

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Perpindahan panas**

Perpindahan panas adalah proses perpindahan energi yang terjadi antar benda material sebagai akibat dari perbedaan suhu atau temperatur. Termodinamika menjelaskan bahwa energi yang ditransferkan pada proses perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai panas atau kalor. Perpindahan panas tidak hanya menjelaskan proses energi panas dapat ditransfer, tetapi juga untuk memprediksi laju perpindahan panas yang akan berlangsung dalam kondisi tertentu [4].

Dalam ilmu termodinamika diketahui bahwa energi terdapat dalam berbagai bentuk salah satunya adalah panas. Panas merupakan bentuk energi yang dapat ditransfer dalam satu sistem ke sistem lainnya sebagai akibat dari adanya perbedaan suhu. Ilmu yang mempelajari hal tersebut adalah *heat transfer* (perpindahan panas)[5].

Perpindahan panas adalah suatu perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu [6]. Konsep perpindahan energi sebagai panas adalah energi akan berpindah dari suhu yang lebih tinggi menuju suhu yang lebih rendah dan akan berhenti apabila kedua sistem telah mencapai kesetimbangan panas. mekanisme perpindahan panas terbagi menjadi 3 jenis yaitu: konduksi, radiasi dan konveksi.

#### **1. Konduksi**

Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan panas melalui eksitasi molekuler dalam suatu bahan tanpa gerakan massal materi tersebut. Perpindahan panas konduksi terutama terjadi pada padatan atau media stasioner seperti fluida diam. Misalnya, perpindahan panas dalam benda padat disebabkan oleh kombinasi getaran kisi molekul dan transpor energi oleh elektron bebas, sedangkan dalam gas dan cairan disebabkan oleh tumbukan dan difusi molekul [7]. Persamaan konduksi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$q = k A t \frac{\Delta T}{L} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

q : Laju perpindahan panas konduksi (Watt)

k : Koefisien konduksi termal (W/m<sup>2</sup>K)

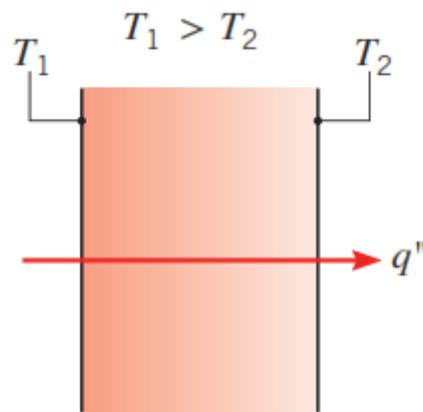
A : Luas penampang (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  : Perbedaan suhu di kedua ujung batang (K)

t : Waktu (s)

L : Panjang (m)

Gambar 2.1 berikut ini merupakan mekanisme proses perpindahan panas secara konduksi.



**Gambar 2. 1** Konduksi melalui padatan atau fluida stasioner [6]

## 2. Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah energi yang dipancarkan materi dalam bentuk foton atau gelombang elektromagnetik [8]. Perpindahan panas dari material dengan suhu tinggi ke material dengan suhu yang lebih rendah, ketika material tidak dalam fisik langsung kontak satu sama lain atau ketika mereka terpisah di ruang angkasa,

disebut radiasi panas [9]. Radiasi bisa menjadi penting bahkan dalam situasi di mana ada media perantara. Contohnya adalah perpindahan kalor yang terjadi antara makhluk hidup dengan sekitarnya. Persamaan radiasi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{q}{t} = e \sigma A T^4 \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

q : Laju perpindahan panas radiasi (Watt)

e : Emisitas bahan ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

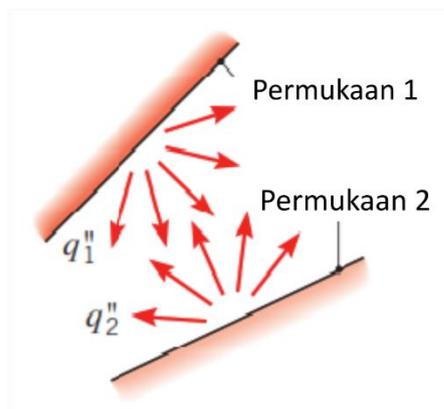
$\sigma$  : Tetapan Stefan Boltzman ( $5.672 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ )

T : Suhu mutlak (K)

t : Waktu (s)

A : Luas Penampang ( $\text{m}^2$ )

Gambar 2.2 berikut ini merupakan mekanisme perpindahan panas secara radiasi.



**Gambar 2. 2** Pertukaran panas radiasi antara dua permukaan [6]

### 3. Konveksi

Konveksi adalah mode perpindahan panas oleh gerakan massa fluida. Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara permukaan dan fluida yang bergerak ketika mereka pada suhu yang berbeda. Perpindahan panas konveksi terjadi ketika suhu permukaan berbeda dari fluida sekitarnya [10]. Perpindahan panas konveksi tergantung pada konduksi dari permukaan padat ke fluida yang berdekatan dan pergerakan fluida di sepanjang permukaan atau menjauh darinya [11]. Persamaan yang mengatur perilaku konveksi panas adalah hukum *Newton's law of cooling*:

$$q = h A (T_s - T_\infty) \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

$q$  : Laju perpindahan panas konveksi (Watt)

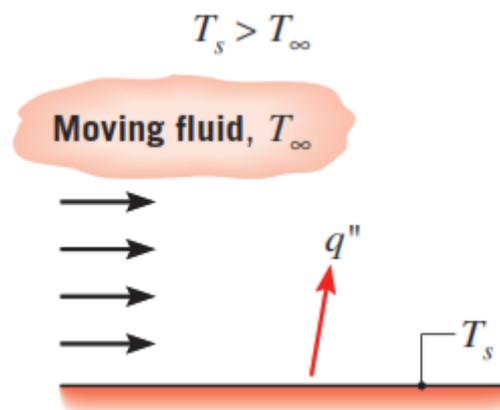
$h$  : Koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2K$ )

$A$  : Luas penampang ( $m^2$ )

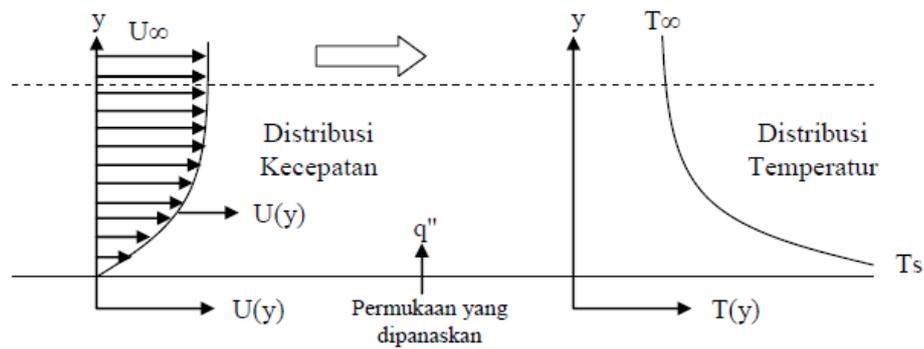
$T_s$  : Temperatur *surface* (K)

$T_\infty$  : Temperatur *infinity* (K)

Gambar 2.3 berikut ini merupakan mekanisme perpindahan panas secara konveksi.



**Gambar 2. 3** Konveksi dari permukaan ke fluida yang bergerak [6].



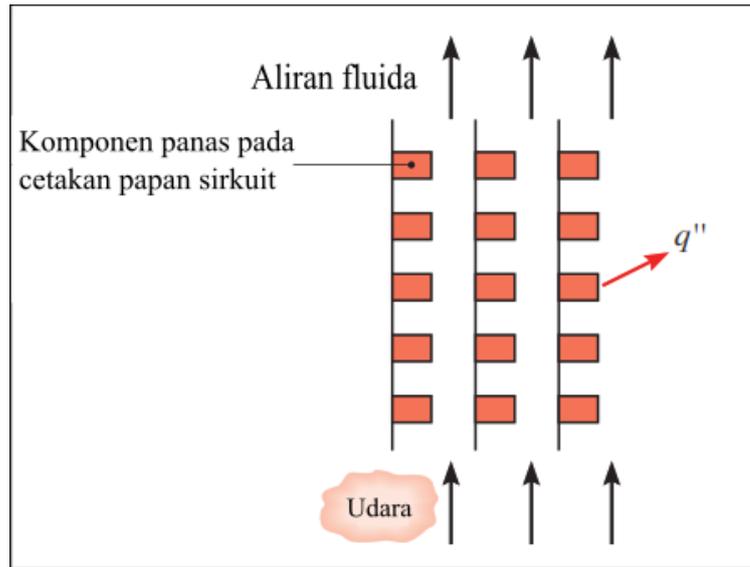
**Gambar 2. 4** Distribusi kecepatan dan temperatur perpindahan panas konveksi

Gambar 2.4 menunjukkan distribusi kecepatan dan temperatur pada pelat datar yang mewakili kondisi konveksi. Hal yang perlu diperhatikan bahwa kecepatan aliran fluida akan semakin menurun ketika mendekati permukaan sebagai akibat adanya gaya viskositas yang bekerja pada fluida [12]. Sedangkan temperatur akan semakin menurun seiring menjauhnya fluida dari permukaan.

Terdapat dua jenis perpindahan panas konveksi yaitu:

**a. Konveksi alami**

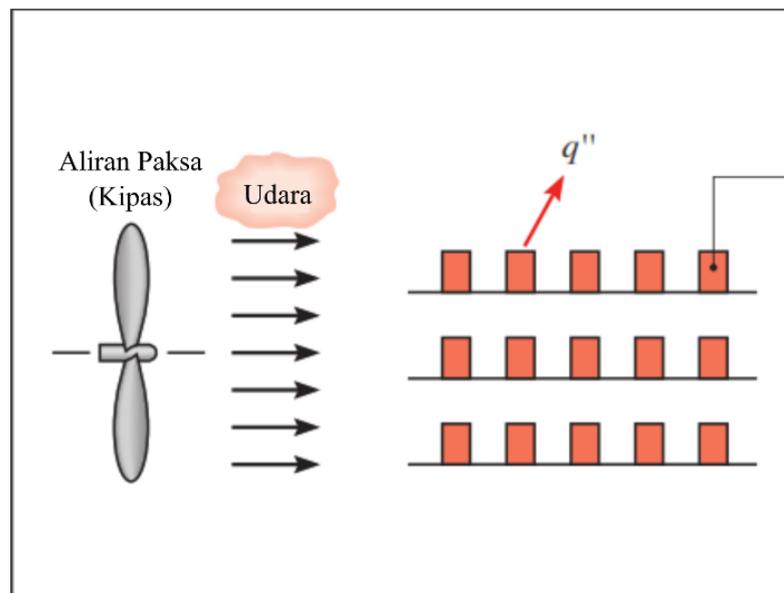
Konveksi alami atau *free convection* merupakan proses perpindahan panas yang disebabkan oleh perbedaan temperatur serta densitas dan tidak terdapat pengaruh gaya dari luar yang mendorongnya [13]. *Free convection* terjadi karena fluida mengalami pemanasan yang menyebabkan perubahan pada densitasnya dan kemudian fluida bergerak naik, dimana udara panas memiliki berat yang lebih ringan dari pada udara dingin. Faktor tersebut yang menyebabkan udara dapat bergerak keatas. Gambar 2.5 berikut ini merupakan mekanisme konveksi alami.



**Gambar 2. 5** Konveksi alami (*free convection*) [6]

### b. Konveksi Paksa

Konveksi paksa atau *forced convection* merupakan proses perpindahan panas dimana aliran fluida (gas atau cairan) disebabkan oleh gaya eksternal seperti pompa dan kipas atau *blower* [14]. Pada umumnya konveksi paksa digunakan pada industri maupun otomotif. Gambar 2.6 berikut ini merupakan mekanisme konveksi paksa.



**Gambar 2. 6** Konveksi paksa (*force convection*) [6]

## 2.2 Parameter Tanpa Dimensi

Persamaan perpindahan panas konveksi berkaitan dengan variabel penting yang dinamakan parameter tanpa dimensi (*dimensionless parameter*). Parameter tanpa dimensi dalam kaitannya dengan perpindahan panas konveksi adalah:

### 1. Bilangan Reynolds (*Reynolds Number*)

Bilangan Reynolds adalah parameter tidak berdimensi yang digunakan untuk menentukan jenis aliran yang terjadi berdasarkan besarnya nilai bilangan Reynolds tersebut [12]. Setiap aliran fluida memiliki bilangan Reynolds yang dapat digunakan untuk mengetahui sifat ataupun jenis dari aliran yang terjadi apakah laminar, transisi, maupun turbulen. Bilangan Reynolds dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

Re = bilangan reynolds

$\rho$  = densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

v = kecepatan fluida (m/s)

D = Diameter (m)

$\mu$  = viskositas absolut fluida dinamis ( $\text{Ns/m}^2$ )

### 2. Bilangan Nusselt (*Nusselt Number*)

Bilangan Nusselt adalah bilangan tanpa dimensi yang menyatakan perbandingan antara koefisien perpindahan panas konveksi terhadap konduktivitas termal fluida. Bilangan nusselt adalah sebuah perhitungan tentang perpindahan panas konveksi yang terjadi pada permukaan. Bilangan Nusselt dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Nu = \frac{hL}{k_f} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

- Nu = bilangan Nusselt  
 h = koefisien perpindahan panas konveksi ( W/m<sup>2</sup>.°C)  
 L = panjang plat ( m )  
 k<sub>f</sub> = konduktivitas termal fluida ( W/m.°C)

### 2.3 Perpindahan Panas Pada Aliran Luar (*External Flow*)

Perpindahan panas akibat aliran fluida yang terjadi di luar pipa dianalisa berdasarkan analisa perpindahan panas secara konveksi yang melewati susunan pipa. Besarnya koefisien perpindahan panas secara konveksi sangat dipengaruhi oleh tingkat turbulensi aliran dan jumlah baris pada pipa. Untuk menentukan jenis aliran, dapat diketahui dengan menentukan nilai bilangan Reynolds. Untuk aliran eksternal, bilangan Reynolds untuk jenis aliran transisi adalah  $5 \times 10^5$ . Jika  $Re < 5 \times 10^5$  maka jenis alirannya laminar dan jika  $Re > 5 \times 10^5$  maka jenis alirannya turbulen. Terdapat dua jenis susunan tube yaitu susunan *inline* dan *staggered*. Jenis aliran dapat dicari dengan persamaan Reynolds Number [15].

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

- Re = bilangan reynolds  
 ρ = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)  
 v = kecepatan fluida (m/s)  
 D = Diameter (m)  
 μ = viskositas absolut fluida dinamis (Ns/m<sup>2</sup>)

Setelah diperoleh nilai *Reynolds number*, untuk mencari nilai *nusselt number* pada aliran *external flow* dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Nu = \frac{h D_h}{k} = C Re^m Pr^n \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

C : Nilai Konstanta C

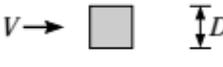
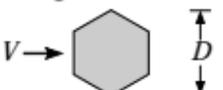
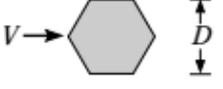
D<sub>h</sub> : Diameter hidrolik (m)

m : Nilai Konstanta m

Pr : Prandtl Number

Nilai dari konstanta C, m dan n dapat diperoleh dari tabel di bawah ini:

**Tabel 2. 1** Nilai konstanta untuk bentuk silinder *non-circular* dalam aliran silang pada gas

Geometry	<i>Re<sub>D</sub></i>	C	m
Square 	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.246	0.588
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.102	0.675
Hexagon 	$5 \times 10^3 - 1.95 \times 10^4$ $1.95 \times 10^4 - 10^5$	0.160 0.0385	0.638 0.782
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.153	0.638
Vertical plate 	$4 \times 10^3 - 1.5 \times 10^4$	0.228	0.731

**2.4 Laju Perpindahan Panas (q)**

Adapun rumus laju perpindahan panas terhadap waktu dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$q = \frac{Q}{t} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

$q$  = Laju perpindahan panas terhadap waktu (Watt)

$Q$  = Energi transfer (J)

$t$  = Waktu (s)

Adapun persamaan laju perpindahan panas konveksi dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$q = h A (\Delta T) \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

$q$  = Laju perpindahan panas konveksi (Watt)

$h$  = Koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$A$  = Luas penampang ( $m^2$  )

$\Delta T$  = Perubahan atau perbedaan temperatur ( $^\circ C$ )

Dalam penelitian ini digunakan pin fin sehingga rumus laju perpindahan panas konveksi dapat diturunkan kembali menjadi sebagai berikut:

$$q = h A_s \Delta T_{LMTD} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

$q$  = Laju perpindahan panas konveksi (Watt)

$h$  = Koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$A_s$  = Luas penampang *pin fin* yang dilewati fluida ( $m^2$  )

$\Delta T$  = Perubahan atau perbedaan temperatur ( $^\circ C$ )

Luas penampang  $A_s$  dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$A_s = WL + 4 S H N \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana:

$A_s$  : Luas permukaan perpindahan panas *pin fin* ( $m^2$ )

$W$  : panjang base plate (m)

- $L$  : lebar base plate (m)  
 $S$  : sisi fin (m)  
 $H$  : panjang fin (m)  
 $N$  : jumlah fin

## 2.5 Koefisien Perpindahan Panas Konveksi

Adapun persamaan koefisien perpindahan panas konveksi adalah sebagai berikut:

$$h = \frac{q}{A_s \Delta T_{LMTD}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

- $h$  : Koefisien perpindahan panas konveksi  
 $q$  : Laju perpindahan panas (W)  
 $A_s$  : Luas permukaan perpindahan panas *pin fin* (m<sup>2</sup>)  
 $\Delta T_{LMTD}$ : Temperatur logaritmik (K)

## 2.6 Log Mean Temperature Difference

LMTD merupakan metode yang digunakan untuk mencari temperatur rata-rata, yaitu dari temperatur inlet dan outlet dari fluida, pada alat penukar kalor. Dengan mencari nilai  $\Delta T_{LMTD}$  kita dapat mencari nilai laju perpindahan panas. Perumusan  $\Delta T_{LMTD}$  sebagai berikut:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}\right)} \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan:

- $\Delta_{LMTD}$  : Perbedaan temperatur rata-rata antara fluida panas dan fluida dingin (K)  
 $T_i$  : Temperatur *inlet* (K)  
 $T_s$  : Temperatur *surface* (K)  
 $T_o$  : Temperatur *outlet* (K)

**2.7 Effectiveness**

*Effectiveness* ( $\epsilon$ ) ialah rasio perbandingan antara laju perpindahan panas menggunakan *fin* dan tanpa menggunakan *fin*. Untuk perumusan *effectiveness*, data dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [15]:

$$\epsilon = \frac{q_f}{h A (T_s - T_i)} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana:

- $q_f$  : laju perpindahan panas konveksi *fin* (Watt)
- $h$  : koefisien perpindahan panas konveksi (W/m<sup>2</sup>K)
- $A$  : Luas perpindahan panas pada *base plate* (m<sup>2</sup>)
- $\Delta T$  : Perbedaan temperatur (T<sub>s</sub>-T<sub>i</sub>)

Berikut ini merupakan tabel yang digunakan untuk mengetahui formulasi laju perpindahan panas yang menggunakan *fin* ( $q_f$ ) pada kondisi panjang tertentu sesuai dengan case A pada tabel berikut:

**Tabel 2. 2** Distribusi temperatur dan *heat loss* untuk sirip penampang yang seragam [15].

Case	Tip Condition ( $x = L$ )	Temperature Distribution $\theta/\theta_b$	Fin Heat Transfer Rate $q_f$
A	Convection heat transfer: $h\theta(L) = -k d\theta/dx _{x=L}$	$\frac{\cosh m(L-x) + (h/mk) \sinh m(L-x)}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (3.70)$	$M \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (3.72)$
B	Adiabatic $d\theta/dx _{x=L} = 0$	$\frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad (3.75)$	$M \tanh mL \quad (3.76)$
C	Prescribed temperature: $\theta(L) = \theta_L$	$\frac{(\theta_L/\theta_b) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \quad (3.77)$	$M \frac{(\cosh mL - \theta_L/\theta_b)}{\sinh mL} \quad (3.78)$
D	Infinite fin ( $L \rightarrow \infty$ ): $\theta(L) = 0$	$e^{-mx} \quad (3.79)$	$M \quad (3.80)$

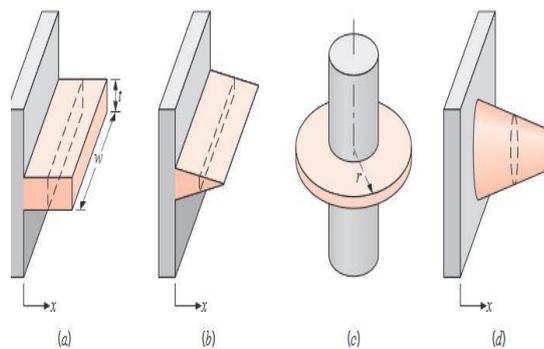
$\theta = T - T_\infty$        $m^2 = hP/kA_c$   
 $\theta_b = \theta(0) = T_b - T_\infty$        $M = \sqrt{hPkA_c} \theta_b$

**2.8 Sirip (*fin*)**

*Fin* merupakan salah satu bagian alat penukar panas yang dirancang untuk meningkatkan perpindahan panas dan meningkatkan kecepatan perpindahan panas yang terjadi. Perpindahan panas sangat dipengaruhi oleh kondisi aliran fluida,

bentuk geometri, bahan media perpindahan panas dan properties fluida. Kenaikan kecepatan udara menyebabkan peningkatan *Nusselt number* dan koefisien perpindahan panas konveksi. Oleh karena itu, laju perpindahan panas fin semakin besar dengan naiknya kecepatan udara. Selain itu, peningkatan kecepatan udara menyebabkan tekanan udara yang melalui pin fin naik secara signifikan [16].

Penggunaan *fin* dapat kita jumpai dalam berbagai hal pada kehidupan sehari-hari. Misalnya pada trafo, sepeda motor, dan CPU. Salah satu contohnya dimana fin berguna untuk menghindari panas berlebih pada silinder piston yang dapat mengakibatkan piston mengunci. Selain itu pada trafo, *fin* berguna untuk mendinginkan trafo tersebut dari panas yang berlebih [17].



**Gambar 2. 7** Konfigurasi *Fin* (a) *Straight Fin of Uniform Cross Section* (b) *Straight Fin of Non-uniform Cross Section* (c) *Annular Fin* (d) *Pin Fin* [18]

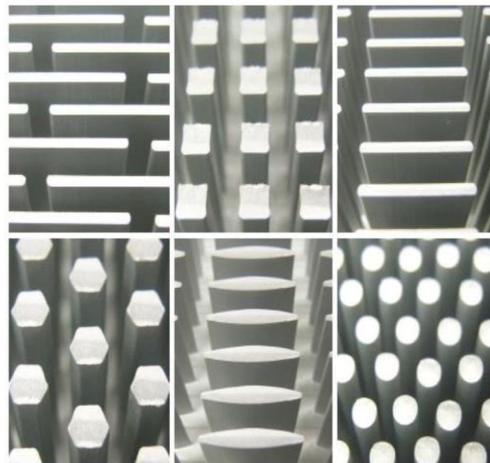
*Fin* dapat dimanfaatkan lebih maksimal apabila material yang digunakan mempunyai konduktivitas termal yang baik. Laju perpindahan panas terbesar berdasarkan rentang nilai *reynolds number* dicapai oleh *copper*, kemudian *brass*, aluminium, dan *steel*. *Nusselt number* meningkat seiring dengan kenaikan nilai *reynolds number* yang menyebabkan meningkatnya koefisien dan laju perpindahan panas [19].

Bahan yang paling sering digunakan sebagai material *fin* antara lain adalah aluminium, maupun tembaga. Kedua bahan tersebut mampu menyerap panas dengan cepat. Kedua bahan tersebut memiliki keunggulan dan kelebihan masing-masing. Namun, aluminium lebih sering dipakai karena lebih ringan dan lebih murah serta fabrikasinya mudah dilakukan [17].

## 2.9 Pin Fin

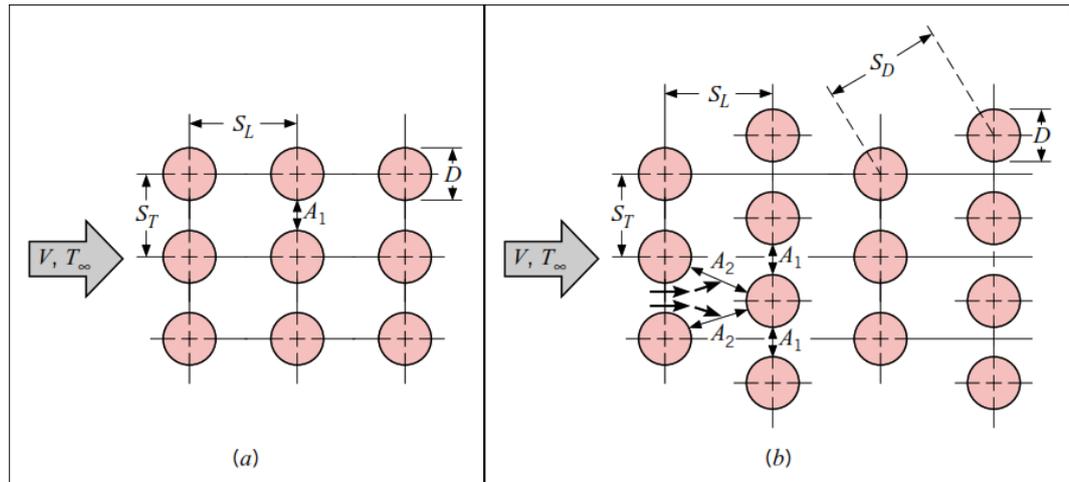
*Pin fin* (sirip pin) adalah jenis sirip yang pada umumnya memiliki bentuk silinder dan dipasang tegak lurus pada dinding alat penukar panas [2]. Sirip *pin* dapat digolongkan kedalam beberapa parameter seperti bentuk, tinggi, diameter, perbandingan tinggi-diameter ( $H/D$ ) dan lain sebagainya. Sirip pin dengan perbandingan tinggi-diameter ( $H/D$ ) antara 0,5 – 4 dikategorikan sebagai sirip pin pendek (short pin fin), sedangkan sirip pin panjang (long pin fin) memiliki perbandingan tinggi-diameter  $> 4$ .

Berdasarkan bentuk geometri *surface*, pin dapat digolongkan menjadi beberapa tipe antara lain terdapat bentuk *elips*, segi empat, *diamond*, *hexagonal*, oblong, serta silinder. Pada umumnya bentuk yang paling sering digunakan yaitu bentuk silinder [3].



**Gambar 2. 8** Tipe *fin* berdasarkan geometri *surface*

Selain dari geometri *surface*, *pin fin* juga dapat divariasikan dalam susunan *inline* (sejajar) atau *staggered* (selang-seling). Susunan *inline* merupakan susunan dimana pin disusun searah dalam satu baris dan memiliki jumlah susunan yang sama. Susunan *staggered* merupakan susunan pin dimana terdapat jarak antar susunan pin dan jumlah tiap barisnya biasanya berbeda [20]. Gambar 2.9 berikut merupakan konfigurasi susunan *fin inline* dan *staggered*.



**Gambar 2. 9** Konfigurasi pin (a) *In-line* (b) *Staggered*

## 2.10 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang menjadi referensi penulisan tugas akhir ini sebagai berikut:

**Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu**

No.	Penulis	Variabel Penelitian	Hasil
1.	Eaman Hassan Muhammad	Analisa perbandingan kinerja perpindahan panas <i>Hexagonal fin</i> dengan jenis pin fin lainnya	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sirip <i>hexagonal</i> menghasilkan bilangan nusselts yang lebih tinggi dibandingkan dengan sirip persegi dan lebih rendah dibandingkan dengan sirip lingkaran [3].
2.	Md. Abu Jafar Rasel, Md . Zahirul Islam, Abul Hasanat	Analisis karakteristik perpindahan panas dalam kondisi konveksi paksa pada <i>base</i> persegi dengan jenis sirip <i>circular</i> .	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan fluida yang tinggi menyebabkan kehilangan tekanan yang tinggi serta kecepatan fluida yang rendah menyebabkan

			perpindahan panas yang tinggi [16].
3.	Tri Istanto, Wibawa Edra Juwana	Karakteristik perpindahan panas dan penurunan tekanan sirip-sirip pin silinder tirus susunan segaris dan selang-seling dalam saluran segi empat	Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah meningkatnya bilangan Reynolds dan semakin kecilnya jarak $S_y/D$ akan meningkatkan bilangan Nusselt. Nilai <i>pressure drop</i> dan faktor gesekan menurun seiring dengan meningkatnya $S_y/D$ . [21]
3.	Retno Sulistyio Dhamar Lestari, Denni Kartika Sari	Pemodelan matematis dan simulasi perpindahan panas pada <i>fin heat exchanger</i>	Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah panas yang hilang berbanding secara linier dengan lebar, panjang dan sudut <i>fin</i> [1].
4.	A. Dvinsky, A. Bar-Cohen, M.Strelets	Analisis termofluida heat sink sirip pin susunan <i>staggered</i> dan <i>inline</i> .	Kesimpulan utama dari penelitian ini adalah desain <i>inline</i> lebih unggul secara termal daripada desain <i>staggered</i> untuk semua kecuali heat sink yang terselubung penuh dan dalam geometri tertentu penurunan tekanan non-dimensi pada heat sink hampir konstan, yang menunjukkan hambatan viscous yang kecil. [22]
5.	Isak Kotcioglu,	Studi eksperimental tentang perpindahan panas dan penurunan	Hasil percobaan menunjukkan bahwa penggunaan sirip-pin heksagonal dibandingkan

	Sinan Caliskan, Senol Baskaya,	tekanan dari penukar panas aliran silang dengan susunan pin-fin yang berbeda	dengan sirip-pin persegi dan lingkaran, dapat memberikan keuntungan dalam hal peningkatan perpindahan panas. [23]
6.	Ivan Catton dkk	Analisis Numerik Heat Transfer antara Plate-Pin Fin dengan beberapa geometri surface pada pin	Hasil penelitian menunjukkan bahwa heat transfer surface bentuk persegi paling tinggi dibanding yang lain. Nilai efektifitas surface bentuk lingkaran paling tinggi dibanding surface lain. [24]
7.	N. Kayansan	Analisis Termal Komparatif dari Pin Fins untuk Peningkatan Panas Transfer dalam Konveksi Paksa	Hasil dari penelitian tersebut adalah perpindahan panas dari sirip pin meningkat dengan meningkatnya kecepatan masuk dan dengan demikian ada persamaan yang baik hasil empiris dan numerik telah ditemukan. Bentuk layang-layang dan elips memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap bilangan Nusselt dan koefisien perpindahan panas.[25]