

BAB IV
DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Data Hasil Pengujian

Setelah dilakukan penelitian, didapatkan data-data pada tiap variasi pemasangan sudut *flat filler*, berupa :

- a. Temperatur air masuk *cooling tower*, ($T_{w\ in}$)
- b. Temperatur air keluar *cooling tower*, ($T_{w\ out}$)
- c. Temperatur bola kering udara masuk *cooling tower*, (T_1)
- d. Temperatur bola basah udara masuk *cooling tower*, (T_2)
- e. Temperatur bola kering udara keluar *cooling tower*, (T_3)
- f. Temperatur bola basah udara keluar *cooling tower*, (T_4)

Tabel 4.1 Tabel hasil pengambilan data

Temperatur lingkungan = 27 °C

Kelembaban relatif lingkungan = 74 %

Tabel 4.1

Sudut <i>filler</i>	Q (ltr/dtk)	$T_{w\ in}$ (°C)	$T_{w\ out}$ (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)
60°	20	50	42	27	22	27	23
	25	50	41	27	23	31	25
	30	50	40	29	25	32	27
75°	20	50	41	26	22	26	22
	25	50	40	27	24	29	25
	30	50	38	28	24	31	27
90°	20	50	40	29	24	32	28
	25	50	39	31	25	34	29
	30	50	37	32	25	35	31

4.1.2 Contoh Perhitungan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari parameter-parameter yang diperlukan untuk menentukan nilai dari laju perpindahan kalor, efektivitas (*effectiveness*) *cooling tower*, dan *number of transfer unit* (NTU).

Data hasil pengamatan *cooling tower* dengan variasi jarak antar *flat filler* 12 cm dengan debit air panas masuk 1,5 liter/menit:

- a. Temperatur air masuk, $T_{w\text{ in}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- b. Temperatur air keluar, $T_{w\text{ out}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- c. Temperatur bola kering udara masuk, $T_1 = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$
- d. Temperatur bola basah udara masuk, $T_2 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$
- e. Temperatur bola kering udara keluar, $T_3 = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$
- f. Temperatur bola basah udara keluar, $T_4 = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$
- g. Temperatur lingkungan : $27\text{ }^{\circ}\text{C}$

1. Perhitungan sifat-sifat udara masuk

- Kelembaban relatif (Φ_{in})

Dari diagram psikrometri pada $T_1 = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $T_2 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ didapatkan harga kelembaban relatif, Φ_{in} : 67 % atau 0,67

- Kelembaban absolut (ω_{in})

Kelembaban absolut adalah perbandingan massa uap air dengan massa udara kering, yang dapat dihitung dengan

$$\omega_{\text{in}} = 0,622 \frac{p_{v\text{ in}}}{(p - p_{v\text{ in}})}$$

Sedangkan $p_{v\text{ in}}$ adalah tekanan parsial uap air, yang didapat dari

$$p_{v\text{ in}} = \Phi_{\text{in}} \cdot p_{g\text{ in}}$$

Pada tabel sifat uap air dan di interpolasi pada temperatur $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, dengan interpolasi diperoleh harga $p_{g\text{ in}}$ sebesar 4,0095 kPa, sehingga :

$$p_{v \text{ in}} = 0,67 \cdot 4,0095$$

$$p_{v \text{ in}} = 2,68603 \text{ kPa}$$

jadi

$$\omega_{\text{in}} = 0,622 \frac{2,68603}{101,3 - 2,68603}$$

$$\omega_{\text{in}} = 0,016941927 \text{ kg uap/kg udara kering}$$

- Laju aliran udara lembab masuk ($m_{\text{moist in}}$)

Pertama kali dihitung dahulu massa jenis udara yang masuk melalui *orifice*. Dari tabel lembab udara pada temperatur 29 °C didapatkan volume spesifik, $v : 0,8910 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$\text{Sehingga dapat diketahui } \rho_{\text{udara}} = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,891} = 1,122334456 \text{ kg/m}^3$$

luas penampang $A_u = 2,0258 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ dan kecepatan udara masuk adalah 9,8 m/s

$$m_{\text{moist in}} = \rho v A_u$$

$$\begin{aligned} m_{\text{moist in}} &= 1,122334456 \times 2,0258 \times 10^{-3} \times 9,8 \\ &= 0,022428031 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

- Laju uap air dalam udara

$$\dot{m}_{v \text{ in}} = \frac{\dot{m}_{\text{moist air}}}{\left(\frac{1}{\omega_{\text{in}}}\right) + 1}$$

$$\dot{m}_{v \text{ in}} = \frac{0,022428031}{\left(\frac{1}{0,016941927}\right) + 1}$$

$$= 0,000371203 \text{ kg/s}$$

dengan kandungan energi sebesar $h_{v \text{ in}} = 2554,5 \text{ kJ/kg}$

$$h_{\text{air in}} = c_p \cdot T_1 + \omega_{\text{in}} \cdot h_{v \text{ in}}$$

$$= 1 \cdot 29 + 0,016941927 \cdot 2554,5$$

$$= 72,27899908 \text{ kJ/kg}$$

- Laju aliran massa udara kering ($m_{\text{dry air}}$)

$$\begin{aligned} m_{\text{dry air}} &= m_{\text{moist in}} - m_{\text{v in}} \\ &= 0,022428031 - 0,000371203 \\ &= 0,021907995 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

2. Perhitungan sifat-sifat udara keluar

- Kelembaban relatif (Φ_{out})

Dari diagram psikrometri pada $T_3 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $T_4 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ didapatkan harga kelembaban relatif, $\Phi_{\text{out}} : 78\%$ atau $0,78$

- Kelembaban absolut (ω_{out})

$$\omega_{\text{out}} = 0,622 \frac{p_{\text{v out}}}{(p - p_{\text{v out}})}$$

$p_{\text{v out}}$ didapat dari,

$$p_{\text{v out}} = \Phi_{\text{out}} \cdot p_{\text{g out}}$$

Dari tabel sifat-sifat uap jenuh pada temperatur $32 \text{ }^\circ\text{C}$, diperoleh harga :

$$p_{\text{g out}} = 4,753 \text{ kPa, sehingga}$$

$$\begin{aligned} p_{\text{v out}} &= \Phi_{\text{out}} \cdot p_{\text{g out}} \\ &= 0,78 \cdot 4,753 \\ &= 3,70734 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi } \omega_{\text{out}} &= 0,622 \frac{3,70734}{101,3 - 3,70734} \\ &= 0,02368472 \text{ kg uap/ kg udara kering} \end{aligned}$$

Dari tabel sifat-sifat uap jenuh pada temperatur $32 \text{ }^\circ\text{C}$, didapatkan harga entalpi uap air sebesar 2560 kJ/kg

dengan kandungan entalpi

$$\begin{aligned} h_{\text{air out}} &= c_p \cdot T_3 + \omega_{\text{out}} \cdot h_{\text{v out}} \\ &= 1 \cdot 31 + 0,02368472 \cdot 2560 \\ &= 92,4888895 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- Laju aliran uap keluar ($m_{v \text{ out}}$)

$$\begin{aligned} m_{v \text{ out}} &= \omega_{\text{out}} \cdot m_{\text{dry air}} \\ &= 0,02368472 \cdot 0,021907995 \\ &= 0,000517707 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

- Laju Penguapan ($m_{\text{evaporation}}$)

Selisih dari nilai massa uap keluar ($m_{v \text{ out}}$) dengan uap masuk ($m_{v \text{ in}}$) merupakan laju penguapan yang nilainya sebesar

$$\begin{aligned} m_{\text{evaporation}} &= m_{v \text{ out}} - m_{v \text{ in}} \\ &= 0,000517707 - 0,000371203 \\ &= 0,000146504 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

- Laju aliran udara lembab keluar ($m_{\text{moist out}}$)

Merupakan penjumlahan laju udara lembab masuk ($m_{\text{moist in}}$) dan laju penguapan ($m_{\text{evaporation}}$)

$$\begin{aligned} m_{\text{moist out}} &= m_{\text{moist in}} + m_{\text{evaporation}} \\ &= 0,022428031 + 0,000146504 \\ &= 0,022468531 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

3. Perhitungan sifat-sifat air

- Laju aliran air masuk ($m_{w \text{ in}}$)

Debit air masuk : 1,5 liter/menit = 0,025 liter/s

$$m_{w \text{ in}} = 0,025 \text{ kg/s}$$

dengan entalpi ($h_{w \text{ in}}$) pada temperatur 50 °C sebesar 209,26 kJ/kg

- Laju aliran air keluar ($m_{w \text{ out}}$)

Didapat dari laju aliran massa air masuk ($m_{w \text{ in}}$) dikurangi besarnya laju penguapan ($m_{\text{evaporation}}$) yaitu

$$\begin{aligned} m_{w \text{ out}} &= m_{w \text{ in}} - m_{\text{evaporation}} \\ &= 0,025 - 0,000146504 \\ &= 0,024853496 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Pada temperatur air keluar *cooling tower* ($T_{w \text{ out}}$) = 40 °C memiliki nilai entalpi sebesar, $h_{w \text{ out}} = 167,45 \text{ kJ/kg}$

4. Nilai kalor yang dilepas oleh air (q_{out})

$$\begin{aligned} q_{out} &= (m_{w\ in} \cdot h_{w\ in}) - (m_{w\ out} \cdot h_{w\ out}) \\ &= (0,025 \cdot 209,26) - (0,024853496 \cdot 167,45) \\ &= 1,069782158 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

5. Nilai kalor maksimum yang mungkin dilepas (q_{max})

Kalor maksimum yang mungkin dilepas *cooling tower* akan mencapai maksimum bila temperatur air keluar ($T_{w\ out}$) sama dengan temperatur bola basah udara masuk (T_2). Pada temperatur 24 °C, air yang keluar dari *cooling tower* mempunyai kandungan energi setelah interpolasi sebesar $h_{w\ wb} = 100,59$ kJ/kg.

$$\begin{aligned} \text{Jadi } q_{max} &= (m_{w\ in} \cdot h_{w\ in}) - (m_{w\ out} \cdot h_{w\ wb}) \\ &= (0,025 \cdot 209,26) - (0,024853496 \cdot 100,59) \\ &= 2,731486875 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

6. Efektifitas/*Effectiveness* (ϵ)

Effectiveness merupakan perbandingan antara kalor aktual yang dilepas *cooling tower* dengan kalor maksimum yang mungkin dapat dilepas *cooling tower*, adalah

$$\epsilon = \frac{q_{out}}{q_{max}}$$

$$\epsilon = \frac{1,069782158}{2,731486875}$$

$$= 0,391648288$$

7. *Number of Transfer Unit (NTU)*

$$NTU = - \frac{\ln \left(\frac{1-\epsilon}{1-\epsilon m^*} \right)}{1-m^*}$$

$$m^* \text{ dicari dari persamaan, } m^* = \frac{\dot{m}_{moist.in}}{\dot{m}_{moist.out}} \cdot \frac{C_s}{C_p}$$

dan C_s merupakan kalor spesifik standar yaitu perbandingan Δh dengan ΔT aktual

$$C_s = \frac{h_{w\ in} - h_{w\ out}}{T_{wi} - T_{wo}}$$

$$C_s = \frac{209,26 - 167,45}{50 - 40}$$

$$= 4,181 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$m^* = \frac{0,022428031}{0,022468531} \frac{4,181}{4,18}$$

$$= 0,993705472$$

Jadi

$$NTU = - \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,391648288}{1 - 0,391648288 \cdot 0,993705472}\right)}{1 - 0,993705472}$$

$$NTU = 0,642485052$$

4.1.3 Hasil Pengolahan Data

Hasil pengolahan data akan di tampilkan dalam bentuk tabel 4.2 berikut ini :

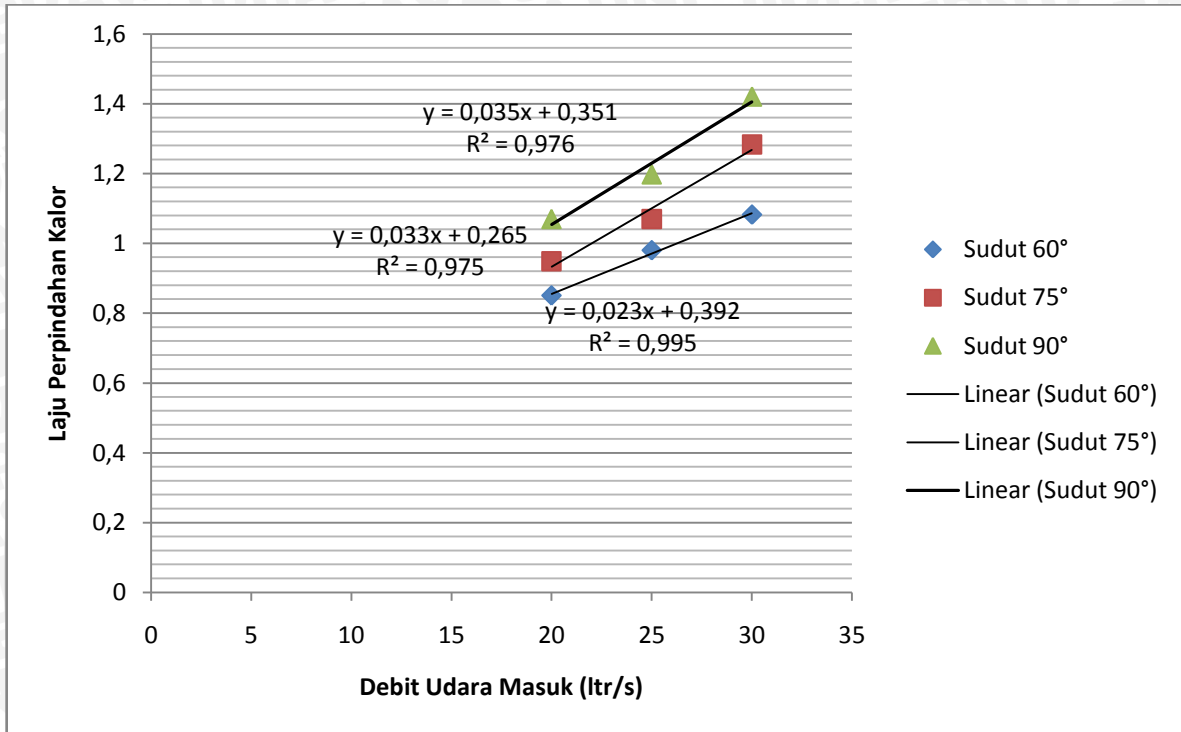
Tabel 4.2 : Tabel Hasil Pengolahan Data

Temperatur lingkungan : 27 °C

Sudut Filler	Q (liter/sec)	q out(kJ/s)	q out (Watt)	q max(kJ/s)	Efektivitas	NTU
60°	20	0,85053771	0850,53771	2,926690508	0,290614162	0,410916392
	25	0,9800274	0980,0274	2,736135145	0,358179457	0,558169952
	30	1,082010162	1082,010162	2,635250073	0,410591076	0,695104322
75°	20	0,94882504	0948,82504	2,926732165	0,324192644	0,480453936
	25	1,069763772	1069,763772	2,732967047	0,391429444	0,642268121
	30	1,283060584	1283,060584	2,736455594	0,468876815	0,880811399
90°	20	1,069782158	1069,782158	2,731486875	0,391648288	0,642485052
	25	1,197782865	1197,782865	2,643072584	0,453178196	0,825238429
	30	1,420858865	1420,858865	2,654339158	0,535296652	1,144078034

4.2 Pembahasan Grafik

4.2.1 Grafik Pengaruh Variasi Besar Sudut Pemasangan *Flat Filler* dan Debit Udara Masuk Terhadap Laju Perpindahan Kalor *Cooling Tower*



Gambar 4.1 Grafik pengaruh variasi besar sudut pemasangan *flat filler* dan debit udara masuk terhadap laju perpindahan kalor *cooling tower*

Dari gambar 4.1 dapat diketahui bahwa hubungan antara debit udara masuk dan sudut *flat filler* terhadap laju perpindahan kalor yaitu semakin besar sudut *flat filler* pada debit udara yang tetap maka nilai laju perpindahan kalor juga semakin besar. Nilai laju perpindahan kalor terkecil terjadi pada debit udara masuk *cooling tower* 20 liter/sec dengan menggunakan sudut *flat filler* 60° yaitu 0,85053771 kJ/sec atau 850,53771 Watt. Sedangkan pada debit yang sama dengan variasi sudut *flat filler* 75° mengalami peningkatan laju perpindahan kalor, yaitu sebesar 0,94882504 kJ/sec atau 948,82504 Watt dan 1,069782158 kJ/sec atau 1069,782158 Watt pada variasi sudut *flat filler* 90°. Nilai laju perpindahan kalor tertinggi terjadi pada debit udara masuk 30 liter/sec dengan variasi *flat filler* 90° yaitu sebesar 1,420858865 kJ/sec atau 1420,858865 Watt.

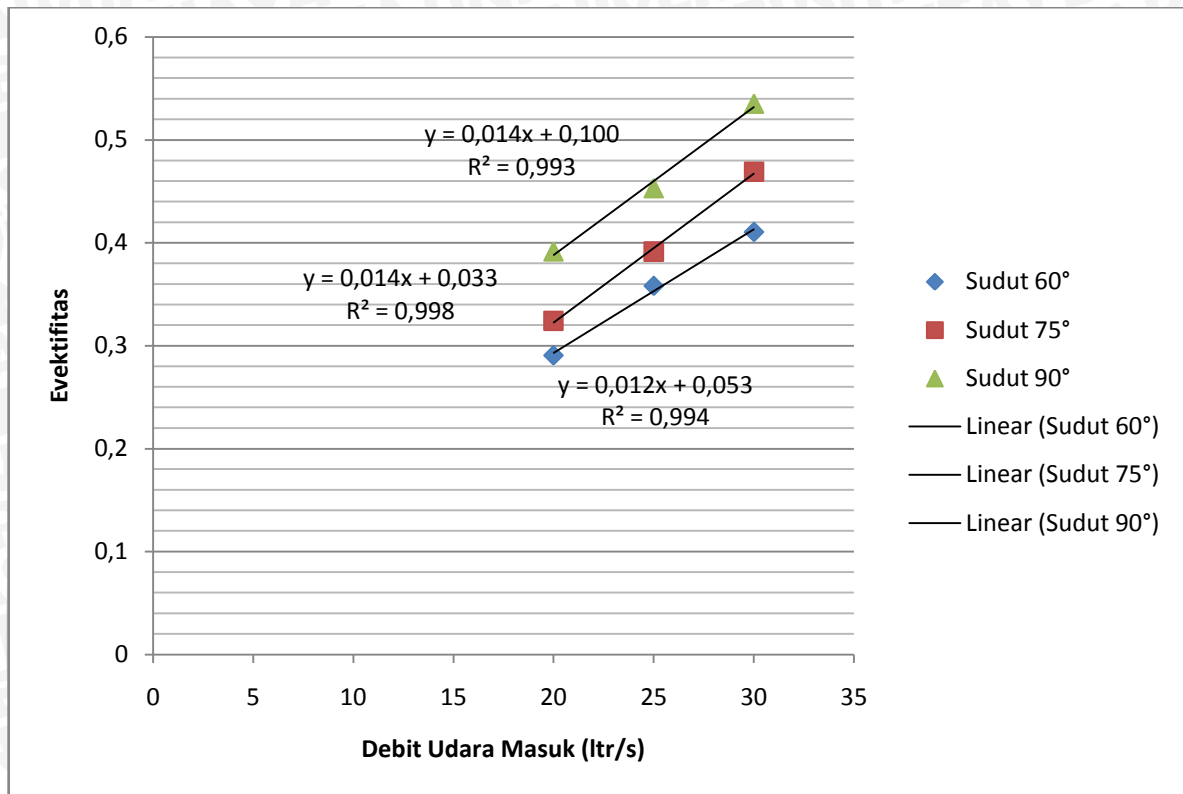
Peningkatan laju perpindahan kalor juga sebanding dengan kenaikan variasi debit udara masuk *cooling tower*. Pada gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa pada variasi sudut *flat filler cooling tower* yang sama, semakin tinggi debit udara masuk *cooling tower* maka laju perpindahan kalor juga semakin tinggi.

Pada gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa pada variasi debit udara masuk *cooling tower* yang sama terdapat kecenderungan peningkatan laju perpindahan kalor *cooling tower* pada setiap variasi sudut *flat filler*, hal ini disebabkan penggunaan sudut *flat filler* dengan variasi yang berbeda akan membuat total luasan kontak antara air panas dan udara masuk *cooling tower* juga berbeda. Selain itu, semakin besar variasi sudut *flat filler*, maka laju air yang tertahan oleh *filler* smakin banyak sehingga membuat lama kontak antara air dengan udara semakin besar sehingga nilai laju perpindahan kalor semakin besar. Jumlah kalor yang dilepas oleh air sebanding dengan jumlah kalor yang diserap oleh udara. Semakin banyak kalor yang dilepas oleh air maka semakin banyak pula kalor yang diserap oleh udara. Laju perpindahan kalor akan sebanding dengan perbedaan temperatur air masuk dengan temperatur air keluar *cooling tower*, sesuai dengan persamaan 2-12 bahwa:

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dengan perbedaan temperatur besar pula menyebabkan laju perpindahan kalor semakin tinggi.

4.2.2 Grafik Pengaruh Besar Sudut Pemasangan *Flat Filler* dan Debit Udara Masuk terhadap Efektivitas (*Effectiveness*) *Cooling Tower*



Gambar 4.2 Grafik pengaruh variasi besar sudut pemasangan *flat filler* dan debit udara masuk terhadap efektivitas (*effectiveness*) *cooling tower*

Pada gambar 4.2 dapat kita lihat grafik hubungan antara besar sudut *flat filler* dan debit udara masuk terhadap efektivitas (*effectiveness*) *cooling tower*. Diketahui bahwa pada debit udara masuk *cooling tower* dari 20 liter/sec hingga 30 liter/sec, efektivitas (*effectiveness*) pada *cooling tower* cenderung meningkat untuk tiap variasi sudut *flat filler*.

Dari gambar 4.2 terlihat bahwa *effectiveness* terkecil terjadi pada debit udara masuk 20 liter/sec pada variasi sudut *flat filler* 60° yaitu sebesar 0,290614162. Pada debit yang sama dengan menggunakan variasi sudut *flat filler* 75°, *effectiveness* meningkat menjadi 0,324192644 dan menjadi 0,642485052 pada variasi sudut *flat filler* 90°. *Effectiveness* paling tinggi terjadi pada debit udara masuk *cooling tower* 30 liter/sec dengan variasi sudut *flat filler* 90° yaitu sebesar 0,535296652. Peningkatan nilai *effectiveness* ini menunjukkan

bahwa penggunaan sudut *flat filler* yang berbeda memberikan pengaruh pada *effectiveness cooling tower* itu sendiri.

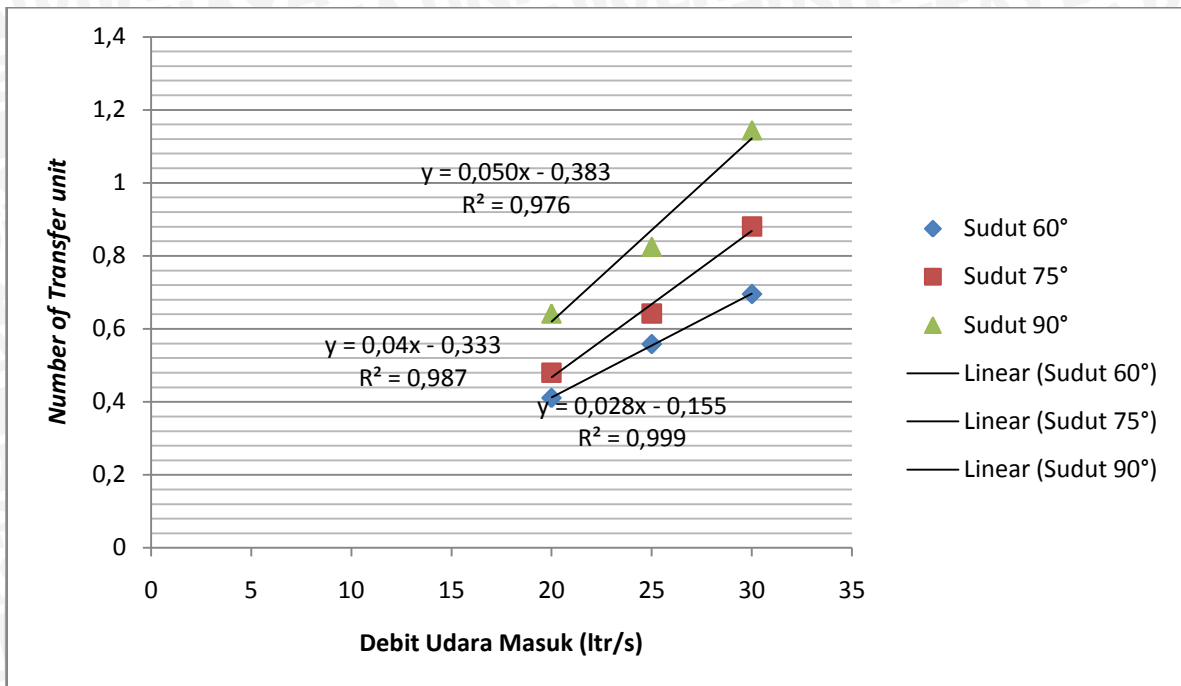
Pada gambar 4.2 di atas dapat dilihat bahwa pada variasi debit udara masuk *cooling tower* yang sama terdapat kecenderungan peningkatan laju perpindahan kalor *cooling tower* pada setiap variasi sudut *flat filler*, hal ini disebabkan penggunaan sudut *flat filler* dengan variasi yang berbeda akan membuat total luasan kontak antara air panas dan udara masuk *cooling tower* juga berbeda. Selain itu, semakin besar variasi sudut *filler*, maka luasan permukaan air yang terlebih dahulu tertahan oleh *filler* smakin besar sehingga membuat nilai laju perpindahan kalor semakin besar. Sehingga akan meningkatkan nilai dari *effectiveness*.

Peningkatan nilai *effectiveness* juga sebanding dengan kenaikan variasi debit udara masuk *cooling tower*. Pada gambar 4.2 di atas dapat dilihat bahwa pada variasi sudut *flat filler cooling tower* yang sama, semakin tinggi debit udara masuk *cooling tower* maka laju perpindahan kalor juga semakin tinggi. Hal ini terjadi karena semakin tinggi debit udara masuk *cooling tower*, maka perbandingan laju massa alir antara air dan udara yang masuk *cooling tower* semakin kecil, sehingga laju perpindahan kalor semakin besar, karena Semakin banyak udara yang tergantikan oleh udara yang baru maka semakin banyak pula kalor yang dilepas ke atmosfer (q_{out}). Sehingga semakin besar laju perpindahan kalor, maka nilai *effectiveness* juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan 2-9 yaitu :

$$\varepsilon = \frac{q_{out}}{q_{max}}$$

semakin besar kalor aktual yang dilepas *cooling tower* maka semakin meningkat pula *effectiveness cooling tower*.

4.2.3 Grafik Pengaruh Besar Sudut Pemasangan Flat Filler dan Debit Udara Masuk terhadap Number of Transfer Unit (NTU) Cooling Tower



Gambar 4.3 Grafik pengaruh variasi besar sudut pemasangan flat filler dan debit udara masuk terhadap number of transfer unit (NTU) cooling tower

Pada grafik 4.3 diatas menunjukkan hubungan variasi sudut flat filler 60°, 75° dan 90° terhadap number of transfer unit (NTU) cooling tower dengan variasi debit udara masuk. Grafik tersebut menunjukkan pada variasi sudut flat filler yang sama, maka nilai Number of Transfer Unit (NTU) cooling tower semakin besar seiring dengan bertambahnya debit udara masuk cooling tower. Nilai Number of Transfer Unit (NTU) terkecil terjadi pada debit udara masuk 20 liter/sec dan akan meningkat seiring dengan bertambahnya debit udara masuk hingga debit 30 liter/sec pada tiap variasi sudut flat filler yang sama. Pada variasi sudut flat filler 60° nilai Number of Transfer Unit (NTU) pada debit udara masuk 20 liter/sec yaitu 0,410916392 dan meningkat hingga 0,695104322 pada debit udara masuk 30 liter/sec. Hal ini terjadi karena semakin tinggi debit udara masuk cooling tower, maka perbandingan laju massa alir antara air dan udara yang masuk cooling tower semakin kecil, sehingga laju perpindahan kalor semakin besar, karena Semakin banyak udara yang

tergantikan oleh udara yang baru maka semakin banyak pula kalor yang dilepas ke atmosfer (q_{out}). Dengan meningkatnya nilai dari laju perpindahan kalor, maka akan meningkatkan nilai dari efektivitas, yang akan meningkatkan nilai dari *NTU* itu sendiri.

Dari gambar 4.3 dapat diketahui bahwa hubungan antara debit udara masuk dan sudut *flat filler* terhadap *Number of Transfer Unit (NTU)* yaitu semakin besar sudut *flat filler* pada debit udara yang tetap maka nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* juga semakin besar. Nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* terkecil terjadi pada debit udara masuk *cooling tower* 20 liter/sec dengan menggunakan sudut *flat filler* 60° yaitu 0,410916392. Sedangkan pada debit yang sama dengan variasi sudut *flat filler* 75° mengalami peningkatan nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* yaitu sebesar 0,480453936 dan 0,642485052 pada variasi sudut *flat filler* 90°. Nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* tertinggi terjadi pada debit udara masuk 30 liter/sec dengan variasi sudut *flat filler* 90° yaitu sebesar 1,144078034.

Kecenderungan peningkatan laju perpindahan kalor *cooling tower* pada setiap variasi sudut *flat filler* ini disebabkan penggunaan sudut *flat filler* dengan variasi yang berbeda akan membuat luasan kontak antara air panas dan udara masuk *cooling tower* juga berbeda. Selain itu, semakin besar variasi sudut *flat filler*, maka lama kontak antara air dengan udara semakin besar. Hal ini memungkinkan proses perpindahan kalor antara air panas dan udara masuk *cooling tower* yang lebih lama karena semakin banyak kalor yang dilepas oleh air panas, sehingga temperatur air keluar *cooling tower* semakin rendah. Oleh karena itu, semakin tinggi nilai dari laju perpindahan kalor, maka semakin tinggi pula nilai *effectiveness*. Pada *counterflow cooling tower* efektivitas memberikan pengaruh pada besaran nilai *NTU* yang mana sesuai persamaan 2-12 $NTU = -\frac{\ln\left(\frac{1-\epsilon}{1-\epsilon m^*}\right)}{1-m^*}$ sehingga semakin tinggi *effectiveness* maka nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* juga semakin tinggi.