

BAB IV

HASIL PERANCANGAN DAN PEMBAHASAN

Laju perpindahan kalor pada pemanas air tenaga surya (PATS) sistem *thermosyphon* sangat bergantung pada rancangan kapsul PCM karena kapsul PCM berperan sebagai alat penukar kalor. Perancangan kapsul PCM dilakukan dengan memilih material, menghitung kebutuhan luas permukaan, menghitung jumlah kapsul yang dibutuhkan. Ukuran dari kapsul PCM yang dimaksud yaitu diameter kapsul dan panjang kapsul. Penentuan panjang kapsul dan diameter kapsul yang digunakan menyesuaikan pada panjang tangki dan diameter tangki dengan volume 60 liter, sehingga dapat memenuhi kebutuhan luas permukaan kapsul PCM. Untuk ukuran kapsul memiliki diameter 1 inch dan panjang 1 meter.

4.1 Pemilihan Material Kapsul PCM

Pemilihan material kapsul PCM dilakukan dengan memilih material dengan konduktifitas termal yang tinggi tetapi dengan harga yang masih terjangkau. Tabel 4.1 menunjukkan beberapa konduktifitas termal dari material dengan harga yang masih terjangkau. Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa material tembaga memiliki konduktifitas termal tertinggi, yaitu 350 W/m.K.

Tabel 4.1 Sifat fisis beberapa material (Ibrahim dkk, 2017)

	Graphite foil	Aluminium	Stainless steel	Carbon steel	Copper
Thermal conductivity (W/m-K)	150	200	20	30	350
Density (kg/m ³)	1000	2700	7800	7800	8800
Estimated volume specific cost (\$/m ³)	10,000	7000	20,000	15,000	40,000

4.2 Kalor Yang Diterima Kolektor

Sebelum menghitung luas permukaan kapsul PCM, ada beberapa parameter yang harus dicari terlebih dahulu yaitu kalor yang diterima kolektor dari energi matahari dengan menggunakan persamaan 2.1 sebagai berikut.

$$Q_{kol} = \eta_c I_c A_c$$

Dimana

η_c : efisiensi kolektor (asumsi) = 26% (Nadjib dan Suhanan, 2013)

I_c : radiasi matahari = 600 W/m²

A_c : luas kolektor = 1,9 m²

Sehingga didapatkan perhitungan dan hasil seperti berikut.

$$Q_{kol} = 26\% \times 600 \text{ W/m}^2 \times 1,9 \text{ m}^2 = 0,2964 \text{ kW}$$

4.3 Diameter Hidrolik

Untuk mencari diameter hidrolik (D_h) dapat dicari menggunakan persamaan 2.3 berikut.

$$D_h = \frac{2V_{TES}}{\pi r_k N_k L_{PCM}} - 2r_k \left(\frac{L_{s,i}}{L_{PCM}} \right)$$

Dimana

V_{TES} : volume tangki = 0,0601 m³

N_k : jumlah kapsul = 24 buah (asumsi awal)

r_k : jari-jari kapsul = 0,0127 m

$L_{s,i}$: panjang selongsong sisi dalam = 1,2440 m

L_{PCM} : panjang kapsul = 1 m

Sehingga didapat perhitungan sebagai berikut.

$$D_h = \frac{2 \times 0,0601 \text{ m}^3}{\pi \times 0,0127 \text{ m} \times 24 \times 1 \text{ m}} - 2 \times 0,0127 \text{ m} \left(\frac{1,2440 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right) = 0,0597 \text{ m}$$

4.4 Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt untuk aliran konveksi bebas melalui rangkaian pipa (Esen, 1998). Perhitungan bilangan Nusselt dapat dicari ketika diameter hidrolik dan jari-jari kapsul sudah diketahui seperti perhitungan berikut ini.

$$Nu = 3.66 + 4.12 \left[\left(\frac{D_h}{r_k} \right) - 0.205 \right]^{0.569}$$

Dimana

$$D_h : 0,0597 \text{ m}$$

$$r_k : 0,0127 \text{ m}$$

Sehingga didapat hasil sebagai berikut.

$$Nu = 3,66 + 4,12 \left[\left(\frac{0,0597\text{m}}{0,0127\text{m}} \right) - 0,205 \right]^{0,569} = 13,3488$$

4.5 Konduktivitas Termal Air

Untuk perhitungan konduktivitas termal air (k) didapat dengan persamaan 4.1 berikut ini.

$$k = a + bT + cT^{1,5} + dT^2 + eT^{0,5} \quad (4.1)$$

Dimana konstantanya adalah :

$$a : 0,5650285$$

$$b : 0,0026363895$$

$$c : - 0,00012516934$$

$$d : - 1,5154918 \times 10^{-6}$$

$$e : - 0,0009412945$$

Sehingga didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$k = 0,5650285 + 0,0026363895 \times 40,7443^\circ\text{C} + -0,00012516934 \times 40,7443^\circ\text{C}^{1,5} + - 1,5154918 \times 10^{-6} \times 40,7443^2^\circ\text{C} + -0,0009412945 \times 40,7443^{0,5^\circ\text{C}} = 0,63614 \text{ W/m.C}$$

4.6 Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi

Untuk mencari koefisien perpindahan kalor konveksi (h) didapat dengan persamaan 2.6 sebagai berikut.

$$h = \frac{Nu k}{D_h}$$

dimana

$$Nu : 13,34488$$

$$k : 0,637 \text{ W/m.C}$$

$$D_h : 0,0597 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

$$h = \frac{13,3488 \times 0,637W/m.C}{0,0597m} = 142,527W/m^2.C$$

4.7 Temperatur Air Panas Akhir

Temperatur air panas akhir dengan asumsi ($Q_w = Q_{kol}$) dapat dicari dengan persamaan 2.10 berikut.

$$T_f = \frac{Q_{kol} t}{m_w c_{pw}} + T_i$$

dimana

Q_{kol} : 0,2964 kW

t : lama waktu pemanasan = 5 jam / 18.000 detik

m_w : massa air di dalam tangki = 46,437 Kg

c_{pw} : panas jenis air pada temperatur rata-rata = 4179,54 J/Kg.C

T_i : temperatur air awal di tangki = 27 °C

Sehingga didapat hasil sebagai berikut.

$$T_f = \frac{0,2964 kW \times 18000 second}{46,437kg \times 4179,54 J/kgC} + 27^{\circ}C = 54,489^{\circ}C$$

4.8 Energi Kalor Yang Terkandung Dalam Air Panas

Energi kalor yang terkandung dalam air panas dapat dicari menggunakan persamaan 2.7 berikut.

$$Q_w = m_w c_{pw} (T_f - T_i)$$

dimana

m_w : massa air di dalam tangki = 46,437 Kg

c_{pw} : panas jenis air pada temperatur rata-rata = 4179,54 J/Kg.C

T_f : temperatur air panas akhir = 54,489 °C

T_i : temperatur air awal di tangki = 27 °C

Sehingga di dapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$Q_w = 46,437 kg \times 4179,540 J/KgC (54,489^{\circ}C - 27^{\circ}C) = 0,2964 kW$$

4.9 Temperatur Permukaan Kapsul

Langkah selanjutnya adalah menghitung temperatur permukaan kapsul dengan asumsi penukar kalor konveksi (persamaan 2.2) sama dengan peukar kalor konduksi (peersamaan 2.8) ($Q_{konv} = Q_{kond}$).

$$T_k = \frac{hD_k \ln\left(\frac{D_k}{2 \times 0.002}\right) T_\infty + 2k_{PCM} T_{PCM,1/2}}{2k_{PCM} + hD_k \ln\left(\frac{D_k}{2 \times 0.002}\right)}$$

dimana

- h : 142,527 W/m².C
- D_k : diameter luar kapsul = 0,0254 m
- T_∞ : temperatur air panas di dalam tangki = 54,49 °C
- k_{PCM} : konduktivitas termal PCM = 0,2 W/m.C
- T_{PCM,1/2} : temperatur awal paraffin di pusat kapsul = 27 °C

Sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

$$T_k = \frac{142,527 \frac{W}{m^2} \cdot C \times 0,0254 m \times \ln\left(\frac{0,0254 m}{2 \times 0.002}\right) 54,49 \text{ }^\circ\text{C} + 2 \times 0,2 \frac{W}{m} \cdot C \times 27 \text{ }^\circ\text{C}}{2 \times \frac{0,2W}{m} \cdot C + 142,527 \frac{W}{m^2} \cdot C \times 0,0254 m \times \ln\left(\frac{0,0254 m}{2 \times 0.002}\right)} = 46,067 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.10 Kebutuhan Luas Permukaan Kapsul PCM

Kebutuhan luas kapsul dicari dengan menyamakan persamaan 2.4 dan persamaan 2.2 ($Q_w = Q_{konv}$), sedangkan t adalah lama waktu pemanasan sehingga diperoleh persamaan 2.9 yaitu luas kapsul:

$$A = \frac{m_w c_{pw} (T_f - T_i)}{h(T_\infty - T_k)t}$$

dimana

- m_w : massa air di dalam tangki = 46,437 Kg
- c_{pw} : panas jenis air pada temperatur rata-rata = 4179,54 J/Kg.C
- T_f : temperatur air panas akhir = 54,489 °C
- T_i : temperatur air awal di tangki = 27 °C
- h : koefisien perpindahan kalor konveksi = 142,527 W/m².C
- T_∞ : temperatur air panas di dalam tangki = 54,49 °C
- T_k : temperatur permukaan kapsul = 27⁰C

t : lama waktu pemanasan = 5 jam (18.000 detik)

Sehingga didapatkan hasil perhitungan kebutuhan luas kapsul sebagai berikut.

$$A = \frac{46,437 \text{ Kg} \times 4179,540 \text{ J/Kg} \cdot C(54,489 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C})}{142,527 \text{ W/m}^2 \cdot C(54,49 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C})18000 \text{ second}} = 0,076 \text{ m}^2$$

4.11 Jumlah Kapsul PCM Yang Perlu Dipasang

Jumlah kapsul PCM yang harus dipasang didalam tangki dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$N_k = \frac{A}{\pi D_k L_{PCM}}$$

dimana

A : kebutuhan luas permukaan kapsul PCM = 0,076m²

D_k : diameter luar kapsul = 0,0254 m

L_{PCM} : panjang kapsul PCM = 1 m

$$N_k = \frac{0,076 \text{ m}^2}{\pi \times 0,0254 \text{ m} \times 1 \text{ m}} = 24,366 \text{ buah}$$

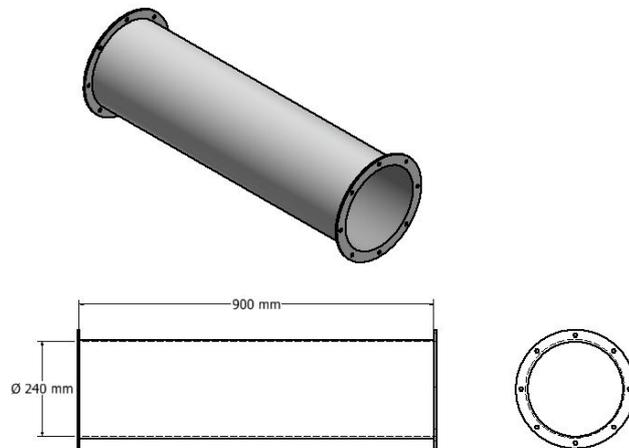
Dari hasil di atas dapat dibulatkan menjadi 24 buah kapsul PCM, menunjukkan bahwa jumlah pipa sama dengan asumsi yang diambil. Dengan demikian harga ini dijadikan dasar dalam mendesain alat penukar kalor.

4.12 Desain 2D dan 3D Komponen Tangki PATS Kapasitas 60 Liter

Perancangan desain 2D dan 3D komponen tangki PATS kapasitas 60 liter dirancang sesuai kebutuhan luas dan volume, maka dari hasil perhitungan – perhitungan di atas didapatkan hasil rancangan seperti tangki utama, tutup tangki, kapsul PCM, dan penyangga PCM di dalam tangki.

a. Tangki Utama kapasitas 60 liter

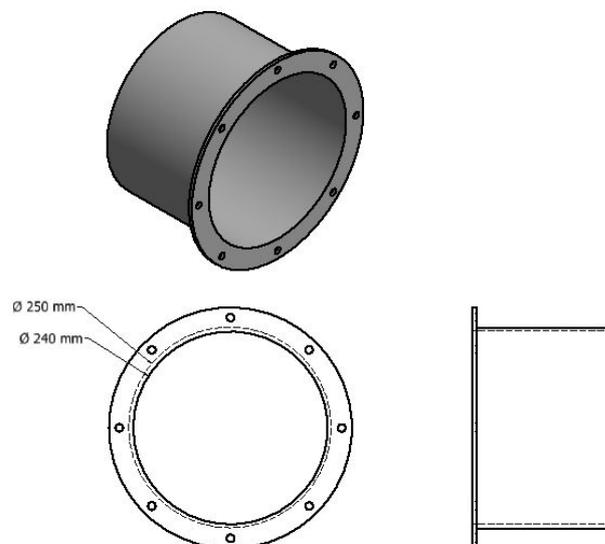
Hasil perancangan desain pada tangki utama yang memiliki tebal plat 2 mm dengan kapasitas 60 liter dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1. Tangki Utama 60 liter

b. Tutup Tangki

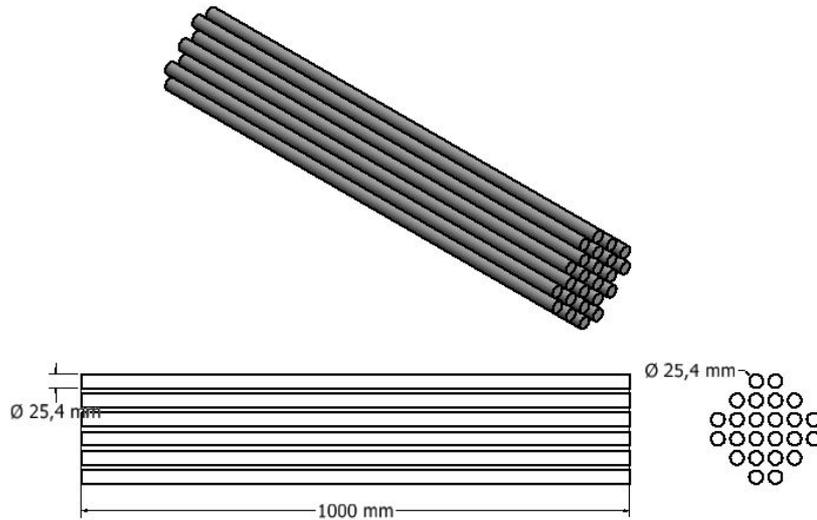
Perancangan desain pada tutup tangki dengan tebal plat 2 mm menghasilkan gambar sebagai mana disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Tutup Tangki

c. Kapsul PCM

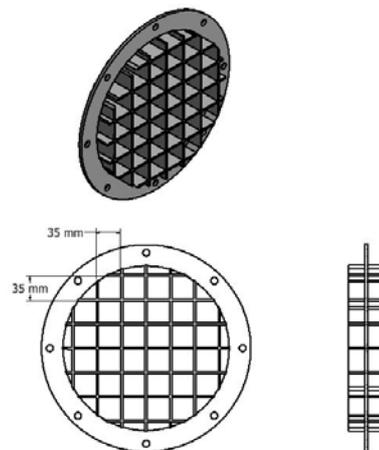
Perancangan kapsul PCM dengan tebal 1 mm mendapatkan hasil seperti gambar 4.3 sebagai berikut.



Gambar 4.3. Kapsul PCM

d. Penyangga PCM dalam tangki

Perancangan penyangga disesuaikan dengan kebutuhan jumlah kapsul yang akan dipasangkan ke dalam tangki. Dan hasilnya seperti gambar 4.4 berikut



Gambar 4.4. Penyangga PCM

e. PATS kapasitas 60 liter

Gambar 3D dan 2D keseluruhan dari PATS meliputi tangki kapasitas 60 liter, kapsul – kapsul di dalam tangki, kolektor surya, dan kerangka ditampilkan pada gambar 4.5 dan dimensi tangki pada gambar 4.6.



Gambar 4.5. PATS kapasitas 60 liter

