BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Data hasil pengujian

Data hasil pengujian pengaruh jumlah sudu *static radial fin* terhadap laju perpindahan kalor dan *pressure drop* pada alat penukar kalor adalah seperti dibawah ini,

Tabel 4.1 Data hasil pengujian *heat exchanger* tanpa pemasangan *static radial fin*

Debit air dingin (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Debit air panas(lt/jam)	Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air pada manometer(cmH_2O)
	Masuk	Keluar		Masuk	Keluar	
900	25.46	28.54	400	65.62	61.56	1
900	25.54	28.84	500	65.62	61.86	1.2
900	25.54	29.32	600	65.62	62.12	1.5
900	25.54	29.36	700	65.62	62.44	1.8
900	25.54	29.64	800	65.62	62.66	2.3
900	25.54	30.28	900	65.62	62.84	2.5

Tabel 4.2 Data hasil pengujian *heat exchanger* dengan *static radial fin* bersudu 2

Debit air dingin (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Debit air panas(lt/jam)	Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air pada manometer(cmH_2O)
	Masuk	Keluar		Masuk	Keluar	
900	25.48	29.24	400	65.54	59.28	1.6
900	25.48	29.54	500	65.54	59.58	2.1
900	25.48	29.8	600	65.56	59.78	2.7
900	25.46	30.18	700	65.56	60.16	3.5
900	25.48	30.5	800	65.58	60.52	5
900	25.48	30.74	900	65.52	60.8	6.2

Tabel 4.3 Data hasil pengujian *heat exchanger* dengan *static radial fin* bersudu 3

Debit air dingin (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Debit air panas(lt/jam)	Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air pada manometer(cmH_2O)
	Masuk	Keluar		Masuk	Keluar	
900	25.48	30.24	400	65.46	58.64	2
900	25.52	30.46	500	65.5	58.84	3.2
900	25.5	30.72	600	65.54	59.24	4.4
900	25.5	31.24	700	65.56	59.52	6
900	25.5	31.52	800	65.58	59.76	7.4
900	25.54	31.78	900	65.64	60.24	9

Tabel 4.4 Data hasil pengujian *heat exchanger* dengan *static radial fin* bersudu 4

Debit air dingin (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Debit air panas(lt/jam)	Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air pada manometer(cmH_2O)
	Masuk	Keluar		Masuk	Keluar	
900	25.54	30.54	400	65.62	58	3
900	25.54	30.8	500	65.64	58.26	4.3
900	25.46	31.24	600	65.56	58.48	5.7
900	25.54	31.48	700	65.56	58.66	7.1
900	25.54	31.68	800	65.58	58.74	9.3
900	25.52	31.84	900	65.54	58.84	10.2

Sedangkan hasil perhitungan laju perpindahan panas *(q)* dan parameter-parameter perpindahan panas yang lain diperlihatkan pada lampiran.

4.1.1 Contoh perhitungan

Parameter-parameter yang diketahui pada pengujian alat penukar kalor dengan pemasangan *static radial fin* bersudu 4, pada debit 400 liter/jam adalah sebagai berikut :

- Debit fluida dingin (Q_h) = 900 $\left[\frac{liter}{jam}\right]$
- Debit fluida panas (Q_C) = 400 $\left[\frac{liter}{jam}\right]$
- Temperatur masuk fluida panas ($T_{h\,in}$) = 65,62 ^oC

- Temperatur keluar fluida panas ($T_{h\ out}$) = 58 ^oC
- Temperatur masuk fluida dingin ($T_{C\ in}$) = 25,54 ^oC
- Temperatur keluar fluida dingin ($T_{C\ out}$) = 30,54 ^oC
- Perbedaan ketinggian air pada manometer (ΔP) = 3 cmH_2O
- Diameter pipa luar *(outertube)* bagian dalam (d_{ot}) = 0,0762 m
- Diameter pipa dalam *(innertube)* bagian dalam (d_{ii}) = 0,0254 m
- Diameter pipa dalam *(innertube)* bagian luar (d_{io}) = 0,0264 m
- Konduktifitas thermal material *innertube (k)* = 383,5687 $\left[\frac{W}{m\,.\,^oC}\right]$
- Panjang pipa *heat exchanger* (L) = 1 m

Dari parameter-parameter yang diketahui diatas, maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut :

1. Temperatur rata-rata *bulk* fluida

Penentuan sifat-sifat fluida didasarkan atas temperatur rata-rata *bulk* fluida yang merupakan temperatur rata-rata aritmatika berdasarkan temperatur rata-rata masuk dan temperatur rata-rata keluar.

$$T_{b\,hot} = \frac{(T_{h,i} + T_{h,o})}{2}$$

$$= \frac{65{,}62 + 58}{2}$$

$$= 61{,}81\ ^oC$$

$$T_{b\,cold} = \frac{(T_{c,i} + T_{c,o})}{2}$$

$$= \frac{25{,}54 + 30{,}54}{2}$$

$$= 28{,}04\ ^oC$$

Dengan menggunakan interpolasi tabel pada lampiran, maka sifat-sifat fluida dingin dan fluida panas berdasarkan temperatur rata-rata *bulk* diatas adalah :

$$\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} = \frac{x - x_1}{y - y_1}$$

Dari persamaan interpolasi diatas, maka dapat dicari densitas atau massa jenis fluida panas (ρ_h) pada temperatur 61,81^oC ($T_{b.hot}$)

$$\frac{T_1 - T_2}{\rho_1 - \rho_2} = \frac{T_{b\,hot} - T_2}{\rho - \rho_2}$$

$$\frac{60-65}{983{,}3-980{,}4} = \frac{61{,}81-65}{\rho - 980{,}4}$$

$$\rho = \frac{(983{,}3-980{,}4)(61{,}81-65)}{60-65} + 980{,}4$$

$$\rho = 982{,}252 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Dengan cara yang sama, maka didapatkan sifat-sifat fluida sebagai berikut :

ρ_h	=	982,252 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	ρ_C	=	995,392 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
C_{ph}	=	4187,724 $\left[\frac{J}{kg\ ^oC}\right]$	C_{pc}	=	4176,784 $\left[\frac{J}{kg\ ^oC}\right]$
k_h	=	0,660 $\left[\frac{W}{m.\ ^oC}\right]$	k_C	=	0,610 $\left[\frac{W}{m.\ ^oC}\right]$
μ_h	=	0,000420 $\left[\frac{kg}{m.s}\right]$	μ_C	=	0,000741 $\left[\frac{kg}{m.s}\right]$
Pr_h	=	2,663	Pr_c	=	4,982

Dimana subskrip *h* dan *c* mewakili fluida panas *(hot)* dan fluida dingin *(cold)*, sifat-sifat fluida diatas adalah sifat fluida panas pada temperatur 61,81 ^oC dan fluida dingin pada temperature 28,04 ^oC.

2. Laju perpindahan panas fluida panas dan dingin secara termodinamika

Parameter-parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan laju perpindahan panas fluida secara termodinamika adalah laju masa alir $(\dot{m})$, panas spesifik fluida (C_p), dan perbedaan temperatur masuk dan keluar fluida (ΔT).

- Laju masa alir fluida $(\dot{m})$

$$Q_h = 400 \left[\frac{liter}{jam}\right]$$

$$= \frac{400\ x\ 10^{-3}}{3600} \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$= 0.0001111 \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$\dot{m}_h = Q_h x\ \rho_h$$

$$= 0.0001111\ x\ 982{,}252 \left[\frac{m^3}{s} . \frac{kg}{m^3}\right]$$

$$= 0{,}1091 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

- Perbedaan temperatur masuk dan keluar fluida panas(ΔT_h)

$$\Delta T_h = T_{h\,in} - T_{h\,out}$$
$$= 65{,}62 - 58 \left[{}^0C\right]$$
$$= 7{,}62 \left[{}^0C\right]$$

Maka laju perpindahan fluida panas secara termodinamika adalah

$$q_h = \dot{m}_h \, x \, C_{ph} \, x \, \Delta T$$
$$= 0{,}1091 \; x \, 4187{,}724 \, x \, 7{,}62 \; \left[\frac{kg}{s} . \frac{J}{kg\,{}^oC} . {}^0C\right]$$
$$= 3482{,}672 \left[\frac{J}{s}\right]$$
$$= 3482{,}672 \quad [Watt]$$

3. Koefisien perpindahan panas menyeluruh *(U)*

Luas penampang pada pipa dalam fluida panas

$$A_h = \pi \, x \, r^2{}_h = 3{,}14 \, x \, (0{,}0127)^2 = 0{,}000506 \, [m^2]$$

Luas penampang pada pipa dalam fluida dingin

$$A_c = \pi \, x \, r^2{}_c - A_h = 3{,}14 \, x \, (0{,}0381)^2 - 0{,}000506 = 0{,}003953 \, [m^2]$$

Kecepatan aliran fluida panas

$$V_h = \frac{Q_h}{A_h}$$
$$= \frac{0{,}0001111}{0{,}000506} \left[\frac{m^3}{s} . \frac{1}{m^2}\right]$$
$$= 0{,}219 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Viskositas kinematik fluida panas

$$v_h = \frac{\mu_h}{\rho_h}$$
$$= \frac{0{,}000420}{982{,}252} \left[\frac{kg}{m.s} . \frac{m^3}{kg}\right]$$
$$= 4{,}27 \; x \; 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s}\right]$$

Kecepatan aliran fluida dingin

$$V_c = \frac{Q_C}{A_C}$$

$$= \frac{0{,}00025}{0{,}003953}\left[\frac{m^3}{s}.\frac{1}{m^2}\right]$$

$$= 0{,}063\left[\frac{m}{s}\right]$$

Viskositas kinematik fluida dingin

$$v_c = \frac{\mu_C}{\rho_C}$$

$$= \frac{0{,}00074}{995{,}392}\left[\frac{kg}{m.s}.\frac{m^3}{kg}\right]$$

$$= 7{,}44\ x\ 10^{-7}\left[\frac{m^2}{s}\right]$$

Angka Reynolds

$$Re_h = \frac{V_h \text{ x } D_{H_h}}{v_h}$$

$$= \frac{0{,}219\ x\ 0{,}025}{4{,}27x\ 10^{-7}}\left[\frac{m}{s}.m.\frac{s}{m^2}\right]$$

$$= 13086{,}32$$

$$Re_c = \frac{V_C \text{ x } D_{H_C}}{v_c}$$

$$= \frac{0{,}063\ x\ 0{,}0565}{7{,}44\ x\ 10^{-7}}\left[\frac{m}{s}.m.\frac{s}{m^2}\right]$$

$$= 4784{,}27$$

Angka Nusselt

- *Nusselt* pada fluida panas

$$Nu_h = 0{,}023\ x\ Re^{0{,}8}\ x\ Pr^{0{,}4}$$

$$= 0{,}023\ x\ 13086{,}32^{0{,}8}\ x\ 2{,}663^{0{,}4}$$

$$= 66{,}885$$

- *Nusselt* pada fluida dingin

$$Nu_c = 0{,}023\ x\ Re^{0{,}8}\ x\ Pr^{0{,}3}$$

$$= 0{,}023\ x\ 4784{,}27^{0{,}8}\ x\ 4{,}982^{0{,}3}$$

$= 32{,}719$

Koefisien perpindahan panas konveksi fluida panas

$$h_i = \frac{Nu_h \; x \; k_h}{D_{Hpd}}$$

$$= \frac{66{,}885 \; x \; 0{,}6660}{0{,}025} \left[\frac{W}{m.\,^0C} \cdot \frac{1}{m}\right]$$

$$= 1781{,}81 \left[\frac{W}{m^2\,^\circ C}\right]$$

$$h_o = \frac{Nu_c \; x \; k_c}{D_C}$$

$$= \frac{32{,}719 \; x \; 0{,}610}{0{,}0565} \left[\frac{W}{m.\,^0C} \cdot \frac{1}{m}\right]$$

$$= 353{,}249 \left[\frac{W}{m^2\,^\circ C}\right]$$

Luas area perpindahan panas

Luas area perpindahan panas dapat dibedakan menjadi luas area permukaan dalam maupun permukaan luar dari *innertube*. Subskrip *i* dan *o* menunjukan luas permukaan dalam dan luar.

$$A_i = \pi \; D_i \; L$$

$$= \pi \; x \; 0{,}0254 \; x \; 1$$

$$= 0{,}07975 \; m^2$$

$$A_o = \pi \; D_o \; L$$

$$= \pi \; x \; 0{,}0264 \; x \; 1$$

$$= 0{,}08289 \; m^2$$

Maka koefisien perpindahan panas menyeluruh berdasarkan atas area permukaan perpindahan panas bagia luar

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_O}{A_i}\frac{1}{h_i} + \frac{A_O \ln(D_O/D_i)}{2\,\pi\,k\,L} + \frac{1}{h_O}}$$

$$= \frac{1}{\frac{0{,}0828}{0{,}07975 \; x \; 1781{,}81} + \frac{0{,}0828 \; x \ln\left(\frac{0{,}0264}{0{,}0254}\right)}{2 \; x \; \pi \; x \; 383{,}5687} + \frac{1}{353{,}249}}$$

$$= 292{,}89 \left[\frac{W}{m^2\,^\circ C}\right]$$

- Beda temperatur rata-rata log (LMTD)

$$\Delta T_1 = T_{h\,in} - T_{C\,out}$$
$$= 65{,}62 - 30{,}54$$
$$= 35{,}08\ ^\circ\mathrm{C}$$
$$\Delta T_2 = T_{h\,out} - T_{C\,in}$$
$$= 58 - 25{,}54$$
$$= 32{,}46\ ^\circ\mathrm{C}$$
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$
$$= \frac{35{,}08 - 32{,}46}{ln\left(\frac{35{,}08}{32{,}46}\right)}$$
$$= 34{,}07\ ^\circ\mathrm{C}$$

Maka laju perpindahan panas berdasarkan berdasarkan atas koefisien perpindahan panas menyeluruh *(U)*, luas area perpindahan panas permukaan bagian luar *(A_o)*, dan beda temperatur rata-rata log *(ΔT_{LMTD})* adalah,

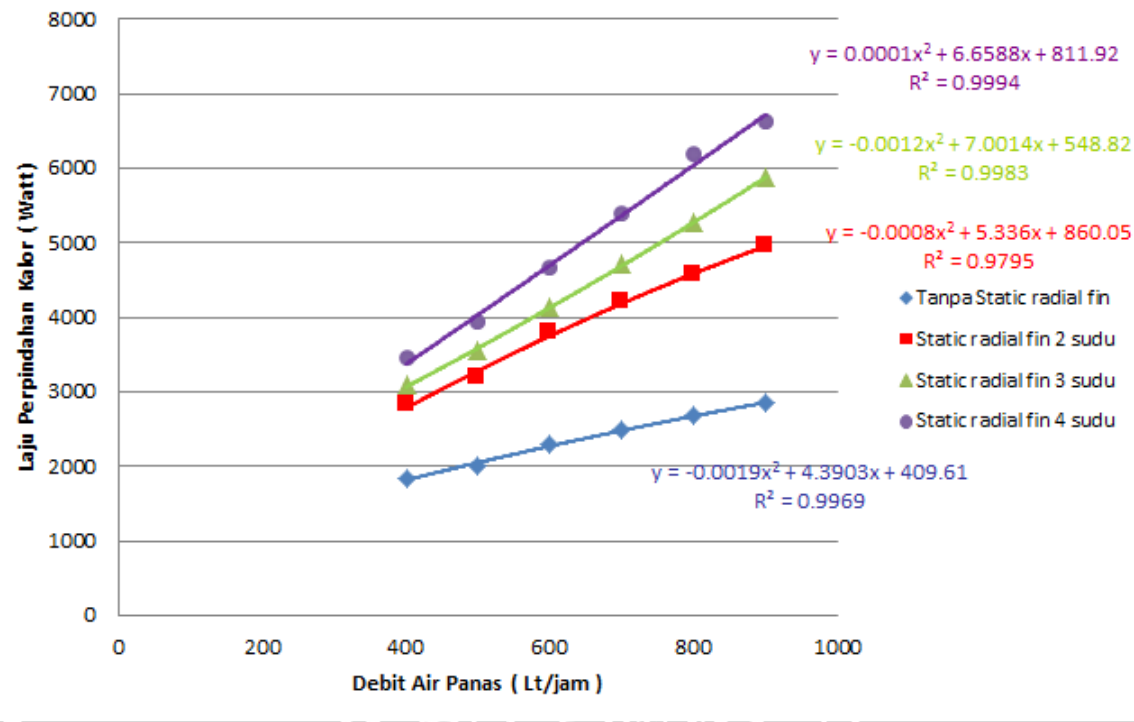
$$Q_{HE} = U_o\ A_o\ \Delta T_m$$
$$= 292{,}89\ x\ 0{,}08289\ x\ 34{,}07\ \left[\frac{W}{m^2\ ^\circ\mathrm{C}}.m^2.\ ^0C\right]$$
$$= 827{,}139\ Watt$$

4. *Pressure drop* (Penurunan tekanan)

$$\Delta P = \Delta h.\rho_h.g$$
$$= 0{,}03\ x\ 982{,}252\ x\ 9{,}81\ \left[\frac{kg}{m^3}.\frac{m}{s^2}\right]$$
$$= 289{,}076\ \left[\frac{N}{m^2}\right]$$

4.2 Pembahasan Grafik

4.2.1 Grafik Hubungan Antara Debit Air Panas Dan Jumlah sudu *Static Radial fin* Dengan Laju Perpindahan Kalor Pada Alat Penukar Kalor



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara debit dan jumlah sudu *static radial fin* dengan laju perpindahan kalor pada alat penukar kalor

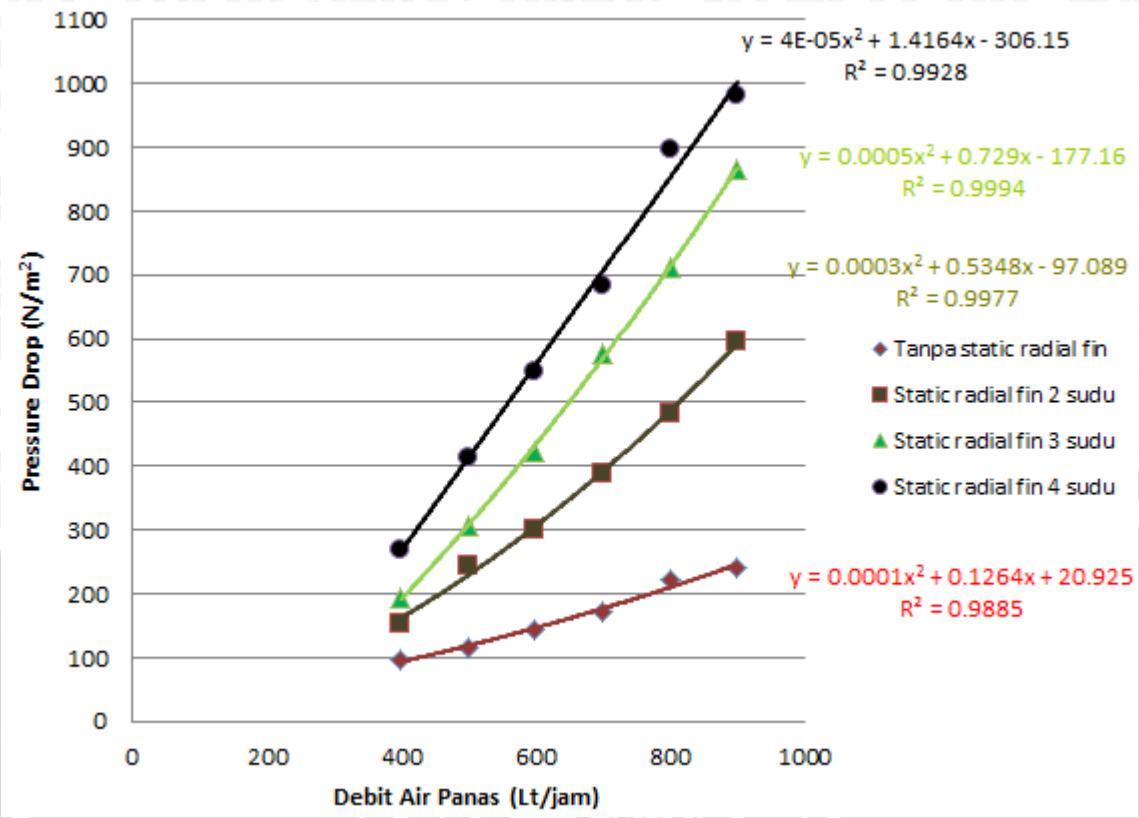
Dari gambar grafik 4.1 terlihat bahwa laju perpindahan kalor terkecil terjadi pada debit 400 liter/jam dengan variasi tanpa *static radial fin* yaitu sebesar 1852,948 Watt. Pada debit yang sama dengan menggunakan variasi jumlah sudu *static radial fin* berturut-turut 2 sudu, 3 sudu, dan 4 sudu, masing-masing laju perpindahan kalor meningkat menjadi 2830,2891 Watt, 3084,027 Watt, dan 3446,2021 Watt. Meningkatnya laju perpindahan kalor ini menunjukkan bahwa penggunaan *static radial fin* berpengaruh terhadap laju perpindahan kalor jika dibandingkan tanpa *static radial fin*.

Pada alat penukar kalor tanpa *static radial fin*, tidak terjadi perubahan arah aliran fluida panas, di mana arah aliran fluida adalah sama sepanjang pipa yaitu searah sumbu aksial pipa, sehingga pada fluida panas hanya terjadi kecepatan aksial saja dan besarnya nilai kecepatan aksial adalah sama dengan kecepatan fluida saat masuk ke dalam pipa air panas. Karena pada pipa hanya terjadi kecepatan aksial saja, maka perpindahan kalor secara konveksi yang terjadi tidak terlalu besar, selain itu besarnya kecepatan total fluida adalah sama dengan kecepatan aksial. Sedangkan pada alat penukar kalor dengan

static radial fin, arah aliran fluida di sekitar *static radial fin* berubah arah alirannya, sehingga aliran fluida mempunyai komponen kecepatan aksial, radial dan tangensial. Setelah melewati *static radial fin*, fluida panas tetap memiliki komponen kecepatan aksial, radial dan tangensial. Di mana, besar dari kecepatan radial dan tangensial pada fluida lebih besar dari pada tanpa menggunakan *static radial fin*. Hal ini mengakibatkan perpindahan kalor secara konveksi fluida di dalam pipa akan lebih besar dari pada tanpa menggunakan *static radial fin*.

Pada grafik juga dapat dilihat bahwa dengan semakin banyaknya jumlah sudu pada *static radial fin* mengakibatkan fluida panas mengalami perubahan garis aliran sehingga partikel-partikel fluida bergerak secara acak dan saling bercampur serta berinteraksi. Dengan semakin banyaknya jumlah sudu pada *static radial fin*, menyebabkan meningkatnya intensitas turbulensi pada aliran yang akan mempercepat transfer energi kalor tersebut. Gerakan fluida yang acak ini akan meningkatkan perpindahan kalor secara konveksi di pipa dalam (*tube*), sehingga dihasilkan beda temperatur fluida yang lebih besar pada lapisan-lapisan fluida yang saling berinteraksi melakukan perpindahan kalor tersebut, sesuai dengan rumus $q_h = \dot{m}_h \, x \, C_{ph} \, x \, \Delta T$,laju perpindahan kalor akan sebanding dengan beda temperatur antar fluida masuk dan fluida keluar yang melakukan perpindahan kalor, hal tersebut menyebabkan laju perpindahan kalor semakin tinggi.

4.2.2 Grafik Hubungan Antara Debit Air Panas Dan Pemasangan *Static Radial fin* Dengan *Pressure Drop* Pada Alat Penukar Kalor



Gambar 4.2 Grafik hubungan debit dan jumlah sudu *static radial fin* dengan *pressure drop* pada alat penukar kalor

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa debit fluida berpengaruh terhadap penurunan tekanan pada aliran fluida. Pada variasi debit fluida yang sama, semakin besar debit fluida, maka *pressure drop* akan semakin meningkat. Pada alat penuka kalor tanpa pemasangan *static radial fin*, *pressure drop* pada debit 400 $[\frac{liter}{jam}]$adalah sebesar 96,257 $[\frac{N}{m^2}]$, dan mengalami peningkatan hingga mencapai ΔP terbesar pada debit 900 $[\frac{liter}{jam}]$ yaitu sebesar 240,424 $[\frac{N}{m^2}]$. Demikian pula dengan pemasangan *static radial fin* dengan sudu 2, 3 dan 4 mengalami peningkatan mulai dari nilai minimum pada volume alir 400 $[\frac{liter}{jam}]$ hingga nilai maksimum pada volume alir 900 $[\frac{liter}{jam}]$. Pada volume alir yang sama, ΔP semakin meningkat dengan semakin banyaknya jumlah sudu pada *static radial fin.*

Pressure drop yang semakin besar ini disebabkan oleh meningkatnya *head losses* ,yang mana terdiri dari *major losses* dan *minor losses*. Berdasarkan rumusan $h_{ma} = f.\frac{L.v^2}{D.2.g}$ dan $h_{mi} = K_L.\frac{v^2}{2.g}$, dimana *major losses* dan *minor losses* berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan fluida. Berdasarkan rumus $\Delta P = \rho.g.h$, nilai *pressure drop* berbanding lurus dengan *head losses* dan kecepatan fluida berbanding lurus dengan debit, sehingga penurunan tekanan juga berbanding lurus dengan kuadrat debit.

Pada variasi debit, *pressure drop* terkecil terjadi pada alat penukar kalor tanpa menggunakan *static radial fin*. *Pressure drop* terkecil dapat terjadi karena penurunan tekanan hanya disebabkan oleh *major losses* saja. Sehingga penurunan tekanan pada alat penukar kalor tanpa *static radial fin* lebih kecil dibanding dengan menggunakan *static radial fin* yang disebabkan oleh *minor losses* dan *major losses*.

Sedangkan pengaruh jumlah sudu *static radial fin* terhadap *pressure drop*, lebih disebabkan oleh meningkatnya koefisien kerugian *head drop* sebagai akibat semakin banyaknya jumlah sudu yang dipasang pada pipa dalam (*tube*). Dengan semakin banyak jumlah sudu pada *static radial fin*, maka penghalang semakin besar dan aliran semakin terhambat sehingga kerugian semakin besar.