

# PERANCANGAN ALAT PENUKAR KALOR UNTUK PCM DI DALAM TANGKI PEMANAS AIR TENAGA SURYA *THERMOSYPHON* KAPASITAS 60 LITER

Imam Dwi Setyanto<sup>1</sup>, Muhammad Nadjib<sup>2</sup>, Tito Hadji Agung Santoso<sup>3</sup>  
Program Studi S-1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah  
Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Indonesia.

[imamdwiset5@gmail.com](mailto:imamdwiset5@gmail.com)

Pemanas air tenaga surya (PATS) adalah teknologi pemanasan air yang telah dikenal masyarakat. PATS menggunakan air sebagai media penyimpanan energi termal mempunyai kekurangan yaitu densitas energi yang rendah. Penelitian terakhir tentang aplikasi *paraffin wax* pada PATS sistem pasif telah dilakukan dengan tangki horizontal bervolume 31 liter. Perancangan ini dapat ditindaklanjuti menggunakan tangki yang volumenya lebih besar. Sebagai langkah awal pengembangan tersebut perlu dirancang alat penukar kalor baru. Tujuan perancangan ini adalah merancang alat penukar kalor pada tangki horisontal dengan kapasitas 60 liter yang berupa susunan kapsul pipa di dalam tangki. Perancangan alat penukar kalor dimulai dengan pemilihan bahan. Sebagai langkah awal, dilakukan perhitungan kebutuhan luas permukaan kapsul PCM dan kebutuhan jumlah kapsul PCM. Selanjutnya pemilihan ukuran kapsul PCM yang sesuai dengan volume tangki, luas permukaan perpindahan kalor yang dibutuhkan dan jumlah kapsul yang akan digunakan. Susunan kapsul PCM di dalam tangki disusun secara inline. Data awal yang digunakan adalah ketebalan kapsul PCM 1 mm, diameter luar kapsul PCM 1 inch, dan efisiensi kolektor 26%. Hasil perancangan alat penukar kalor menghasilkan kebutuhan luas permukaan kapsul PCM pada perhitungan menunjukkan hasil 0,076 m<sup>2</sup>. Jumlah kapsul PCM yang dibutuhkan pada tangki PATS kapasitas 60 liter menunjukkan hasil 24 buah kapsul PCM dengan menggunakan bahan pipa tembaga berdiameter 1 inch.

Kata kunci: PCM, *Paraffin Wax*, PATS, *Thermosyphon*, dan *inline*.

---

## 1. Pendahuluan

Saat ini sebagian besar manusia masih menggunakan sumber energi fosil. Energi ini terbatas ketersediaannya di bumi. Dalam jangka panjang penggunaan energi memerlukan pengelolaan dan pengaturan yang lebih baik dan terencana, agar kebutuhan energi tetap terpenuhi. Seiring dengan kebutuhan energi yang terus meningkat maka penggunaan minyak bumi harus dioptimalkan. Selain itu, perlu dioptimalkan pemakaian energi terbarukan untuk mensubstitusi minyak bumi.

Salah satu bentuk energi terbarukan adalah energi matahari. Indonesia yang merupakan daerah tropis mempunyai potensi energi matahari sangat besar dengan insolasi harian rata-rata 4,5-4,8 KWh/m<sup>2</sup> / hari (Yuliananda dkk, 2014). Energi matahari dapat

dimanfaatkan baik dari sisi listrik maupun termal. Sel surya adalah alat yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik secara langsung. Contoh penggunaan sel surya pada kehidupan sehari – hari antara lain untuk penerangan jalan, pompa air dan lain-lain. Bentuk pemanfaatan dari energi matahari selain *Solar Cell* adalah *Solar Water Heater* (pemanas air tenaga surya) (Zainuddin, 2014).

Pemanas air tenaga surya (PATS) adalah teknologi pemanasan air yang telah dikenal masyarakat. PATS menggunakan air sebagai media penyimpanan energi termal. Penggunaan air mempunyai keuntungan yaitu nilai konduktivitas termalnya tinggi dan murah. Namun demikian, PATS memiliki kekurangan yaitu densitas energinya rendah (Hasan,

1994). Rendahnya densitas energi berarti sistem PATS memerlukan volume penyimpanan energi yang besar. Konsekuensinya adalah sistem PATS cenderung memiliki konstruksi yang berat. Salah satu upaya untuk meningkatkan densitas energi pada PATS konvensional adalah dengan menggunakan *phase change material* (PCM) di dalam sistem PATS. Hal ini disebabkan PCM memiliki densitas energi yang tinggi, sehingga volume penyimpanan energi dapat diperkecil dan konstruksi akan cenderung ringan.

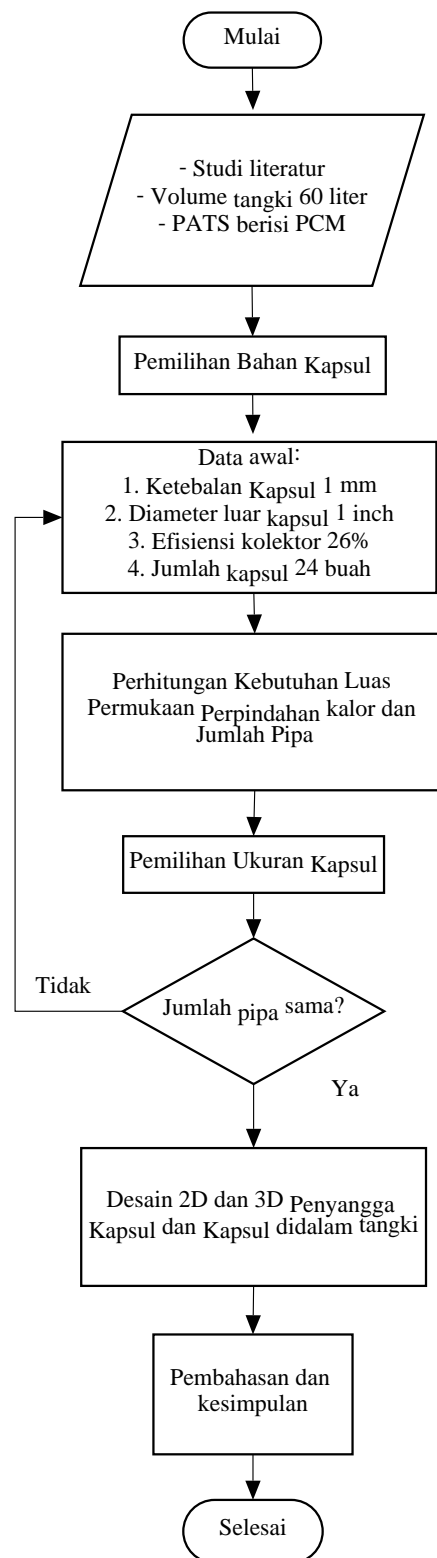
Penelitian yang berhubungan dengan PATS *thermosyphon* yang menggunakan PCM di dalam tangki telah dilakukan peneliti sebelumnya. PCM diwadahi dalam botol aluminium dan diletakkan di dalam tangki PATS vertikal (Canbazoglu dkk, 2005). Performansi PATS pasif antara tipe konvensional dan tanpa PCM telah dilakukan dan efisiensi PATS yang berisi PCM lebih baik (Amin dkk, 2013). Paraffin wax dimasukkan dalam kapsul silinder dan disusun di dalam tangki PATS secara horizontal (Nadjib dan Suhanan, 2013)

Penelitian terakhir tentang pemakaian PCM pada PATS *thermosyphon* menitikberatkan pada penyimpanan energi termal di dalam tangki. Penelitian tersebut menggunakan alat penukar kalor yang berupa susunan kapsul. Mengingat alat penukar kalor adalah alat yang sangat penting dalam penyimpanan energi termal maka desain termalnya perlu dilakukan.

## 2. Metode Perancangan

Metode perancangan terdapat beberapa tahapan dalam perancangan kapsul yaitu, menentukan bahan kapsul, menentukan ketebalan dan diameter kapsul, menghitung luas permukaan perpindahan kalor dan jumlah kapsul, pemilihan ukuran kapsul, menentukan tipe penyusunan kapsul di dalam tangki, dan menggambar desain alat penyangga kapsul dalam bentuk 2D dan 3D. Gambar 1 menunjukkan diagram alir

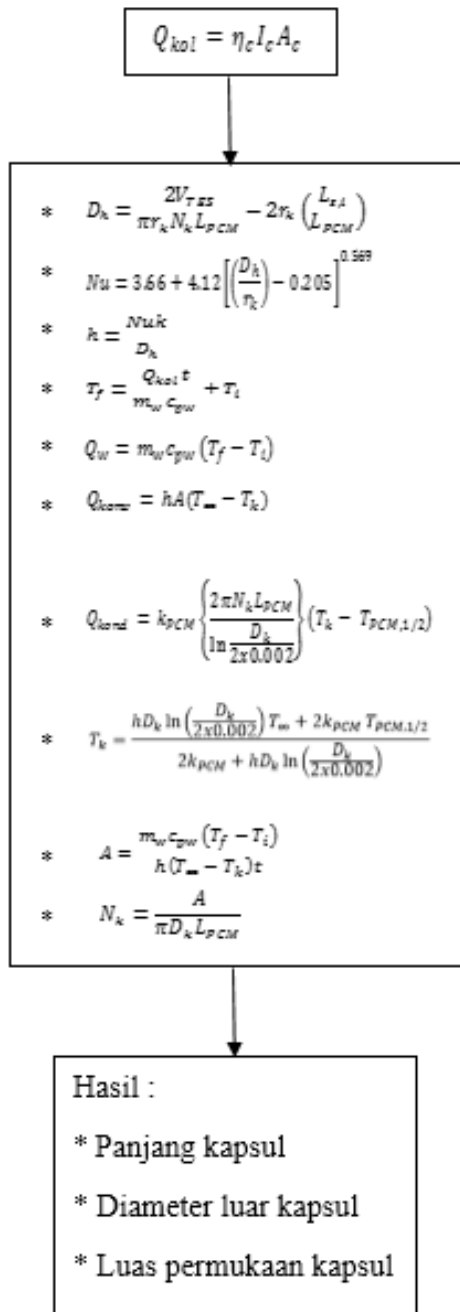
perancangan yang dilakukan dari awal sampai akhir.



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan

Adapun bagan alir perhitungan yang digunakan untuk mengetahui kebutuhan luas permukaan kapsul PCM dan

kebutuhan jumlah kapsul yang digunakan dalam perancangan ini



Gambar 2. Bagan alir perhitungan

### 3. Hasil Perancangan

#### a. 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 1 Sifat fisis beberapa material (Ibrahim dkk, 2017)

	Graphite foil	Aluminium	Stainless steel	Carbon steel	Copper
Thermal conductivity	150	200	20	30	350
Density	1000	2700	7800	7800	8000
Estimated volume specific cost	10,000	7000	20,000	15,000	40,000

#### b. 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 1 sebagai berikut.

$$Q_{kol} = \eta_c I_c A_c \dots\dots\dots(1)$$

Dimana

$\eta_c$  : efisiensi kolektor (asumsi) = 26% (Nadjib dan Suhanan, 2013)

$I_c$  : radiasi matahari = 600 W/m<sup>2</sup>

$A_c$  : luas kolektor = 1,9 m<sup>2</sup>

Sehingga didapatkan perhitungan dan hasil seperti berikut.

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

c. Untuk mencari diameter hidrolis ( $D_h$ ) dapat dicari menggunakan persamaan 2 berikut.

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

Dimana

$V_{TES}$  : volume tangki = 0,0601 m<sup>3</sup>

$N_k$  : 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

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

$$= 0,0597 \text{ m}$$

sebagai berikut.

### c. Bilangan Nusselt

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

$$Nu = 3,66 + 4,12 \left[ \left( \frac{D_h}{r_k} \right) - 0,205 \right]^{0,569} \dots\dots(3)$$

Dimana

$D_h$  : 0,0597 m

$r_k$  : 0,0127 m

Sehingga didapat hasil sebagai berikut.

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

### d. Konduktivitas Termal Air

Untuk perhitungan konduktivitas termal air (k) didapat dengan persamaan 4 berikut ini.

$$k = a + bT + cT^{1,5} + dT^2 + eT^{0,5} \dots\dots(4)$$

Dimana konstantanya adalah :

a : 0,5650285

b : 0,0026363895

c : - 0,00012516934

d : - 1,5154918 x 10<sup>-6</sup>

e : - 0,0009412945

Sehingga didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

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

### e. Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi

Untuk mencari koefisien perpindahan kalor konveksi (h) didapat dengan persamaan 5 sebagai berikut.

$$h = \frac{Nu k}{D_h} \dots\dots(5)$$

dimana

Nu : 13,34488

k : 0,637 W/m.C

$D_h$  : 0,0597 m

Sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

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

### f. Temperatur Air Panas Akhir

Temperatur air panas akhir dengan asumsi ( $Q_w = Q_{kol}$ ) dapat dicari dengan persamaan 6 berikut.

$$T_f = \frac{Q_{kol} t}{m_w c_{pw}} + T_i \dots\dots(6)$$

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.

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

### g. Energi Kalor Yang Terkandung Dalam Air Panas

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

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

#### h. Temperatur Permukaan Kapsul

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

$$T_k = \frac{hD_k \ln\left(\frac{D_k}{2 \times 0.002}\right) T_\infty + 2k_{PCM} T_{PCM,1/2}}{2k_{PCM} + hD_k \ln\left(\frac{D_k}{2 \times 0.002}\right)} \dots\dots(8)$$

dimana

$h$  : 142,527 W/m<sup>2</sup>.C

$D_k$  : diameter luar kapsul = 0,0254 m

$T_\infty$  : 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.

$$T_k = \frac{142,527 \frac{W}{m^2} \cdot C \times 0,0254 \text{ m} \times \ln\left(\frac{0,0254 \text{ m}}{2 \times 0,002}\right) 54,49^\circ\text{C} + 2 \times 0,2 \frac{W}{m} \cdot C \times 27^\circ\text{C}}{2 \times \frac{0,2W}{m} \cdot C + 142,527 \frac{W}{m^2} \cdot C \times 0,0254 \text{ m} \times \ln\left(\frac{0,0254 \text{ m}}{2 \times 0,002}\right)} = 46,067^\circ\text{C}$$

#### i. Kebutuhan Luas Permukaan Kapsul PCM

Kebutuhan luas kapsul dicari dengan ( $Q_w = Q_{konv}$ ), sedangkan t adalah lama waktu pemanasan sehingga diperoleh persamaan 9 yaitu luas kapsul:

$$A = \frac{m_w c_{pw} (T_f - T_i)}{h(T_\infty - T_k)t} \dots\dots(9)$$

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/m<sup>2</sup>.C

$T_\infty$  : temperatur air panas di dalam tangki = 54,49 °C

$T_k$  : temperatur permukaan kapsul = 27°C

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

Sehingga didapatkan hasil perhitungan kebutuhan luas kapsul sebagai berikut.

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

#### j. Jumlah Kapsul PCM Yang Perlu Dipasang

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

$$N_k = \frac{A}{\pi D_k L_{PCM}} \dots\dots(10)$$

dimana

$A$  : kebutuhan luas permukaan kapsul PCM = 0,076m<sup>2</sup>

$D_k$  : diameter luar kapsul = 0,0254 m

$L_{PCM}$  : panjang kapsul PCM = 1 m

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

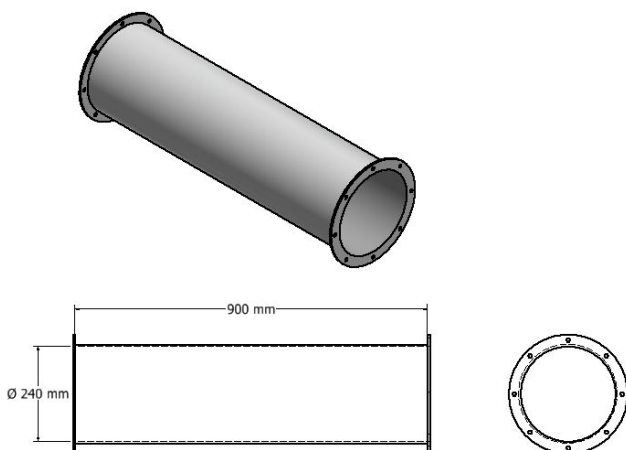
Dari hasil di atas dapat dibulatkan menjadi 24 buah kapsul PCM, menunjukkan bahwa jumlah pipa sama dengan asumsi yang diambil. Dengan demikian harga ini dijadikan dasar dalam mendesain alat penukar kalor.

#### k. 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.

##### Tangki Utama kapasitas 60 liter

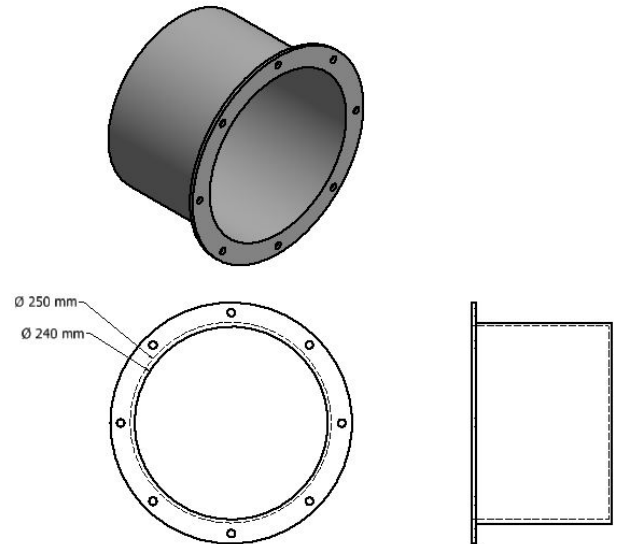
Hasil perancangan desain pada tangki utama yang memiliki tebal plat 2 mm dengan kapasitas 60 liter dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3. Tangki Utama 60 liter

##### Tutup Tangki

Perancangan desain pada tutup tangki dengan tebal plat 2 mm menghasilkan

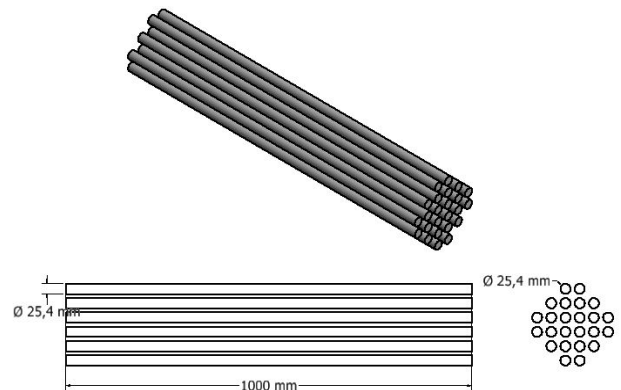


gambar sebagai mana disajikan pada Gambar 4.

Gambar 4. Tutup Tangki

##### Kapsul PCM

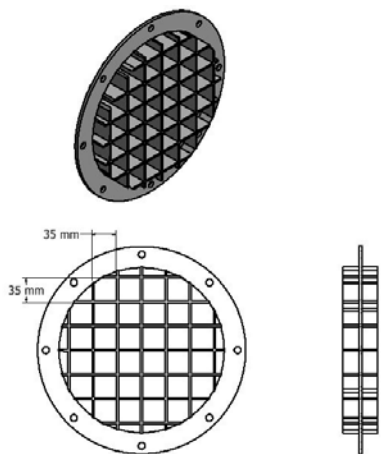
Perancangan kapsul PCM dengan tebal 1 mm mendapatkan hasil seperti gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5. Kapsul PCM

##### Penyangga PCM dalam Tangki

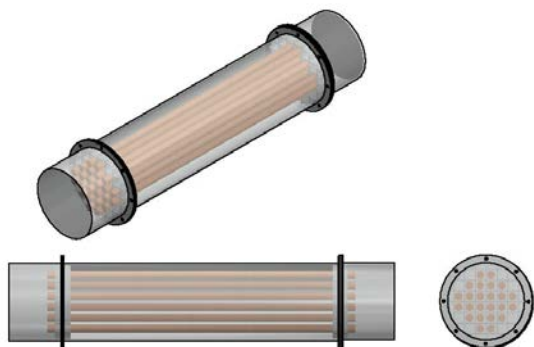
Perancangan penyangga disesuaikan dengan kebutuhan jumlah kapsul yang akan dipasangkan ke dalam tangki. Dan hasilnya seperti gambar 6 berikut.



Gambar 6. Penyangga PCM

Hasil assembling komponen tangki PATS

Hasil perancangan tangki PATS kapasitas 60 liter dengan semua komponen yang telah di gabungkan disajikan pada gambar 7.



Gambar 7. Assembling komponen PATS

#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan dari perancangan alat penukar kalor ini adalah sebagai berikut.

1. Hasil perancangan pipa kapsul PCM adalah:
  - a. Bahan : Pipa tembaga
  - b. Diameter luar : 1 inch

- c. Panjang : 100 cm
- d. Tebal Pipa : 1 mm

2. Kebutuhan luas kapsul pada perhitungan menunjukkan hasil  $0,076 \text{ m}^2$
3. Jumlah kapsul yang dibutuhkan adalah 24 buah
4. Susunan alat penukar kalor adalah in-line.

#### Daftar Pustaka

- Agyenim, F., Eames, P. dan Smyth, M., 2010<sup>a</sup>, *Heat Transfer Enhancement in Medium Temperature Thermal Energy Storage System using A Multitube Heat Transfer Array*, *Renewable Energy*, 198–207.
- Canbazoglu, S., Sahinaslan, A., Ekmekyapar, A., Aksoy, Y.G. dan Akarsu, F., 2005, *Enhancement of Solar Thermal Energy Storage Performance Using Sodium Thiosulfate Pentahydrate of a Conventional Solar Water-Heating System*, *Energy and Buildings*, 235 – 242.
- Dwivedi, V., 2009, *Thermal Modelling and Control of Domestic Hot Water Tank*, *University of Strathclyde, UK*.
- Esen, M., Durmus, A. dan Durmus, A., 1998, *Geometric Design of Solar-Aided Latent Heat Store Depending on Various Parameters and Phase Change Materials*, *Solar Energy*.
- Hasan, A., 1994. “Phase Change Material Energy Storage System Employing Palmatic Acid”, *Solar Energy*, pp.143–154.
- Ibrahim, N., Al-Sulaiman, F., Rahman, S., Yilbas Bekir, S., Sahin Ahmet, Z., 2017. *Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal*

*energy storage applications : A critical review.*

Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., & Dewitt, D. P. 2007. "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", John Wiley & Sons, Jefferson.

Jamar, A., Majid, Z., Azimi, W., Norhafana, M., & Razak, A., 2016. "*A review of water heating system for solar energy applications*", *International Communications in Heat and Mass Transfer*..

Nadjib, M., 2015. *Kajian Ekperimental Pemanas Air Tenaga Surya Domestik "Sibela"*. Laporan Penelitian HKI, Program Studi Teknik Mesin FT UMY, Yogyakarta.

Nadjib, M., dan Suhanan., 2013. "*Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal Proses Charging Pada Pemanas Air Tenaga Surya Thermosyphon Menggunakan Air dan Paraffin Wax Sebagai Material Penyimpan Kalor*", Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII. Bandar Lampung: SNTTM XII.

Zainuddin, 2014. "*Perancangan Pemanas Air Tenaga Surya Kapasitas 25 Liter*", Universitas Muhammadiyah Malang, Malang.