

**BAB 2**  
**DASAR TEORI**

**2.1 Tinjauan Pustaka**

Adapun peneliti terdahulu yang telah melakukan pengujian serupa dengan bentuk dimensi dan susunan sirip pin yang berbeda adalah sebagai berikut :

**Tabel 2.1** Penelitian terdahulu

No	Penulis	Variabel Penelitian	Hasil
1	Sara, et al	Analisis efektifitas termal pada <i>solid blocks</i> persegi berlubang	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan luasan pada permukaan perpindahan panas akan meningkatkan perpindahan panas dari <i>solid blocks</i> secara signifikan. Pada <i>solid blocks</i> dan <i>blocks</i> berlubang, peningkatan <i>Reynolds Number</i> akan menyebabkan unjuk kerja termal menurun[4].
2	Tarchi dkk	Melakukan penelitian mengenai penurunan tekanan serta koefisien perpindahan panas dengan cara mencocokkan diantara keduanya yang memiliki bentuk silinder dengan bentuk pentagonal yang disusun selang – seling.	Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan: 1. pin fin bentuk silinder dengan yang disusun pentagonal lebih sejenis dibandingkan dengan yang memiliki bentuk dengan struktur selang-seling dan nilai rata-rata yang dihasilkan tidak

			<p>jauh berbeda dengan susunan selang-seling.</p> <p>2. Berbanding terbalik dengan pin berbentuk ellips tidak mengalami perubahan yang berarti baik dari pin selang-seling atau susunan pin pentagonal[5].</p>
3	Tahat, M. el al	<p>Penelitian mengenai laju panas yang berpindah pada suatu sirip dengan tunak yang disusun secara segaris dan selang-seling.</p>	<p>Berdasarkan eksperimen didapatkan:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. laju perpindahan panas mengalami penurunan apabila naiknya <i>space</i> antara titik pusat pada pin (sirip).</li> <li>2. laju perpindahan panas yang hilang akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya <i>Reynolds Number</i>[6].</li> </ol>
4	Bilen, K. el al	<p>Penelitian yang dilakukan adalah karakteristik laju panas yang berpindah berbentuk segiempat dan udara sebagai fluida kerja.</p>	<p>Hasil penelitian menunjukkan peningkatan laju panas yang berpindah secara maksimum terhadap variasi jarak antara pin (sirip). Ini artinya bahwa data eksperimen tersebut mengalami peningkatan <i>Reynolds Number</i> dan juga</p>

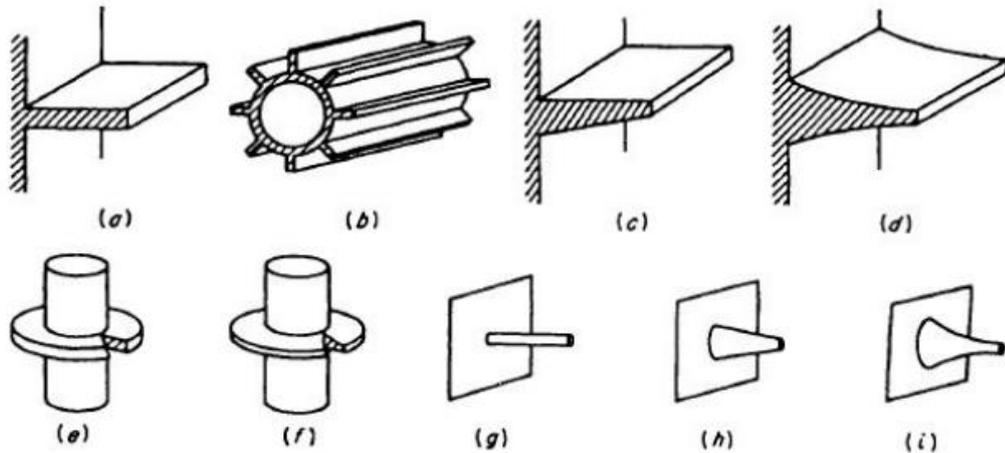
			peningkatan <i>Nusselt Number</i> [7].
5	Rokhadi	Melakukan eksperimen mengenai penurunan tekanan dan karakteristik perpindahan panas pada saluran segiempat dengan bentuk sirip pin <i>ellips</i> yang disusun secara selang-seling.	Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan susunan selang seling ( <i>staggered</i> ) pada sirip pin <i>ellips</i> mengalami peningkatan panas yang berpindah dari <i>base plate</i> khususnya pada permukaannya, dengan dipengaruhi naiknya luasan permukaan, sedangkan pada saluran segiempat terjadi penurunan tekanan yang signifikan[8].

### 2.1.1 Sirip

Perluasan permukaan perpindahan panas (*extended surface heat transfer*) merupakan komponen-komponen perpindahan panas terhadap unjuk kerja tinggi yang bertepatan dengan volume, berat dan *cost* (biaya) yang semakin kecil dalam berbagai kondisi lingkungan termal. Dalam berbagai macam aplikasi banyak komponen yang telah diterapkan salah satunya yaitu seperti kendaraan pesawat ruang angkasa [9].

Aliran panas biasanya untuk menerapkan antara penyerap panas dan panas pada titik sumbernya (*heat sink and heat source*) pada berbagai macam bentuk desain dan konstruksi terhadap peralatan dengan berpindahnya bentuk panas yang cukup sederhana pada umumnya baik itu dengan bentuk silinder, plat ataupun batang. Permukaan utama (*prime surface*) bisa juga disebut dengan bagian yang menerima panas. Perluasan pada *extended surface* merupakan penggabungan antara kedua permukaan yang terjadi pada *prime surface* yang ukurannya ditambah sebagai perluasan sesuai dengan apa yang disampaikan pada gambar 2.1. Sirip

merupakan perangkat untuk menambah ukuran dalam rangka memperluas permukaan khususnya bagian utama. Sirip *spines* atau *pegs* disebut juga elemen sirip berbentuk kerucut atau silinder[10].



**Gambar 2.1** Jenis-jenis bentuk sirip pin

[12]

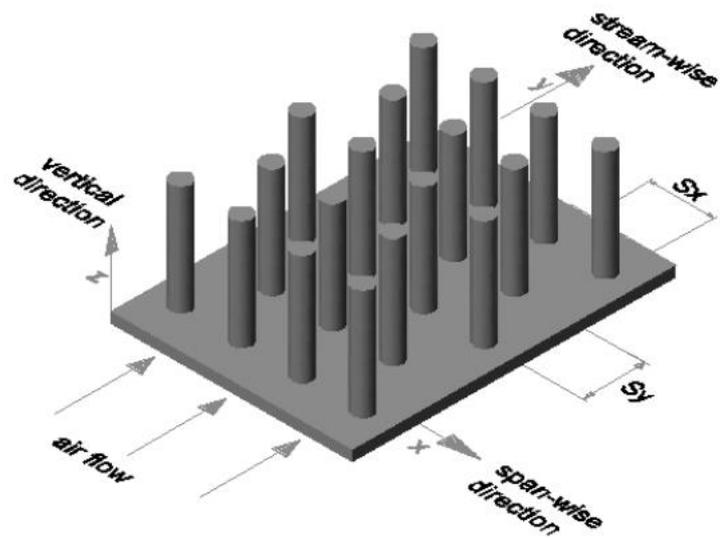
Sebagai perangkat penerima panas sebagai penyerap dan sumbernya (*sink and source*), dengan susunan yang selaras dan statis atau identik, akan memberikan tanggapan yang berbeda pada sirip yang memiliki sifat geometri dan konduktivitas termal yang beragam. Sebaliknya, terdapat variasi temperature dan koefisien pada panas yang berpindah dari kedua hal yang disampaikan, yaitu sumber panas dan penerima panas. Untuk menyederhanakan penyelesaiannya dengan menganalisis dimensi sirip yaitu asumsi yang dipilih dalam menetapkan dan membatasi suatu masalah. Pada asumsi penelitian sebelumnya adapun analisis dari beberapa dimensi dasar sirip dapat ditentukan [11], yaitu:

1. Laju aliran panas yang terdapat pada sirip dan suhu konstan pada waktu.
2. Bahan sirip yaitu homogen, konduktivitas termal yang sama, dan konstan tetapi stabil.
3. Koefisien pada panas konveksi yang berpindah serta selaras pada permukaan sirip khususnya merata pada semua permukaan.
4. Temperature pada lingkungan sirip konstan.

5. Sirip yang dimiliki kecil ketebalannya, jika disandingkan dengan panjang dan tinggi yang dimiliki, karena hal itu, gradien suhu telah melewati ketebalan dari sirip dan panas yang berpindah dari ujung sirip tidak diburis sama sekali.
6. Suhu yang dimiliki seragam pada sirip khususnya pada bagian dasar.
7. Tidak ada tahanan kontak dimana sirip pin dipasang secara vertikal pada permukaan yang utama.
8. Tidak terdapat sumber panas terhadap sirip pin.
9. Suhu panas yang dikirimkan melewati sirip pin pada ujungnya tidak dihiraukan dibandingkan dengan suhu panas yang beranjak dari permukaan lateralnya.
10. Suhu panas yang berpindah yang terjadi pada sirip pin seimbang dengan suhu yang berlebih antara medium sekitar dan sirip[11].

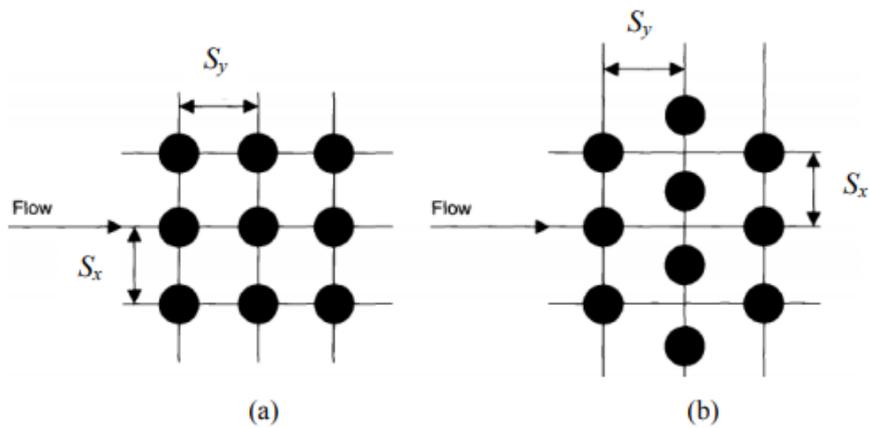
### **2.1.2 Sirip Pin**

Sirip pin merupakan material yang memiliki bentuk silinder ataupun bentuk lain yang dirancang dengan cara vertical pada permukaan *base plate* alat konverter panas. Dimensi dengan artian tinggi, lingkaran tengah, bentuk, dan perbandingan tinggi merupakan parameter yang mengelompokkan sirip pin. Sirip pin yang dikelompokkan dengan sirip pendek (*short pin fin*) yaitu dengan perbandingan diameter dan tinggi antara 0,5 sampai 4, sedangkan perbandingan tinggi dan diameter  $> 4$  merupakan sirip pin Panjang (*long pin fin*). Dalam hal penghasil koefisien pada panas yang berpindah cukup tinggi, maka perbandingan diameter dan tinggi merupakan hal yang cocok untuk pengaplikasian pada alat perpindahan panas [12]. Gambar 2.2 berikut merupakan mekanisme aliran fluida yang melewati kerangka keirip pin *staggered*.



**Gambar 2.2** Sebuah susunan sirip pin silinder susunan *staggered*  
[4]

Pada susunan sirip pin terdapat dua jenis susunan yaitu *staggered* dan susunan sirip pin segaris (*inline*). Pada gambar 2.3 terdapat susunan sirip pin selang-seling (*staggered*).  $S_x$  merupakan letak dari pada titik pusat pin yang akan diukur secara normal atau vertikal pada laju aliran (*span wise direction*), sedangkan  $S_y$  merupakan jarak antar titik pusat sirip sepanjang laju aliran (*stream wise direction*).



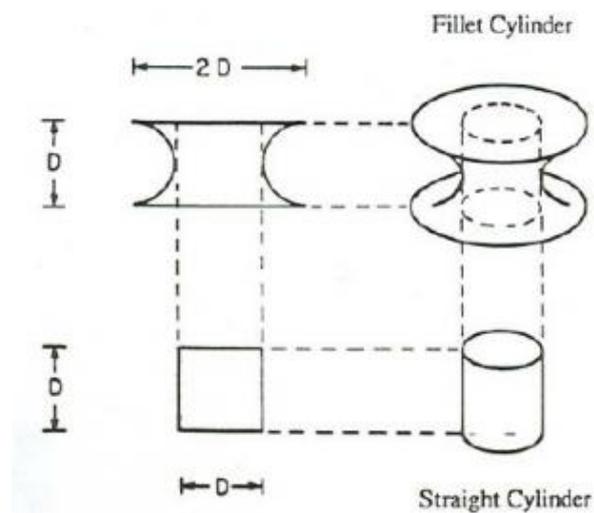
**Gambar 2.3** Susunan sirip pin *inline* dan *staggered*  
[13]

### 2.1.3 Macam-macam Bentuk Sirip Pin

Adapun berbagai macam atau jenis sirip pin yaitu sebagai berikut :

#### 1. Silinder

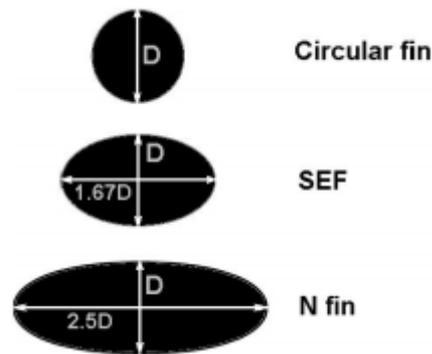
Sirip pin silinder lurus merupakan geometri yang paling umum. Silinder yang memiliki bentuk lurus dengan ujung berfillet (*filleted pin fin*) dan silinder dengan bentuk tirus (*tapered cylindrical pin fin*) merupakan contoh lain dari bentuk geometri sirip pin. Adapun pendekatan antara bentuk sirip pin berfillet dengan bentuk sirip pin silinder lurus pada gambar 2.4 berikut.



**Gambar 2.4** Perbedaan antara sirip pin silinder lurus dan sirip pin silinder berfillet [11]

#### 2. Ellips

Sirip pin lainnya adalah sirip pin dengan bentuk silinder ditarik atau diletakan ke dalam satu arah tepat pada posisi garis lingkaran tengahnya sehingga disebut juga sirip pin ellips. Pada gambar 2.5 ditunjukkan gambar sketsa geometri pada sirkular pin dan dua lainnya berbentuk sirip pin ellips.



**Gambar 2.5** Bentuk geometri dari sirkular pin, SEF dan N pin  
[14]

Sirip pin memiliki kemampuan dalam meningkatkan perpindahan panas dan menghasilkan turbulensi dalam media aliran yang dapat digambarkan dari kemampuan yang dimiliki dengan aliran terpisah (*flow separation*). Jadi, bentuk sirip pin yang tepat akan menghasilkan panas yang berpindah dengan meningkat dan performa yang lebih bagus, seperti halnya pada sirip pin yang berbentuk kubus. Dikarenakan memiliki gaya inersia yang kuat yang dihasilkan dari aliran fluida di daerah sirip pin, pada sirip pin bagian belakang (*downstream*) dari sudut yang tajam alirannya tidak dapat melekat pada permukaan. Selain itu, di sekeliling sirip pin kubus terjadi perubahan laju aliran secara tiba-tiba yang menyebabkan daerah aliran turbulen (*turbulent vortex shedding*) dan pemisahan aliran,, susunan pada sirip pin tersebut dapat menambah perpindahan panas[14].

#### 2.1.4 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan suatu proses berpindahnya energi dari suatu tempat ke tempat yang lain yang dikarenakan perubahan temperature yang terjadi pada suatu tempat tersebut[13]. Terdapat tiga mekanisme perpindahan panas, diantaranya yaitu:

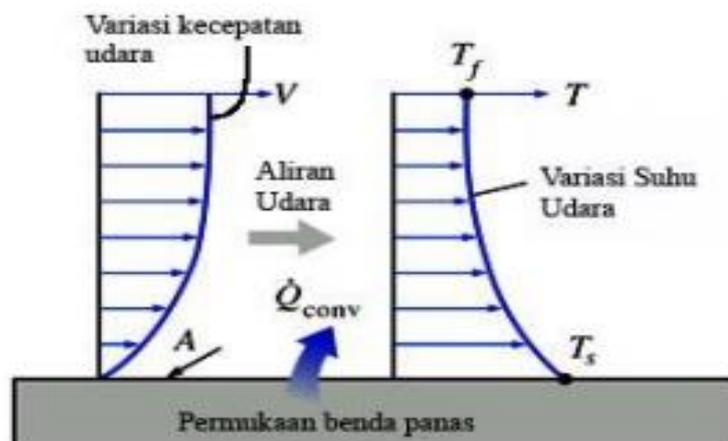
##### 1. Perpindahan panas secara konduksi

Merupakan distribusi energi berupa panas yang terjadi pada benda yang diam (padat) yang bertemperatur tinggi ke bagian benda yang memiliki temperatur

rendah atau terdapat gradien yang menunjukkan suhu pada benda. Berikut merupakan rumus dasar perpindahan panas secara konduksi[13] :

2. Perpindahan panas secara konveksi

Merupakan penyebaran energi panas yang terjadi disebabkan karena adanya aliran fluida yang mengalir disekitarnya. Jika terdapat fluida yang terdeteksi sedang bergerak, dan suhu keduanya berbeda, maka akan terjadinya mekanisme perpindahan panas secara konveksi. Aliran fluida yang cepat akan menghasilkan perpindahan panas konveksi yang semakin besar. Jika mekanisme berubah kembali menjadi mekanisme perpindahan panas konduksi itu berarti fluidanya tidak bergerak[15]. Pada gambar 2.6 berikut ini merupakan suatu distribusi aliran fluida dengan variasi kecepatan dan variasi suhu.



**Gambar 2.6** Perpindahan panas konveksi

[15]

Terdapat dua macam perpindahan panas konveksi yaitu yang terjadi disebabkan karena adanya fluida yang terdeteksi bergerak sebagai konveksi alami dan juga konveksi paksa. Terdapat persamaan dasar dari panas yang berpindah secara konveksi ini, yaitu :

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

$q$  = laju perpindahan panas (Watt)

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

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

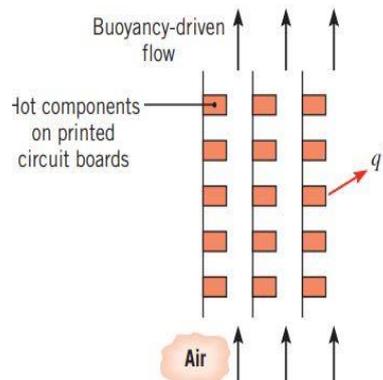
$T_s$  = temperature permukaan benda (K)

$T_\infty$  = temperature fluida (K)

Ada dua macam mekanisme panas yang berpindah secara konveksi, diantaranya yaitu:

a. Konveksi alami

Konveksi alami merupakan proses panas yang berpindah disebabkan karena perbedaan temperatur tidak mengalami pengaruh energi dari luar. Konveksi alami dapat terjadi karena aliran fluidanya terdapat suatu proses pemanasan, yang memiliki suatu densitas dengan bergerak secara naik keatas. Proses gerakan yang terjadi ini disebut juga gaya apung (*buoyancy force*) yang ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut [15].

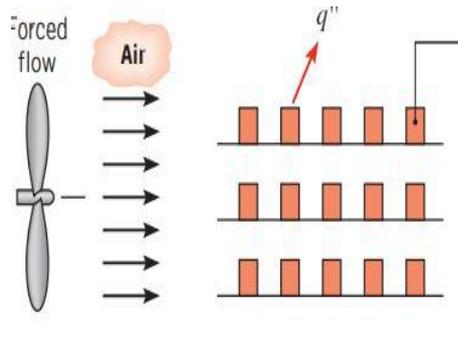


**Gambar 2.7** Konveksi alami

[18]

b. Konveksi paksa

Konveksi paksa adalah perpindahan suatu panas pada gas/aliran fluida, terjadi karena pengaruh energy dari luar. Mekanisme pada konveksi ini terjadi adanya pengaruh luar seperti air dengan suhu tinggi dihempaskan udara oleh kipas, deskripsi yang disampaikan dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut [15].



**Gambar 2.8** Konveksi paksa

[18]

### 3. Perpindahan panas secara radiasi,

Perpindahan panas secara radiasi merupakan pendistribusian energi suhu tinggi tedapat pada *eksplasi* gelombang cahaya yang melewati antara suatu zat ddengan zat yang lainnya dengan tidak melalui perantara diantara keduanya. Jika terdapat suatu permukaan yang mengenai energy radiasi, maka radiasi yang diterima akan direfleksikan, diserap serta diteruskan. Maka, pancaran panas yang diperoleh dapat menggunakan rumus sebagai berikut[16]:

Pada pengujian ini, konsep perpindahan panas konveksi digunakan. Dikarenakan perantara yang berperan pada hal ini merupakan aliran fluida. Sehingga, kaitan antara persamaan perpindahan panas dengan parameter tanpa dimensi saling berkesinambungan. Parameter ini dikenal dengan nama *Reynolds Number* dan *Nusselt Number* [16]:

#### 2.1.5 Bilangan Tak Berdimensi

Adapun parameter pada bilangan tak berdimensi yang berhubungan langsung terhadap perpindahan panas konveksi yaitu:

##### 1. *Reynolds Number*

*Reynolds Number* diartikan dengan suatu perbandingan yang terjadi antara dua gaya, yaitu gaya kekentalan dan gaya inersia. *Reynolds Number* biasa digunakan untuk mengidentifikasi jenis suatu aliran yang berbeda, contohnya seperti aliran transisi, aliran turbulen, serta aliran laminar. Berikut merupakan persamaan *Reynolds Number* :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

Re = *Reynolds Number*

$\rho$  = densitas fluida

v = kecepatan fluida

D = Diameter

$\mu$  = viskositas absolut fluida dinamis

## 2. *Nusselt Number*

*Nusselt Number* merupakan suatu bilangan yang tak berdimensi dengan perbandingan konduktivitas termal dengan koefisien laju perpindahan panas konveksi. Berikut persamaan pada *Nusselt Number* [12]:

$$Nu = \frac{hD}{k_f} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

Nu = *Nusselt Number*

D = Diameter (m)

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

$k_f$  = konduktivitas termal fluida (W/m.°C)

### 2.1.6 **Perpindahan panas pada aliran luar (*external flow*)**

Berdasarkan analisa perpindahan panas secara konveksi yang mengakibatkan aliran fluida diluar pipa. *Reynolds Number* bisa diartikan sebagai suatu perbandingan gaya inersia terhadap gaya kekentalan pada kecepatan lapisan batas. Untuk lapis batas dengan pengontrolan volume yang berbeda, pada gaya inersia diasosiasikan dengan suatu kenaikan momentum dari aliran fluida yang bergerak melintasi control volume jenis aliran fluida dapat dicari dengan persamaan *Reynolds Number*[12] .

Nilai dari *Reynold Number* sepanjang plat akan menghasilkan nilai yang bermacam-macam. Pada aliran eksternal, proses dari transisi dan laminar menjadi aliran turbulen terjadi pada angka *Reynold Number* kritis pada  $Re > 5 \times 10^5$ . Angka *Reynold Number* kritis akan menghasikan nilai yang bervariasi dari nilai  $10^5$  sampai

3.10<sup>6</sup>, untuk aliran sepanjang plat, lapisan batas selalu turbulen untuk  $Re \geq 4.10^6$  tergantung pada kekasaran permukaan dan level turbulensi dari aliran. Nilai dari *Reynolds Number* akan bervariasi pada aliran fluida. Untuk aliran eksternal, proses transisi dari aliran laminar menjadi aliran turbulen terjadi pada *Reynolds Number* kritis pada  $Re > 5 \times 10^5$ . Pada angka *Reynolds Number* titik kritis akan memiliki nilai bervariasi dari nilai 10<sup>5</sup> sampai 3.10<sup>6</sup>, untuk aliran sepanjang plat, lapisan pada batas yang dihasilkan selalu turbulen untuk  $Re \geq 4.10^6$  [12].

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \dots\dots\dots (4)$$

Pada External Flow, Nilai *Nusselt Number* dapat dicari dengan perumusan sebagai berikut:

$$Nu = \frac{h D_h}{k} = C Re^m Pr^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

C : Nilai Konstanta C

m : Nilai Konstanta m

Pr : Prandtl Number

Berikut ini merupakan gambar tabel C, m dan n yang besarnya ditentukan oleh geometri permukaan dan jenis aliran fluida.

<i>Re<sub>D</sub></i>	<i>C</i>	<i>m</i>
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40,000	0.193	0.618
40,000-400,000	0.027	0.805

**Gambar 2.9** Aliran fluida pin *circular* [18]

**2.1.7 Perpindahan panas pada aliran dalam (*internal flow*)**

a. Aliran Laminar

Aliran laminar terjadi jika nilai yang dihasilkan dari  $Re_D$   $Re < 2300$ .

Perpindahan panas pada aliran ini dapat ditentukan dari *heat flux* permukaan

temperatur tetap, serta tidak bergantung pada *Reynolds Number* dan *Prandtl Number*, Persamaannya sebagai berikut:

Jika  $\Delta T$  pada seluruh permukaan konstan maka:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 4,36 \quad (q = \text{konstan}) \dots \dots \dots (46)$$

Jika  $T_s$  pada seluruh permukaan perpindahan panas konstan maka:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 3,66 \quad (T_s = \text{konstan}) \dots \dots \dots (57)$$

b. Aliran Turbulen

Aliran turbulen terjadi jika nilai  $Re_D \geq 2300$ .  $Re > 5 \times 10^5$ . Aliran ini berfokus pada *Nusselt Number* dengan menggunakan persamaan *dittus-boelter*. Dengan salah satu faktor yang berpengaruh yaitu jenis dari perpindahan panas yang terjadi (*heating and cooling*).

$$Nu = 0,0023 Re^{\frac{4}{5}} Pr^n \dots \dots \dots (68)$$

Dimana:

Pr: *Prandtl Number*

n: 0.4 untuk proses heating ( $T_s > T_m$ ) dan 0.3 untuk proses cooling ( $T_s < T_m$ )

Berdasarkan aliran fluida yang terjadi didalam pipa yang dibatasi oleh *surface* dapat juga disebut dengan *internal flow*. *Nusselt Number* merupakan bilangan yang tidak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara konduktivitas termal fluida terhadap koefisien perpindahan panas konveksi. *Nusselt Number* memiliki sebuah perhitungan mengenai panas yang berpindah pada konveksi, dialami pada bagian permukaan. Koefisien perpindahan panas secara konveksi didalam pipa dapat dihitung dengan cara menggunakan rumus berikut [17] :

$$Nu = \frac{h Dh}{k} \dots \dots \dots (9)$$

Dimana :

$Nu = \text{Nusselt Number}$

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

$Dh = \text{diameter hidrolik (m)}$

$k = \text{konduktifitas termal fluida (W/m. °C)}$

### 2.1.8 Log Mean Temperature Difference

Perumusan yang digunakan untuk menemukan nilai rata-rata suhu *inlet* dan *outlet* yaitu metode LMTD. Adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut [19] :

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln \frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}} \dots \dots \dots (10)$$

Dimana :

$\Delta T_{LMTD}$  : perbedaan suhu rata-rata diantara fluida panas dan fluida dingin (K)

$T_i$  : temperatur *inlet* (K)

$T_s$  : temperature surface (K)

$T_o$  : temperatur *outlet* (K)

### 2.1.9 Effectiveness

*Effectiveness* ( $\epsilon$ ) merupakan rasio laju perpindahan panas menggunakan fin dan tanpa menggunakan fin. *Effectiveness* adalah bilangan yang tak memiliki dimensi, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [18]:

$$\epsilon = \frac{q_f}{h \cdot A_s \cdot (T_2 - T_1)} \dots \dots \dots (11)$$

Berikut ini merupakan tabel yang digunakan untuk mengetahui formulasi panans yang berpindah pada lajunya dengan menggunakan fin ( $q_f$ ) pada penyesuaian panjang tertentu sesuai dengan case A pada gambar 2.10 berikut:

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

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

**Gambar 2.10** Distribusi temperatur dan *heat loss* untuk sirip penampang yang seragam [18]

### 2.1.10 Laju Perpindahan Panas Pada Pin

Laju perpindahan panas yang terjadi pada pin dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$q = h_c \cdot A_s \cdot \Delta T_{LMTD} \dots \dots \dots (12)$$

Nilai  $A_s$  sendiri mampu didapatkan melalui persamaan rumus berikut :

$$A_s = WL + \pi DHN \dots \dots \dots (13)$$

Dimana :

$W$  : Panjang base plate

$L$  : Lebar *base plate*

$D$  : Diameter fin

$H$  : Panjang fin

$N$  : Jumlah fin