

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Fabrikasi *Test Bed Dehumidifier*

Proses fabrikasi *test bed dehumidifier desiccant* padat berbasis *silica gel white* dilakukan melalui beberapa tahapan utama, meliputi perancangan konstruksi rangka, pembuatan saluran udara (*ducting*), perakitan *bed desiccant*, instalasi pemanas (*heater*), serta integrasi sistem instrumentasi pengukuran temperatur dan kelembapan relatif.

Test bed yang difabrikasi terdiri atas lima komponen utama: *desiccant compartment* yang dapat diisi ulang, saluran udara adsorpsi dan saluran udara regenerasi, *heater* dengan pengatur suhu (*thermostat*), *blower* sentrifugal untuk mengalirkan udara, serta sistem sensor dan akuisisi data berbasis *data logger* yang dapat diakses melalui website.



Gambar 4.1 Hasil fabrikasi *test bed dehumidifier*

Komponen-komponen yang digunakan pada sistem *dehumidifier desiccant* ditunjukkan pada Gambar 4.1. Untuk mendukung proses pengujian, setiap komponen memiliki spesifikasi tertentu yang dijelaskan melalui Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Komponen dan spesifikasi *test bed dehumidifier*

No	Komponen	Spesifikasi	
1	<i>Control Panel</i>	Ukuran	: 300 x 400 x 180 mm
2	Rangka	Material	: Pipa Hollow 30 x 30 mm
		Ukuran	: 1100 x 630 x 730 mm
3	<i>Blower Regenerasi</i>	Model	: BBLK-202
		Tegangan	: 220 V
		Amp	: 1.0 A
		Daya	: 150 W
		Frekuensi	: 50/60 Hz
		Kecepatan	: 2800/3400 rpm
4	<i>Ducting Regenerasi</i>	Material	: Stainless Steel 304
		Ukuran	: 450 x 270 x 170 mm
5	<i>Chamber Adsorpsi</i>	Material	: Stainless Steel 304
		Ukuran	: R150 mm x 170 mm
6	<i>Ducting Adsorpsi</i>	Material	: Stainless Steel 304
		Ukuran	: R150 mm x 190 mm
7	<i>Blower Adsorpsi</i>	Model	: BBLK-202
		Tegangan	: 220 V
		Amp	: 1.0 A
		Daya	: 150 W
		Frekuensi	: 50/60 Hz
		Kecepatan	: 2800/3400 rpm
8	<i>Chamber Regenerasi</i>	Material	: Stainless Steel 304
		Ukuran	: R135 x 305 x 80 mm
9	Motor Listrik	Daya	: 0.25 HP
		Tegangan	: 380 V
		Kecepatan	: 1500 rpm
INSTRUMENTASI			
a	<i>Thermocouple</i>	Probe Type K	
b	<i>Thermohygrometer</i>	HTC-2	
c	Sensor suhu dan RH	RS485 Modbus Probe	
d	Anemometer	Lutron AM-4201	

Lanjutan Tabel 4.1 Komponen dan spesifikasi <i>test bed dehumidifier</i>		
e	Inverter	CT 2000 ES
f	<i>Dimmer</i>	SYO-70066
g	<i>Heater</i>	<i>heater</i> tipe U 1500 W

4.2 Kondisi Udara Proses Adsorpsi dan Regenerasi

Kondisi udara pada jalur adsorpsi dan regenerasi digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem dehumidifier dalam proses penyerapan dan pelepasan uap air oleh material *desiccant*. Pengukuran dilakukan pada titik *inlet* dan *outlet bed desiccant* pada enam variasi setpoint suhu *heater* regenerasi, yakni 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C. Kecepatan aliran udara dijaga konstan sebesar 8.56 m/s pada sisi adsorpsi dan 9.6 m/s pada sisi regenerasi selama seluruh pengujian. Hasil pengambilan data pada proses adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3.

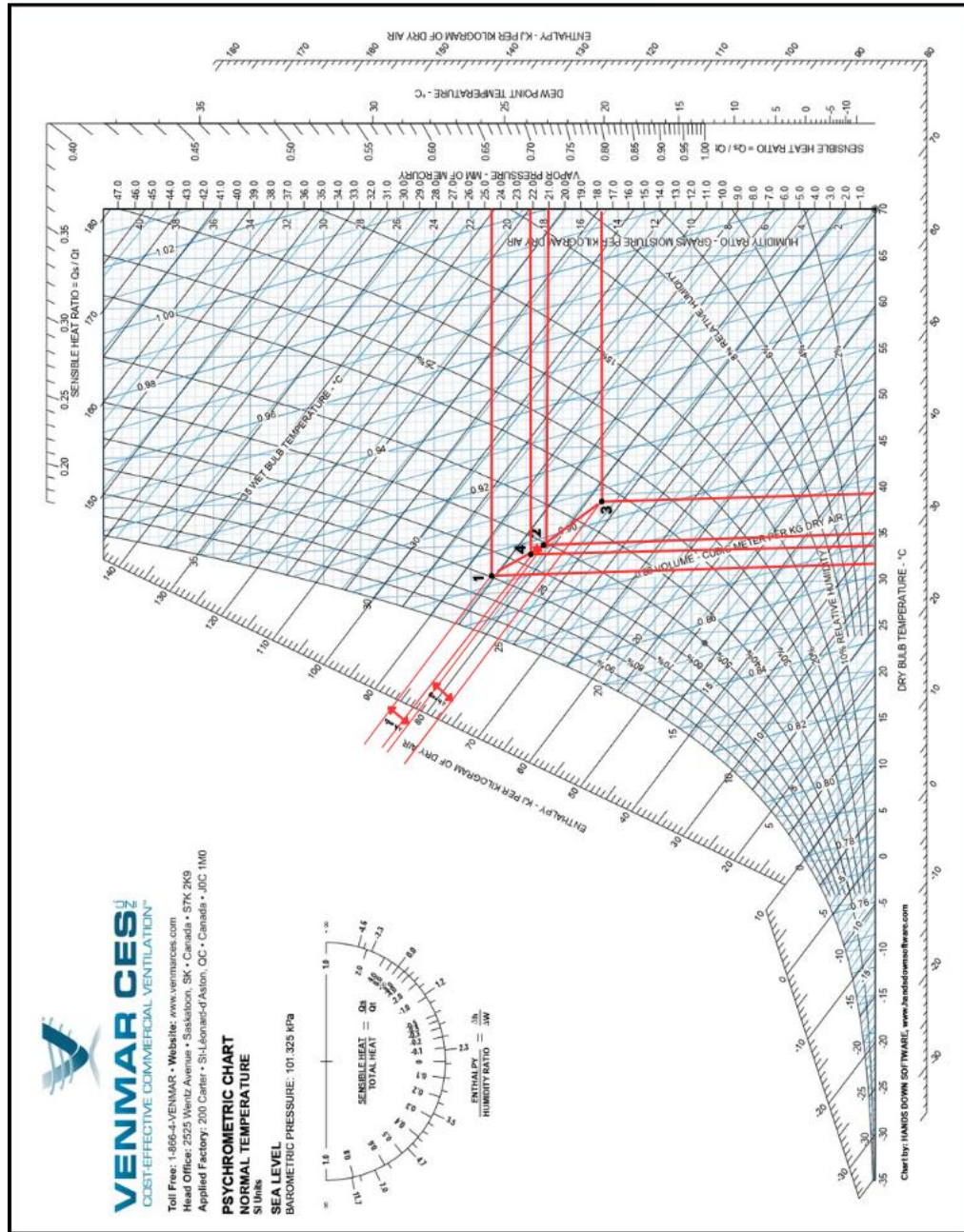
Tabel 4.2 Data kondisi udara adsorpsi

Menit ke-	T set <i>heater</i> (°C)	T in ads (°C)	RH in ads (°C)	W in ads (kg/kg)	T out ads (°C)	RH out ads (°C)	W out ads (kg/kg)
3	40	31.9	69.4	0.020918	35	50.1	0.017875
6	45	31.72	70.6	0.021068	37.2	45.9	0.018496
9	50	31.8	70.48	0.02113	38.4	44.2	0.019023
12	55	31.6	71	0.021043	40.36	40.58	0.019409
15	60	31.6	71	0.021043	42.3	37.24	0.019744
18	65	31.5	71.54	0.021085	44.58	33.86	0.020227

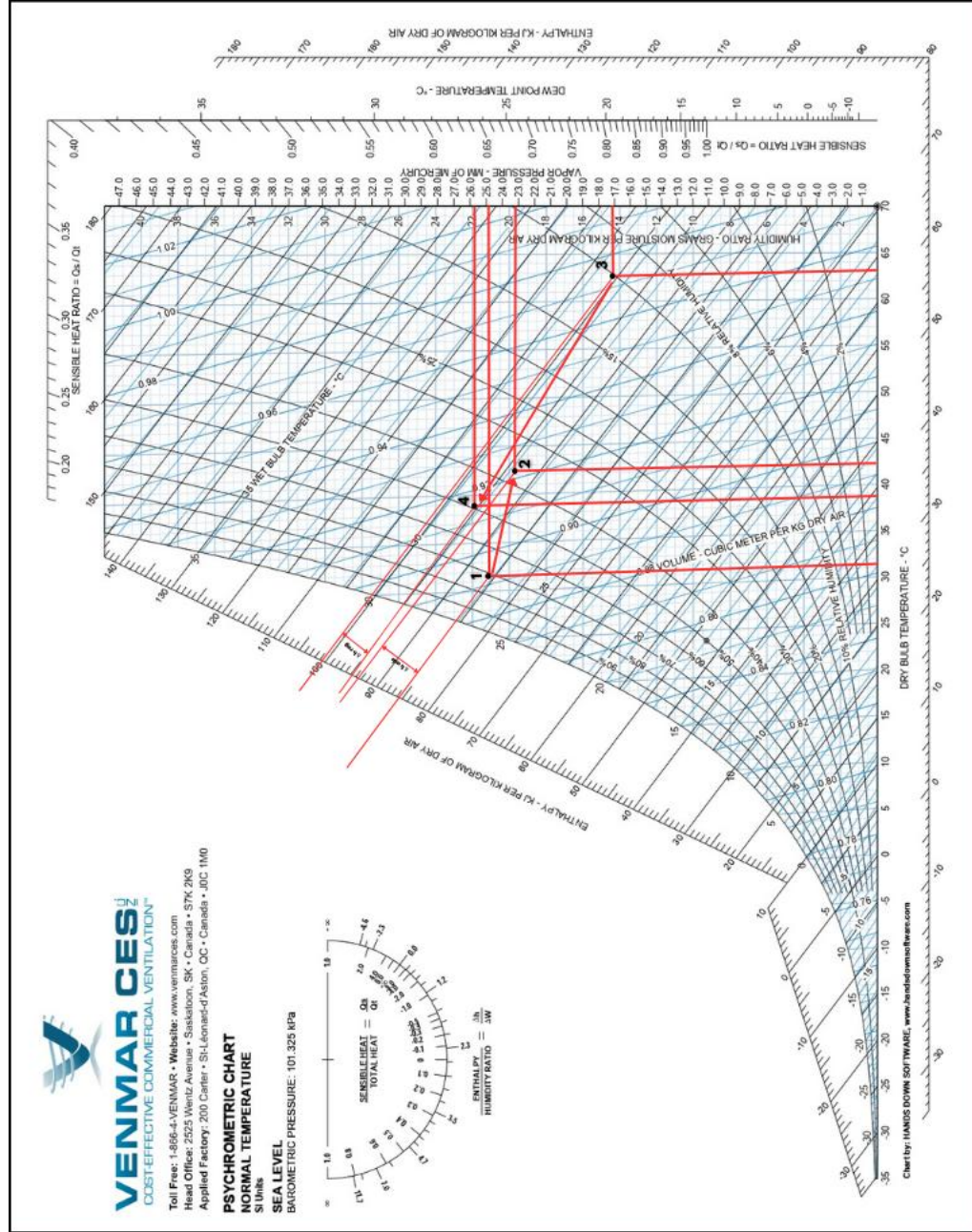
Tabel 4.3 Data kondisi udara regenerasi

Menit ke-	T set <i>heater</i> (°C)	T in reg (°C)	RH in reg (°C)	W in reg (kg/kg)	T out reg (°C)	RH out reg (°C)	W out reg (kg/kg)
3	40	39.3	33.2	0.0149	33.9	55.8	0.018755
6	45	45.04	24.8	0.015047	35.8	52.5	0.01963
9	50	50.4	19.1	0.01519	36.1	52.98	0.020155
12	55	55.3	14.82	0.014953	38.5	48.4	0.021008
15	60	62.9	10.04	0.014421	38.8	49.2	0.021727
18	65	68.6	7.5	0.013871	41.74	44.12	0.022822

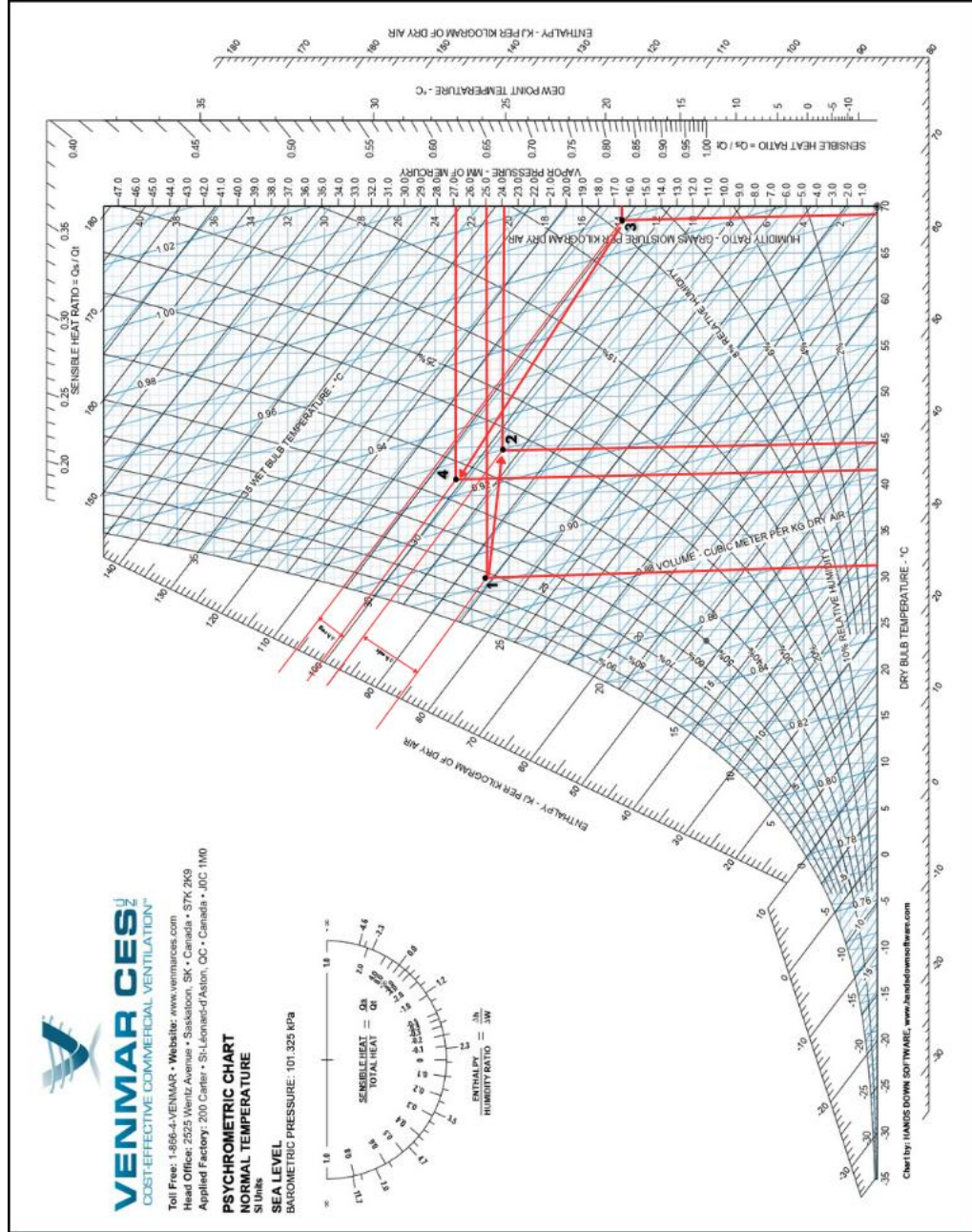
Berdasarkan data kondisi udara pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3, kondisi udara pada proses adsorpsi dan regenerasi selanjutnya divisualisasikan menggunakan diagram *psychrometric* yang disajikan pada Gambar 4.2, Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7. Diagram *psychrometric* tersebut menunjukkan perubahan kondisi udara dari sisi *inlet* ke *outlet bed desiccant* pada setiap variasi suhu regenerasi, sehingga proses penurunan dan pelepasan kandungan uap air dapat diamati dengan lebih jelas.



Gambar 4.2 Diagram psychrometric set suhu 40°C



Gambar 4.6 Diagram *psychrometric* set suhu 60°C



Gambar 4.7 Diagram psychrometric set suhu 65°C

4.3 Kalkulasi Hasil Data

Subbab ini menyajikan kalkulasi hasil data yang diperoleh berdasarkan proses pengujian yang telah dilakukan. Perhitungan tersebut digunakan untuk mengetahui hasil dari masing-masing pengujian serta menjadi dasar dalam melakukan analisis dan penarikan kesimpulan terhadap sistem yang di fabrikasi.

4.3.1 Penurunan Kelembapan Absolut

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.8, penurunan kelembapan absolut dihitung dengan menggunakan persamaan (2.43).



Gambar 4.8 Skema penurunan kelembapan absolut

$$\Delta\omega_{ads} = \omega_{ads,in} - \omega_{ads,out}$$

Sehingga, penurunan kelembapan absolut pada suhu regenerasi set poin 40°C

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{ads} &= 0,02092 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - 0,01788 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \\ &= 0,003043 \text{ kg/kg}\end{aligned}$$

Secara lengkap hasil perhitungan penurunan kelembapan absolut yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan penurunan kelembapan absolut

Treg in (°C)	$\omega_{ads,in}$ (kg/kg)	$\omega_{ads,out}$ (kg/kg)	$\Delta\omega_{ads}$ (kg/kg)
39,3	0.020918	0.017875	0,003043
45,04	0.021068	0.018496	0,002572
50,4	0.02113	0.019023	0,002107
55,3	0.021043	0.019409	0,001634
62,9	0.021043	0.019744	0,001299
68,6	0.021085	0.020227	0,000858

4.3.2 Moisture removal capacity

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.9, *moisture removal capacity* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.44).



Gambar 4.9 Skema MRC

$$MRC = \dot{m}_{ads} \times (\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out})$$

Sehingga, *moisture removal capacity* pada suhu regenerasi set poin 40°C adalah

$$\begin{aligned} MRC &= 0,275 \frac{kg}{s} \times (0,02092 - 0,01788) \frac{kg}{kg} \\ &= 0,000839 \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

Secara lengkap hasil perhitungan *moisture removal capacity* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil perhitungan *moisture removal capacity*

T _{reg in} (°C)	$\dot{m}_{ads}$ (kg/s)	$\omega_{ads,in}$ (kg/kg)	$\omega_{ads,out}$ (kg/kg)	MRC (kg/s)
39,3	0.275813	0.020918	0.017875	0,000839
45,04	0.275813	0.021068	0.018496	0,000709
50,4	0.275813	0.02113	0.019023	0,000581
55,3	0.276055	0.021043	0.019409	0,000451
62,9	0.276055	0.021043	0.019744	0,000359
68,6	0.276055	0.021085	0.020227	0,000237

4.3.3 *Moisture regeneration rate*

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.10, *moisture regeneration rate* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.45).



Gambar 4.10 Skema MRR

$$MRR = \dot{m}_{reg} \times (\omega_{reg,out} - \omega_{reg,in})$$

Sehingga, *moisture regeneration rate* pada suhu regenerasi set poin 40°C adalah

$$\begin{aligned} MRR &= 0,021719 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (0,018755 - 0,0149) \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \\ &= 0,00008373 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Secara lengkap hasil perhitungan *Moisture Regeneration Rate* (MRR) yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan *moisture regeneration rate*

Treg in (°C)	$\dot{m}_{reg}$ (kg/s)	$\omega_{reg,in}$ (kg/kg)	$\omega_{reg,out}$ (kg/kg)	MRR (kg/s)
39,3	0.021719	0.0149	0.018755	0,00008373
45,04	0.02664	0.015047	0.01963	0,00012209
50,4	0.026203	0.01519	0.020155	0,0001301
55,3	0.025816	0.014953	0.021008	0,000156313
62,9	0.025234	0.014421	0.021727	0,000184358
68,6	0.024822	0.013871	0.022822	0,00022218

4.3.4 Efektivitas dehumidifikasi

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.11, efektivitas dehumidifikasi dapat dihitung dengan persamaan (2.46).



Gambar 4.11 Skema efektivitas dehumidifikasi

$$\varepsilon_{deh} = \frac{\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out}}{\omega_{ads,in}} \times 100 \%$$

Sehingga, efektivitas dehumidifikasi pada suhu regenerasi set poin 40°C adalah

$$\begin{aligned}\varepsilon_{deh} &= \frac{0,020918 - 0,017875}{0,020918} \times 100 \% \\ &= 14,55 \%\end{aligned}$$

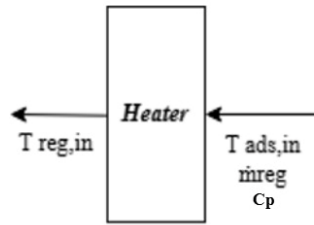
Secara lengkap hasil perhitungan efektivitas dehumidifikasi yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan efektivitas dehumidifikasi

T _{reg in} (°C)	ω _{ads,in} (kg/kg)	ω _{ads,out} (kg/kg)	ε _{deh} (%)
39,3	0.020918	0.017875	14,55
45,04	0.021068	0.018496	12,21
50,4	0.02113	0.019023	9,97
55,3	0.021043	0.019409	7,77
62,9	0.021043	0.019744	6,17
68,6	0.021085	0.020227	4,07

4.3.5 Konsumsi daya *heater*

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.12, konsumsi daya *heater* dapat dihitung dengan persamaan (2.47)

**Gambar 4.12** Skema konsumsi daya *heater*

$$W_{heater} = \dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater}$$

Sehingga, konsumsi daya *heater* pada suhu regenerasi set poin 40°C adalah

$$\begin{aligned}
 W_{heater} &= \dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater} \\
 &= 0,021719 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times (39,3 - 31,9)^\circ\text{C} \\
 &= 0,16152 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

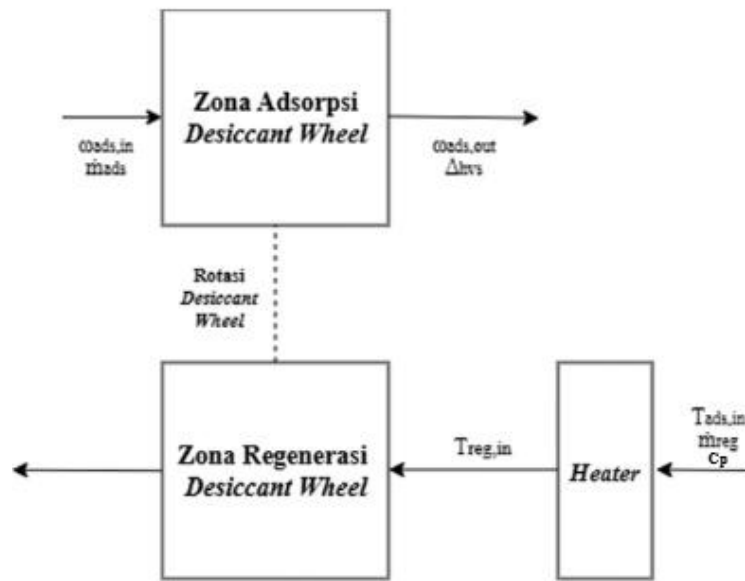
Secara lengkap hasil perhitungan konsumsi daya *heater* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil perhitungan konsumsi daya *heater*

T _{reg in} (°C)	m _{reg} (kg/s)	C _p ($\frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$)	ΔT_{heater} (°C)	W _{heater} (kW)
39,3	0.021719	1,005	7,4	0,16152
45,04	0.02664	1,005	13,32	0,28529
50,4	0.026203	1,005	18,6	0,39185
55,3	0.025816	1,005	23,7	0,49191
62,9	0.025234	1,005	31,3	0,63501
68,6	0.024822	1,005	37,1	0,74039

4.3.6 Dehumidification coefficient of performance

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.13, DCOP dapat dihitung dengan persamaan (2.48) dan (2.49).



Gambar 4.13 Skema DCOP

$$\text{DCOP} = \frac{\dot{m}_{\text{ads}} \times \Delta h_{vs} \times (\omega_{\text{ads},in} - \omega_{\text{ads},out})}{\dot{m}_{\text{reg}} \times C_p \times \Delta T_{\text{heater}}}$$

Dimana untuk mencari Δh_{vs} kita menggunakan rumus

$$\begin{aligned}\Delta h_{vs} &= (-0,614342 \times 10^{-4}) \times T_{ads\ in}^3 + \\ &0,0158927 \times 10^{-2} \times T_{ads\ in}^2 - \\ &0,236418 \times 10 \times T_{ads\ in} + 0,250079 \times 10^4\end{aligned}$$

Sehingga, Δh_{vs} dan DCOP pada suhu regenerasi set poin 40 °C adalah

$$\begin{aligned}\Delta h_{vs} &= (-0,614342 \times 10^{-4}) \times 31,9^3\text{°C} + \\ &0,0158927 \times 10^{-2} \times 31,9^2\text{°C} - \\ &0,236418 \times 10 \times 31,9\text{°C} + 0,250079 \times 10^4 \\ &= 2.423,540 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\end{aligned}$$

Jadi, DCOP untuk suhu regenerasi set poin 40°

$$\begin{aligned}\text{DCOP} &= \frac{0,275813 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2.423,540 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times (0,020918 - 0,017875) \frac{\text{kg}}{\text{kg}}}{0,021719 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (39,3 - 31,9)^\circ\text{C}} \\ &= 12,59\end{aligned}$$

Secara lengkap hasil perhitungan DCOP yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel

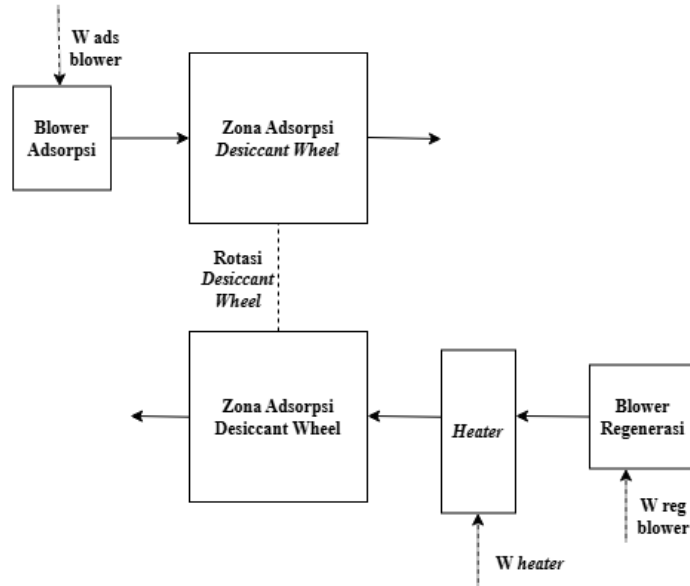
4.9.

Tabel 4.9 Hasil perhitungan DCOP

$T_{reg\ in}$ (°C)	$T_{ads\ in}$ (°C)	Δh_{vs}	$\dot{m}_{ads}$ (kg/s)	$\omega_{ads,in}$ (kg/kg)	$\omega_{ads,out}$ (kg/kg)	$\dot{m}_{reg}$ (kg/s)	Cp (KJ/kg°C)	ΔT_{heater} (°C)	DCOP
39,3	31,9	2423,54	0.275813	0.020918	0.017875	0.021719	1,005	7,4	12,59
45,04	31,72	2423,99	0.275813	0.021068	0.018496	0.02664	1,005	13,32	6,027
50,4	31,8	2423,79	0.275813	0.02113	0.019023	0.026203	1,005	18,6	3,594
55,3	31,6	2424,30	0,276055	0.021043	0.019409	0.025816	1,005	23,7	2,223
62,9	31,6	2424,30	0,276055	0.021043	0.019744	0.025234	1,005	31,3	1,369
68,6	31,5	2424,55	0,276055	0.021085	0.020227	0.024822	1,005	37,1	0,775

4.3.7 Specific energy consumption

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.14, *specific energy consumption* dapat dihitung dengan persamaan (2.50).



Gambar 4.14 Skema SEC

$$SEC = \frac{W_{heater} + W_{blower}}{MRC}$$

Sehingga, SEC pada suhu regenerasi set poin 40°C adalah

$$\begin{aligned} SEC &= \frac{(0,1615245 + 0,011544)kW}{0,000839 \frac{kg}{s}} \\ &= 206,20 \frac{kJ}{kg} \end{aligned}$$

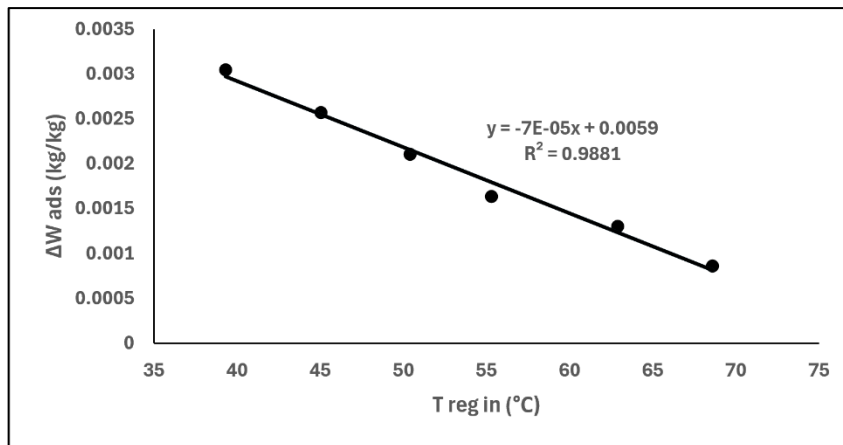
Secara lengkap hasil perhitungan SEC yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil perhitungan SEC

Treg in (°C)	W_{heater} (kW)	W_{blower} (kW)	MRC (kg/s)	SEC ($\frac{kJ}{kg}$)
39,3	0,16152	0.011544	0,000839	206,20
45,04	0,28529	0.011544	0,000709	481,43
50,4	0,39185	0.011544	0,000581	694,15
55,3	0,49191	0.011544	0,000451	1.116,12
62,9	0,63501	0.011544	0,000359	1.803,03
68,6	0,74039	0.011544	0,000237	3.174,67

4.4 Analisis Penurunan Kelembapan Absolut (ΔW_{ads})

Nilai ΔW_{ads} merupakan selisih *humidity ratio* udara masuk dan keluar sisi adsorpsi yang menunjukkan jumlah uap air yang diserap oleh desikan selama proses dehumidifikasi. Hubungan antara temperatur regenerasi (Treg) dan nilai ΔW_{ads} ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Hubungan temperatur regenerasi dengan penurunan kelembapan absolut

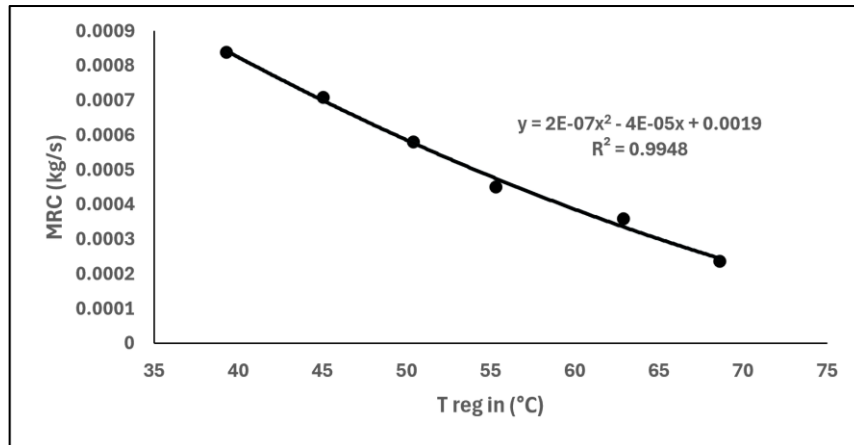
Berdasarkan Gambar 4.15, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur regenerasi, nilai ΔW_{ads} menurun dari 0,0030 kg/kg pada 39,3°C menjadi sekitar 0,00085 kg/kg pada 68,6°C. Hal ini menunjukkan bahwa selisih kelembapan absolut udara sebelum dan sesudah melewati *desiccant wheel* semakin kecil sehingga kemampuan adsorpsi

sistem cenderung menurun pada kondisi pengujian. Kondisi ini diduga disebabkan oleh temperatur regenerasi yang masih relatif rendah dibandingkan temperatur regenerasi optimum *silica gel*, sehingga proses desorpsi belum berlangsung secara sempurna. Akibatnya, sebagian uap air masih tertinggal di dalam material sehingga kapasitas adsorpsi pada proses berikutnya menurun.

Berbeda dengan hasil pengujian tersebut, Chaudhary et al. (2019) melaporkan bahwa peningkatan temperatur regenerasi mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi karena *silica gel* menjadi lebih kering setelah proses regenerasi. Perbedaan tren tersebut diduga disebabkan oleh fenomena *heat carryover* yang meningkatkan temperatur pada sisi adsorpsi sehingga kemampuan *silica gel* dalam menyerap uap air berkurang. Selain itu, rentang temperatur regenerasi yang digunakan pada pengujian ini kemungkinan belum cukup tinggi untuk meregenerasi *silica gel* secara optimal, sehingga kapasitas adsorpsinya tidak meningkat.

4.5 Moisture Removal Capacity (MRC)

Moisture removal capacity menunjukkan kemampuan desikan dalam menghilangkan uap air dari udara proses selama dehumidifikasi. Semakin besar nilai MRC, semakin baik kemampuan sistem dalam menurunkan kelembapan udara. Hubungan antara temperatur regenerasi (Treg) dan nilai MRC hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Hubungan temperatur regenerasi dengan *moisture removal capacity*

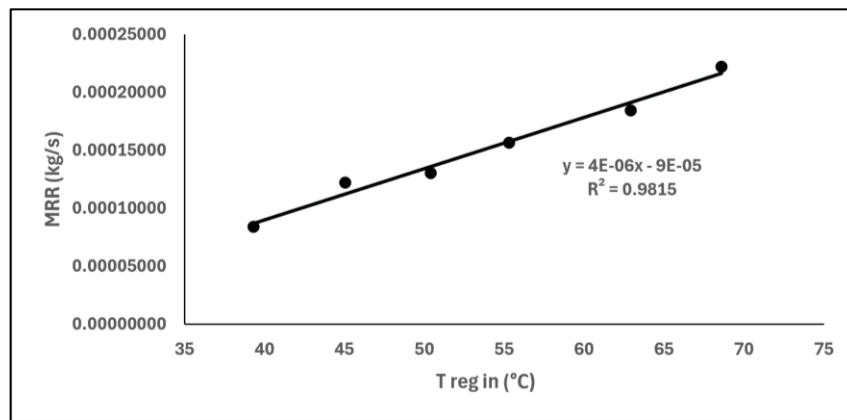
Berdasarkan Gambar 4.16, nilai MRC cenderung menurun seiring dengan meningkatnya temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 0,000839 kg/s pada 39,3°C menjadi sekitar 0,000237 kg/s pada 68,6°C. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan *silica gel* dalam menghilangkan uap air dari udara proses semakin berkurang pada rentang temperatur regenerasi yang diuji. Kondisi ini sejalan dengan penurunan ΔW_{ads} karena MRC secara langsung dipengaruhi oleh selisih *humidity ratio* pada sisi adsorpsi. Semakin kecil kemampuan *silica gel* menyerap uap air, maka semakin sedikit massa air yang dipindahkan dari udara.

Berbeda dengan hasil tersebut, penelitian Li & Tao (2023) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur regenerasi meningkatkan nilai MRC, karena proses regenerasi yang lebih efektif menghasilkan desikan yang lebih *kering* sehingga kapasitas penyerapan uap air pada siklus adsorpsi berikutnya menjadi lebih tinggi. Perbedaan tren ini diduga dipengaruhi oleh fenomena *heat carryover* yang meningkatkan temperatur pada sisi adsorpsi serta temperatur regenerasi pada pengujian ini yang belum cukup tinggi untuk meregenerasi *silica gel* secara optimal, sehingga

kemampuan desikan dalam menyerap uap air belum meningkat.

4.6 Moisture Regeneration Rate (MRR)

Moisture Regeneration Rate (MRR) menunjukkan kemampuan sistem dalam mengurangi kandungan uap air dari aliran udara selama proses dehumidifikasi. Semakin besar nilai MRR, semakin banyak uap air yang berhasil dipindahkan. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan nilai MRR hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.17.



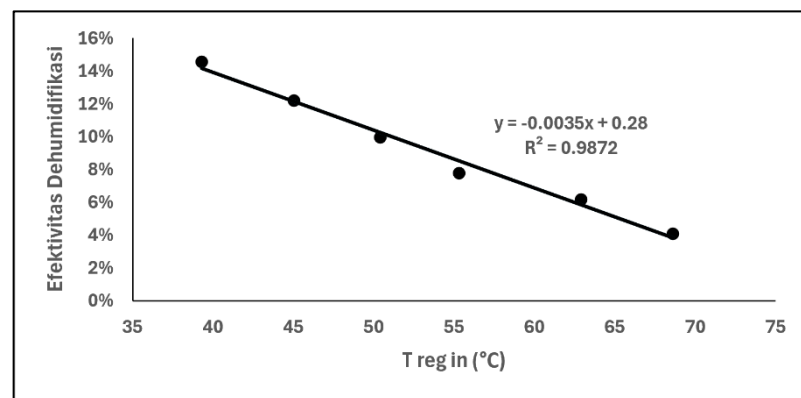
Gambar 4.17 Hubungan temperatur regenerasi dengan *moisture regeneration rate*

Berdasarkan Gambar 4.17, nilai MRR meningkat seiring dengan kenaikan temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar $8,3 \times 10^{-5}$ kg/s pada $39,3^{\circ}\text{C}$ menjadi sekitar $2,2 \times 10^{-4}$ kg/s pada $68,6^{\circ}\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur regenerasi, semakin besar jumlah uap air yang berhasil dilepaskan dari material desikan selama proses regenerasi. Peningkatan ini menunjukkan bahwa energi panas yang lebih besar mampu mempercepat pelepasan uap air dari permukaan *silica gel* menuju aliran udara regenerasi.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Mehare et al. (2025) yang juga menunjukkan bahwa peningkatan temperatur udara regenerasi meningkatkan *regeneration rate* karena energi panas yang lebih tinggi mempercepat pelepasan uap air yang tersimpan di dalam desikan. Namun demikian, peningkatan MRR pada pengujian ini belum diikuti peningkatan performa adsorpsi pada siklus berikutnya, sehingga menunjukkan bahwa laju regenerasi yang tinggi belum tentu menghasilkan kapasitas adsorpsi yang lebih baik.

4.7 Efektivitas Dehumidifikasi

Nilai efektivitas menunjukkan kemampuan sistem dalam mengurangi kandungan uap air pada udara proses. Semakin tinggi nilai efektivitas, semakin baik kinerja dehumidifikasi sistem. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan efektivitas dehumidifikasi ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Hubungan temperatur regenerasi dengan efektivitas dehumidifikasi

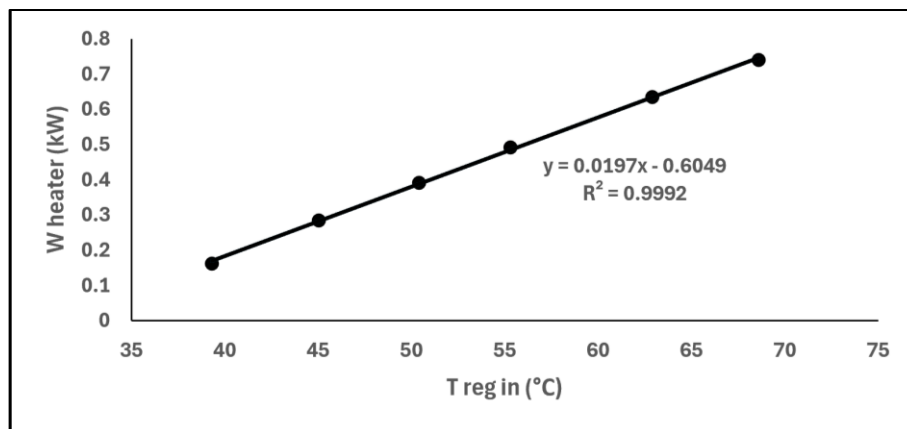
Berdasarkan Gambar 4.18, nilai efektivitas dehumidifikasi cenderung menurun seiring dengan meningkatnya temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 14,55% pada 39,3°C menjadi sekitar 4,07% pada 68,6°C. Hal ini menunjukkan bahwa

kemampuan sistem dalam mengurangi kandungan uap air pada udara proses semakin menurun pada rentang temperatur regenerasi yang diuji.

Berbeda dengan hasil tersebut, Chaudhary et al. (2019) melaporkan bahwa peningkatan temperatur regenerasi justru meningkatkan efektivitas dehumidifikasi karena proses regenerasi yang lebih baik menghasilkan desikan yang lebih *kering* sehingga kapasitas adsorpsinya meningkat. Perbedaan tren ini diduga disebabkan oleh fenomena *heat carryover* yang meningkatkan temperatur pada sisi adsorpsi serta temperatur regenerasi pada pengujian ini yang belum cukup tinggi untuk meregenerasi *silica gel* secara optimal, sehingga efektivitas dehumidifikasi tidak meningkat.

4.8 Konsumsi Daya *Heater*

Daya *heater* menunjukkan besarnya energi yang digunakan untuk memanaskan udara regenerasi selama proses regenerasi desikan. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan konsumsi daya *heater* ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hubungan temperatur regenerasi dengan konsumsi daya *heater*

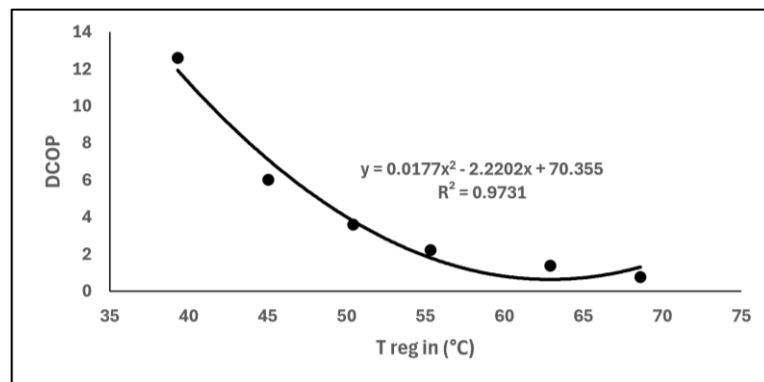
Berdasarkan Gambar 4.19, konsumsi daya *heater* (*Wheater*) meningkat seiring

dengan kenaikan temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 0,16 kW pada 39,3°C menjadi sekitar 0,74 kW pada 68,6°C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur regenerasi yang diinginkan, semakin besar energi yang dibutuhkan untuk memanaskan udara regenerasi.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Kosasih et al. (2022) yang menunjukkan bahwa konsumsi daya *heater* meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pemanas karena kebutuhan energi untuk mencapai temperatur regenerasi yang lebih tinggi juga semakin besar. Dengan demikian, peningkatan temperatur regenerasi berpengaruh langsung terhadap kenaikan konsumsi daya *heater* pada sistem dehumidifikasi.

4.9 Dehumidification Coefficient of Performance (DCOP)

Dehumidification coefficient of performance (DCOP) menunjukkan perbandingan antara energi yang dimanfaatkan untuk proses penghilangan kelembapan dengan energi yang dibutuhkan selama proses regenerasi. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan nilai DCOP ditunjukkan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Hubungan temperatur regenerasi dengan DCOP

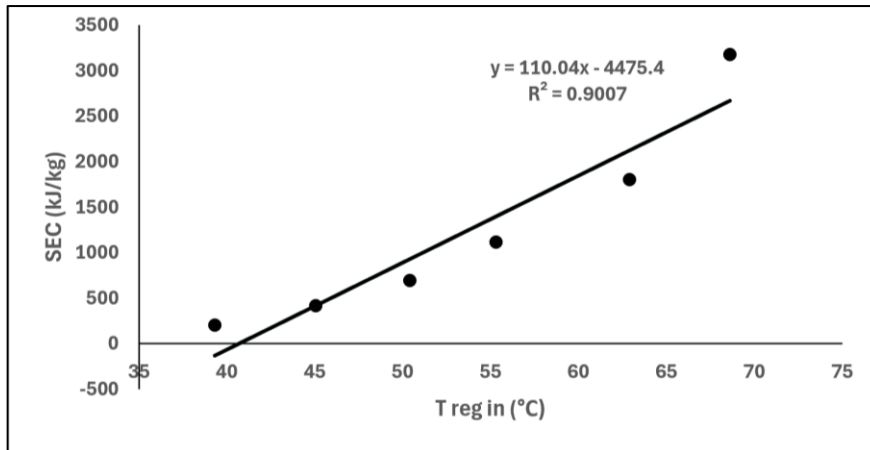
Berdasarkan Gambar 4.20, nilai DCOP cenderung menurun seiring dengan

meningkatnya temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 12,59 pada 39,3°C menjadi sekitar 0,77 pada 68,6°C. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja pemanfaatan energi untuk menghasilkan efek dehumidifikasi semakin menurun pada temperatur regenerasi yang lebih tinggi.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Li & Tao (2023) yang menunjukkan bahwa nilai DCOP cenderung menurun ketika temperatur regenerasi meningkat akibat kebutuhan energi regenerasi yang semakin besar. Nilai DCOP menurun seiring meningkatnya temperatur regenerasi karena peningkatan energi yang digunakan tidak diimbangi dengan peningkatan kemampuan sistem dalam menghilangkan uap air. Dengan kata lain, energi tambahan yang diberikan lebih banyak digunakan untuk meningkatkan temperatur udara regenerasi dibandingkan menghasilkan peningkatan kapasitas dehumidifikasi. Hasil ini mengindikasikan bahwa temperatur regenerasi 40°C memberikan keseimbangan terbaik antara energi yang digunakan dan performa dehumidifikasi

4.10 *Specific Energy Consumption*

Specific Energy Consumption (SEC) menunjukkan energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan satu satuan massa air pada proses dehumidifikasi. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan nilai SEC ditunjukkan pada Gambar 4.21.



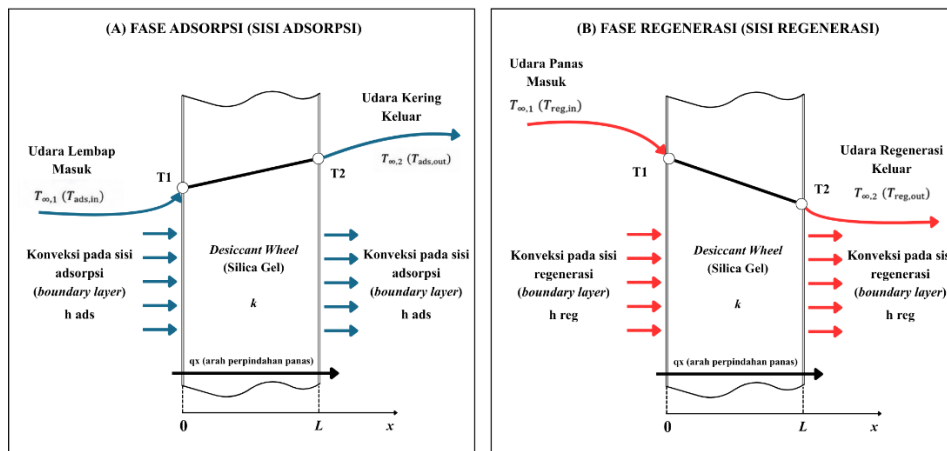
Gambar 4.21 Hubungan temperatur regenerasi dengan *specific energy consumption*

Berdasarkan Gambar 4.21, nilai SEC cenderung meningkat seiring dengan kenaikan temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 206 kJ/kg pada 39,3°C menjadi sekitar 3.174 kJ/kg pada 68,6°C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur regenerasi, semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan setiap satu kilogram uap air sehingga kinerja energi sistem cenderung menurun.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Kosasih et al. (2022) yang menunjukkan bahwa nilai SEC meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pemanas (*heater temperature*) karena kebutuhan energi untuk proses regenerasi semakin besar. Dengan demikian, meskipun temperatur regenerasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan proses regenerasi desikan, konsumsi energi yang dibutuhkan juga semakin besar sehingga nilai SEC meningkat.

4.11 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*) pada *Rotary Wheel*

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses perpindahan energi termal dari suatu benda atau sistem yang memiliki temperatur lebih tinggi ke benda atau sistem lain yang memiliki temperatur lebih rendah akibat adanya perbedaan temperatur. Secara umum, perpindahan panas dapat terjadi melalui tiga mekanisme, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.



Gambar 4.22 Skema perpindahan panas pada *rotary wheel*

Berdasarkan mekanisme perpindahan panas yang ditunjukkan pada Gambar 4.22, analisis kebutuhan kalor pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data temperatur udara masuk dan keluar.

a. *Heat transfer* konveksi adsorpsi di *rotary wheel*

Hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.52) sampai (2.58)

$$Q_{conv,ads} = h_{ads} \times A_v \times (T_{ads out} - T_{ads in})$$

Diketahui :

$$\dot{V}_{duct,ads} : 0,24131 \frac{m^3}{s}$$

d_{wheel}	: 0,3 m	
$d_{\text{lubang honeycomb}}$	: 0,002 m	
$T_{\text{in,ads}}$	: 31,9 °C	: 305,05 K
$T_{\text{out,ads}}$	: 35 °C	: 308,15 K
μ_{ads}	: $1,9 \times 10^{-5}$ Pa s	
ρ_{ads}	: 1,143 kg/m ³	
C_p	: $1005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	

Untuk mencari v_{wheel} menggunakan persamaan

$$v_{\text{wheel,ads}} = \frac{\dot{V}_{\text{duct,ads}}}{A_{\text{wheel,ads}}} = \frac{0,24131 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \pi \frac{(0,3 \text{ m})^2}{4}} = 6,827 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Untuk mencari k_{ads} , menggunakan tabel *thermal conductivity* yang ditunjukkan pada Gambar 4.23.

Air - Thermal Conductivity vs. Temperature at Atmospheric Pressure - SI Units			
Temperature	Thermal conductivity		
(°C)	(mW/m K)	(kcal(IT)/(h m K))	(Btu(IT)/(h ft °F))
-190	7.82	0.00672	0.00452
-150	11.69	0.01005	0.00675
-100	16.20	0.01393	0.00936
-75	18.34	0.01577	0.01060
-50	20.41	0.01755	0.01179
-25	22.41	0.01927	0.01295
-15	23.20	0.01995	0.01340
-10	23.59	0.02028	0.01363
-5	23.97	0.02061	0.01385
0	24.36	0.02094	0.01407
5	24.74	0.02127	0.01429
10	25.12	0.02160	0.01451
15	25.50	0.02192	0.01473
20	25.87	0.02225	0.01495
25	26.24	0.02257	0.01516
30	26.62	0.02289	0.01538
40	27.35	0.02352	0.01580
50	28.08	0.02415	0.01623
60	28.80	0.02477	0.01664
80	30.23	0.02599	0.01746
100	31.62	0.02719	0.01827
125	33.33	0.02866	0.01926
150	35.00	0.03010	0.02022
175	36.64	0.03151	0.02117
200	38.25	0.03289	0.02210
225	39.83	0.03425	0.02301
300	44.41	0.03819	0.02566
412	50.92	0.04378	0.02942
500	55.79	0.04797	0.03224
600	61.14	0.05257	0.03533
700	66.32	0.05702	0.03832
800	71.35	0.06135	0.04122
900	76.26	0.06557	0.04406
1000	81.08	0.06971	0.04685
1100	85.83	0.07380	0.04959

Gambar 4.23 Tabel *thermal conductivity* adsorpsi

$$T_f = \frac{T_{in_{ads}} + T_{out_{ads}}}{2} = \left(\frac{31,9 + 35}{2} \right) ^\circ C = 33,45 ^\circ C$$

Diketahui

$$k_{ads} @ 30^\circ C = 0,02662 \frac{W}{m K}$$

$$k_{ads} @ 40^\circ C = 0,02735 \frac{W}{m K}$$

Untuk mencari $k_{ads} @ 33,45^\circ C$, maka harus di interpolasi

$$k_{ads} @ 33,45 ^\circ C = 0,02662 + \left(\frac{(33,45 - 30)^\circ C}{(40 - 30)^\circ C} \right) \times (0,02735 - 0,02662) \frac{W}{m K}$$

$$= 0,02687 \frac{W}{m K}$$

Untuk mencari Pr, menggunakan persamaan

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{\mu_{ads} \times Cp}{k_{ads}} \\ &= \frac{1,9 \times 10^{-5} Pa s \times 1005 \frac{J}{kg K}}{0,02687 \frac{W}{m K}} \\ &= 0,71064 \frac{W}{m K} \end{aligned}$$

Untuk mencari nilai Re, menggunakan persamaan⁵⁹.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho_{ads} \times v_{wheel} \times Dh_{honeycomb}}{\mu_{ads}} \\ &= \frac{1,143 \frac{kg}{m^3} \times 6,827 \frac{m}{s} \times 0,002 m}{1,9 \times 10^{-5} Pa s} \\ &= 821,395 \end{aligned}$$

Karena $Re < 2.300$, maka aliran nya adalah aliran laminar. Untuk mencari Nu, menggunakan persamaan

$$Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} = 0,664 \times 821,395^{0,5} \times 0,71064^{0,33} = 17,00$$

Untuk mencari h_{ads} , menggunakan rumus

$$h_{ads} = \frac{Nu \times k_{ads}}{Dh_{honeycomb}} = \frac{17 \times 0,02687 \frac{W}{m K}}{0,002 m} = 228,395 \frac{W}{m^2 K}$$

Untuk luas perpindahan kalor adsorpsi

$$\begin{aligned} A_{ads,v} &= \frac{1}{2} \pi \times d_{lubang honeycomb} \times b \times N_{lubang honeycomb} \\ &= \frac{1}{2} \pi \times 0,002 m \times 0,13 m \times 2.116 = 0,863 m^2 \end{aligned}$$

Sehingga, *heat transfer* adsorpsi pada *rotary wheel* pada suhu regenerasi set poin 40°C

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{conv,ads}} &= h_{\text{ads}} \times A_v \times (T_{\text{out,ads}} - T_{\text{in,ads}}) \\
 &= 228,395 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \times 0,863 \text{ m}^2 \times (308,15 - 305,05)\text{K} \\
 &= 611,025 \text{ Watt} \\
 &= 611,025 \frac{\text{J}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Secara lengkap hasil perhitungan *heat transfer* adsorpsi di *rotary wheel* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil perhitungan *heat transfer* konveksi adsorpsi di *rotary wheel*

Menit ke-	T set heater (°C)	T in ads (°C)	T out ads (°C)	k ads ($\frac{\text{W}}{\text{m K}}$)	Pr	Nu	h ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$)	$Q_{\text{conv,ads}}$ ($\frac{\text{J}}{\text{s}}$)
3	40	31,9	35	0,02687	0,7106	17	228,395	611,025
6	45	31,72	37,2	0,02694	0,7087	16,98	228,720	1081,67
9	50	31,8	38,4	0,02699	0,7074	16,97	229,010	1304,39
12	55	31,6	40,36	0,02705	0,7059	16,97	229,519	1735,13
15	60	31,6	42,3	0,02712	0,7040	16,95	229,842	2122,38
18	65	31,5	44,58	0,02720	0,7020	16,94	230,384	2600,58

b. *Heat transfer* konveksi regenerasi di *rotary wheel*

Hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.59) sampai (2.65)

$$Q_{\text{conv,reg}} = h_{\text{reg}} \times A_v \times (T_{\text{reg in}} - T_{\text{reg out}})$$

Diketahui :

$$\dot{V}_{\text{duct,reg}} : 0,01939 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$d_{\text{wheel}} : 0,3 \text{ m}$$

$$d_{\text{lubang honeycomb}} : 0,002 \text{ m}$$

$$T_{\text{in,reg}} : 39,3 \text{ °C} : 312,45 \text{ K}$$

$$T_{out,reg} : 33,9 \text{ }^{\circ}\text{C} : 307,05 \text{ K}$$

$$\mu_{reg} : 2,075 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$$

$$\rho_{reg} : 1,120 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p : 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Untuk mencari v_{wheel} menggunakan persamaan

$$v_{wheel,reg} = \frac{\dot{V}_{duct,reg}}{A_{wheel,reg}} = \frac{0,01939 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \pi \frac{(0,3 \text{ m})^2}{4}} = 0,548 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Untuk mencari k_{reg} , menggunakan tabel *thermal conductivity* yang ditunjukkan pada Gambar 4.24.

Air - Thermal Conductivity vs. Temperature at Atmospheric Pressure - SI Units			
Temperature	Thermal conductivity		
(°C)	(mW/m K)	(kcal(IT)/(h m K))	(Btu(IT)/(h ft °F))
-190	7.82	0.00672	0.00452
-150	11.69	0.01005	0.00675
-100	16.20	0.01393	0.00936
-75	18.34	0.01577	0.01060
-50	20.41	0.01755	0.01179
-25	22.41	0.01927	0.01295
-15	23.20	0.01995	0.01340
-10	23.59	0.02028	0.01363
-5	23.97	0.02061	0.01385
0	24.36	0.02094	0.01407
5	24.74	0.02127	0.01429
10	25.12	0.02160	0.01451
15	25.50	0.02192	0.01473
20	25.87	0.02225	0.01495
25	26.24	0.02257	0.01516
30	26.62	0.02289	0.01538
40	27.35	0.02352	0.01580
50	28.08	0.02415	0.01623
60	28.80	0.02477	0.01664
80	30.23	0.02599	0.01746
100	31.62	0.02719	0.01827
125	33.33	0.02866	0.01926
150	35.00	0.03010	0.02022
175	36.64	0.03151	0.02117
200	38.25	0.03289	0.02210
225	39.83	0.03425	0.02301
300	44.41	0.03819	0.02566
412	50.92	0.04378	0.02942
500	55.79	0.04797	0.03224
600	61.14	0.05257	0.03533
700	66.32	0.05702	0.03832
800	71.35	0.06135	0.04122
900	76.26	0.06557	0.04406
1000	81.08	0.06971	0.04685
1100	85.83	0.07380	0.04959

Gambar 4.24 Tabel *thermal conductivity* regenerasi

$$T_f = \frac{T_{in_{reg}} + T_{out_{reg}}}{2} = \left(\frac{39,3 + 33,9}{2} \right) ^\circ C = 36,6 ^\circ C$$

Diketahui

$$k_{reg} @ 30^\circ C = 0,02662 \frac{W}{m K}$$

$$k_{reg} @ 40^\circ C = 0,02735 \frac{W}{m K}$$

Untuk mencari $k_{reg} @ 36,6^\circ C$, maka harus di interpolasi

$$k_{\text{reg}} @ 36,6 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,02662 + \left(\frac{(36,6 - 30)^{\circ}\text{C}}{(40 - 30)^{\circ}\text{C}} \right) \times (0,02735 - 0,02662) \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$= 0,02710 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

Untuk mencari Pr, menggunakan persamaan

$$\text{Pr} = \frac{\mu_{\text{reg}} \times \text{Cp}}{k_{\text{reg}}}$$

$$= \frac{2,075 \times 10^{-5} \text{ Pa s} \times 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,02710 \frac{\text{W}}{\text{m K}}}$$

$$= 0,7695 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

Untuk mencari nilai Re, menggunakan persamaan

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{reg}} \times v_{\text{wheel}} \times D_{\text{honeycomb}}}{\mu_{\text{reg}}}$$

$$= \frac{1,120 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,548 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,002 \text{ m}}{2,075 \times 10^{-5} \text{ Pa s}}$$

$$= 59,157$$

Karena $\text{Re} < 2.300$, maka aliran nya adalah aliran laminar. Untuk mencari Nu, menggunakan persamaan

$$\text{Nu} = 0,664 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33} = 0,664 \times 59,157^{0,5} \times 0,7695^{0,33} = 4,684$$

Untuk mencari h_{reg} , menggunakan rumus

$$h_{\text{reg}} = \frac{\text{Nu} \times k_{\text{reg}}}{D_{\text{honeycomb}}} = \frac{4,684 \times 0,02710 \frac{\text{W}}{\text{m K}}}{0,002 \text{ m}} = 63,468 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Untuk luas perpindahan kalor adsorpsi

$$A_{\text{reg,v}} = \frac{1}{2} \pi \times d_{\text{lubang honeycomb}} \times b \times N_{\text{lubang honeycomb}}$$

$$= \frac{1}{2} \pi \times 0,002 \text{ m} \times 0,13 \text{ m} \times 2.116 = 0,863 \text{ m}^2$$

Sehingga, *heat transfer* regenerasi pada *rotary wheel* pada suhu regenerasi set poin 40°C

$$Q_{\text{conv,reg}} = h_{\text{reg}} \times A_v \times (T_{\text{in,reg}} - T_{\text{out,reg}})$$

$$= 63,468 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \times 0,863 \text{ m}^2 \times (312,45 - 307,05)\text{K}$$

$$= 295,773 \text{ Watt}$$

$$= 295,773 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Secara lengkap hasil perhitungan *heat transfer* regenerasi di *rotary wheel* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil perhitungan *heat transfer* konveksi regenerasi di *rotary wheel*

Menit ke-	T set heater (°C)	T in reg (°C)	T out reg (°C)	k reg ($\frac{\text{W}}{\text{m K}}$)	Pr	Re	Nu	h ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$)	$Q_{\text{conv,reg}}$ ($\frac{\text{J}}{\text{s}}$)
3	40	39,3	33,9	0,02710	0,7695	59,157	4,684	63,468	295,773
6	45	45,04	35,8	0,02738	0,7616	58,048	4,624	63,302	504,777
9	50	50,4	36,1	0,02758	0,7561	57,097	4,575	63,089	778,575
12	55	55,3	38,5	0,02785	0,7487	56,252	4,526	63,024	913,747
15	60	62,9	38,8	0,02814	0,7410	54,984	4,459	62,738	1304,84
18	65	68,6	41,74	0,02845	0,7329	54,086	4,407	62,689	1453,14

c. *Heat transfer* konduksi adsorpsi di *rotary wheel*

Hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.66) sampai (2.67)

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{3,14}{4} (0,30^2 - 0,27^2) = 0,01342 \text{ m}^2$$

Sehingga, *heat transfer* konduksi adsorpsi di *rotary wheel* pada suhu regenerasi set poin 40°C

$$\begin{aligned} Q_{cond,ads} &= k \times \frac{A (T_{ads out} - T_{ads in})}{L} = 0,18 \times \frac{0,01343 \times (35 - 31,9)}{0,13} \\ &= 0,0576 \text{ W} \end{aligned}$$

Secara lengkap hasil perhitungan *heat transfer* konduksi sisi adsorpsi di *rotary wheel* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil perhitungan *heat transfer* konduksi adsorpsi di *rotary wheel*

Menit ke-	T set heater (°C)	T in ads (°C)	T out ads (°C)	$Q_{cond,ads}$ ($\frac{J}{s}$)
3	40	31,9	35	0,0576
6	45	31,72	37,2	0,1019
9	50	31,8	38,4	0,1227
12	55	31,6	40,36	0,1628
15	60	31,6	42,3	0,1989
18	65	31,5	44,58	0,2432

d. *Heat transfer* konduksi regenerasi di *rotary wheel*

Hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.68) sampai (2.69)

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{3,14}{4} (0,30^2 - 0,27^2) = 0,01342 \text{ m}^2$$

Sehingga, *heat transfer* konduksi regenerasi di *rotary wheel* pada suhu regenerasi set poin 40°C

$$Q_{cond,reg} = k \times \frac{A (T_{reg\ in} - T_{reg\ out})}{L} = 0,18 \times \frac{0,01343 \times (39,3 - 33,9)}{0,13}$$

$$= 0,1004\ W$$

Secara lengkap hasil perhitungan *heat transfer* konduksi sisi regenerasi di *rotary wheel* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Hasil perhitungan *heat transfer* konduksi regenerasi di *rotary wheel*

Menit ke-	T set heater (°C)	T in reg (°C)	T out reg (°C)	Q _{cond,reg} ($\frac{J}{s}$)
3	40	39,3	33,9	0,1004
6	45	45,04	35,8	0,1718
9	50	50,4	36,1	0,2659
12	55	55,3	38,5	0,3124
15	60	62,9	38,8	0,4481
18	65	68,6	41,74	0,4994