	59
Gambar 32. Pisang ambon lumut ( <i>Musa paradisiaca L.</i> ) .....	71
Gambar 33. Software SW-DL2005 digunakan untuk mengunduh data rekaman temperatur .....	71
Gambar 34. Termokopel tipe K dimasukkan ke dalam kulit bagian dalam pisang ambon lumut .....	72
Gambar 35. Termometer digital .....	72
Gambar 36. Menghubungkan termometer digital dengan laptop dengan menggunakan kabel RS232 sebagai konektor.....	73
Gambar 37. Temperatur ruangan (19,8°C), temperatur kulit luar (22°C), dan temperatur kulit dalam (22,8°C) pada akhir proses pendinginan..	73
Gambar 38. Proses pengukuran ketebalan kulit pisang ambon lumut .....	74

Gambar 39. Jangka sorong menunjukkan ketebalan kulit pisang ambon lumut yaitu 3mm.....	74
Gambar 40. Pengambilan data dengan temperatur ruangan 20°C .....	75
Gambar 41. Pengambilan data dengan temperatur ruangan 22°C .....	75
Gambar 42. Pengambilan data dengan temperatur ruangan 24°C .....	76

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Ciri-ciri pisang ambon lumut .....	4
Tabel 2. Deskripsi kematangan buah pisang berdasarkan indeks warna kulit .....	6
Tabel 3. Umur simpan beberapa jenis buah dengan kondisi tertentu .....	7
Tabel 4. Konduktivitas termal pisang ambon .....	11
Tabel 5. Koefisien $A_1$ dan $\lambda_1$ untuk konduksi transien satu dimensi pada dinding, silinder dan bola.....	19
Tabel 6. Bilangan Prandtl untuk beberapa jenis fluida .....	21
Tabel 7. Hubungan empiris untuk bilangan nusselt pada permukaan benda ....	22
Tabel 8. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi.....	23
Tabel 9. Beberapa konduktivitas termal material padat, cair dan gas.....	25
Tabel 10. Beberapa konduktivitas termal buah-buahan.....	27
Tabel 11. Temperatur kulit luar dan kulit dalam pisang ambon lumut pada temperatur ruangan 20°C .....	39
Tabel 12. Temperatur kulit luar dan kulit dalam pisang ambon lumut pada temperatur ruangan 22°C .....	40
Tabel 13. Temperatur kulit luar dan kulit dalam pisang ambon lumut pada temperatur ruangan 24°C .....	42
Tabel 14. Pengaruh temperatur ruangan 20°C terhadap konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut.....	51
Tabel 15. Pengaruh temperatur ruangan 22°C terhadap konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut.....	53
Tabel 16. Pengaruh temperatur ruangan 24°C terhadap konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut.....	55
Tabel 17. Pengaruh variasi temperatur ruangan terhadap konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut.....	56
Tabel 18. Hasil perhitungan konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut pada temperatur ruangan 20°C.....	64

Tabel 19. Hasil perhitungan konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut pada temperatur ruangan 20°C .....	67
Tabel 20. Hasil perhitungan konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut pada temperatur ruangan 20°C .....	70

## DAFTAR SIMBOL

Notasi	Keterangan	Satuan
$q$	Laju perpindahan panas	W
$k$	konduktivitas termal	W/m.K
$A$	luas permukaan	$m^2$
$L$	Panjang	m
$h$	Koefisien konveksi	W/ $m^2$ .K
$T_s$	temperatur permukaan	K
$T_\infty$	Temperatur fluida	K
$T_{film}$	Temperatur film	K
$\Delta T$	Perbedaan temperatur	K
$Nu$	Bilangan Nusselt	-
$\beta$	Koefisien temperatur	1/K
$L_c$	Panjang karakteristik	m
$Re$	Bilangan Reynold	-
$\rho$	Densitas	$kg/m^3$
$D$	Diameter	m
$r$	Jari-jari	m
$\mu$	Viskositas dinamis	kg/m.s
$\nu$	Viskositas kinematis	$m^2/s$
$Pr$	Bilangan Prandtl	-
$Gr$	Bilangan Grashof	-
$C_p$	Panas jenis spesifik	kJ/kg.K
$v$	Kecepatan aliran	m/s

g	Percepatan gravitasi	9,81 m/s <sup>2</sup>
t	Waktu	min



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Penanganan pasca panen yang kurang tepat pada produk hortikultura mengakibatkan menurunnya kualitas dan daya jual. Penanganan yang baik akan memberikan nilai tambah bagi produk-produk hortikultura baik bagi para petani, pengusaha di bidang pertanian maupun masyarakat umum yang mengkonsumsinya. Pada umumnya buah-buahan dan sayur-sayuran dipetik pada suhu lingkungan yang cukup tinggi. Suhu yang tinggi dapat mempercepat proses respirasi dan transpirasi sehingga buah dan sayur cepat membusuk. Salah satu cara untuk mengatasi hal tersebut biasanya dilakukan pendinginan awal, dengan maksud untuk menghilangkan panas produk setelah pemanenan, sebelum penyimpanan produk dilakukan (Johanes, 2012).

Pisang ambon lumut termasuk keluarga *Musacae*, genus muda dan merupakan salah satu buah yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Selain itu, buah pisang menjadi salah satu komoditas perdagangan internasional selain jeruk, apel dan anggur. Apabila buah disimpan pada suhu lingkungan setelah panen, proses respirasi menjadi lebih cepat sehingga buah menjadi mudah rusak dan membusuk. Upaya yang dapat dilakukan untuk menjaga kualitas buah pisang ialah menjaganya di temperatur rendah sehingga mengurangi laju respirasi dan transpirasi pada buah. Namun penyimpanan buah pisang di bawah temperature 11°C dapat menyebabkan buah mengalami kerusakan (*chilling injury*) (Kotecha and Desai, 1995; Turner, 1997). Oleh karena itu, untuk mempertahankan kualitas buah maka diperlukan proses perlakuan dan temperatur yang tepat dalam penanganan pasca panen. Dalam menentukan temperatur penyimpanan yang diinginkan, maka data awal yang perlu diketahui ialah sifat-sifat termal dari buah pisang.

Sifat termal pada buah-buahan seperti panas spesifik ( $C_p$ ), difusivitas termal ( $\alpha$ ) dan konduktivitas termal ( $k$ ) menjadi informasi dan data penting dalam mendesain proses pendinginan optimal. Menurut

Erdogdu et al. (2013) nilai konduktivitas dan difusivitas termal pisang perlu diketahui untuk mendesain proses pendinginan yang optimal. Studi yang telah dilakukan oleh Bart-Plange et al. (2012) pada sifat termal buah pisang Gros Michel yang ditanam di Ghana melaporkan nilai konduktivitas termal pisang Gros Michel bervariasi dari 0,249 W/m°C hingga 0,458 W/m°C, sementara koefisien difusivitas termal bervariasi dari  $1,15 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s hingga  $1,62 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s dan panas spesifik bervariasi dari 1574 J/kg°C hingga 2506,8 J/kg°C. Dalam sebuah studi Ikegwo dan Ekwu (2009) mengemukakan bahwa sifat termal beberapa buah tropis seperti pisang meningkat seiring meningkatnya kadar air. Mariani et al. (2005) mengemukakan bahwa perubahan kecil pada temperatur dan kadar air pisang menyebabkan berubahnya difusivitas termal buah.

Salah satu bagian penting dari buah pisang adalah kulitnya. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan sifat termal dari buah pisang, tetapi pada kulit buah masih terbatas. Sementara kulit pisang memiliki pengaruh pada proses penanganan produk pasca panen yang menentukan tingkat kematangan dan kualitas buah pisang. Oleh karena itu, penulis terdorong untuk melakukan penelitian dengan judul **“Kajian Eksperimen Pengaruh Temperatur Terhadap Konduktivitas Termal Kulit Buah Pisang Ambon Lumut (*Musa paradisiaca L.*)”**

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menentukan nilai konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut (*Musa paradisiaca L.*)?
2. Bagaimana pengaruh perubahan temperatur terhadap konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut (*Musa paradisiaca L.*)?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Menentukan nilai konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut (*Musa paradisiaca L.*).
2. Menganalisis pengaruh temperatur terhadap konduktivitas termal kulit ambon lumut (*Musa paradisiaca L.*).

### **1.4 Batasan Penelitian**

Penelitian ini dibatasi pada sifat termal yaitu nilai konduktivitas kulit pisang ambon lumut dimana buah ditempatkan secara horizontal di dalam ruangan pendingin dengan variasi temperatur ruangan 20°C, 22°C dan 24°C. Pisang ambon lumut yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan pisang dengan skala indeks warna tingkat 1 (hijau). Dalam perhitungan perpindahan panas, pisang ambon lumut diasumsikan berbentuk silinder horizontal dan pengukuran dilakukan pada permukaan kulit luar dan kulit dalam menggunakan termokopel tipe K.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai nilai konduktivitas termal kulit pisang ambon lumut untuk menentukan proses perlakuan panas atau pendinginan yang optimal serta membantu dalam desain peralatan produk buah-buahan.
2. Data dan kesimpulan yang diperoleh dapat menjadi bahan referensi pengembangan riset lebih lanjut tentang penanganan pasca panen pada buah pisang ambon lumut dalam menjaga kualitas buah.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pisang Ambon Lumut

Pisang merupakan komoditas buah tropis yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Pada umumnya pisang adalah tumbuhan terna raksasa berdaun besar dan memanjang dari suku *Musaceae*. *Musa paradisiaca L.* adalah salah satu jenis pisang yang tumbuh dan dikembangkan di seluruh Indonesia dan dikenal sebagai pisang ambon lumut karena merujuk pada kulit hijau kekuningan ketika sudah matang (Verheij & Coronel, 1992). Pisang ambon lumut memiliki rasa manis yang lezat, aroma yang kuat dan khas.

Buah pisang sangat mudah rusak karena sifat buah pisang yang merupakan buah klimakterik (Giovannoni, 2004). Buah klimakterik adalah buah yang mengalami lonjakan respirasi dan produksi etilen setelah dipanen (Suhardiman, 1997). Menurut Aizat et. Al (2013) buah klimakterik dicirikan oleh adanya peningkatan respirasi serta produksi etilen selama proses pemasakan buah (*ripening process*). Pada buah klimakterik, etilen memiliki peran yang sangat penting dalam proses pematangan dimana peningkatan produksi etilen yang masif menginisiasi dimulainya periode klimakterik (Karmawan et al, 2009). Menurut Mulyanti et al. (2015) pisang ambon hijau memiliki ciri-ciri seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 di bawah ini.

**Tabel 1** Ciri-ciri pisang ambon lumut (Mulyanti et al, 2015)

<b>Bagian</b>	<b>Ciri-ciri</b>
Tangkai daun	Intermediate
Daun	Warna tulang daun bagian punggung hijau muda
Batang semu	Bila pelepah dibuang selapis, lapisan berikutnya warnanya lebih merah
Tanaman atau pohonnya	Lebih tinggi dan besar dibanding pisang ambon lainnya
Buah	Penampang melintang buah sedikit menyudut, kuningnya hanya membayang saja atau kuning kehijauan, warna buah krim






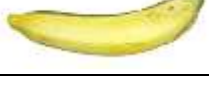




**Gambar 1.** Pisang ambon lumut (*Musa paradisiaca L.*)

## **2.2 Indeks Skala Warna Kulit Buah**

Kualitas (mutu) buah pisang ditentukan dari derajat ketuaan, kebersihan, bentuk, ada tidaknya buah dempet atau buah yang lepas, serta terkena hama atau penyakit. Pisang umumnya dipanen apabila pada sisir pertama dari tandan sudah terdapat 1-2 buah yang menguning. Pada saat itu pertumbuhan buah sudah mencapai atau mendekati maksimum. Sisir buah masih berwarna hijau, namun proses pematangan (*ripening process*) masih akan berlanjut setelah proses pemetikan karena pisang termasuk buah klimakterik. Tingkat kematangan buah pisang ditandai dari warnanya. Prabawati et al. (2009) menyatakan bahwa derajat kekuningan kulit buah tersebut dinilai dengan angka antara 1 sampai 8. Tabel 2 menyajikan deskripsi kematangan buah pisang berdasarkan warna kulit.

**Tabel 2.** Deskripsi kematangan buah pisang berdasarkan indeks warna kulit.

Indeks Warna	Keadaan Buah	Deskripsi
1		Seluruh permukaan buah berwarna hijau, buah masih keras
2		Permukaan buah berwarna hijau dengan semburat atau sedikit warna kuning
3		Warna hijau lebih dominan daripada kuning
4		Kulit buah dengan warna kuning lebih banyak dari pada warna hijau
5		Seluruh permukaan kulit buah berwarna kuning, bagian ujung masih hijau
6		Seluruh jari buah pisang berwarna kuning
7		Buah pisang berwarna kuning dengan sedikit bintik kecoklatan
8		Buah pisang berwarna kuning dengan banyak bercak coklat

### 2.3 Pascapanen Pisang

Penanganan pascapanen (*postharvest*) sering disebut juga sebagai pengolahan primer (*primary processing*) merupakan istilah yang digunakan untuk semua perlakuan dari panen sampai komoditas dapat dikonsumsi segar atau untuk persiapan pengolahan berikutnya. Umumnya perlakuan tersebut tidak mengubah bentuk penampilan atau penampakan, termasuk berbagai aspek dari pemasaran dan distribusi (Mutiarawati, 2007). Buah pisang harus dipanen setelah tua benar agar mutunya tinggi. Buah pisang merupakan jenis buah yang dapat diperam karena mengeluarkan gas etilen yang memacu proses pematangan. Buah yang matang karena diperam mempunyai mutu yang rendah. Setelah panen produk hortikultura buah maupun sayuran segar tetap melakukan aktivitas

metabolisme yaitu respirasi. Respirasi terus berlangsung untuk memperoleh energi yang digunakan untuk aktivitas hidup pascapanennya (Chomchalow, 2004).

Penanganan pascapanen hasil hortikultura yang umumnya dikonsumsi segar dan mudah rusak (*perishable*), bertujuan mempertahankan kondisi segarnya dan mencegah perubahan-perubahan yang tidak dikehendaki selama penyimpanan, seperti pertumbuhan tunas, pertumbuhan akar, batang bengkok, buah keriput, terlalu matang dan lain-lain. Perlakuan dapat berupa pembersihan, pencucian, pengikatan, *curing*, sortasi, *grading*, pengemasan, penyimpanan dingin, pelilinan, dan sebagainya (Mutiarawati, 2007).

Perlakuan pascapanen pisang dalam penyimpanan bertujuan untuk menghambat proses enzimatik untuk meminimalkan respirasi dan transpirasi sehingga daya simpan buah lebih lama. Sebagai buah klimakterik, pisang mengalami kenaikan respirasi dan produksi etilen yang semakin tinggi pada saat proses pematangan. Keadaan tersebut menyebabkan daya simpan pisang menjadi sangat singkat, sehingga menyebabkan kualitas pisang cepat menurun.

## 2.4 Penyimpanan Dingin

Winarno (2002) menyatakan bahwa alpukat, pisang, dan tomat merupakan beberapa diantara buah-buahan dan sayuran yang menghasilkan etilen. Etilen mampu menstimulasi proses pematangan buah dan sayuran. Namun efek pematangan etilen pada suhu rendah (misalnya 0°C) sangat kecil atau tidak ada sama sekali, tetapi penting peranannya pada suhu tinggi. Tabel 3 menunjukkan kebutuhan kondisi penyimpanan buah pisang dalam keadaan awal penyimpanan masih hijau yang disimpan pada temperatur 13-15°C.

**Tabel 3.** Umur simpan beberapa jenis buah dengan kondisi tertentu (Winarno, 2002)

Komoditi	Suhu Simpan (°C)	RH (%)	Umur simpan	Kadar air (%)
Alpukat	4 – 13	85 - 90	2 – 4 minggu	65

Apel	-1 – 4	90	3 – 8 bulan	84
Pisang hijau	13 – 15	90 – 95	4 -7 hari	75
Mangga	13	85 - 90	2 – 3 minggu	81
Jambu biji	7 – 10	90	2 – 3 minggu	83

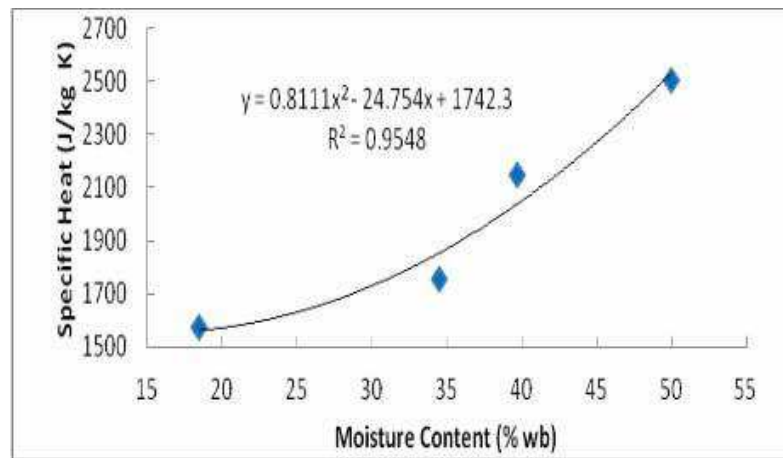
Kotecha dan Desai (1995) menjelaskan penyebab kerugian (*losses*) selama penyimpanan dapat terjadi karena beberapa sebab seperti *mechanical injury* dan *chilling injury*. Pisang jauh lebih rentan terhadap *mechanical injury* daripada buah lainnya karena teksturnya yang lembut dan kadar air yang tinggi sehingga membutuhkan penanganan yang tepat selama pengepakan, pengangkutan, penyimpanan, dan pemasaran. Cedera dingin (*chilling injury*) disebabkan oleh penyimpanan pisang mentah (hijau) pada temperatur 1°C dan 7°C selama beberapa jam. Menurut Erdogdu et al. (2013) bahwa *chilling injury* ditandai dengan warna kuning keabu-abuan atau kusam setelah pematangan. Oleh karena itu, pisang biasanya diekspor pada temperatur 11°C dan 13°C untuk menghindari terjadinya cedera dingin (*chilling injury*).

Tingkat cedera pada beberapa jenis pisang sangat bervariasi dan dapat diketahui dari kulit hijau yang kecoklatan atau menghitam seluruhnya saat pemasakan. Pada buah pisang hijau (mentah) biasanya efek *chilling injury* tidak terlalu terlihat, tetapi pada saat pemasakan warna kulit biasanya bervariasi dari kuning kusam hingga kuning keabu-abuan. Gejala-gejala tersebut muncul dari akumulasi zat fenolik teroksidasi dalam epidermal atau subepidermal disertai dengan beberapa retensi klorofil. Efek dari *chilling injury* pada buah pisang berbeda-beda. Pada umumnya melunak, cenderung asam, dan tidak memiliki rasa.

Sifat termal pada buah-buahan seperti panas spesifik ( $C_p$ ), difusivitas termal ( $\alpha$ ) dan konduktivitas termal ( $k$ ) menjadi informasi dan data penting dalam mendesain proses pendinginan optimal. Bart-Plange et al. (2012) melakukan penelitian terhadap pisang Gros Michel untuk mengetahui pengaruh kadar air terhadap panas spesifik, konduktivitas termal dan difusivitas termal Gros Michel yang tumbuh di Ghana. Dari hasil

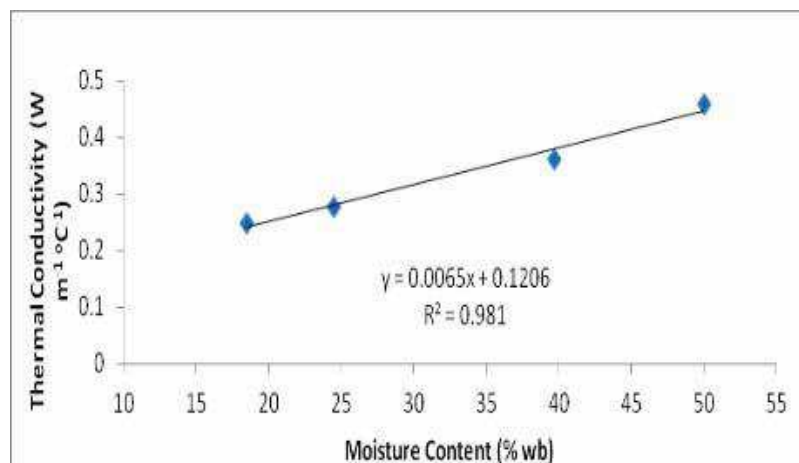


penelitiannya diperoleh nilai rata-rata panas spesifik dari pisang Gros Michel bervariasi mulai 1574 J/kg°C hingga 2506,8 J/kg°C.



**Gambar 2.** Variasi kadar air terhadap panas spesifik buah pisang Gros Michel

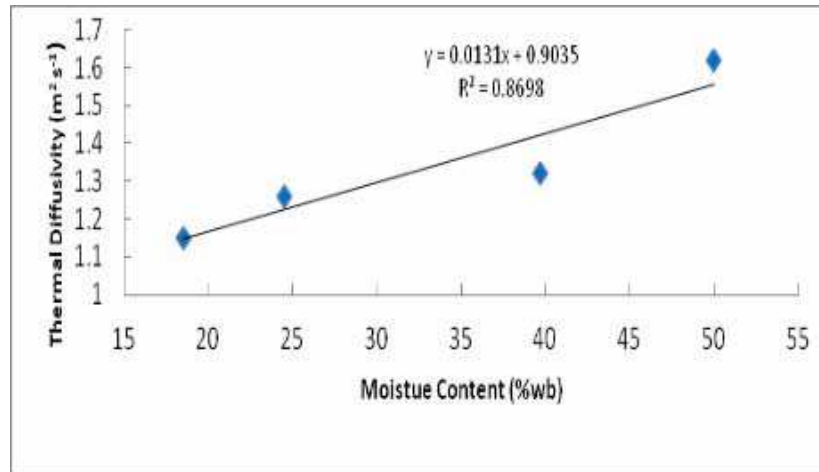
Pada gambar 2 di atas menunjukkan bahwa panas spesifik ( $C_p$ ) pada pisang meningkat seiring meningkatnya kadar air. Ikegwo dan Ekwu (2009) dalam penelitiannya juga melaporkan panas spesifik dari pisang 3,45 kJ/ kg°C pada kadar air 71%. Hal ini sesuai penelitian dari Tansakul dan Lumyong (2008) yang mengemukakan bahwa panas spesifik dari produk-produk makanan merupakan fungsi dari kadar air yang terdapat di dalam produk.



**Gambar 3.** Variasi kadar air terhadap nilai konduktivitas termal buah pisang Gros Michel

Gambar 3 menunjukkan nilai konduktivitas termal buah pisang Gros Michel yang bervariasi dari 0,249 W/m°C hingga 0,458 W/m°C dengan kadar air 18,5-50% wb. Konduktivitas termal pisang terlihat meningkat

secara linear dengan meningkatkan kadar air. Pada kadar air 63-65% wb, Perusella et al. (2010) memperoleh konduktivitas termal yang bervariasi dari 0,3-0,55 W/m°C. Nilai eksperimental yang diperoleh untuk konduktivitas termal pisang Gros Michel sesuai dengan literatur yang telah dipublikasikan.



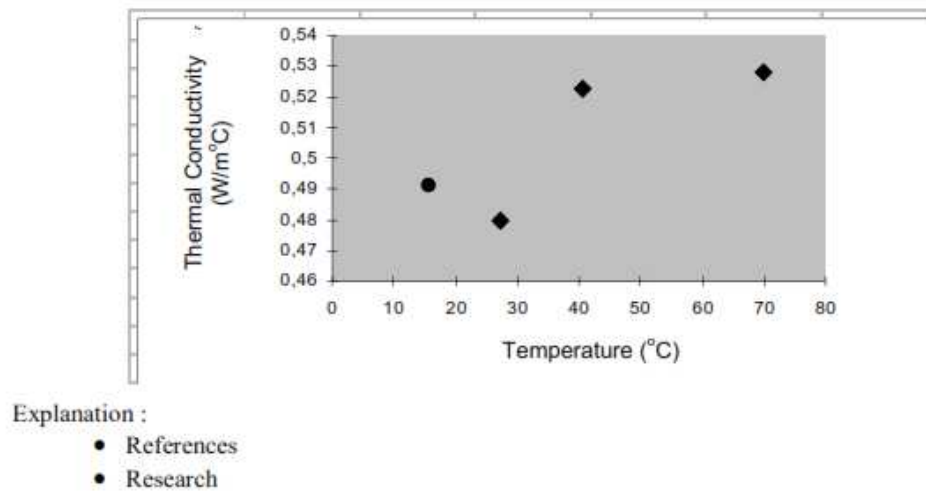
**Gambar 4.** Variasi kadar air terhadap nilai difusivitas termal buah pisang Gros Michel

Nilai difusivitas termal berkisar  $1,15 \times 10^{-7} m^2/s$  hingga  $1,62 \times 10^{-7} m^2/s$  dengan variasi kadar air 18,5-50% wb. Gambar 4 menunjukkan adanya peningkatan linear difusivitas termal dengan kadar air. Ikegwu dan Ekwu (2009) memperoleh nilai difusivitas termal  $1,5 \times 10^{-7} m^2/s$  pada kadar air 71% wb. Mariani et al. (2008) memperoleh difusivitas yang bervariasi dari  $2,49 \times 10^{-9} m^2/s$  hingga  $1,88 \times 10^{-7} m^2/s$ .

Argo et al. (2000) melakukan penelitian tentang konduktivitas termal buah pisang ambon (*Musa paradisiaca L.*). Konduktivitas termal rata-rata pisang ambon pada temperatur pemanasan 40°C adalah 0,525 W/m°C dan pada temperatur pemanasan 70°C yaitu 0,53 W/m°C. Nilai konduktivitas termal yang tinggi terjadi disebabkan oleh meningkatnya kadar air pada setiap percobaan. Apabila kadar air meningkat maka akan berbanding lurus dengan kenaikan nilai konduktivitas (k) dan panas spesifik (Cp) seperti yang ditunjukkan pada tabel 4 di bawah ini.

**Tabel 4.** Konduktivitas termal pisang ambon (Argo et al., 2000)

Heating treatment	Moisture content (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (kJ/kg°C)	$\alpha_{avg}$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)
40-40°C	77,16	950,378	3,46	1,5 x 10 <sup>-7</sup>	0,493
	77,23	948,009	3,463	1,6 x 10 <sup>-7</sup>	0,525
	77,4	943,269	3,469	1,7 x 10 <sup>-7</sup>	0,556
<b>Average</b>	<b>77,27</b>	<b>947,219</b>	<b>3,464</b>	<b>1,6 x 10<sup>-7</sup></b>	<b>0,525</b>
70-40°C	76,13	966,969	3,425	1,4 x 10 <sup>-7</sup>	0,493
	76,73	962,229	3,446	1,6 x 10 <sup>-7</sup>	0,531
	76,8	959,859	3,448	1,8 x 10 <sup>-7</sup>	0,596
<b>Average</b>	<b>76,55</b>	<b>963,368</b>	<b>3,44</b>	<b>1,6 x 10<sup>-7</sup></b>	<b>0,53</b>



**Gambar 5.** Hubungan antara temperatur pemanasan dan konduktivitas termal untuk pisang ambon (Argo et al., 2000)

Temperatur perlakuan mempengaruhi nilai konduktivitas termal seperti yang ditunjukkan pada gambar 5, Mohsenin (1980) bereksperimen pada temperatur 27°C dan memperoleh nilai konduktivitas termal yaitu 0,481 W/m°C. Argo et al. (2000) melakukan eksperimen pada buah pisang ambon dengan temperatur perlakuan 40°C dan memperoleh nilai konduktivitas termal rata-rata buah pisang Ambon yaitu 0,525 W/m°C dan pada temperatur 70°C nilai rata-rata konduktivitas termal buah 0,53 W/m°C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu perlakuan (*treatment*) memberikan peningkatan pada nilai konduktivitas termal.

## 2.5 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah proses yang dinamis yaitu panas dipindahkan secara spontan dari satu bahan ke bahan lain yang lebih dingin. Perpindahan energi selalu dari temperatur tinggi ke temperatur rendah dan berhenti ketika dua medium mencapai temperatur yang sama. Perbedaan temperatur antara sumber panas dan penerima panas merupakan gaya tarik dalam perpindahan panas. Peningkatan perbedaan temperatur akan meningkatkan gaya tarik sehingga meningkatkan kecepatan perpindahan panas (Cengel, 2003).

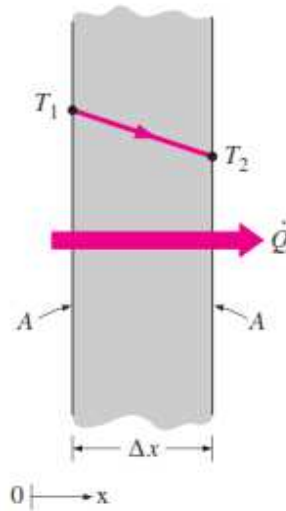
Ilmu perpindahan panas pada umumnya dapat ditemukan dalam sistem rekayasa dan aspek kehidupan lainnya. Peralatan-peralatan rumah tangga dirancang seluruh atau sebagiannya menggunakan prinsip-prinsip perpindahan panas, contohnya pemanas air, pengkondisian udara, kulkas, radiator mobil dan lain sebagainya. Perpindahan panas juga dapat diamati pada sistem perpipaan yang mengalirkan fluida seperti minyak dan gas.

Perpindahan energi panas pada pipa terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan. Temperatur selalu bergerak dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Apabila temperatur dalam pipa lebih tinggi, maka temperatur tersebut akan mengalir menuju lingkungan yang bertemperatur lebih rendah. Perpindahan panas dapat melalui tiga cara yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Semua metode perpindahan panas membutuhkan perbedaan temperatur dan berasal dari temperatur tinggi ke temperatur rendah.

### 2.5.1 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas dimana panas mengalir dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar menurut teori kinetik (Iskandar, 2014). Pada medium cair dan gas, konduksi disebabkan oleh *collision* dan difusi molekul yang bergerak acak (Cengel, 2003). Contoh

perpindahan panas konduksi yaitu panas yang berpindah di dalam sebuah batang logam akibat pemanasan salah satu ujungnya.



**Gambar 6.** Konduksi pada dinding dengan ketebalan  $\Delta x$  dan luas  $A$

Laju perpindahan panas konduksi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti bentuk medium, ketebalan, dan material medium tersebut. Pada gambar 6 konduksi terjadi pada dinding tebal yang memiliki ketebalan  $\Delta x = L$ ,  $x_0=0$  dan  $x_1=L$  dan luas permukaan ( $A$ ) tegak lurus terhadap laju perpindahan panas. Perbedaan temperatur dinding  $\Delta T = T_1 - T_2$ . Laju perpindahan panas secara konduksi melalui lapisan bidang berbanding lurus dengan luas permukaan bidang dan gradien temperatur tetapi berbanding terbalik terhadap tahanan termal (ketebalan dinding). Di mana  $dT/dx$  adalah gradien temperatur yang merupakan kurva kemiringan temperatur pada diagram  $T-x$ . laju perpindahan panas  $q_{cond}$ . dapat ditulis sebagai berikut:

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \text{ (Watt)}$$

Kemudian mengintegalkan  $dx$  dan  $dT$ , dimana  $x_1=L$ ,  $x_0=0$ :

$$q_{cond} \int_{x_0}^{x_1} dx = -kA \int_{T_2}^{T_1} dT$$

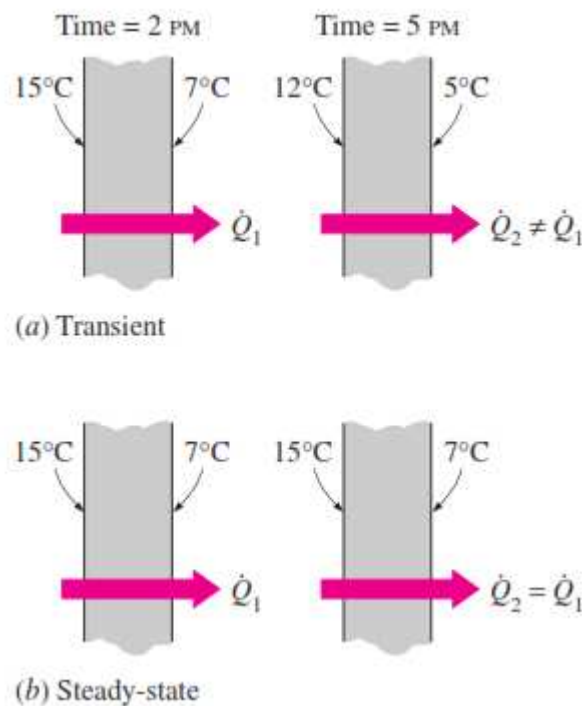
$$q_{cond} L = -kA(T_1 - T_2)$$

$$q_{cond} = \frac{-kA(T_1 - T_2)}{L}$$

Persamaan di atas merupakan persamaan Fourier, di mana tanda negatif menunjukkan bahwa gradien temperature berlawanan arah dengan laju perpindahan panas dan  $k$  adalah konduktivitas termal dari material.

$$q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \text{ (Watt)}$$

Pada perpindahan panas konduksi dibedakan menjadi dua yaitu *steady state* dan *unsteady state* (transien). *Steady state* berarti tidak ada perubahan dengan waktu pada titik mana pun pada medium. Sedangkan konduksi transien dipengaruhi oleh waktu seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 di bawah ini.



**Gambar 7.** Konduksi steady dan transien pada dinding (Cengel, 2003)

### 2.5.1.1 Konduksi *Steady* pada Dinding Datar Satu Dimensi

Pada kondisi yang sebenarnya, konduksi pada dinding datar yang bisa dipandang sebagai konduksi satu dimensi tidak pernah ada. Namun konduksi yang terjadi pada dinding relatif tipis dan cukup luas, atau dinding yang keempat sisinya diisolasi dengan

baik sehinggal dipandang sebagai konduksi pada dinding datar satu dimensi. Pada gambar 8 proses proses perindahan panas berlangsung pada medium padat dengan masing-masing permukaan bertemperatur  $T_1$  dan  $T_2$  dimana  $T_1 > T_2$ . Laju perpindahan panas konduksi  $q_{cond}$ . dapat ditulis (berdasarkan Hukum Fourier):

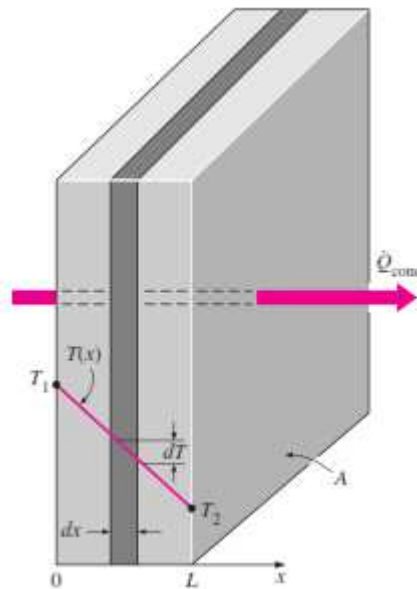
$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \text{ (Watt)}$$

Dimana.  $q_{cond}$  adalah laju perpindahan panas. (W atau J/s), luas permukaan  $A$  ( $m^2$ ) konstan,  $k$  adalah konduktivitas termal ( $W/m.K$  atau  $W/m^\circ C$ ), dan  $dT/dx$  ialah perbedaan temperature pada arah  $x$  ( $^\circ C/m$  atau  $K/m$ )

$$\int_{x=0}^L q_{cond} \cdot dx = -kA \int_{T_2}^{T_1} dT$$

$$q_{cond} \cdot L = -kA(T_1 - T_2)$$

$$q_{cond} = -kA \frac{T_1 - T_2}{L} \text{ (Watt)}$$



**Gambar 8.** Konduksi pada dinding satu dimensi (Cengel, 2003)

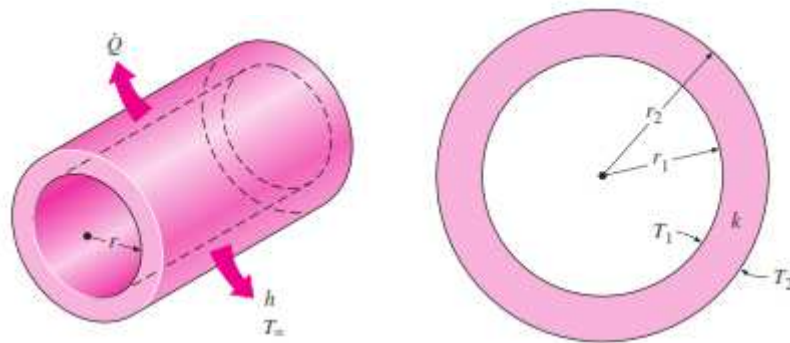
Persamaan konduksi di atas juga dapat dianalogikan sebagai tahanan termal sebagai berikut:

$$q_{cond.} = \frac{T_1 - T_2}{R_{dinding}} \text{ (Watt)}$$

$$R_{dinding} = \frac{L}{kA} \text{ (}^\circ\text{C/W)}$$

### 2.5.1.2 Konduksi Steady pada Silinder

Konduksi pada pipa air terjadi melalui permukaan dinding pipa karena adanya perbedaan temperatur antara fluida di dalam pipa dengan temperatur lingkungan. Jika dinding pipa tipis gradient temperatur pada arah radial akan relative lebih besar. Jika temperatur fluida di dalam dan luar pipa konstan, maka perpindahan panas akan stabil (*steady*). Sehingga perpindahan panas pada pipa silinder bisa dimodelkan sebagai *steady* dan satu arah. Pada kondisi *steady*, tidak ada perubahan temperatur pada pipa yang dipengaruhi oleh waktu.



**Gambar 9.** Pipa silinder dengan temperatur dalam ( $T_1$ ) dan luar ( $T_2$ )

$$q_{conv} = -kA \frac{dT}{dr} \text{ (Watt)}$$

Pada gambar 9 memperlihatkan sebuah dinding silinder dengan temperatur  $T_1$  dan  $T_2$  memiliki jari-jari  $r$  dan tebal  $dr$ . Luas permukaan pada silinder infestisimal adalah:

$$A = 2\pi rL$$

$$q_{conv} = -2\pi rLk \frac{dT}{dr}$$



Integrasi persamaan di atas dari  $r_1$  sampai  $r_2$ :

$$q_{conv} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi kL \int_{T_1}^{T_2} dT$$

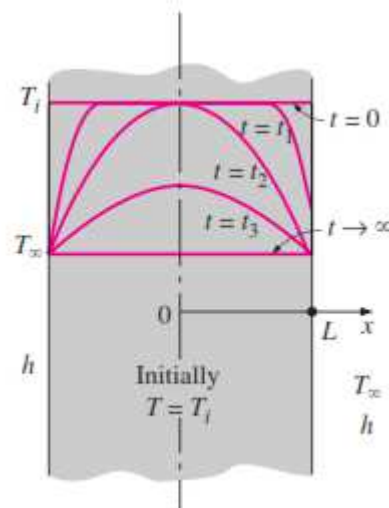
$$q_{conv} \cdot \ln r_2 - \ln r_1 = -2\pi kL(T_2 - T_1)$$

$$q_{conv} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = -2\pi kL(T_2 - T_1)$$

$$q_{conv} = 2\pi kL \frac{(T_2 - T_1)}{\ln(r_2/r_1)}$$

### 2.5.1.2 Konduksi Transien pada Dinding dan Silinder

Pada konduksi *steady*, variasi temperatur dapat diabaikan karena nilainya yang kecil. Namun dalam kehidupan sehari-hari ditemukan variasi temperatur yang berubah dari titik ke titik seiring waktu. Pada dinding dan silinder masing-masing ketebalannya dinyatakan sebagai  $2L$  dan  $r$  (jari-jari) dan  $T_i$  adalah keadaan awal temperatur seragam. Perpindahan panas membutuhkan ruang (sistem) dan lingkungan dengan konveksi seragam dan koefisien transfer ( $h$ ) yang konstan.



**Gambar 10.** Gambaran temperatur transien pada permukaan dinding

$$T_i > T_\infty$$

Gambaran variasi temperatur dengan waktu pada dinding diilustrasikan pada gambar 10. Pada kondisi awal  $t = 0$  dan  $T_i > T_\infty$  seluruh dinding berada pada temperatur  $T_i$ , tetapi temperatur pada permukaan dan dalam dinding mulai menurun sebagai akibat perpindahan panas dari dinding ke lingkungan sekitarnya. Hal tersebut terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara permukaan dinding  $T_i$  dan lingkungan  $T_\infty$ . Perpindahan panas akan terus berlangsung hingga tidak ada perbedaan temperatur antarkeduanya atau mencapai titik kesetimbangan termal.

Dalam menganalisis masalah perpindahan panas yang lebih kompleks, yaitu perpindahan panas transien dapat disederhanakan dengan mengasumsikan bahwa temperatur fungsi waktu dan variasi temperatur dalam sistem. Ukuran relative signifikansi tahanan termal dalam padatan adalah bilangan Biot (Bi) yang merupakan rasio dari tahanan internal terhadap eksternal dan dapat didefinisikan oleh persamaan:

$$Bi = \frac{R_{internal}}{R_{ekstrenal}} = \frac{hL_c}{k_{material}}$$

Dimana:

$h$  = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m<sup>2</sup>.K)

$L$  = panjang karakteristik (m)

$k$  = konduktivitas termal material (W/m.K)

Perpindahan panas transien dengan  $Bi \leq 0,1$  disebut sebagai *lump capacitance* dimana resistansi internal sangat kecil atau dapat diabaikan. Jika nilai Bi diketahui maka temperatur di titik-titik lain dapat ditemukan. Nilai Bi kemudian digunakan untuk memperoleh nilai koefisien lainnya. Temperatur pada benda berubah dari  $T_i$  ke temperatur lingkungan  $T_\infty$  pada akhir proses konduksi transien.

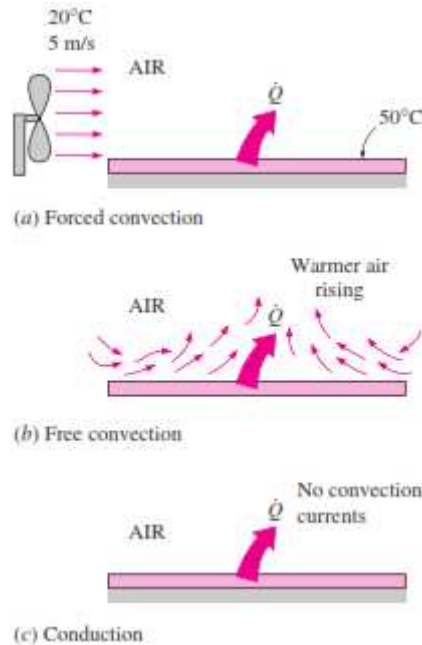
**Tabel 5.** Koefisien  $A_1$  dan  $\lambda_1$  untuk konduksi transien satu dimensi pada dinding, silinder dan bola

Bi	Plane Wall		Cylinder		Sphere	
	$\lambda_1$	$A_1$	$\lambda_1$	$A_1$	$\lambda_1$	$A_1$
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239
0.1	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298
0.2	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592
0.3	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0931	1.0528	1.1164
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713
0.7	0.7506	1.0918	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5995	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202
5.0	1.3138	1.2403	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	2.7654	1.8920
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249
20.0	1.4961	1.2699	2.2880	1.5919	2.9857	1.9781
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990
$\infty$	1.5708	1.2732	2.4048	1.6021	3.1416	2.0000

### 2.5.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan atau aliran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi dan lain sebagainya. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free/natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa atau eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida

sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*) seperti yang diperlihatkan pada gambar 11 di bawah ini.



**Gambar 11.** Konveksi bebas dan konveksi paksa (Cengel, 2003)

$$q_{conv.} = hA(T_s - T_\infty)$$

Keterangan:

h : koefisien konveksi ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

A : luas permukaan ( $\text{m}^2$ )

$T_s$  : Temperatur permukaan (K)

$T_\infty$  : Temperatur fluida (K)

Perpindahan panas konveksi alami (*natural convection*) pada permukaan dipengaruhi pada geometri permukaan benda. Selain itu juga dipengaruhi oleh variasi suhu pada permukaan dan sifat termofisik fluida. Persamaan sederhana untuk bilangan Nusselt pada konveksi alami adalah sebagai berikut:

$$Nu = \frac{hL_c}{k_{fluida}} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n$$

Keterangan

- Nu : bilangan Nusselt  
h : koefisien konveksi (W/m<sup>2</sup>.K)  
Gr : bilangan Grashof  
Ra : bilangan Rayleigh

Dimana Ra adalah bilangan Rayleigh, yang merupakan hasil kali bilangan Grashof dan Prandtl. Bilangan Grashof adalah parameter tak berdimensi yang merupakan rasio gaya apung terhadap gaya viskos yang bekerja pada fluida.

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

Bilangan Prandtl didefinisikan sebagai:

$$Pr = \frac{\text{difusi molekuler momentum}}{\text{difusi molekuler panas}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

Bilangan Prandtl berkisar kurang dari 0,01 untuk logam cair hingga lebih dari 100.000 untuk *heavy oil* (Tabel 6).

**Tabel 6.** Bilangan Prandtl untuk Beberapa Jenis Fluida

Fluid	Pr
Liquid metals	0,004 – 0,03
Gases	0,7 – 1
Water	1,7 – 13,7
Light organic fluids	5 – 50
Oils	50 – 100.000
Glycerin	2.000 – 100.000

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2}$$

Keterangan

- Ra<sub>L</sub> : bilangan Rayleigh  
g : gravitasi (m/s<sup>2</sup>)  
β : 1/K (β = 1/T untuk gas ideal)  
T<sub>s</sub> : temperatur pada permukaan (K)

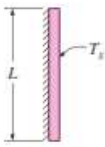
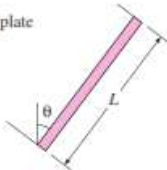



- $T_{\infty}$  : temperatur fluida (K)
- $L_c$  : panjang karakteristik (m)
- $\nu$  : viskositas kinematik ( $m^2/s$ )

Nilai konstanta C dan n bergantung pada geometri permukaan dan *flow regime*. Nilai konstanta C umumnya kurang dari 1.

Nilai koefisien konveksi diperoleh dari bilangan Nusselt dan konduktivitas termal dari fluida yang mengalir. Hubungan sederhana untuk bilangan Nusselt untuk berbagai geometri disajikan pada tabel 7 yang memberikan informasi terkait panjang karakteristik ( $L_c$ ) dan rentang bilangan Rayleigh. Semua sifat fluida juga dapat ditentukan dengan mengetahui temperatur film permukaan benda.

$$T_f = \frac{1}{2}(T_s + T_{\infty})$$

**Tabel 7.** Hubungan empiris untuk bilangan nusselt pada permukaan benda

Geometry	Characteristic length $L_c$	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	$L$	$10^4-10^9$ $10^9-10^{13}$ Entire range	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-21) (complex but more accurate)
Inclined plate 	$L$		Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate  Replace $g$ by $g \cos \theta$ for $Ra < 10^9$
Horizontal plate (Surface area $A$ and perimeter $p$ ) (a) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate)  (b) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 	$A_s/p$	$10^4-10^7$ $10^7-10^{11}$  $10^8-10^{11}$	$Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ (9-23)  $Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ (9-24)
Vertical cylinder 	$L$		A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when  $D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$

Horizontal cylinder 	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{4/3}} \right\}^2$ (9-25)
Sphere 	D	$Ra_D \leq 10^{11}$ ( $Pr \geq 0.7$ )	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/3}}$ (9-26)

Jika bilangan Nusselt dan koefisien konveksi diketahui, maka laju perpindahan panas konveksi alami pada permukaan padat dengan suhu seragam  $T_s$  ke fluida sekitarnya dapat dinyatakan oleh Hukum Pendinginan Newton sebagai:

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

Dimana  $A_s$  adalah luas permukaan perpindahan panas

$h$  : koefisien konveksi ( $W/m^2 \cdot K$ )

$A_s$  : luas permukaan ( $m^2$ )

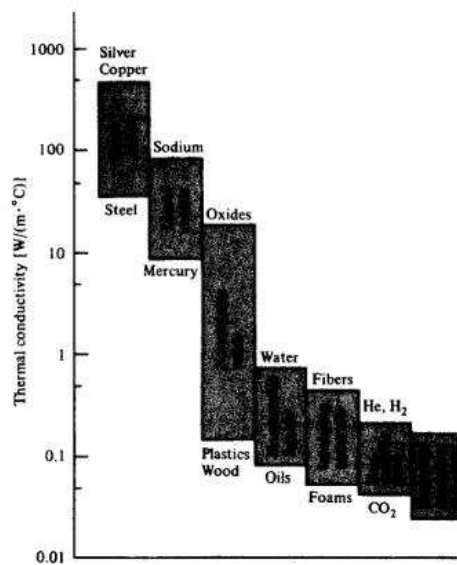
**Tabel 8.** Nilai koefisien perpindahan panas konveksi ( $h$ )

Mode	$h$	
	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
Across 2.5-cm air gap evacuated to a pressure of $10^{-6}$ atm and subjected to $\Delta T = 100^\circ C - 30^\circ C$	0.087	0.015
<i>Free convection, <math>\Delta T = 30^\circ C</math></i>		
Vertical plate 0.3 m [1 ft] high in air	4.5	0.79
Horizontal cylinder, 5-cm diameter, in air	6.5	1.14
Horizontal cylinder, 2-cm diameter, in water	890	157
Heat transfer across 1.5-cm vertical air gap with $\Delta T = 60^\circ C$	2.64	0.46
Fine wire in air, $d = 0.02$ mm, $\Delta T = 55^\circ C$	490	86
<i>Forced convection</i>		
Airflow at 2 m/s over 0.2-m square plate	12	2.1
Airflow at 35 m/s over 0.75-m square plate	75	13.2
Airflow at Mach number = 3, $p = 1/20$ atm, $T_\infty = -40^\circ C$ , across 0.2-m square plate	56	9.9
Air at 2 atm flowing in 2.5-cm-diameter tube at 10 m/s	65	11.4
Water at 0.5 kg/s flowing in 2.5-cm-diameter tube	3500	616
Airflow across 5-cm-diameter cylinder with velocity of 50 m/s	180	32
Liquid bismuth at 4.5 kg/s and $420^\circ C$ in 5.0-cm-diameter tube	3410	600
Airflow at 50 m/s across fine wire, $d = 0.04$ mm	3850	678
<i>Boiling water</i>		
In a pool or container	2500–35,000	440–6200
Flowing in a tube	5000–100,000	880–17,600
<i>Condensation of water vapor, 1 atm</i>		
Vertical surfaces	4000–11,300	700–2000
Outside horizontal tubes	9500–25,000	1700–4400
<i>Dropwise condensation</i>	170,000–290,000	30,000–50,000

## 2.6 Konduktivitas Termal

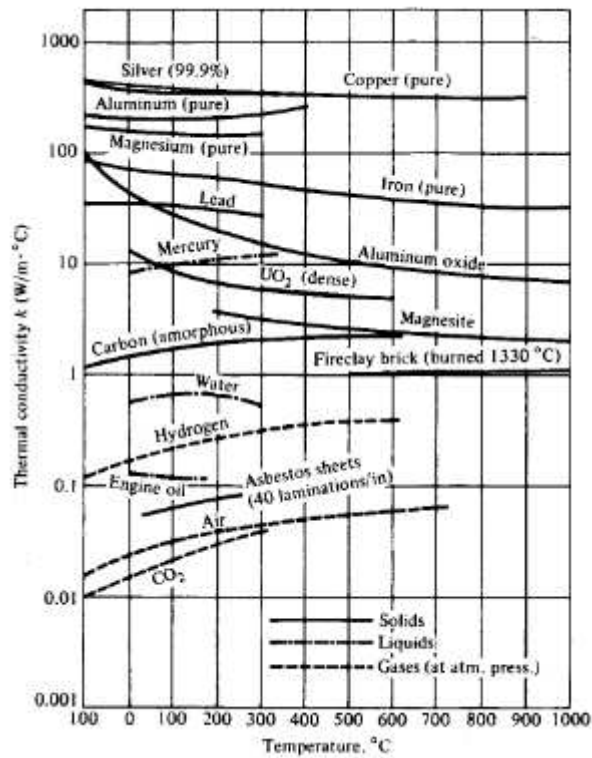
Sifat material yang penting dalam perpindahan panas ialah konduktivitas termal. Tetapan kesetimbangan ( $k$ ) adalah sifat fisik material atau kemampuan material dalam mengantarkan panas. Material memiliki sifat-sifat yang berbeda-beda dalam menghantarkan panas. Konduktivitas termal juga dapat menunjukkan seberapa cepat kalor mengalir dalam bahan tertentu. Sifat ini berguna antara lain untuk rekayasa teknik, seperti dalam perencanaan, perhitungan beban pendinginan pada system refrigerasi dan tata udara, perencanaan alat penukar kalor, menentukan apakah sifat suatu bahan itu konduktur atau isolator dan sebagainya (Yunianto, 2008).

Nilai konduktivitas termal pada masing-masing bahan berbeda seperti diilustrasikan pada gambar 12, antara logam yang sangat konduktif seperti tembaga atau perak dengan gas dan uap yang nilai konduktivitas termalnya kecil. Konduktivitas termal juga bervariasi dengan temperatur. Variasi ini untuk beberapa bahan pada kisaran temperatur tertentu cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Tetapi pada banyak kasus, variasi konduktivitas termal cepat berubah-ubah sesuai dengan temperatur terutama pada temperatur yang sangat rendah, contohnya pada tembaga, aluminium atau perak yang mencapai nilai 50 hingga 100 kali lipat pada suhu kamar (Ozisik, 1985). Pada gambar 13. menjelaskan hubungan antara nilai konduktivitas termal dari beberapa bahan dengan variasi temperatur.



**Gambar 12.** Variasi konduktivitas termal pada beberapa padatan (Ozisik, 1985)





**Gambar 13.** Pengaruh temperatur pada konduktivitas termal material (Ozisik, 1985)

**Tabel 9.** Beberapa konduktivitas termal material padat, cair dan gas.

Properties of solid metals						Properties at Various Temperatures (K), k(W/m - K)/c <sub>p</sub> (J/kg · K)					
Composition	Melting Point, K	Properties at 300 K									
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg · K	$k$ W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s	100	200	400	600	800	1000
Aluminum:											
Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218	
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	870	177	73.0	65	163	186	186		
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)						473	787	925	1042		
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04			
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	5.60	9.85
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7			
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	189	111	90.9	80.7	71.3	65.4
Cobalt	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1
Copper:											
Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14	252	356	397	417	433	451
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17		42	52	59		
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149		
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19				
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	15.8	17.4
Gold	1336	19,300	129	317	127	190	290	337	348	357	375
Iridium	2720	22,500	130	147	50.3	109	124	131	135	140	145
						172	153	144	138	132	126
						90	122	133	138	144	153

Properties of solid nonmetals

Composition	Melting Point, K	Properties at 300 K					Properties at Various Temperatures (K), k (W/m · K)/c <sub>p</sub> (J/kg · K)					
		ρ kg/m <sup>3</sup>	c <sub>p</sub> J/kg · K	k W/m · K	α × 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s	100	200	400	600	800	1000	
						—	—	—	—	—	—	
Aluminum oxide, sapphire	2323	3970	765	46	15.1	450	82	32.4	18.9	13.0	10.5	
Aluminum oxide, polycrystalline	2323	3970	765	36.0	11.9	133	55	26.4	15.8	10.4	7.85	
Beryllium oxide	2725	3000	1030	272	88.0	—	—	196	111	70	47	
Boron	2573	2500	1105	27.6	9.99	190	52.5	18.7	11.3	8.1	6.3	
Boron fiber epoxy (30% vol.) composite	530	2080	—	—	—	—	—	1490	1880	2135	2350	
k, ∥ to fibers	—	—	—	2.29	—	2.10	2.23	2.28	—	—	—	
k, ⊥ to fibers	—	—	—	0.59	—	0.37	0.49	0.60	—	—	—	
c <sub>p</sub>	—	—	1122	—	—	364	757	1431	—	—	—	
Carbon	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Amorphous	1500	1950	—	1.60	—	0.67	1.18	1.89	21.9	2.37	2.53	
Diamond, type IIa insulator	—	3500	509	2300	—	10,000	4000	1540	—	—	—	
Graphite, pyrolytic	2273	2210	—	—	—	21	194	853	—	—	—	
k, ∥ to layers	—	—	—	1950	—	4970	3230	1390	892	607	534	
k, ⊥ to layers	—	—	—	5.70	—	16.8	9.23	4.09	2.68	2.01	1.60	
c <sub>p</sub>	—	—	709	—	—	136	411	992	1406	1650	1793	
Graphite fiber epoxy (25% vol.) composite	450	1400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
k, heat flow ∥ to fibers	—	—	—	11.1	—	5.7	8.7	13.0	—	—	—	
k, heat flow ⊥ to fibers	—	—	—	0.87	0.46	0.68	1.1	—	—	—	—	
c <sub>p</sub>	—	—	935	—	—	337	642	1216	—	—	—	
Procceram, Corning 9000	1623	2000	808	3.98	1.89	5.25	4.78	3.64	3.28	3.08	2.96	
Silicon carbide	3100	3160	675	490	230	—	—	908	1038	1122	1197	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	87	
—	—	—	—	—	—	—	—	880	1000	1135	1195	

Properties of insulating materials  
(at a mean temperature of 24°C)

Material	Thickness, L mm	Density, ρ kg/m <sup>3</sup>	Thermal Conductivity, k W/m · K	Specific Heat, c <sub>p</sub> kJ/kg · K	R-value (for listed thickness, L/k), K · m <sup>2</sup> /W
<b>Blanket and Batt</b>					
Mineral fiber (fibrous form processed from rock, slag, or glass)	50 to 70 mm	4.8–32	—	0.71–0.96	1.23
	75 to 90 mm	4.8–32	—	0.71–0.96	1.94
	135 to 165 mm	4.8–32	—	0.71–0.96	3.32
<b>Board and Slab</b>					
Cellular glass	—	136	0.055	1.0	—
Glass fiber (organic bonded)	—	64–144	0.036	0.96	—
Expanded polystyrene (molded beads)	—	16	0.040	1.2	—
Expanded polyurethane (R-11 expanded)	—	24	0.023	1.6	—
Expanded perlite (organic bonded)	—	16	0.052	1.26	—
Expanded rubber (rigid)	—	72	0.032	1.68	—
Mineral fiber with resin binder	—	240	0.042	0.71	—
Cork	—	120	0.039	1.80	—
<b>Sprayed or Formed in Place</b>					
Polyurethane foam	—	24–40	0.023–0.026	—	—
Glass fiber	—	56–72	0.038–0.039	—	—
Urethane, two-part mixture (rigid foam)	—	70	0.026	1.045	—
Mineral wool granules with asbestos/ inorganic binders (sprayed)	—	190	0.046	—	—
<b>Loose Fill</b>					
Mineral fiber (rock, slag, or glass)	~75 to 125 mm	9.6–32	—	0.71	1.94
	~165 to 222 mm	9.6–32	—	0.71	3.35
	~191 to 254 mm	—	—	0.71	3.87
	~185 mm	—	—	0.71	5.28
Silica aerogel	—	122	0.025	—	—
Vermiculite (expanded)	—	122	0.068	—	—
Perlite, expanded	—	32–66	0.039–0.045	1.09	—
Sawdust or shavings	—	128–240	0.065	1.38	—
Cellulosic insulation (milled paper or wood pulp)	—	37–51	0.039–0.046	—	—
<b>Roof Insulation</b>					
Cellular glass	—	144	0.058	1.0	—
Preformed, for use above deck	13 mm	—	—	1.0	0.24
	25 mm	—	—	2.1	0.49
	50 mm	—	—	3.9	0.93
<b>Reflective Insulation</b>					
Silica powder (evacuated)	—	160	0.0017	—	—
Aluminum foil separating fluffy glass mats; 10–12 layers (evacuated); for cryogenic applications (150 K)	—	40	0.00016	—	—

Pada produk hortikultura seperti buah-buahan dan sayuran juga memiliki nilai konduktivitas termal yang digunakan dalam mendesain proses *treatment* yang tepat sehingga kualitas produk terjaga.

**Tabel 10.** Beberapa konduktivitas termal buah-buahan

Properties of common foods (Concluded)  
(b) Other properties

Food	Water Content, % (mass)	Temperature, T °C	Density, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Thermal Conductivity, $k$ W/m · K	Thermal Diffusivity, $\alpha$ m <sup>2</sup> /s	Specific Heat, $c_p$ kJ/kg · K
<b>Fruits/Vegetables</b>						
Apple juice	87	20	1000	0.559	$0.14 \times 10^{-6}$	3.86
Apples	85	8	840	0.418	$0.13 \times 10^{-6}$	3.81
Apples, dried	41.6	23	856	0.219	$0.096 \times 10^{-6}$	2.72
Apricots, dried	43.6	23	1320	0.375	$0.11 \times 10^{-6}$	2.77
Bananas, fresh	76	27	980	0.481	$0.14 \times 10^{-6}$	3.59
Broccoli	—	-6	560	0.385	—	—
Cherries, fresh	92	0-30	1050	0.545	$0.13 \times 10^{-6}$	3.99
Figs	40.4	23	1241	0.310	$0.096 \times 10^{-6}$	2.69
Grape juice	89	20	1000	0.567	$0.14 \times 10^{-6}$	3.91
Peaches	89	2-32	960	0.526	$0.14 \times 10^{-6}$	3.91
Plums	—	-16	610	0.247	—	—
Potatoes	78	0-70	1055	0.498	$0.13 \times 10^{-6}$	3.64
Raisins	32	23	1380	0.376	$0.11 \times 10^{-6}$	2.48
<b>Meats</b>						
Beef, ground	67	6	950	0.406	$0.13 \times 10^{-6}$	3.36
Beef, lean	74	3	1090	0.471	$0.13 \times 10^{-6}$	3.54
Beef fat	0	35	810	0.190	—	—
Beef liver	72	35	—	0.448	—	3.49
Cat food	39.7	23	1140	0.326	$0.11 \times 10^{-6}$	2.68
Chicken breast	75	0	1050	0.476	$0.13 \times 10^{-6}$	3.56
Dog food	30.6	23	1240	0.319	$0.11 \times 10^{-6}$	2.45
Fish, cod	81	3	1180	0.534	$0.12 \times 10^{-6}$	3.71
Fish, salmon	67	3	—	0.531	—	3.36
Ham	71.8	20	1030	0.480	$0.14 \times 10^{-6}$	3.48
Lamb	72	20	1030	0.456	$0.13 \times 10^{-6}$	3.49
Pork, lean	72	4	1030	0.456	$0.13 \times 10^{-6}$	3.49
Turkey breast	74	3	1050	0.496	$0.13 \times 10^{-6}$	3.54
Veal	75	20	1060	0.470	$0.13 \times 10^{-6}$	3.56
<b>Other</b>						
Butter	16	4	—	0.197	—	2.08
Chocolate cake	31.9	23	340	0.106	$0.12 \times 10^{-6}$	2.48
Margarine	16	5	1000	0.233	$0.11 \times 10^{-6}$	2.08
Milk, skimmed	91	20	—	0.566	—	3.96
Milk, whole	88	28	—	0.580	—	3.89
Olive oil	0	32	910	0.168	—	—
Peanut oil	0	4	920	0.168	—	—
Water	100	0	1000	0.569	$0.14 \times 10^{-6}$	4.217
	100	30	995	0.618	$0.15 \times 10^{-6}$	4.178
White cake	32.3	23	450	0.082	$0.10 \times 10^{-6}$	2.49

Source: Data obtained primarily from ASHRAE, Handbook of Fundamentals, SI version (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), Chap. 30, Tables 7 and 9. Used with permission.

Most specific heats are calculated from  $c_p = 1.08 + 2.51 \times$  (Water content), which is a good approximation in the temperature range of 3 to 32°C. Most thermal diffusivities are calculated from  $\alpha = k/\rho c_p$ . Property values given here are valid for the specific water content.

Pada keadaan riil nilai konduktivitas termal suatu material bervariasi terhadap temperatur. Namun dapat diabaikan dan menggunakan nilai rata-rata serta menjadikannya konstanta karena variasi nilai konduktivitas termal yang kecil (Cengel, 2003).