

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Data hasil pengujian

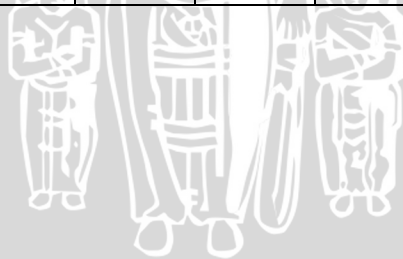
Data hasil pengujian pengaruh variasi sudut *static mixer* terhadap unjuk kerja *heat exchanger* yang didefinisikan sebagai laju perpindahan panas dan penurunan tekanan (*pressure drop*) adalah seperti dibawah ini,

Tabel 4.1 Data hasil pengujian *heat exchanger* tanpa pemasangan *helical static mixer*

No	Waktu (menit)	Debit air panas (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air (cmH ₂ O)
			Masuk	Keluar	Masuk	Keluar	
1	1	600	25.0	26.5	50.1	47.6	1.4
	2		25.4	27.2	50.5	47.9	1.3
	3		26.3	27.4	50.7	48.0	1.2
	4		26.5	28.1	50.5	47.9	1.3
	5		27.5	28.3	50.4	47.7	1.3
2	1	700	26.5	28.2	50.8	48.1	2
	2		26.9	28.7	50.2	47.5	2.1
	3		27.4	29.3	50.5	47.9	2
	4		28.0	29.7	50.6	47.9	2.1
	5		28.5	30.1	49.4	46.6	2.0
3	1	800	26.0	27.8	50.7	48.0	2.8
	2		26.2	28.1	50.2	47.7	2.8
	3		27.4	29.4	49.9	47.3	2.7
	4		27.7	29.7	49.7	47.2	2.7
	5		28.6	30.5	49.6	47.2	2.8
4	1	900	25.8	27.6	51.9	49.7	3.6
	2		26.7	28.5	51.7	49.3	3.3
	3		27.4	29.2	51.3	49.5	3.5
	4		28.0	29.9	50.6	48.5	3.5
	5		28.3	30.2	50.4	48.3	3.6

Tabel 4.2 Data hasil pengujian *heat exchanger* dengan pemasangan *helical static mixer* pitch 36 mm

No	Waktu (menit)	Debit air panas (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air (cmH ₂ O)
			Masuk	Keluar	Masuk	Keluar	
1	1	600	27.3	29.2	50.3	47.6	9.5
	2		28.3	30.2	49.9	46.4	9.3
	3		28.3	30.4	50.0	46.7	9.3
	4		29.3	31.3	50.1	46.5	9.4
	5		29.5	31.3	50.3	47.2	9.5
2	1	700	26.5	28.6	51.4	48.4	11.8
	2		26.6	29.3	51.5	48.3	12.0
	3		27.2	29.3	51.4	48.3	12.0
	4		28.3	30.3	51.2	47.9	11.9
	5		28.4	30.5	50.4	47.7	12.1
3	1	800	27.3	29.7	50.3	47.4	14.3
	2		27.9	30.4	50.0	47.2	14.8
	3		28.4	30.9	49.9	47.0	14.6
	4		28.9	31.5	49.8	46.8	14.7
	5		29.3	31.7	49.8	46.5	14.8
4	1	900	25.8	28.7	51.4	48.4	18.2
	2		26.5	29.4	51.3	48.2	18.0
	3		27.4	30.3	50.9	48.0	17.8
	4		28.4	31.2	50.6	47.4	17.9
	5		29.2	32.3	50.4	47.3	18.1



Tabel 4.3 Data hasil pengujian *heat exchanger* dengan pemasangan *helical static mixer* pitch 54 mm

No	Waktu (menit)	Debit air panas (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air (cmH ₂ O)
			Masuk	Keluar	Masuk	Keluar	
1	1	600	24.7	26.4	50.0	46.7	7.2
	2		25.4	27.2	49.5	46.2	7.2
	3		26.1	27.5	49.4	46.1	7.0
	4		26.4	28.3	49.1	46.3	7.3
	5		27.3	29.3	49.3	46.2	7.2
2	1	700	25.3	27.4	50.2	47.3	9.8
	2		25.5	27.4	50.4	47.4	9.8
	3		26.7	28.8	49.8	46.7	9.8
	4		27.1	28.7	49.3	46.5	9.9
	5		27.3	29.5	49.3	46.3	10.0
3	1	800	25.3	27.5	51.7	48.2	13.0
	2		26.0	28.4	51.3	48.1	13.1
	3		26.2	28.4	51.0	48.5	12.6
	4		27.3	29.6	51.1	48.5	12.9
	5		27.3	29.3	50.5	48.2	13.0
4	1	900	25.2	27.4	51.8	49.3	14.4
	2		25.7	28.0	51.8	49.0	14.2
	3		26.5	28.7	51.6	48.6	14.0
	4		27.3	29.4	51.0	48.3	14.1
	5		27.7	30.1	50.6	48.3	14.2

Tabel 4.4 Data hasil pengujian *heat exchanger* dengan pemasangan *helical static mixer* pitch 72 mm

No	Waktu (menit)	Debit air panas (lt/jam)	Suhu air dingin (°C)		Suhu air panas (°C)		Perbedaan ketinggian air (cmH ₂ O)
			Masuk	Keluar	Masuk	Keluar	
1	1	600	27.1	28.7	51.3	48.6	5.1
	2		27.8	29.4	51.5	48.5	4.3
	3		28.3	30.1	50.5	47.4	4.5
	4		28.7	30.4	50.4	47.4	4.7
	5		29.6	31.2	50.2	47.0	4.8
2	1	700	26.5	28.6	51.6	48.6	5.7
	2		27.3	29.3	51.6	48.6	5.6
	3		27.5	29.3	51.3	48.6	5.7
	4		28.5	30.4	50.6	47.7	5.7
	5		28.6	30.6	50.4	47.2	5.8
3	1	800	25.5	27.6	51.4	48.4	7.5
	2		26.5	28.5	50.4	47.7	7.6
	3		26.4	28.5	50.3	47.5	7.7
	4		27.2	29.4	49.7	47.1	7.6
	5		27.4	29.5	49.9	47.4	7.7
4	1	900	25.4	27.4	51.5	48.9	8.6
	2		25.9	28.0	51.4	48.7	8.5
	3		26.5	28.6	50.7	48.3	8.4
	4		27.1	29.3	50.4	47.8	8.5
	5		27.4	29.6	50.3	47.6	8.6

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

4.1.2 Contoh perhitungan

Parameter-parameter yang diketahui pada pengujian *heat exchanger* dengan pemasangan *static mixer* sudut 40° pada debit 400 liter/jam adalah sebagai berikut :

- Debit fluida panas (Q_h) = 600 liter/jam
- Debit fluida dingin (Q_c) = 900 liter/jam
- Temperatur masuk fluida panas ($T_{h\ in}$) = 50,1 °C
- Temperatur keluar fluida panas ($T_{h\ out}$) = 47,6 °C
- Temperatur masuk fluida dingin ($T_{c\ in}$) = 25 °C
- Temperatur keluar fluida dingin ($T_{c\ out}$) = 26.5 °C

- Perbedaan ketinggian air pada manometer (ΔP) = 1,4 cmH₂O
- 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}) = 0,0276 m
- Konduktivitas thermal material *innertube* (k) = 383,5687 W/m°C
- Panjang pipa *heat exchanger* (L) = 1,1 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.

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

$$= \frac{50,1 + 47,6}{2}$$

$$= 48,85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

$$= \frac{25 + 26,5}{2}$$

$$= 25,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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 48,85°C (T_b) = 321,85 K

$$\frac{T_1 - T_2}{\rho_1 - \rho_2} = \frac{T_b - T_1}{\rho - \rho_1}$$

$$\frac{320 - 340}{989 - 980} = \frac{321,85 - 320}{\rho - 989}$$

$$\rho = \frac{(989 - 980)(321,85 - 320)}{320 - 340} + 989$$

$$\rho = 988,1675 \text{ Kg/m}^3$$

Dengan cara yang sama seperti perhitungan massa jenis fluida diatas, maka sifat-sifat fluida yang lain didapatkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\rho_h &= 988,1675 \text{ Kg/m}^3 & \rho_c &= 997,1875 \text{ Kg/m}^3 \\ C_{ph} &= 4177,0175 \text{ J/Kg}^\circ\text{C} & C_{pc} &= 4178,25 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Dimana subskrip *h* dan *c* mewakili fluida panas (*hot*) dan fluida dingin (*cold*), sifat-sifat fluida diatas adalah sifat fluida panas pada temperatur 48.85 °C dan fluida dingin pada temperature 25,75 °C.

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})

$$\begin{aligned}Q_h &= 600 \frac{\text{liter}}{\text{jam}} \\ &= \frac{600 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \\ &= 0.0001666 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_h &= Q_h \times \rho_h \\ &= 0.0001666 \times 988,1675 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \\ &= 0,16403 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}\end{aligned}$$

- Perbedaan temperatur masuk dan keluar (ΔT)

$$\begin{aligned}\Delta T_h &= T_{h \text{ in}} - T_{h \text{ out}} \\ &= 50,1 - 47,6 \\ &= 2,5 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Maka laju perpindahan fluida panas secara termodinamika adalah

$$\begin{aligned}q_h &= \dot{m}_h \times C_{ph} \times \Delta T \\ &= 0,16403 \times 4177,0175 \times 2,5 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \\ &= 1712,9511 \frac{\text{J}}{\text{s}}\end{aligned}$$

$$= 1712,9511 \text{ Watt}$$

3. Penurunan tekanan (*pressure drop*)

Perhitungan penurunan tekanan secara teoritis didasarkan pada persamaan Bernoulli yang menyatakan bahwa total *Head* sepanjang pipa alir adalah konstan.

$$\Delta P = \rho_h \times g \times h$$

$$\Delta P = 988,1675 \times 9,81 \times 1,4 \times 10^{-2}$$

$$= 135,7149 \frac{N}{m^2}$$

4. Effectiveness

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{\text{perpindahan kalor aktual}}{\text{perpindahan kalor maksimum}}$$

Perpindahan kalor aktual telah kita ketahui, besarnya yaitu 1712,9511 Watt, maka kita cari perpindahan kalor maksimum dengan menggunakan rumus :

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})$$

- *Heat capacity* fluida panas (C_h)

$$C_h = \dot{m}_h \times C_{ph}$$

$$= 0,16403 \times 4177,0175 \frac{Kg}{s} \frac{J}{Kg^\circ C}$$

$$= 685,1804 \frac{J}{s^\circ C}$$

- *Heat capacity* fluida pendingin (C_c)

$$C_c = \dot{m}_c \times C_{pc}$$

$$= 0,00025 \times 997,1875 \times 4178,25 \frac{Kg}{s} \frac{J}{Kg^\circ C}$$

$$= 1041,6246 \frac{J}{s^\circ C}$$

Karena C_c lebih besar daripada C_h , maka $C_{min} = C_h$.

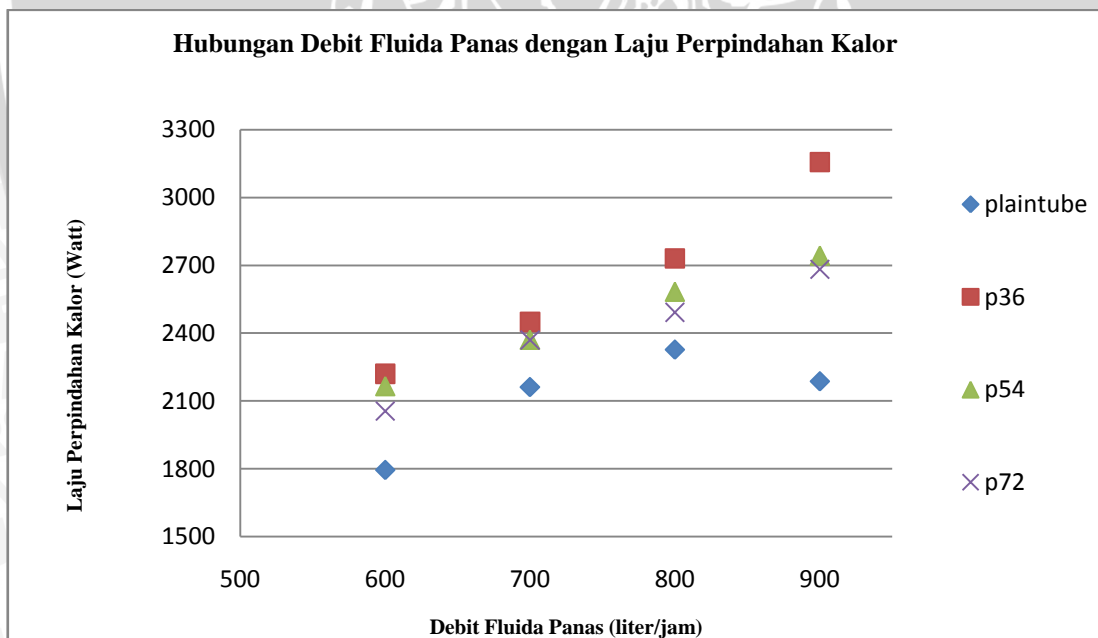
$$\begin{aligned} q_{max} &= C_h \times (T_{h,i} - T_{c,i}) \\ &= 685,1804 \times (50,1 - 25) \frac{J}{s \text{ } ^\circ\text{C}} \\ &= 17198,0268 \frac{J}{s} \end{aligned}$$

- Effectiveness

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{q}{q_{max}} \\ &= \frac{1712,9511}{17198,0268} \\ &= 0,0996 \end{aligned}$$

4.2 Pembahasan Grafik

4.2.1 Grafik hubungan debit fluida panas dengan laju perpindahan kalor



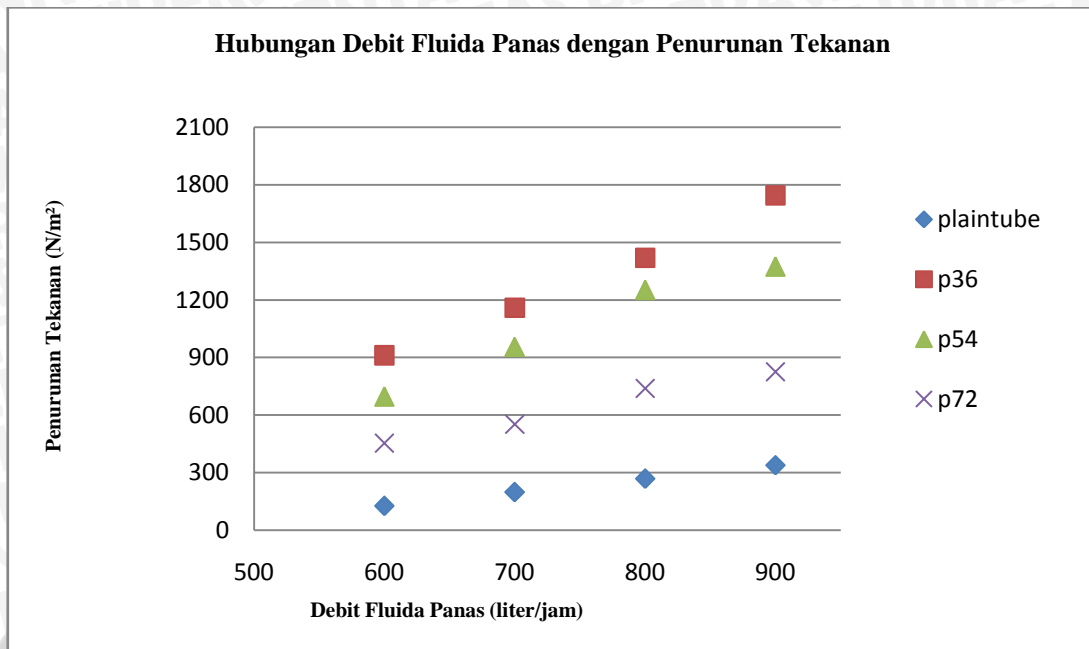
Gambar 4.3 Grafik pengaruh debit fluida panas terhadap laju perpindahan kalor pada *plain tube* dan pemasangan *helical static mixer*

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara debit fluida panas dengan laju perpindahan kalor. Dari grafik tersebut, dapat kita ketahui bahwa debit fluida panas berpengaruh terhadap laju perpindahan panas (q). Hal ini terlihat dari semakin besar

debit fluida panas, maka laju perpindahan kalor semakin meningkat. Pada *plain tube* / tanpa pemasangan *helical static mixer*, laju perpindahan kalor pada debit 400 liter/jam adalah sebesar 1795.008 Watt, dan mengalami peningkatan untuk setiap kenaikan debit hingga mencapai nilai q terbesar pada debit fluida panas 900 liter/jam yakni sebesar 2186.718 Watt. Demikian pula dengan pemasangan *helical static mixer* jarak *pitch* 36, 54 dan 72 mm yang juga mengalami peningkatan secara linier, mulai dari nilai minimum pada debit 400 liter/jam hingga nilai q maksimum pada 900 liter/jam. Peningkatan laju perpindahan kalor ini dikarenakan, semakin besar debit fluida panas pada *innertube* mengakibatkan semakin besar pula massa alir fluida tersebut. Ini sesuai dengan persamaan $\dot{m} = Q_h \times \rho$. Sehingga laju perpindahan kalor fluida juga akan semakin meningkat, dimana laju perpindahan panas dirumuskan sebagai $q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$.

Sementara itu, pada debit fluida panas yang sama, terlihat bahwa laju perpindahan panas menggunakan pemasangan *helical static mixer* (*pitch* 36 mm, 54 mm, dan 72 mm) memiliki laju perpindahan kalor yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa *helical static mixer* (*pitch* 0 mm). Namun, laju perpindahan kalor terbesar diantara ketiga variasi *pitch* didapat pada *pitch* 36 mm. disusul kemudian *pitch* 54 mm dan terakhir 72 mm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil jarak *pitch helical static mixer*, kecepatan aliran fluida panas semakin meningkat karena fluida panas harus melewati permukaan *helical static mixer* yang lebih panjang. Apabila kecepatan aliran fluida meningkat maka daerah lapisan batas akan meningkat sehingga laju perpindahan kalor akan meningkat.

4.2.2 Grafik hubungan debit fluida panas terhadap penurunan tekanan



Gambar 4.5 Hubungan debit fluida panas terhadap penurunan tekanan pada *plain tube* dan pemasangan *helical static mixer*

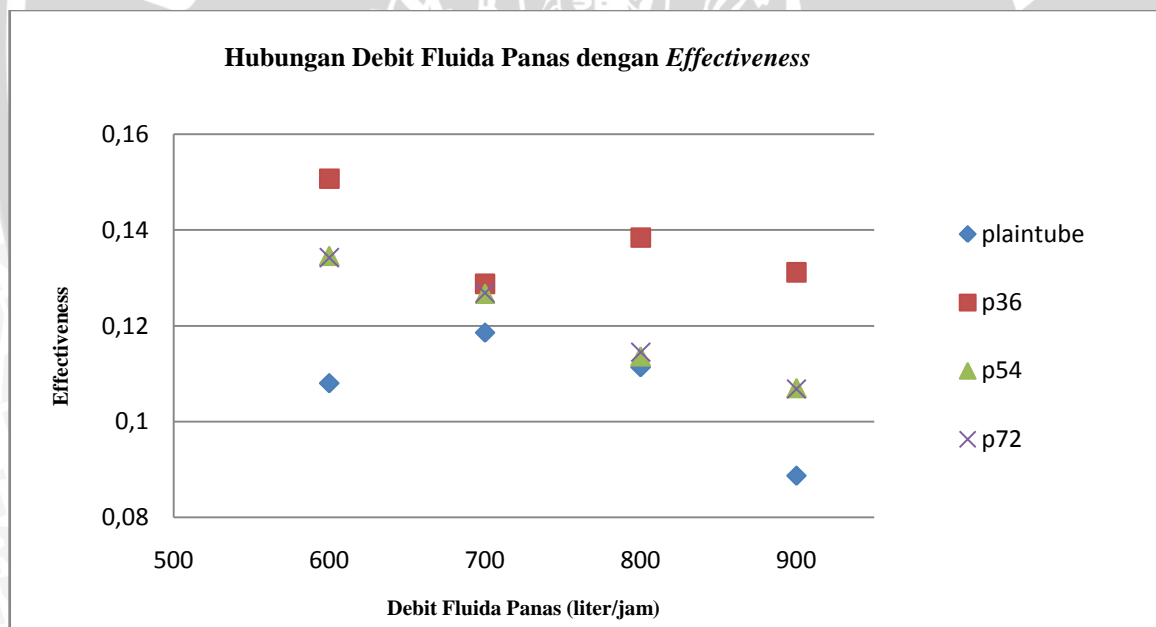
Grafik di atas menunjukkan hubungan antara debit fluida panas dengan penurunan tekanan. Dari grafik tersebut terlihat bahwa debit fluida panas berpengaruh terhadap penurunan tekanan. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan penurunan tekanan seiring dengan peningkatan debit fluida panas.

Pada *plain tube* / tanpa pemasangan *helical static mixer* besarnya penurunan tekanan pada debit 600 liter/jam adalah 126 N/m². Kemudian mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan fluida panas. Demikian pula pada pemasangan *helical static mixer* jarak *pitch* 36 mm, 54 mm, dan 72 mm. Ketiganya memiliki nilai penurunan tekanan minimum pada debit 600 liter/jam, lalu penurunan tekanannya meningkat seiring dengan meningkatnya debit fluida panas hingga mencapai penurunan tekanan maksimum pada debit 900 liter/jam.

Peningkatan penurunan tekanan pada debit fluida panas yang semakin besar dapat kita hubungkan dengan rumus *minor losses* $\Delta P = K \frac{1}{2} \rho V^2$, dimana *minor losses* berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan fluida. Karena debit berbanding lurus dengan kecepatan fluida, maka *minor losses* akan meningkat seiring dengan meningkatnya debit fluida

Dari grafik di atas juga terlihat bahwa penurunan tekanan ketika menggunakan pemasangan *helical static mixer* (*pitch* 36 mm, 54 mm, dan 72 mm) memiliki penurunan tekanan yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa *helical static mixer* (*pitch* 0 mm) pada debit fluida panas yang sama. Namun, penurunan tekanan terbesar diantara ketiga variasi *pitch* didapat pada *pitch* 36 mm. disusul kemudian *pitch* 54 mm dan terakhir 72 mm. Semakin kecil jarak *pitch helical static mixer*, kecepatan fluida panas setelah melewati *helical static mixer* akan meningkat karena fluida panas harus melewati permukaan *helical static mixer* yang lebih panjang. Peningkatan kecepatan fluida panas ini berbanding terbalik dengan tekanan. dimana tekanan fluida panas setelah melewati *helical static mixer* akan semakin menurun, sehingga penurunan tekanannya akan semakin meningkat.

4.2.3 Grafik hubungan debit fluida panas terhadap *effectiveness*



Gambar 4.8 Hubungan debit fluida panas terhadap *effectiveness* pada *plain tube* dan pemasangan *helical static mixer*

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara debit fluida panas dengan *effectiveness*. Nilai *effectiveness* didapat dengan membandingkan antara laju perpindahan kalor aktual (q) dengan laju perpindahan kalor maksimal (q_{maks}). Sedangkan laju perpindahan kalor maksimal (q_{maks}) didapatkan dari persamaan $q_{maks} = C \times \Delta T_{maks}$, dimana $C = \dot{m} \times C_p$ dan $\Delta T_{maks} = T_{hi} - T_{ci}$

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa debit fluida panas berpengaruh terhadap *effectiveness*. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan nilai *effectiveness* seiring dengan peningkatan debit fluida panas. Pada debit fluida panas yang semakin besar, mengakibatkan semakin besar pula massa alir fluida tersebut. Ini sesuai dengan persamaan $\dot{m} = Q_h \times \rho$. Peningkatan massa alir fluida panas ini akan meningkatkan kapasitas kalor fluida panas (C) dan pada akhirnya akan meningkatkan nilai laju perpindahan kalor maksimum. Semakin tinggi nilai laju perpindahan kalor maksimum maka nilai *effectiveness*-nya akan semakin berkurang, Nilai *effectiveness* terendah rata-rata diperoleh pada debit 900 liter/ jam.

Dari grafik tersebut dapat kita lihat pula bahwa pemasangan *helical static mixer* dengan variasi jarak *pitch* mempunyai nilai *effectiveness* yang lebih tinggi daripada tanpa *helical static mixer* (*pitch* 0 mm) untuk variasi debit fluida panas yang sama.

Untuk pemasangan *helical static mixer*, nilai *effectiveness* terbesar diperoleh pada pemasangan *helical static mixer* dengan jarak *pitch* 36 mm. Berikutnya adalah pada jarak *pitch* 54 mm dan 72 mm yang nilai *effectiveness*-nya hampir sama.

Pada pemasangan *helical static mixer*, jarak *pitch* 36 mm memiliki nilai *effectiveness* yang lebih besar dibandingkan yang lainnya. Hal ini disebabkan karena pada jarak *pitch* 36 mm, laju perpindahan kalor aktualnya lebih besar dibandingkan dengan dua variasi *pitch* yang lainnya. Sebagaimana telah dijelaskan pada pembahasan grafik sebelumnya, pada jarak *pitch* 36 mm kecepatan aliran fluida panas semakin meningkat karena fluida panas harus melewati permukaan *helical static mixer* yang lebih panjang. Apabila kecepatan aliran fluida meningkat maka daerah lapisan batas akan meningkat sehingga laju perpindahan kalor akan meningkat.