

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Fabrikasi *Test Bed Dehumidifier*

Proses fabrikasi *test bed dehumidifier desiccant* padat berbasis *silica gel* biru 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, pemanas listrik (*electric 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	Control Panel	Ukuran	: 300 x 400 x 180 mm
2	Rangka	Material	: Pipa Hollow 30 x 30 mm
		Ukuran	: 1100 x 630 x 730 mm
		Model	: BBLK - 202
		Tegangan	: 220 V
3	Blower Regenerasi	Amp	: 1.0 A
		Daya	: 150 W
		Frekuensi	: 50/60 Hz
		Kecepatan	: 2800/3400 rpm
4	Ducting Regenerasi	Material	: Stainless Steel 304
		Ukuran	: 450 x 270 x 170 mm
5	Chamber Adsorpsi	Material	: Stainless Steel 304
		Ukuran	: R150 mm x 170 mm
6	Ducting Adsorpsi	Material	: Stainless Steel 304
		Ukuran	: R150 mm x 190 mm
		Model	: BBLK - 202
		Tegangan	: 220 V
7	Blower Adsorpsi	Amp	: 1.0 A
		Daya	: 150 W
		Frekuensi	: 50/60 Hz
		Kecepatan	: 2800/3400 rpm
8	Chamber Regenerasi	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	

Lanjutan Tabel 4.1 Komponen dan spesifikasi test bed dehumidifier		
C	Sensor suhu dan RH	RS485 Modbus Probe
D	Anemometer	Lutron AM-4201
E	<i>Inverter</i>	CT 2000 ES
F	<i>Dimmer</i>	SYO - 70066
G	<i>Heater</i>	<i>Electric heater tipe U 1500 W</i>

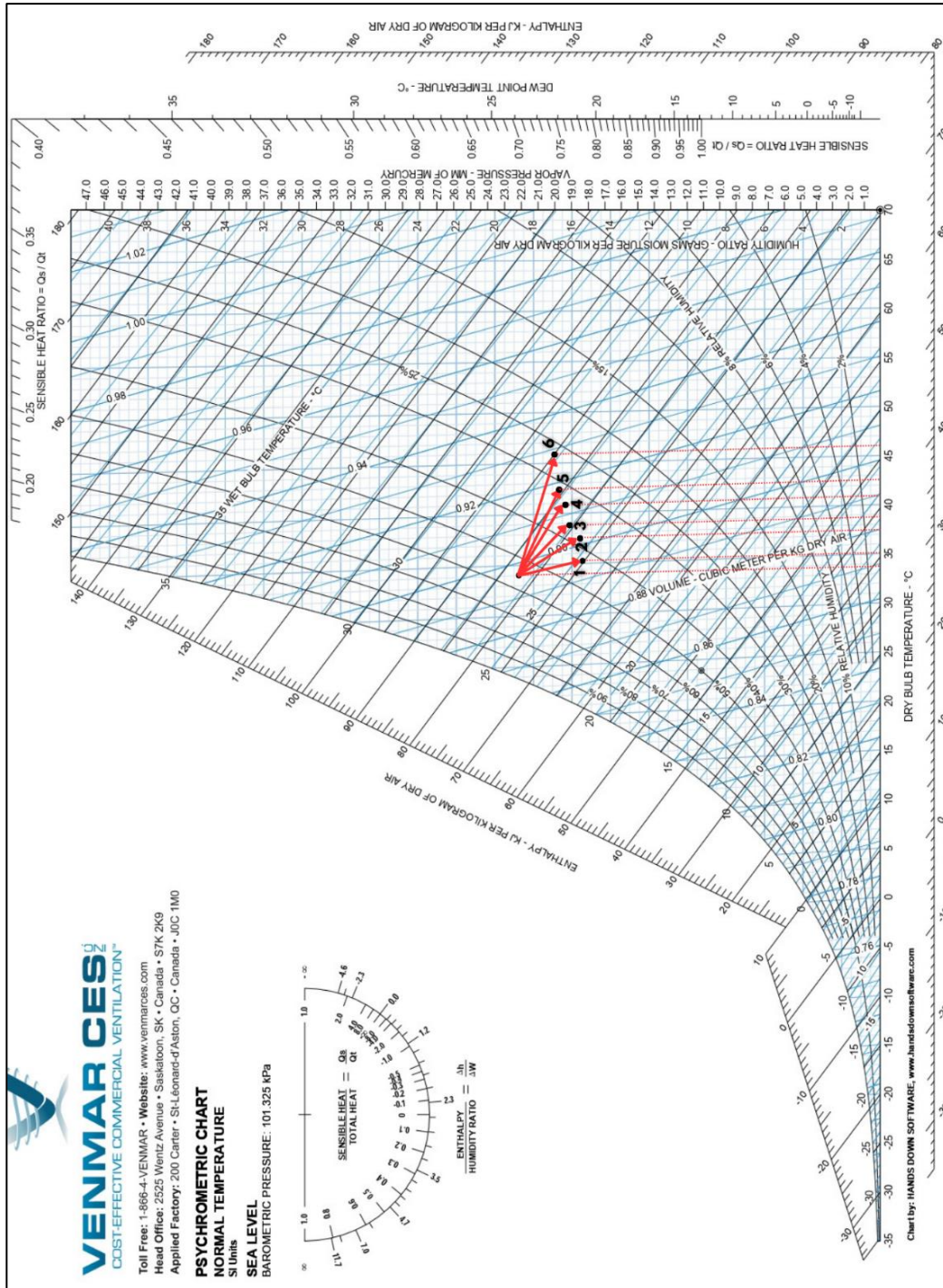
4.2 Kondisi Udara Adsorpsi (*Humidity Ratio / W*)

Kondisi udara pada jalur adsorpsi merupakan parameter kunci yang menggambarkan kemampuan sistem dehumidifier dalam menurunkan kandungan uap air udara proses. 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. Laju aliran udara dijaga konstan pada kecepatan 9,63 m/s selama seluruh pengujian. Hasil pengambilan data pada proses adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data kondisi udara adsorpsi

Menit ke-	T set heater (°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)
4	40	34	55,48	0,01875	35,1	42,9	0,01533
8	45	34,3	54,58	0,01876	37,7	38,14	0,01572
12	50	34,4	54,18	0,01872	38,9	36,3	0,01597
16	55	34,54	54,82	0,0191	41,5	33	0,01669
20	60	34,4	55	0,01902	42,8	30,66	0,0166
24	65	34,4	54,7	0,01891	45,8	27,08	0,01714

Berdasarkan grafik *psychrometric* pada Gambar 4.2, pada proses adsorpsi kondisi udara berubah dari inlet menuju outlet dengan kecenderungan temperatur meningkat dan rasio kelembapan menurun karena uap air diserap oleh adsorben.



Gambar 4.2 Diagram psychrometric proses adsorpsi

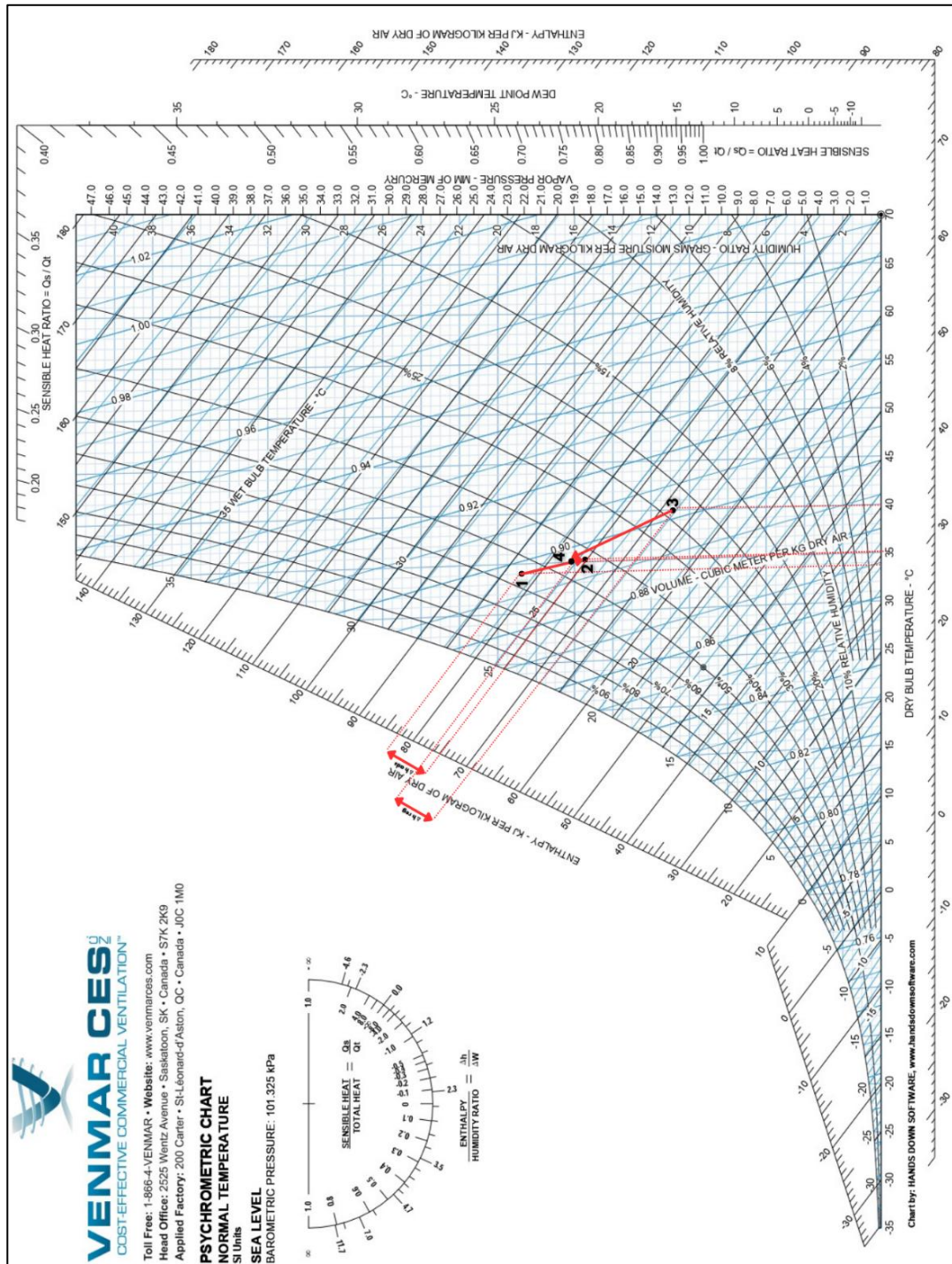
4.3 Kondisi Udara Regenerasi (*Humidity Ratio / W*)

Kondisi udara pada jalur regenerasi merupakan parameter penting yang menunjukkan kemampuan sistem dalam melepaskan uap air yang telah teradsorpsi oleh material desiccant sehingga kapasitas adsorpsinya dapat dipulihkan. Pengukuran dilakukan pada sisi inlet dan outlet bed desiccant dengan variasi suhu heater 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, dan 65°C, sementara kecepatan udara dijaga konstan sebesar 10,8 m/s. Perubahan kondisi udara pada sisi regenerasi digunakan sebagai indikator keberhasilan proses desorpsi dan pemulihan kapasitas adsorpsi silica gel. Hasil pengambilan data pada proses regenerasi dapat dilihat pada Tabel 4.3.

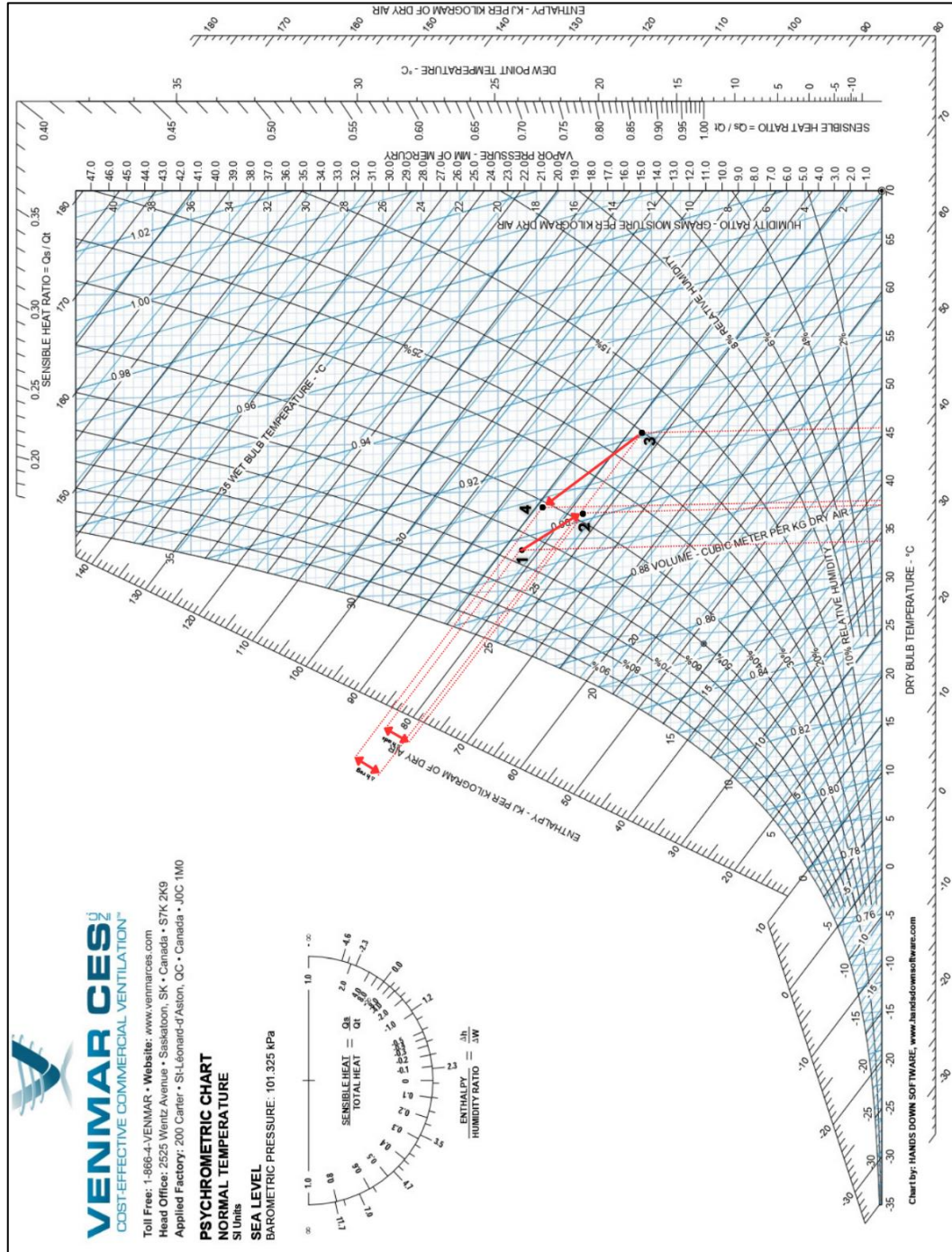
Tabel 4.3 Data kondisi udara regenerasi

Menit ke-	T set heater (°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)
4	40	40,08	26,84	0,01301	34,84	46,5	0,016407
8	45	45,52	20,26	0,01255	38,36	42,26	0,018123
12	50	50,46	15,62	0,012405	40,08	39,96	0,017361
16	55	56,6	11,38	0,012161	41,66	39,1	0,020054
20	60	62,7	8,38	0,01188	43,7	36,2	0,020676
24	65	70	5,68	0,011116	44,92	35,6	0,021691

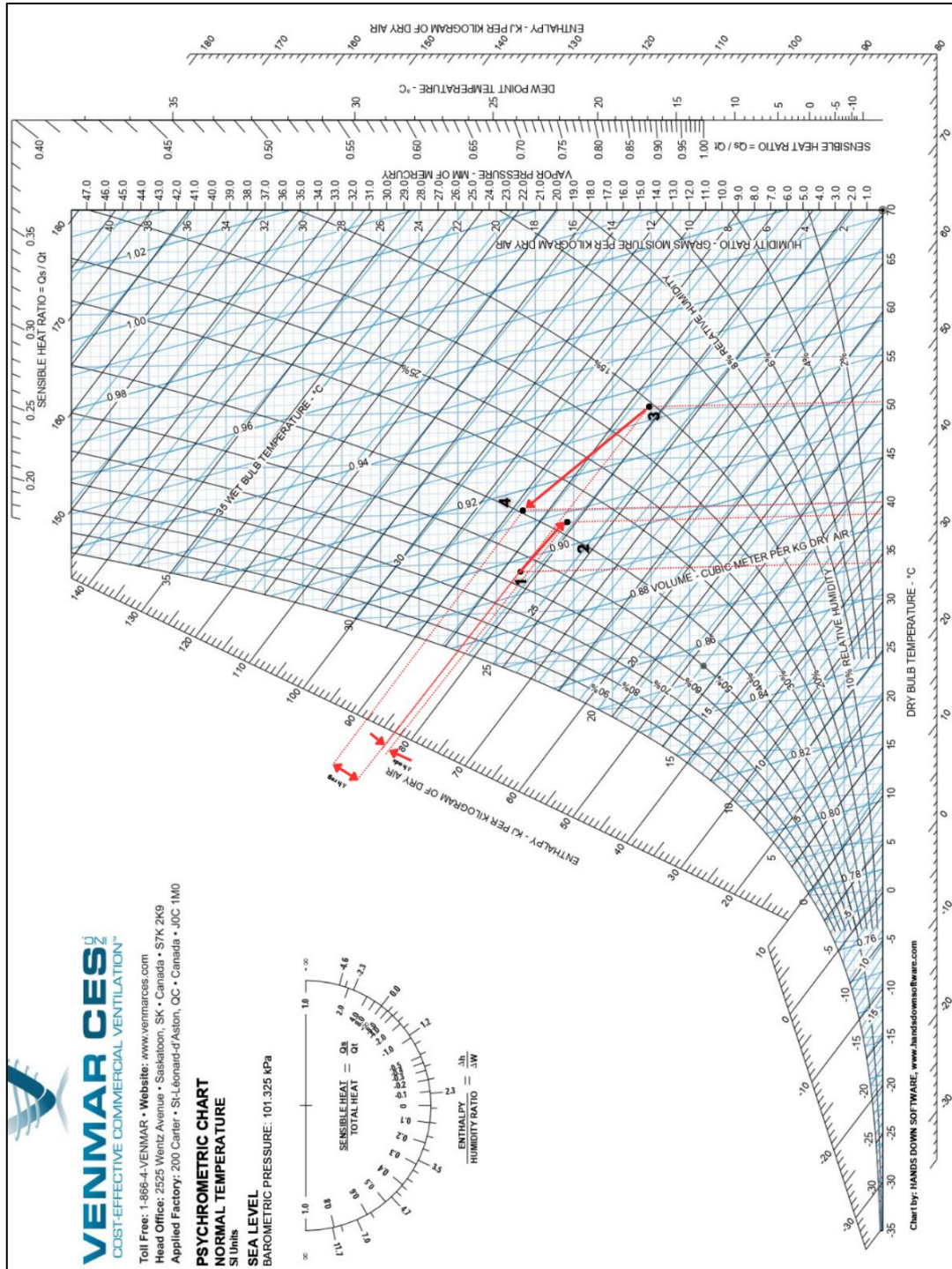
kondisi udara pada proses adsorpsi dan regenerasi selanjutnya divisualisasikan menggunakan diagram *psychrometric* yang disajikan pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5, Gambar 4.6, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8. Diagram *psychrometric* tersebut menunjukkan perubahan kondisi udara dari sisi *inlet* ke *outlet bed desiccant* pada setiap variasi suhu regenerasi, sehingga proses penurunan dan pelepasan kandungan uap air dapat diamati dengan lebih jelas.



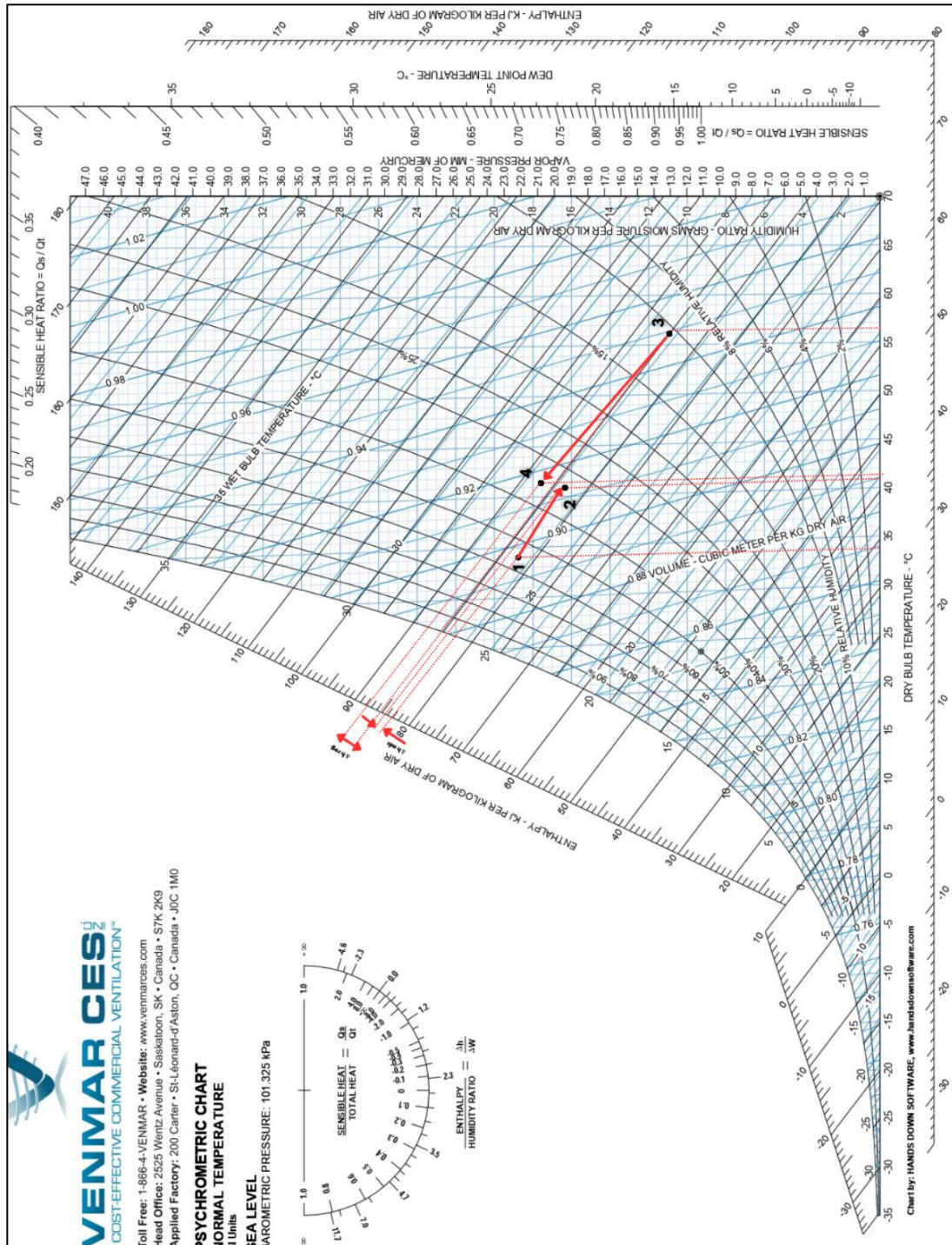
Gambar 4.3 Diagram *psychrometric* set suhu 40°



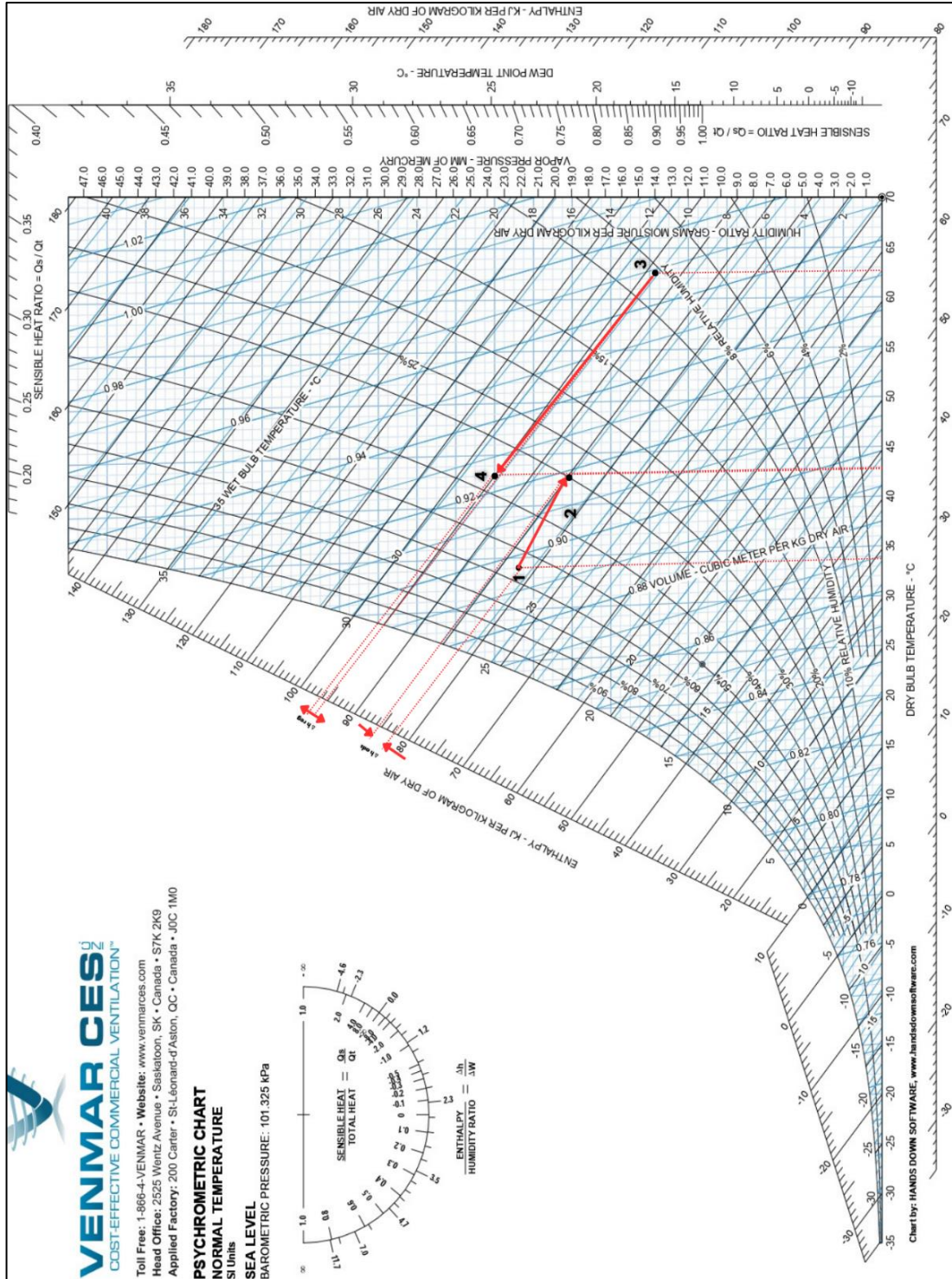
Gambar 4.4 Diagram psychrometric set suhu 45°



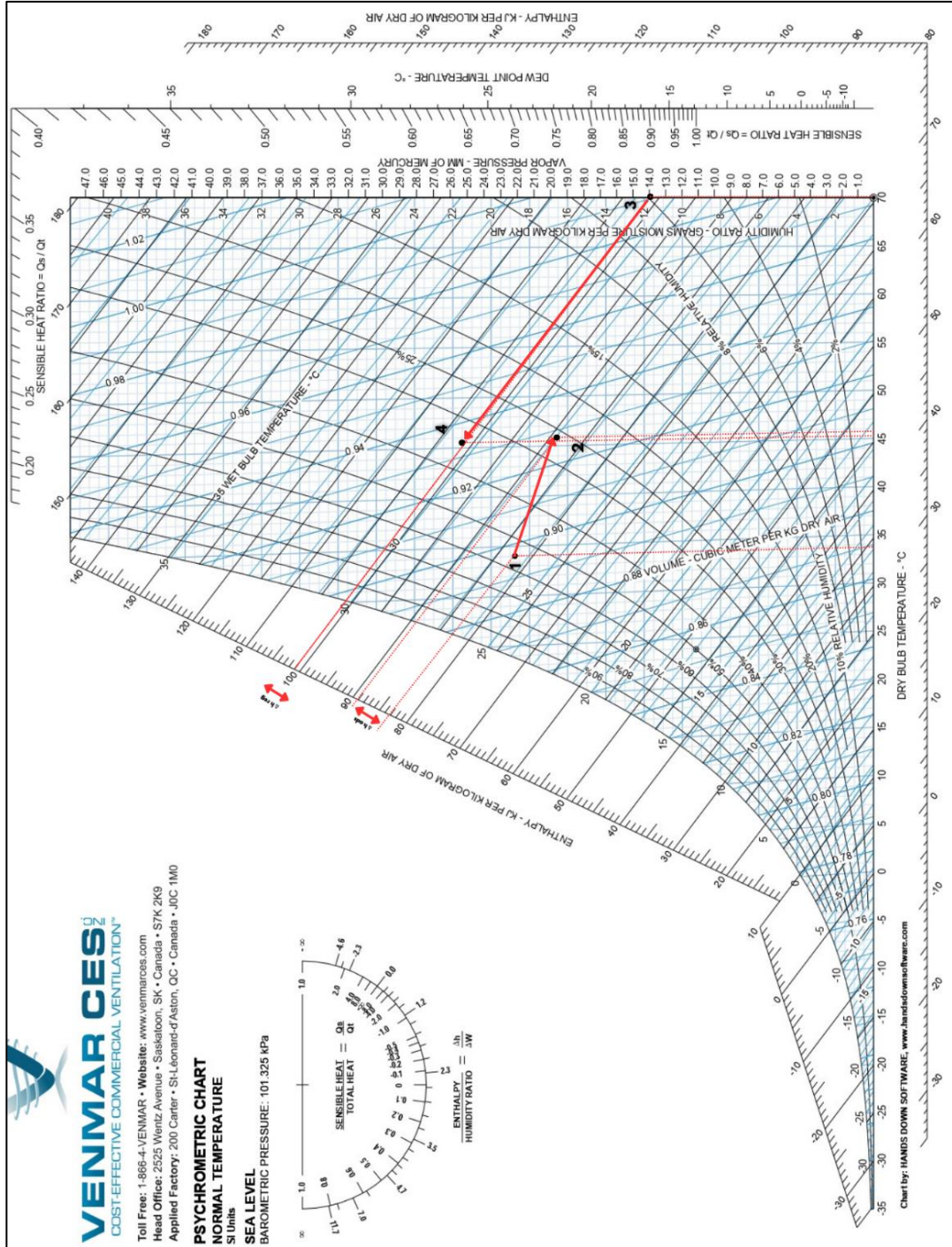
Gambar 4.5 Diagram psychrometric set suhu 50°



Gambar 4.6 Diagram psychrometric set suhu 55°



Gambar 4.7 Diagram *psychrometric* set suhu 60°



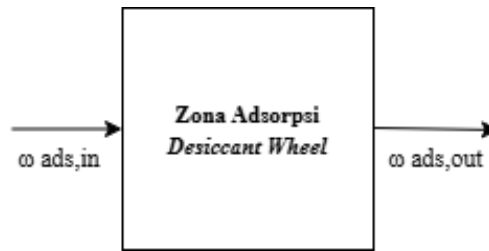
Gambar 4.8 Diagram psychrometric set suhu 65°

4.4 Perhitungan Parameter

Perhitungan parameter digunakan dalam analisis kinerja sistem dehumidifikasi. Parameter yang diperoleh dari perhitungan ini selanjutnya digunakan sebagai dasar evaluasi performa alat selama proses pengujian.

4.4.1 Penurunan Kelembapan Absolut

Berdasarkan skema yang disajikan pada **Gambar 4.9**, penurunan kelembapan absolut dihitung dengan menggunakan persamaan (2.46).



Gambar 4.9 Skema penurunan kelembapan absolut

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

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

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{ads} &= 0,018752 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - 0,01533 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \\ &= 0,002345 \text{ kg/kg}\end{aligned}$$

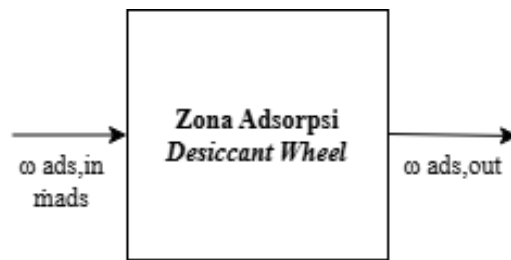
Secara lengkap hasil perhitungan penurunan kelembapan relatif yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan penurunan kelembapan relatif

Treg in (°C)	$\omega_{ads,in}$ (kg/kg)	$\omega_{ads,out}$ (kg/kg)	$\Delta\omega_{ads}$ (kg/kg)
40,08	0,01875	0,01533	0,003422
45,52	0,01876	0,01572	0,003035
50,46	0,01872	0,01597	0,00275
56,6	0,0191	0,0167	0,002409
62,7	0,01902	0,0166	0,002411
70	0,01891	0,01714	0,001769

4.4.2 Moisture Removal Capacity (MRC)

Berdasarkan skema yang disajikan pada **Gambar 4.10**, *moisture removal capacity* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.48).



Gambar 4.10 Skema MRC

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

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

$$\begin{aligned}
 MRC &= 0,268258 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (0,018752 - 0,01533) \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \\
 &= 0,000918 \frac{\text{kg}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

cara lengkap hasil perhitungan *Moisture Removal Capacity* (MRC) yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil perhitungan moisture removal capacity (MRC)

T _{reg in} (°C)	$\dot{m}_{ads}$ (kg/s)	$\omega_{ads,in}$ (kg/kg)	$\omega_{ads,out}$ (kg/kg)	MRC (kg/s)
40,08	0,2683	0,01875	0,01533	0,00092
45,52	0,2678	0,01876	0,01572	0,00081
50,46	0,2678	0,01872	0,01597	0,00074
56,6	0,2676	0,0191	0,0167	0,00064
62,7	0,2678	0,01902	0,0166	0,00065
70	0,2678	0,01891	0,01714	0,00047

4.4.3 Moisture Removal Regenerate (MRR)

Berdasarkan skema yang disajikan pada **Gambar 4.11**, *moisture removal regenerate* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.48).



Gambar 4.11 Skema MRR

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

Sehingga, *moisture removal regenerate* (MRR) pada suhu regenerasi set poin 40°C adalah

$$\begin{aligned}
 MRR &= 0,0243 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (0,0164 - 0,0130) \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \\
 &= 0,0000827 \frac{\text{kg}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

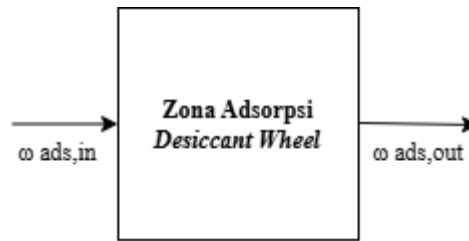
Secara lengkap hasil perhitungan *Moisture Removal Regenerate* (MRR) yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan moisture removal regenerate (MRR)

Treg in (°C)	$\dot{m}_{reg}$ (kg/s)	$\omega_{reg,in}$ (kg/kg)	$\omega_{reg,out}$ (kg/kg)	MRR (kg/s)
40,08	0,02434666	0,01301	0,01641	0,0000827
45,52	0,02397578	0,01255	0,01812	0,0001336
50,46	0,02362673	0,01241	0,01736	0,0001171
56,6	0,02319041	0,01216	0,02005	0,0001830
62,7	0,0227759	0,01188	0,02068	0,0002003
70	0,02229595	0,01112	0,02169	0,0002357

4.4.4 Efektivitas Dehumidifikasi

Berdasarkan skema yang disajikan pada **Gambar 4.12**, efektivitas dehumidifikasi dihitung dengan menggunakan persamaan (2.49).



Gambar 4.12 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

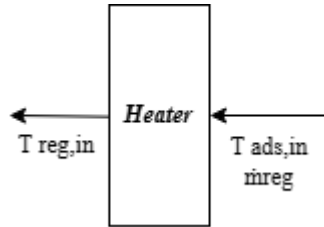
$$\begin{aligned} \varepsilon_{deh} &= \frac{0,018752 - 0,01533}{0,018752} \times 100 \% \\ &= 18\% \end{aligned}$$

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)	$\omega_{ads, in}$ (kg/kg)	$\omega_{ads, out}$ (kg/kg)	ε_{deh} (%)
40,08	0,01875	0,01533	18
45,52	0,01876	0,01572	16
50,46	0,01872	0,01597	15
56,6	0,0191	0,0167	13
62,7	0,01902	0,0166	13
70	0,01891	0,01714	9

4.4.5 Konsumsi Daya Heater



Gambar 4.13 Skema konsumsi daya heater

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.13, **Gambar 4.12** konsumsi daya heater dihitung dengan menggunakan persamaan (2.50).

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

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

$$\begin{aligned}
 W_{heater} &= \dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater} \\
 &= 0,02172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \times (39,3 - 31,9)^\circ\text{C} \\
 &= 0,16152 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\
 &= 148,76 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

Secara lengkap hasil perhitungan konsumsi daya heater yang dihasilkan dapat dilihat

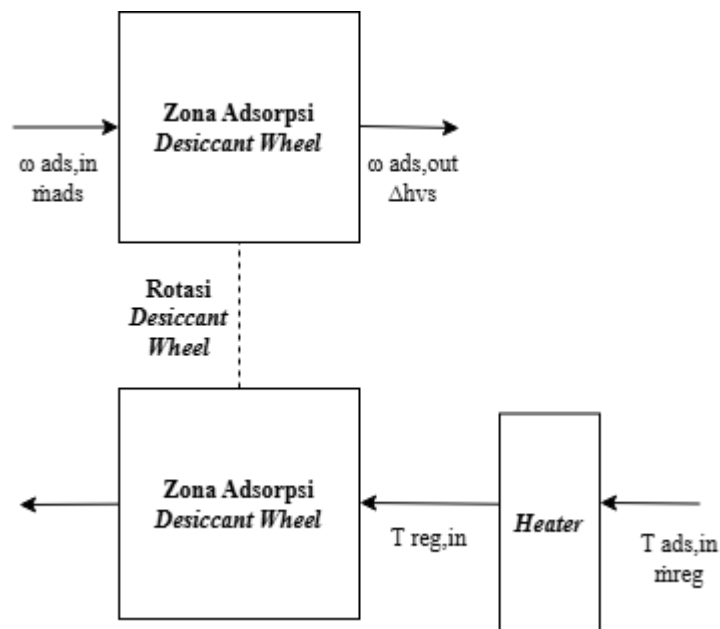
pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil perhitungan konsumsi daya heater

$T_{reg\ in}$ (°C)	$\dot{m}_{reg}$ (kg/s)	C_p ($\frac{KJ}{kg^{\circ}C}$)	ΔT_{heater} (°C)	W_{heater} (Watt)
40,08	0,02434666	1,005	6,08	148,76
45,52	0,02397578	1,005	11,22	270,35
50,46	0,02362673	1,005	16,06	381,34
56,6	0,02319041	1,005	22,06	514,14
62,7	0,0227759	1,005	28,3	647,78
70	0,02229595	1,005	35,6	797,70

4.4.6 Dehumidification Coefficient of Performance (DCOP)

Berdasarkan skema yang disajikan pada Gambar 4.14 **Gambar 4.12**, DCOP dihitung dengan menggunakan persamaan (2.51) dan persamaan (2.52).



Gambar 4.14 Skema DCOP

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

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

$$\begin{aligned} \Delta h_{vs} = & (-0,614342 \times 10^{-4}) \times 39,6^3 \text{°C} + \\ & 0,0158927 \times 10^{-2} \times 39,6^2 \text{°C} - \\ & 0,236418 \times 10 \times 39,6 \text{°C} + 0,250079 \times 10^4 \\ = & 2.420,788 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Jadi didapatkan, DCOP untuk suhu regenerasi set poin 40° sebagai

$$\begin{aligned} DCOP = & \frac{0,268 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2.420,788 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times (0,018752 - 0,01533) \frac{\text{kg}}{\text{kg}}}{0,0271 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \times (39,6 - 32,98) \text{°C}} \\ = & 15,24071 \end{aligned}$$

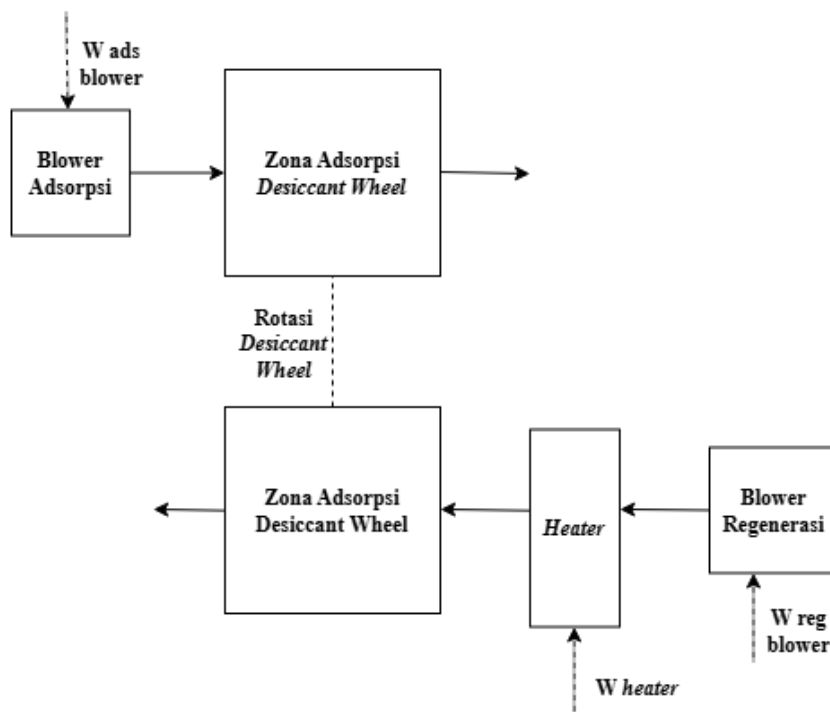
maka hasil perhitungan DCOP yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.9.

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)	C_p (KJ/kg°C)	ΔT_{heater} (°C)	DCOP
40,08	34	2418,18	0,268	0,01875	0,01533	0,024	1,005	6,08	14,921
45,52	34,3	2417,41	0,268	0,01876	0,01572	0,024	1,005	11,22	7,267
50,46	34,4	2417,15	0,268	0,01872	0,01597	0,024	1,005	16,06	4,668
56,6	34,54	2416,79	0,267	0,0191	0,0167	0,023	1,005	22,06	3,030
62,7	34,4	2417,15	0,268	0,01902	0,0166	0,023	1,005	28,3	2,409

4.4.7 Specific Energy Consumption (SEC)

Berdasarkan skema yang disajikan pada **Gambar 4.15**, SEC dihitung dengan menggunakan persamaan (2.53).



Gambar 4.15 Skema SEC

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

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

$$SEC = \frac{(0,14876 + 0,011544)kW}{0,00097 \frac{kg}{s}}$$

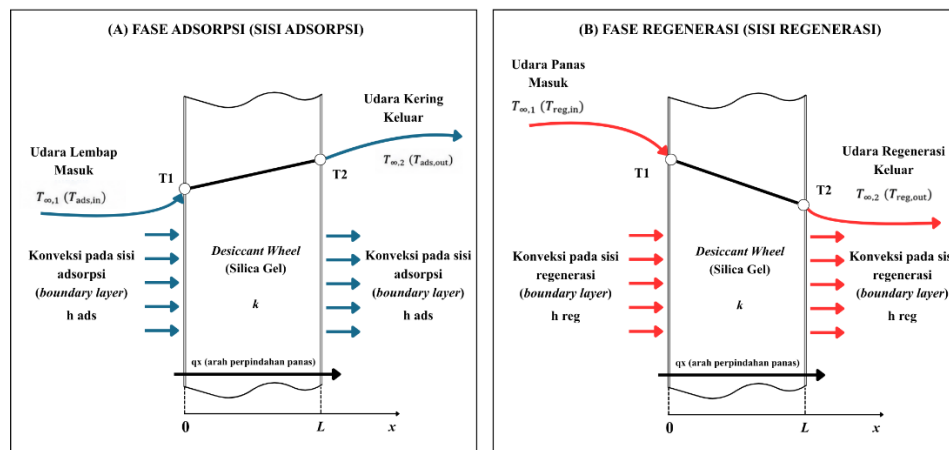
$$= 174,64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

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 ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)
40,08	0,148767807	0,011544	0,00092	174,636
45,52	0,270353338	0,011544	0,00081	346,852
50,46	0,381342478	0,011544	0,00074	533,514
56,6	0,514138302	0,011544	0,00064	815,607
62,7	0,647780874	0,011544	0,00065	1021,21
70	0,797704571	0,011544	0,00047	1708,31

4.5 Heat Transfer



Gambar 4.16 Skema Perpindahan Panas pada Rotary Wheel

1. Heat Transfer Konveksi Adsorpsi di Rotary Wheel

Hasil perhitungan menggunakan persamaan 2.54 Sampai 2.60

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

Diketahui:

$$\dot{V}_{duct,ads} : 0,26215 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned}
d_{\text{wheel}} &: 0,3 \text{ m} \\
d_{\text{lubang honeycomb}} &: 0,002 \text{ m} \\
T_{\text{in,ads}} &: 32,98 \text{ }^{\circ}\text{C} = 306,13 \text{ K} \\
T_{\text{out,ads}} &: 35,5 \text{ }^{\circ}\text{C} = 308,65 \text{ K} \\
\mu_{\text{ads}} &: 1,9 \times 10^{-5} \text{ Pa s} \\
\rho_{\text{ads}} &: 1,138 \text{ kg/m}^3 \\
C_p &: 1.005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}
\end{aligned}$$

Untuk mencari h , menggunakan rumus:

$$h_{\text{ads}} = \frac{\text{Nu} \times k_{\text{ads}}}{D_{\text{h honeycomb}}}$$

Untuk mencari nilai reynold, menggunakan persamaan

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{ads}} \times v_{\text{wheel,ads}} \times D_{\text{h honeycomb}}}{\mu_{\text{ads}}}$$

Untuk mencari v_{wheel} menggunakan persamaan

$$\begin{aligned}
v_{\text{wheel,ads}} &= \frac{\dot{V}_{\text{duct,ads}}}{A_{\text{wheel,ads}}} \\
&= \frac{0,26216 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \pi \frac{(0,3 \text{ m})^2}{4}} \\
&= 7,421 \frac{\text{m}}{\text{s}}
\end{aligned}$$

Untuk mencari k_{ads} , menggunakan tabel thermal conductivity.

Air - Thermal Conductivity vs. Temperature at Atmospheric Pressure - SI Units

Temperature	Thermal conductivity		
	(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

$$T_f = \frac{T_{in_{ads}} + T_{out_{ads}}}{2}$$

$$= \left(\frac{32,98 + 35,5}{2} \right) ^{\circ}\text{C}$$

$$= 34,42\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Diketahui

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

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

Untuk mencari k_{ads} @ 34,42°C, maka harus ngeinterpolasi

$$\begin{aligned}
 k_{ads}@ 34,42^{\circ}\text{C} &= 0,02662 + \left(\frac{(34,42 - 30)^{\circ}\text{C}}{(40 - 30)^{\circ}\text{C}} \right) \times (0,02735 - 0,02662) \frac{\text{W}}{\text{m K}} \\
 &= 0,02693 \frac{\text{W}}{\text{m K}}
 \end{aligned}$$

Untuk mencari Pr, menggunakan rumus:

$$\begin{aligned}
 \text{Pr} &= \frac{\mu_{ads} \times C_p}{k_{ads}} \\
 &= \frac{1,9 \times 10^{-5} \text{Pa s} \times 1.005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,02693 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} \\
 &= 0,70907 \frac{\text{W}}{\text{m K}}
 \end{aligned}$$

Untuk mencari nilai Re, menggunakan rumus:

$$\begin{aligned}
 \text{Re} &= \frac{\rho_{ads} \times v_{\text{wheel}} \times D_{\text{honeycomb}}}{\mu_{ads}} \\
 &= \frac{1,138 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 7,421 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,002 \text{ m}}{1,9 \times 10^{-5} \text{Pa s}} \\
 &= 888,968
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Nu} &= 0,664 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33} \\
 &= 0,664 \times 888,968^{0,5} \times 0,70907^{0,33} \\
 &= 17,67
 \end{aligned}$$

Untuk mencari h_{ads} , menggunakan rumus

$$h_{ads} = \frac{\text{Nu} \times k_{ads}}{D_{\text{honeycomb}}}$$

$$h_{ads} = \frac{17,67 \times 0,02693 \frac{W}{m K}}{0,002 m}$$

$$= 237,979 \frac{W}{m^2 K}$$

Untuk luas perpindahan kalor adsorpsi

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

$$= \frac{1}{2} \times 0,002 m \times 0,13 m \times 2.116$$

$$= 0,863 m^2$$

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

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

$$= 237,979 \frac{W}{m^2 K} \times 0,863 m^2 \times (308,65 - 306,13) K$$

$$= 517,996 \text{ Watt}$$

$$= 517,996 \frac{J}{s}$$

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 adsorpsi di rotary wheel

Menit	T set	T in	T out	k ads	Pr	Nu	h	Q _{conv,ads}
ke-	heater	ads	ads	($\frac{W}{m K}$)			($\frac{W}{m^2 K}$)	($\frac{J}{s}$)
	(°C)	(°C)	(°C)					
5	40	32,98	35,50	0,02693	0,7090	17,67	237,979	517,996

10	45	32,8	36,26	0,02695	0,7085	17,66	238,104	711,59
15	50	32,9	38,40	0,02703	0,7064	17,65	238,595	1133,47
20	55	32,82	39,44	0,02706	0,7056	17,64	238,817	1365,56
25	60	32,7	41,90	0,02715	0,7056	17,64	239,570	1903,74
30	65	32,7	43,12	0,02720	0,7056	17,64	239,963	2159,73

2. Heat Transfer Konveksi Regenerasi di Rotary Wheel

Hasil perhitungan menggunakan persamaan 2.61 Sampai 2.67

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

Diketahui:

$$\dot{V}_{\text{duct,ads}} : 0,02424 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

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

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

$$T_{\text{in,reg}} : 39,6 \text{ }^{\circ}\text{C} = 312,75 \text{ K}$$

$$T_{\text{out,reg}} : 35,8 \text{ }^{\circ}\text{C} = 308,95 \text{ K}$$

$$\mu_{\text{reg}} : 1,934 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$$

$$\rho_{\text{reg}} : 1,118 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p : 1.005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Untuk mencari h, menggunakan rumus:

$$h_{\text{reg}} = \frac{\text{Nu} \times k_{\text{reg}}}{D_{\text{h honeycomb}}} \quad (2.2)$$

Untuk mencari nilai reynold, menggunakan persamaan

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{reg}} \times v_{\text{wheel,reg}} \times D_{\text{h honeycomb}}}{\mu_{\text{reg}}} \quad (2.2)$$

Untuk mencari v_{wheel} menggunakan persamaan

$$\begin{aligned} v_{\text{wheel,ads}} &= \frac{\dot{V}_{\text{duct,ads}}}{A_{\text{wheel,ads}}} \\ &= \frac{0,02424 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \pi \frac{(0,3 \text{ m})^2}{4}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{\text{wheel,ads}} &= \frac{\dot{V}_{\text{duct,ads}}}{A_{\text{wheel,ads}}} \\ &= \frac{0,02424 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \pi \frac{(0,3 \text{ m})^2}{4}} \\ &= 0,6862 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Untuk mencari k_{reg} , menggunakan tabel thermal conductivity.

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

$$T_f = \frac{T_{in_{reg}} + T_{out_{reg}}}{2}$$

$$= \left(\frac{39,6 + 35,8}{2} \right) ^\circ\text{C}$$

$$= 37,7 ^\circ\text{C}$$

Diketahui

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

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

Untuk mencari k_{reg} @ 37,7°C, maka harus interpolasi

$$k_{reg}@ 34,42^{\circ}\text{C} = 0,02662 + \left(\frac{(37,7 - 30)^{\circ}\text{C}}{(40 - 30)^{\circ}\text{C}} \right) \times (0,02735 - 0,02662) \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$= 0,02718 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

Untuk mencari Pr, menggunakan rumus:

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

$$= \frac{1,934 \times 10^{-5} \text{ Pa s} \times 1.005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,02718 \frac{\text{W}}{\text{m K}}}$$

$$= 0,715$$

Untuk mencari nilai Re, menggunakan rumus:

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

$$= \frac{1,118 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,6862 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,002 \text{ m}}{1,934 \times 10^{-5} \text{ Pa s}}$$

$$= 79,335$$

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

$$\text{Nu} = 0,664 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33}$$

$$= 0,664 \times 79,335^{0,5} \times 0,715^{0,33}$$

$$= 5,293$$

Untuk mencari h_{reg} , menggunakan rumus

$$h_{ads} = \frac{5,2945 \times 0,027182 \frac{\text{W}}{\text{m K}}}{0,002 \text{ m}}$$

$$= 71,981 \frac{W}{m^2K}$$

Untuk luas perpindahan kalor regenerasi

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

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

$$\begin{aligned} Q_{\text{conv,reg}} &= h_{\text{reg}} \times A_v \times (T_s - T_{\text{in,ads}}) \\ &= 71,981 \frac{W}{m^2K} \times 0,863 \text{ m}^2 \times (308,65 - 306,13)K \\ &= 236,188 \text{ Watt} \\ &= 236,26 \frac{J}{s} \end{aligned}$$

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 regenerasi di rotary wheel

T set heater (°C)	T in reg (°C)	T out reg (°C)	k ads ($\frac{W}{mK}$)	Pr	Nu	Re	h ($\frac{W}{m^2K}$)	Q _{conv,reg} ($\frac{J}{s}$)
40	39,60	35,80	0,02718	0,7150	5,293	79,335	71,9810	236,260
45	45,10	37,40	0,02744	0,7083	5,211	77,347	71,5049	479,664

50	50,80	38,60	0,02769	0,7018	5,109	74,788	70,7442	745,486
55	56,90	40,80	0,028	0,6942	5,005	72,307	70,0694	974,413
60	63,00	41,60	0,02825	0,6881	4,911	70,032	69,3699	1282,25
65	70,06	44,04	0,02859	0,6799	4,807	67,625	68,7191	1544,45

3. *Heat Transfer* Konduksi Adsorpsi di *Rotary Wheel*

$$A = \frac{3,14}{4} (0,30^2 - 0,27^2)$$

$$= 0,01343 \text{ m}^2$$

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

$$Q_{konduksi,ads} = 0,18 \times \frac{0,01343 \times (35,5 - 32,98)}{0,13}$$

$$= 0,0469 \text{ W}$$

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 adsorpsi di rotary wheel

Menit	T set	T in ads	T out ads	$Q_{kond,ads}$
ke-	heater (°C)	(°C)	(°C)	($\frac{J}{s}$)
5	40	32,98	35,50	0,047
10	45	32,8	36,26	0,064
15	50	32,9	38,40	0,1023
20	55	32,82	39,44	0,123

25	60	32,7	41,90	0,171
30	65	32,7	43,12	0,194

4. *Heat Transfer* Konduksi Regenerasi di *Rotary Wheel*

$$A = \frac{3,14}{4} (0,30^2 - 0,27^2)$$

$$= 0,01343 \text{ m}^2$$

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

$$Q_{konduksi,reg} = 0,18 \times \frac{0,01343 \times (39,6 - 35,8)}{0,13}$$

$$= 0,071 \text{ W}$$

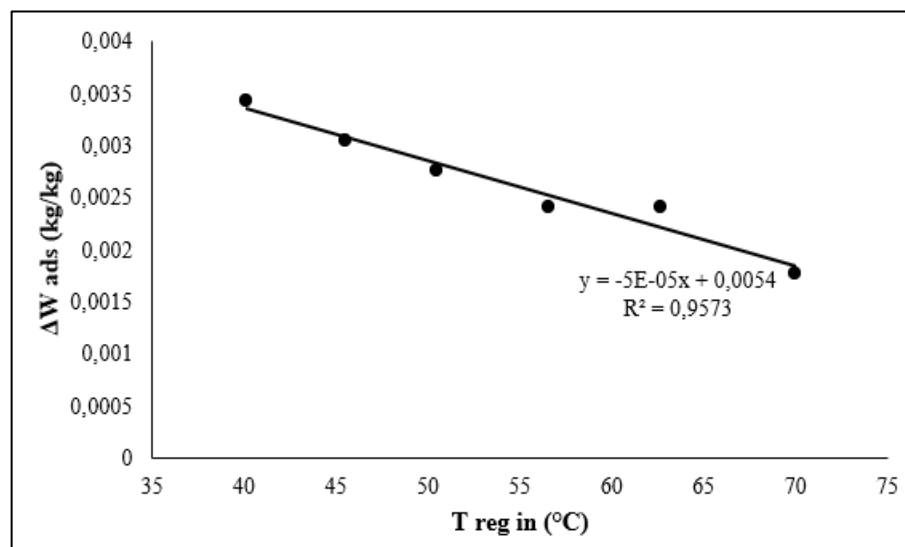
Secara lengkap hasil perhitungan heat transfer konduksi pada regenerasi di rotary wheel yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4. 14.

Tabel 4. 14 Heat transfer konduksi pada regenerasi di rotary wheel

T set heater (°C)	T in reg (°C)	T out reg (°C)	Q _{kond,reg} ($\frac{J}{s}$)
40	39,60	35,80	0,071
45	45,10	37,40	0,143
50	50,80	38,60	0,227
55	56,90	40,80	0,30
60	63,00	41,60	0,398

4.6 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 (T_{reg}) dan nilai ΔW_{ads} ditunjukkan pada **Gambar 4.17**.



Gambar 4.17 Hubungan temperatur regenerasi dengan penurunan kelembapan absolut

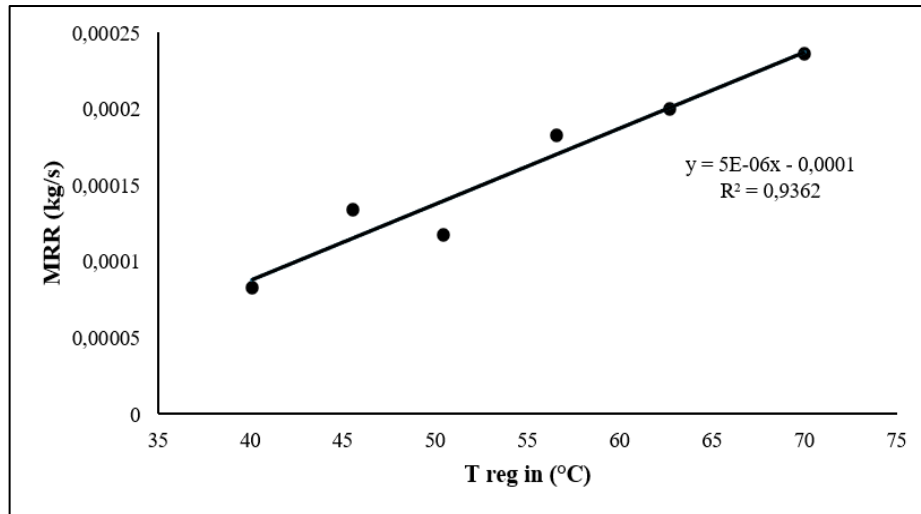
Berdasarkan **Gambar 4.17** terlihat bahwa semakin tinggi temperatur regenerasi, nilai ΔW_{ads} menurun dari 0,0034 kg/kg pada 40°C menjadi sekitar 0,0018 kg/kg pada 70°C. Hal ini menunjukkan bahwa selisih kelembapan spesifik udara sebelum dan sesudah melewati *desiccant wheel* semakin kecil sehingga kemampuan adsorpsi sistem

cenderung menurun pada kondisi pengujian.

Berbeda dengan hasil 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 penelitian ini kemungkinan belum cukup tinggi untuk meregenerasi silica gel secara optimal, sehingga kapasitas adsorpsinya tidak meningkat.

4.7 Moisture Removal Capacity (MRC)

Moisture Removal Capacity (MRC) 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 (T_{reg}) dan nilai MRC hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.18.



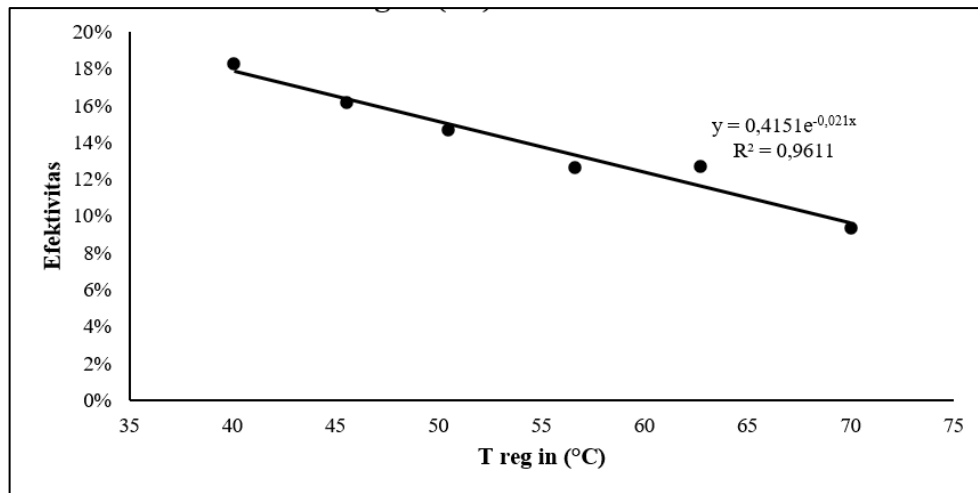
Gambar 4.18 Hubungan temperatur regenerasi dengan moisture removal capacity

Berdasarkan **Gambar 4.18**, nilai MRC cenderung menurun seiring dengan meningkatnya temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 0,000082 kg/s pada 40°C menjadi sekitar 0,00023 kg/s pada 70°C. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan desikan dalam menghilangkan uap air dari udara proses semakin berkurang pada rentang temperatur regenerasi yang diuji.

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 penelitian ini yang belum cukup tinggi untuk meregenerasi silica gel secara optimal, sehingga kemampuan desikan dalam menyerap uap air belum.

4.8 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 4.19.



Gambar 4.19 Hubungan temperatur regenerasi dengan efektivitas dehumidifikasi

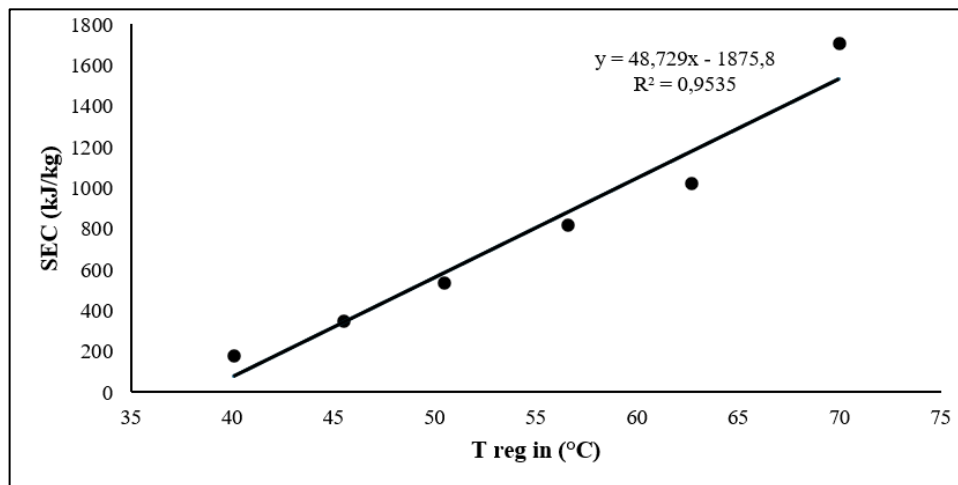
Berdasarkan Gambar 4.19, nilai efektivitas dehumidifikasi cenderung menurun seiring dengan meningkatnya temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 18% pada 40°C menjadi sekitar 9% pada 70°C. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam mengurangi kandungan uap air pada udara proses semakin menurun 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 penelitian ini yang belum cukup tinggi untuk meregenerasi silica gel secara optimal, sehingga efektivitas dehumidifikasi tidak meningkat.

4.9 *Specific Energy Consumption*

Specific Energy Consumption (SEC) menunjukkan energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan satu satuan massa air pada proses dehumidifikasi. Semakin rendah nilai SEC, semakin efisien penggunaan energi oleh sistem. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan nilai SEC ditunjukkan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Hubungan temperatur regenerasi dengan specific energy consumption (SEC)

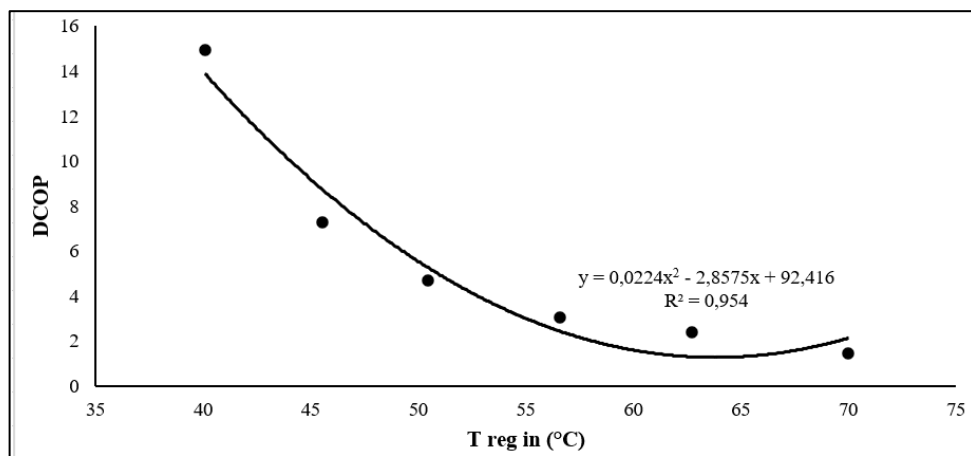
Berdasarkan **Gambar 4.20**, nilai SEC cenderung meningkat seiring dengan kenaikan temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 174,6 kJ/kg pada 40°C menjadi sekitar 1708,3 kJ/kg pada 70°C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur regenerasi, semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan setiap satuan massa uap air.

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.

4.10 Desiccant Coefficient of Performance (DCOP)

Dehumidification Coefficient of Performance (DCOP) menunjukkan efisiensi sistem dalam memanfaatkan energi untuk menghasilkan efek dehumidifikasi. Semakin tinggi nilai DCOP, semakin efisien kinerja sistem. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan nilai DCOP ditunjukkan pada Gambar 4.21.



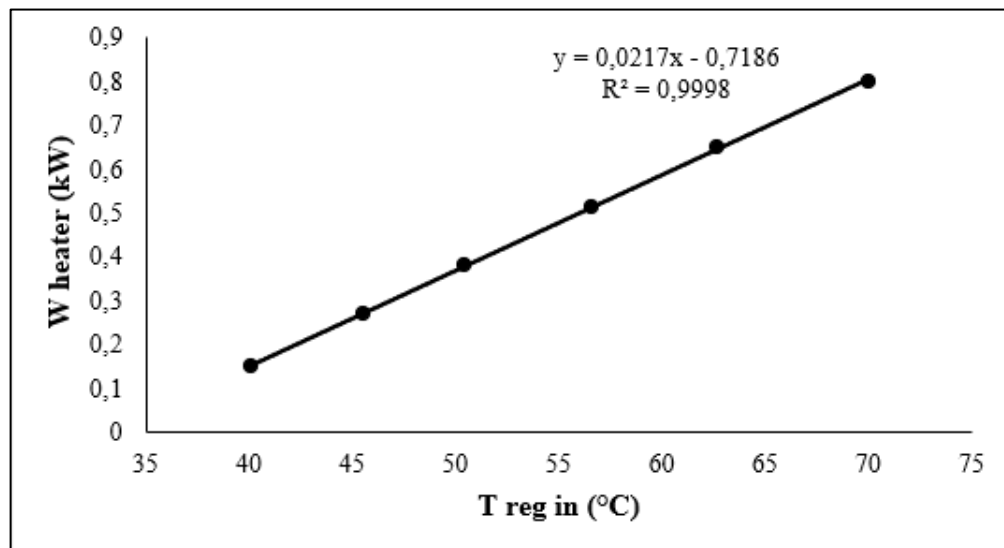
Gambar 4.21 Hubungan temperatur regenerasi dengan DCOP

Berdasarkan Gambar 4.21, nilai DCOP cenderung menurun seiring dengan meningkatnya temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 14,9 pada 39°C menjadi sekitar 1,4 pada 69°C. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi 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. Dengan demikian, meskipun temperatur regenerasi yang lebih tinggi dapat memperbaiki proses regenerasi desikan, peningkatan konsumsi energi yang lebih besar menyebabkan nilai DCOP menurun.

4.11 Konsumsi Daya Heater

Energi heater menunjukkan besarnya energi yang digunakan untuk memanaskan udara regenerasi selama proses regenerasi desikan. Hubungan antara temperatur regenerasi (T_{reg}) dan konsumsi energi heater ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Hubungan temperatur regenerasi dengan konsumsi energi heater

Berdasarkan Gambar 4.22, konsumsi energi heater (W_{heater}) meningkat seiring dengan kenaikan temperatur udara regenerasi, yaitu dari sekitar 0,14 kW pada 40°C menjadi sekitar 0,79 kW pada 70°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 energi 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 energi heater pada sistem dehumidifikasi.

4.12 Heat Transfer

