

KARAKTERISASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN UNJUK KERJA TANGKI PENYIMPAN ENERGI TERMAL STRATIFIKASI BERTINGKAT DENGAN VARIASI DEBIT ALIRAN

Bambang Hadi Priyanto¹, Joko Waluyo²

¹Pasca sarjana Teknik Mesin JTMI – FT UGM

bpriyanto@ymail.com

²Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

jokowaluyo@ugm.ac.id

Abstract

A stratified thermal energy storage tank is often used on a cogeneration power plant to store thermal energy which is produced by exhausted gas energy utilizations from gas turbines. This tank is used as a thermal loads controller on that cogeneration power plant operation by charging the energy when the loads become minimum, and discharging when it is maximum. In this research, a new model is proposed by developing a mechanistic model which is determined from a non-linear regression function using analyzing of temperature distributions to determine the characteristic parameters of stratified PET tank. The temperature distribution data are reached from experiments of variable of flowrates. Applying a mechanistic model, the characteristic formulation of the tank is developed. Experiment results show that the temperature distribution of water in the stratified thermal energy storage tank can be represented by Four Parameter Sigmoid (FPS) equation. This equation generally connects the distribution temperature with four others parameters i.e. mean temperatures of cold water, mean temperatures of hot water, a centre point and also slope gradients of thermo-cline(S). Using the FPS equation, the temperature distribution parameters of the thermal energy storage tank are mathematically differentiated. Those parameters include a limit point, thermocline thicknesses, cumulative storage energy (Q_{cum}), and characteristics of Half Figure of Merit ($FoM_{1/2}$). The results show that values of S are influenced by the flowrates while the thermocline thickness, the cumulative energy storage (Q_{cum}) and the ratio of Half Figure of Merit ($FoM_{1/2}$) are influenced by the value of S.

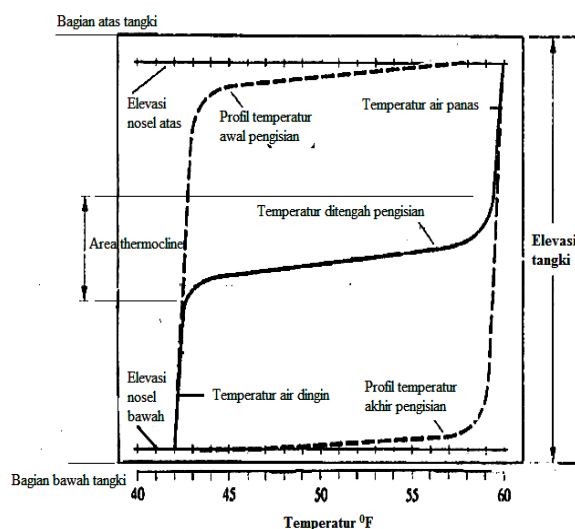
Keywords: *stratified thermal energy storage tank, temperature distribution, four parameter Sigmoid (FPS), thermocline, half figure of merit ($FoM_{1/2}$)*

Pendahuluan

Tangki penyimpanan energi termal (PET) stratifikasi merupakan salah satu jenis tangki yang paling sering digunakan untuk *cogeneration plant*. Kelebihan tangki ini adalah konstruksinya yang sederhana, bekerja dengan biaya operasi rendah dan mempunyai unjuk kerja yang relatif tinggi dibandingkan dengan tangki jenis lainnya (ASHRAE [2]). Tangki ini bekerja dengan menyimpan air dingin dan air panas di dalam suatu tangki silinder vertikal. Air dingin tersimpan di bagian bawah tangki sementara air panas terletak di bagian atas, sedangkan air campuran terletak di bagian tengahnya. Pada konstruksinya tangki ini

dilengkapi dengan dua buah nosel yang terletak di bagian bawah dan atas tangki (Electric Power Research Institute [5]). Pengoperasian tangki dilakukan dengan dua cara, yaitu siklus pengisian (*charging*) maupun siklus pelepasan (*discharging*) (Dincer I. dan Rosen M.A [4]). Pada pengoperasiannya sebagai tangki penyimpan air panas, dilakukan dengan mengalirkan air panas melalui nosel atas, sementara air dingin dikeluarkan lewat nosel bawah. Pada proses pelepasan energi termal dilakukan dengan mensirkulasikan air panas dari nosel atas, sementara air dingin dipompakan dari nosel bawah. Proses pengisian dan pelepasan tangki PET dilakukan saat tangki

dalam keadaan penuh air. Distribusi temperatur air merupakan hal penting untuk menentukan unjuk kerja tangki PET stratifikasi (Macki E. dan Reeves G [8]). Karena menyimpan air panas dan dingin di dalam suatu tangki, konstelasi distribusi suhu air saat pengisian mempunyai bentuk yang unik yaitu menyerupai kurva S seperti terlihat di Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi temperatur di tangki PET stratifikasi [11]

Satu sisi kurva S merupakan temperatur air dingin, sisi lainnya merupakan temperatur air panas, sedangkan sisi melengkungnya merupakan area termoklin temperatur air campuran. Berdasarkan sebaran temperatur air ini kemudian beberapa peneliti melakukan perhitungan unjuk kerja tangki PET stratifikasi. Parameter unjuk kerja yang penting adalah ketebalan termoklin, energi tersimpan kumulatif dan *Half-cycle Figure of Merit* ($FoM_{1/2}$) (Musser A dan Bahnfleth W.P [9]). Ketebalan termoklin merupakan tolok ukur seberapa baik mekanisme pemisahan di dalam tangki PET stratifikasi. Ketebalan termoklin ini digunakan untuk mengevaluasi mekanisme pemisahan air dari beberapa difuser yang dipasang di sisi masuk nosel (Bahnfleth W.P. dan Musser A [3]). Namun demikian metode yang digunakan untuk menentukan ketebalan termoklin tersebut menggunakan cara estimasi terhadap profil sebaran distribusi suhu. Estimasi dilakukan

dengan pendekatan ekstrapolasi ujung termoklin dari titik tengahnya (Yoo J, Wildin M.W. dan Truman C.R [12]), dengan garis linier (Homan K., Sohn dan Soo [6]) dan menggunakan temperatur cut-off non dimensional dari capturing distribusi temperatur (Musser A [10]). Metode estimasi ini mengakibatkan hasil yang kurang akurat terhadap perolehan parameternya, karena kesulitan menentukan batas termoklin (Karim M [7]). Metode ini juga sulit dilakukan, karena harus melakukan langkah capturing terhadap profil sebaran temperaturnya (Amin M.A.A. dan Waluyo Joko [1]). Parameter unjuk kerja penting lainnya adalah mengetahui besarnya energi tersimpan kumulatif selama pengoperasian tangki PET stratifikasi. Cara lama perhitungan energi tersimpan kumulatif dilakukan dengan hitungan diskret dengan membagi elevasi air di dalam tangki menjadi beberapa slab. Rumusan energi tersimpan kumulatif (Q_{cum}) dinyatakan sebagai berikut (Dincer I. dan Rosen M.A [4]).

$$Q_{cum} = M_n \cdot C_p \cdot \sum_{n=1}^N (T_r - T_n) \quad (1)$$

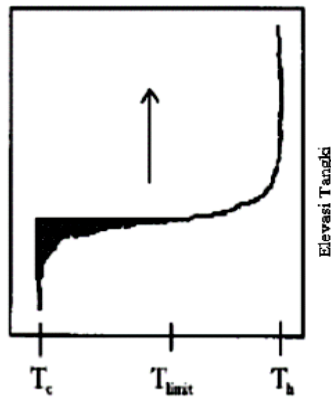
Dimana

- M_n : massa air setiap slab di dalam tangki (kg),
- C_p : Panas jenis air (kJ/kg.°C),
- T_r : Temperatur acuan (°C),
- T_n : Temperatur di setiap slab (°C),
- N : Jumlah slab.

Rumusan ini mempunyai kelemahan yaitu sulit aplikasi perhitungannya, karena harus membagi secara diskret virtual terhadap ketinggian air di dalam tangki PET stratifikasi. Selama ini belum ada formulasi matematis yang bisa digunakan secara komprehensif untuk menghitung energi tersimpan kumulatif di dalam tangki PET.

Parameter unjuk kerja lainnya yang digunakan untuk mengevaluasi pengoperasian tangki PET stratifikasi adalah *Half Figure of Merit* ($FoM_{1/2}$). Pada dasarnya $FoM_{1/2}$ ini adalah tolok ukur efisiensi termal tangki PET stratifikasi karena kehilangan rugi konduksi dan efek pencampuran [13]. Rugi konduksi dan efek pencampuran ini disebut sebagai

C_{Lost} . Harga C_{Lost} ini digambarkan sebagai daerah yang diarsir hitam di diagram skematik Gambar 2.



Gambar 2. Skematik C_{Lost} pengisian tangki [7]

Rumusan dari *Figure of Merit* setengah ($FoM_{1/2}$) dituliskan sebagai berikut :

$$FoM_{1/2} = \frac{1 - C_{Lost}}{C_{Max}} \quad (2)$$

C_{Lost} adalah hasil pengurangan kapasitas teoritis penyimpanan termal (C_{Max}) dengan kapasitas aktual penyimpanan termal (C_{Int}). Sekali lagi rumusan ini menyisakan kelemahan hasil yang kurang akurat karena harus melibatkan *capturing* distribusi temperatur yang harus terukur di lapangan. Rumusan ini perlu disempurnakan dengan formulasi matematis untuk memperoleh hitungan *Figure of Merit* Setengah secara eksak di dalam pengoperasian tangki PET stratifikasi.

Penelitian ini difokuskan untuk memperbaiki cara estimasi ini yaitu dengan membuat formulasi baru unjuk kerja tangki penyimpan termal stratifikasi. Formulasi tersebut dikembangkan dari model mekanistik yang disusun berdasarkan analisa distribusi temperatur. Dengan adanya formulasi matematis, diharapkan dapat membantu untuk pengkajian lebih lanjut guna meningkatkan efisiensi pada perancangan dan pengoperasian tangki PET stratifikasi. Secara kongkrit penelitian dilakukan dengan pengujian tangki stratifikasi sebagai penyimpan air panas.

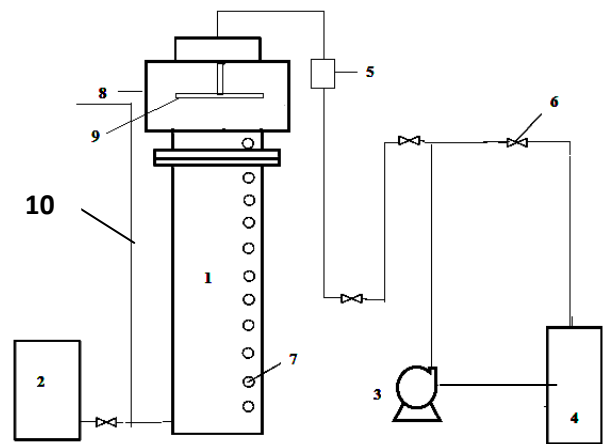
Distribusi temperatur hasil pengujian digunakan untuk formulasi penentuan parameter unjuk kerja dan karakterisasi pengujian dengan variasi debit aliran.

Metode Penelitian

Sekema alat penelitian tentang karakterisasi distribusi temperatur pada tangki PET stratifikasi diperlihatkan seperti pada (Gambar 3) :

Keterangan Gambar 3

1. Tangki PET bagian bawah (diameter dalam 200 mm)
2. Tangki Penampung air dingin
3. Pompa
4. Tangki Penampung Air Panas
5. *Flow Meter*
6. *Gate Valve*
7. *Thermocouple*
8. Tangki bagian atas (diameter dalam tangki (300 mm)
9. *Diffuser*
10. pipa keluarnya air dingin



Gambar 3. Skema alat pengujian

Langkah Penelitian

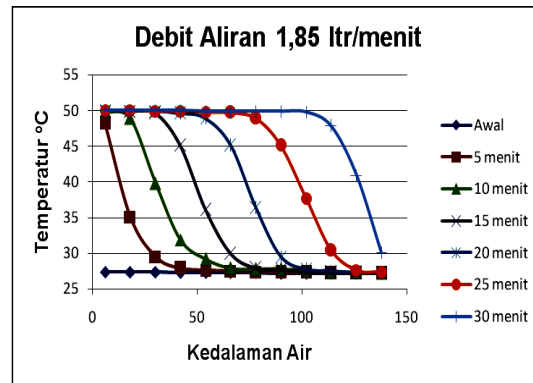
- a. Pembuatan alat uji tangki penyimpan energi termal stratifikasi dengan skema terlihat di Gambar 3.
- b. Melakukan pengujian dengan variasi tipe diffuser dan besarnya debit aliran pada pengisian air panas kedalam

- tangki PET stratifikasi. Pengisian dilakukan dengan mengalirkan air panas di nosel atas, sementara air dingin disirkulasikan dari nosel bawah.
- Pengambilan data distribusi temperatur.
 - Menentukan parameter di dalam profil distribusi temperatur.
 - Memilih model mekanistik yang mempunyai bentuk kurva S serta memenuhi kriteria parameter di dalam profil distribusi temperatur. Pemilihan ini dengan menggunakan analisa regresi non linier.
 - Melakukan evaluasi terhadap model mekanistik. Jika hasilnya tidak memenuhi kriteria, pemilihan model diulang kembali.
 - Jika evaluasi sudah terpenuhi, maka model tersebut dikembangkan untuk memformulasikan parameter unjuk kerja tangki PET stratifikasi.
 - Formulasi parameter unjuk kerja pengisian tangki, yang meliputi ketebalan termoklin, kapasitas, energi tersimpan kumulatif dan *Half Figure of Merit* ($FoM_{1/2}$)
 - Melakukan karakterisasi tangki PET stratifikasi pada variasi tipe diffuser.

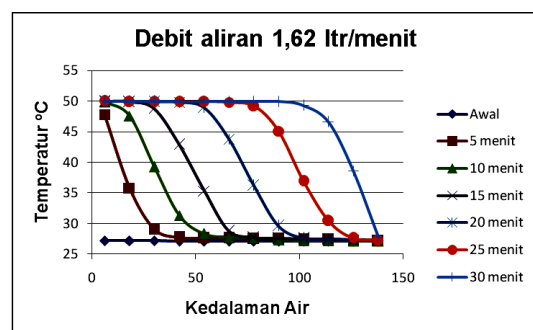
Hasil dan Pembahasan

Distribusi temperatur

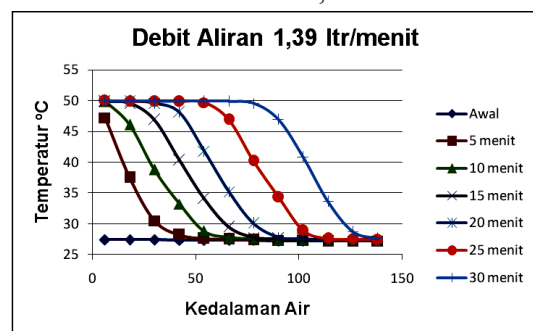
Data distribusi temperatur pada pengujian tangki PET stratifikasi dengan diameter difuser 18 cm dengan variasi debit aliran 1,39 ltr/menit, 162 ltr/menit dan 1,85 ltr/menit digunakan untuk pemilihan persamaan distribusi temperatur. Data yang digunakan adalah data temperatur pada siklus pengisian. Plotting data ditampilkan di Gambar 4.



Gambar 4. Plot distribusi temperatur untuk debit aliran 1,85 ltr/menit



Gambar 5. Plot distribusi temperatur untuk debit aliran 1,62 ltr/menit



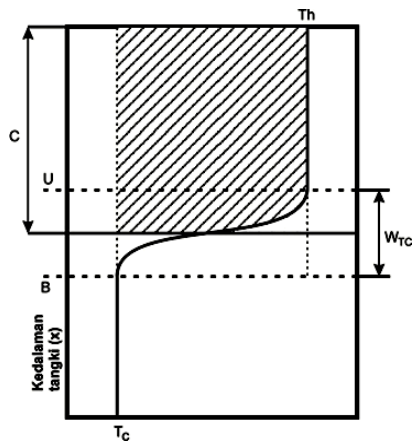
Gambar 6. Plot distribusi temperatur untuk debit aliran 1,39 ltr/menit

Persamaan Model Matematis

Sebelum memilih persamaan model matematis, terlebih dahulu dilakukan penentuan parameter yang mempengaruhi bentuk kurva S di dalam distribusi

temperatur. Parameterisasi kurva S seperti terlihat di Gambar 5.

Parameter kurva S di Gambar 7 dapat dijelaskan sebagai berikut. T_c adalah temperatur rata-rata air dingin dan T_h adalah temperatur rata-rata air panas. Termoklin dinyatakan dengan tiga hal, yaitu ketebalan, gradien kelengkungan dan posisi titik tengah termoklinnya.



Gambar 7. Kurva S distribusi temperatur

Ketebalan termoklin dinyatakan sebagai W_{TC} , gradien kelengkungan termoklin dinyatakan dengan S sedangkan posisi tengah termoklin adalah C yang menunjukkan kedalaman air panas. Ketebalan termoklin ini menunjukkan area campuran antara air dingin dan panas.

Persamaan matematis dipilih dengan kriteria mampu merepresentasikan profil kurva S yang berisikan 4 buah parameter T_h , T_c , C dan S_1 serta merupakan fungsi elevasi kedalaman air X . Dari hasil pemilihan dan pencocokan kurva diperoleh satu persamaan yang bisa memenuhi semua kriteria tersebut yaitu 'Four Parameters Sigmoid (FPS)'. Persamaan Four Parameters Sigmoid (FPS) dituliskan sebagai berikut :

$$T = T_c + \frac{T_h - T_c}{1 + e^{(C-X)/S_1}} \quad (3)$$

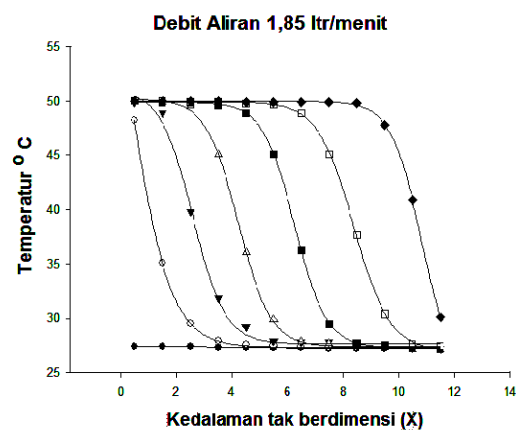
Persamaan FPS menghubungkan distribusi temperatur dengan 4 parameter T_c , T_h , C and S_1 , dan variabel elevasi air (X). Parameter T_c dan T_h adalah temperatur rata-rata air dingin dan panas ($^{\circ}C$). Parameter C adalah angka tak berdimensi titik tengah dari ketebalan termoklin, sedangkan S_1 adalah gradien kelengkungan dari termoklin. Sedangkan variabel X menyatakan parameter kedalaman air tak berdimensi

$$X = \frac{x \cdot N}{H} \quad (4)$$

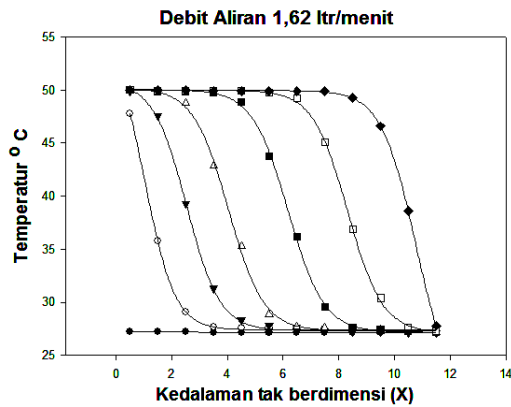
Dimana, x : elevasi di titik tengah slab (m)
 H : kedalaman efektif air (m)
 N : jumlah slab di dalam tangki

Evaluasi Persamaan Model Matematis

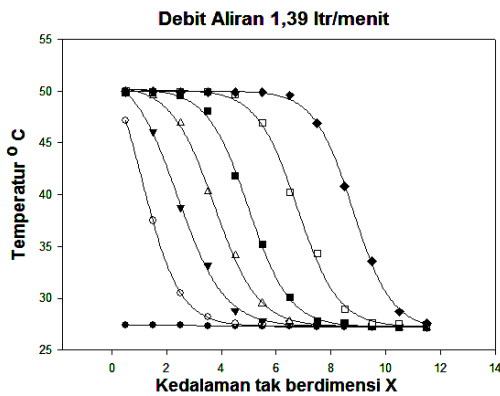
Plot distribusi temperatur di Gambar 4 digunakan untuk menentukan harga T_c , T_h , C dan S dengan metode pencocokan kurva (curve fitting). Hasil pencocokan kurva FPS terhadap sebaran data disajikan di Gambar 8,9 dan 10. Perolehan harga- harga T_c , T_h , C, R^2 dan S disajikan di Tabel 1,2 dan 3.



Gambar 8. . Pencocokan kurva FPS ke data distribusi temperatur debit aliran 1,85 ltr/menit



Gambar 9. . Pencocokan kurva FPS ke data distribusi temperatur debit aliran 1,62 ltr/menit



Gambar 10. . Pencocokan kurva FPS ke data distribusi temperatur debit aliran 1,39 ltr/menit

Di Tabel 1,2 dan 3 tersebut juga disajikan perolehan harga koefisien determinasi (R^2) untuk mengevaluasi kecocokan kurva. Terlihat di Tabel 1, bahwa semua pola distribusi mampu didekati dengan persamaan FPS kecuali pada kondisi awal pengisian. Kondisi awal pengisian (menit ke 0) dinyatakan tidak konvergen pada regresi non linier dengan menggunakan FPS. Hal ini dapat difahami karena temperatur awal pengisian masih seragam pada temperatur air dingin, sehingga distribusi temperaturnya masih membentuk garis datar yang tidak membentuk pola kurva S. Sedangkan pada data lainnya,

kurva FPS mempunyai kesesuaian yang sangat bagus terhadap sebaran datanya.

Tabel 1. Evaluasi pendekatan kurva dengan software untuk debit aliran 1,85 ltr/menit menggunakan fungsi FPS

Waktu	T_c (°C)	T_h (°C)	C	S	R^2	
Menit ke	0	27,2	27,4	4,51	2,12	0,741
	5	27,2	48,2	0,27	0,73	0,877
	10	27,2	49,9	2,60	-0,58	0,997
	15	27,2	49,9	4,23	-0,57	0,999
	20	27,2	50,0	6,26	-0,58	0,999
	25	27,4	50,0	8,39	-0,65	0,999
	30	30,1	50,0	10,84	-0,55	0,999

Tabel 2. Evaluasi pendekatan kurva dengan software untuk debit aliran 1,65 ltr/menit menggunakan fungsi FPS

Waktu	T_c (°C)	T_h (°C)	C	S	R^2	
Menit ke	0	27,1	27,2	3,01	0,01	0,722
	5	27,1	47,8	1,06	0,53	0,982
	10	27,1	49,9	2,54	-0,60	0,997
	15	27,2	49,9	4,04	-0,63	0,999
	20	27,2	50,0	6,19	-0,64	0,999
	25	27,3	50,0	8,32	-0,62	0,999
	30	27,8	50,0	10,77	-0,62	0,999

Tabel 3. Evaluasi pendekatan kurva dengan software untuk debit aliran 1,39 ltr/menit menggunakan fungsi FPS

Waktu	T_c (°C)	T_h (°C)	C	S	R^2	
Menit ke	0	27,1	27,2	4,51	2,12	0,711
	5	27,1	47,8	1,11	0,68	0,999
	10	27,1	49,9	2,42	-0,85	0,999
	15	27,2	49,9	3,75	-0,78	0,999
	20	27,2	50,0	4,99	-0,75	0,999
	25	27,3	50,0	6,79	-0,74	0,999
	30	27,8	50,0	8,8	-0,71	0,999

Dari Tabel 1,2 dan 3 terlihat bahwa semua harga R² lebih dari 0.99, hal ini menunjukkan bahwa persamaan FPS mampu melakukan pencocokan kurva sebaran data dengan sangat baik. Persamaan FPS mampu merepresentasikan kurva S distribusi temperatur selama pengisian tangki PET stratifikasi.

Formulasi Parameter Unjuk Kerja Tangki PET

Persamaan FPS selanjutnya bisa digunakan untuk menjabarkan beberapa parameter unjuk kerja tangki PET stratifikasi antara lain ketebalan termoklin, energi tersimpan kumulatif, dan *Half Figure of Merit* (FoM_{1/2}).

Ketebalan Termoklin (W_{TC})

Ketebalan termoklin dihitung sebagai selisih titik batas atas (U) dan titik batas bawah (B). Untuk melakukan kajian ini rumusan temperatur *cut – off* ($\theta = T - T_c / T_h - T_c$) [10] digunakan untuk menunjukkan ujung profil termoklin.

Titik batas bawah (B) bisa diformulasikan dengan rumus berikut.

$$B = C - \left[\ln \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \right] \cdot S_1 \tag{5}$$

Sementara rumusan titik batas atas (U) termoklin dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$U = C + \left[\ln \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \right] \cdot S_1 \tag{6}$$

Dengan demikian ketebalan termoklin (W_{TC}) bisa dirumuskan sebagai dua kali setengah ketebalan termoklin.

$$W_{TC} = 2 \cdot \left\{ \left[\ln \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \right] \cdot S_1 \right\} \tag{7}$$

Energi Tersimpan Kumulatif (Q_{cum})

Energi tersimpan kumulatif dilakukan dengan menyelesaikan integral persamaan kontinyu turunan dari persamaan FPS. Hal ini dilakukan dengan mensubstitusikan

$$M = \rho \cdot A \cdot \int dX \text{ dan } T = T_c + \frac{T_h - T_c}{1 + e^{(C-X)/S_1}} \text{ ke}$$

persamaan (1).Selanjutnya diperoleh formulasi Q_{cum} sebagai berikut.

$$Q_{cum} = \rho \cdot A \cdot c_p \cdot (T_h - T_c) \cdot S_1 \left[\ln \left(\frac{e^{C/S_1} + e^{H/S_1}}{e^{C/S_1} + 1} \right) \right] \tag{8}$$

Half Figure of Merit (FoM_{1/2})

Formulasi *Half Figure of Merit* (FoM_{1/2}) diperoleh dari penyelesaian integral dari persamaan (2 dan11). Dengan persamaan FPS, formulasi C_{Max} didapatkan sebagai berikut.

$$C_{Max} = \rho \cdot A \cdot C_p \cdot C \cdot (T_h - T_c) \tag{9}$$

Formulasi C_{Lost} dilakukan dengan menyelesaikan integral persamaan kontinyu

$$C_{Lost} = A \cdot \rho \cdot C_p \cdot \int_B^U (T_x - T_c) \cdot dX \tag{10}$$

dan substitusi $T = T_c + \frac{T_h - T_c}{1 + e^{(C-X)/S_1}} \cdot$

Selanjutnyadiperolehformulasi C_{Lost} sebagai berikut.

$$C_{Lost} = \rho \cdot A \cdot c_p \cdot (T_h - T_c) \cdot S_1 \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot e^{C \cdot S_1}}{e^{C \cdot S_1} + e^{U \cdot S_1}} \right) \tag{11}$$

Dan C_{int} di formulasikan

$$C_{Int} = \rho \cdot A \cdot C_p \cdot \int_0^C (T_r - T_c) dx$$

Hasil Integralnya adalah :

$$C_{Int} = \rho \cdot A \cdot C_p \cdot (T_h - T_c) \cdot S_1 \left[\ln \left(\frac{2 \cdot e^{C/S_1}}{e^{C/S_1} + 1} \right) \right] \tag{12}$$

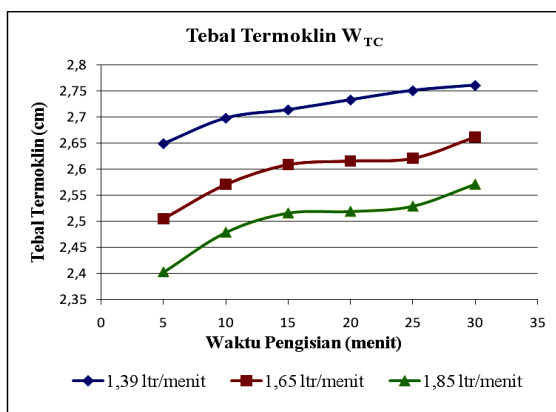
Karakterisasi Pengujian Tangki PET

Hasil formulasi unjuk kerja Tangki PET stratifikasi selanjutnya digunakan untuk mengkarakterisasi pengujian tangki PET

dengan variasi debit aliran 1,39 ltr/menit, 1,62 ltr/menit dan 1,85 ltr/menit. Karakterisasi dilakukan untuk mengkaji perolehan ketebalan termoklin, energi tersimpan kumulatif dan harga *Half Figure of Merit*.

(i). Ketebalan termoklin (W_{TC})

Hasil perhitungan ketebalan termoklin (W_{TC}) pada variasi debit aliran ditunjukkan di Gambar 11. Hasil ini diperoleh dari persamaan (7).



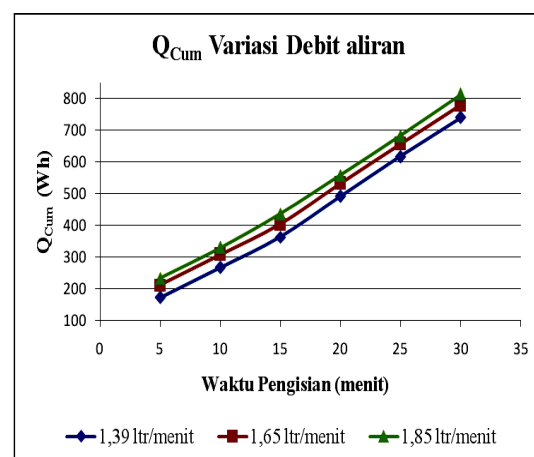
Gambar 11. Perbandingan ketebalan termoklin pada variasi debit aliran

Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa ketebalan termoklin yang terjadi dengan menggunakan debit aliran 1,85 ltr/menit mempunyai ketebalan lebih tipis daripada debit aliran (1,65 dan 1,39) ltr/menit. Hal ini disebabkan karena pengisian tangki PET stratifikasi dengan menggunakan debit aliran 1,85 ltr/menit memiliki karakteristik aliran yang lebih cepat dalam penyebaran distribusi temperatur sehingga terbentuk profil termoklin yang lebih tipis. Sedangkan pada pengisian dengan menggunakan debit (1,65 dan 1,39) ltr/menit memiliki karakteristik aliran yang cenderung lambat sehingga kemungkinan kalor hilang lebih besar sehingga dapat merusak lapisan termoklin. Dari Gambar 11 juga terlihat

bahwa pada ketiga debit aliran mempunyai harga ketebalan termoklin yang membesar seiring dengan bertambahnya waktu pengisian tangki PET stratifikasi. Hal ini menunjukkan area pencampuran air panas dan air dingin akan membesar selama proses pengisian tangki PET stratifikasi.

(ii). Energi Tersimpan Kumulatif (Q_{cum})

Hasil perolehan hitungan energi tersimpan kumulatif (Q_{cum}) pada pengisian tangki PET dengan variasi difuser ditunjukkan di Gambar 12. Hasil perhitungan energi tersimpan kumulatif (Q_{cum}) diperoleh dari persamaan (6). Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai Q_{cum} pada debit 1,85 ltr/menit lebih besar dibanding harga Q_{cum} pada debit (1,65 dan 1,39) ltr/menit. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengisian tangki PET stratifikasi dengan debit 1,85 ltr/menit mampu menyimpan energi panas yang lebih besar daripada debit (1,65 dan 1,39) ltr/menit.



Gambar 12. Grafik Q_{cum} pada variasi debit aliran

(iii). Half Figure of Merit ($FoM_{1/2}$)

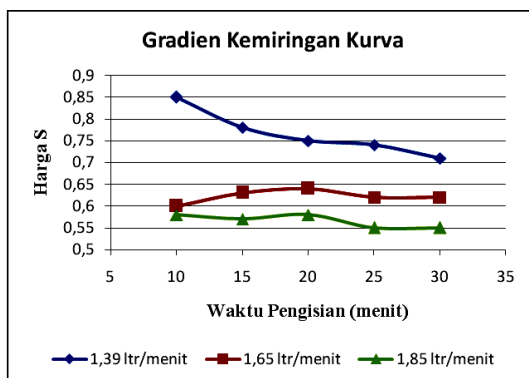
Hasil perhitungan *Half Figure of Merit* ($FoM_{1/2}$) pada variasi debit aliran ditunjukkan pada Tabel 4, yang diperoleh dari hitungan persamaan (11) dan (12). Dari Tabel 4 didapatkan bahwa nilai *Half Figure of Merit* ($FoM_{1/2}$) pada debit 1,85 ltr/menit lebih besar daripada nilai rasio *Half Figure of Merit* dari pada debit (1,65 dan 1,39) ltr/menit. Hal ini menunjukkan bahwa tangki PET stratifikasi dengan debit 1,85 ltr/menit memiliki unjuk kerja termal yang lebih baik daripada variasi debit (1,65 dan 1,39) ltr/menit.

Tabel 4. *Half Figure of Merit* ($FoM_{1/2}$) pada variasi debit aliran

Variasi flow rate	$FoM_{1/2}$
1,39 ltr/menit	0,967 ± 0,027
1,65 ltr/menit	0,970 ± 0,025
1,85 ltr/menit	0,982 ± 0,022

(iv). Harga gradien kemiringan kurva

Harga gradien kemiringan kurva (S) dapat memperlihatkan karakteristik dari kurva sebaran distribusi temperatur.



Gambar 13 Gradien kemiringan kurva (S)

Bila dibandingkan dari ketiga debit aliran maka dapat diperlihatkan seperti pada Gambar 13. Dari gambar tersebut terlihat bahwa debit aliran 1,85 ltr/menit mempunyai nilai S (gradien kurva) yang kecil sehingga kurvanya akan landai artinya ketebalan termoklinnya juga tipis.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal berikut.

a. Distribusi temperatur pada tangki PET stratifikasi dapat direpresentasikan dengan persamaan *Four Parameters Sigmoid* (FPS). Persamaan tersebut menghubungkan 4 parameter yaitu temperatur air panas (T_h), temperatur air dingin (T_c), titik tengah termoklin tak berdimensi (C), dan kelengkungan gradien termoklin (S) dan fungsi kedalaman air takberdimensi.

b. Persamaan *Four Parameters Sigmoid* (FPS) dapat dijabarkan untuk memformulasikan secara eksak beberapa parameter unjuk kerja tangki PET stratifikasi, yaitu ketebalan termoklin (W_{TC}), energi tersimpan kumulatif (Q_{cum}) dan *Half Figure of Merit* ($FoM_{1/2}$).

c. Karakterisasi pengujian tangki PET stratifikasi dengan variasi debit aliran didapatkan hasil bahwa debit 1,85 ltr/menit mempunyai harga parameter kelengkungan gradien termoklin yang lebih besar daripada debit (1,65 dan 1,39) ltr/menit. Dengan demikian debit 1,85 ltr/menit mempunyai unjuk kerja yang lebih bagus, karena mempunyai ketebalan termoklin yang lebih tipis, mempunyai kapasitas energi tersimpan kumulatif lebih besar dan mempunyai efisiensi termal *Half Figure of Merit* yang lebih besar.

d. Besarnya gradien kemiringan kurva akan mempengaruhi besarnya ketebalan termoklin (W_{TC}), bila harga S kecil maka kurvanya landai sehingga besarnya termoklin akan kecil (tipis).

Daftar Pustaka

- [1]. Amin M.A.A. dan Waluyo Joko, "Thermocline Thickness Evaluation on Stratified Thermal Energy Storage Tank of Co-generated District Cooling Plant," *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 28-33, 2010.
- [2]. ASHRAE, *Handbooks HVAC Applications*, 2003.
- [3]. Bahnfleth W.P. dan Musser A., "Thermal Performance of a Full Scale Stratified Chilled Water Storage Tank," *ASHRAE Transaction*, vol. 104(2), pp. 377-388, 1998.
- [4]. Dincer I. dan Rosen M.A., *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, John Wiley and Sons Ltd., 2001.
- [5]. *Electric Power Research Institute, Commercial Cool Storage Design Guide* Springer-Verlag, 1987.
- [6]. Homan K., Sohn dan Soo, "Thermal Performance of Stratified Chilled Water Storage Tanks " *HVAC&R Research*, vol. 2, pp. 158-170, 1996.
- [7]. Karim M., "Performance Evaluation of A Stratified Chilled-Water Thermal Storage System," *World Academy of Science Engineering and Technology*, vol. 53, pp. 328-334, 2009.
- [8]. Macki E. dan Reeves G., "*Stratified Chilled Water Storage Design Guide*," *Electric Power Research Institute*, 1988.
- [9]. Musser A dan Bahnfleth W.P., "Field-Measured Performance of Four Full-Scale Cylindrical Stratified Chilled-Water Thermal Storage Tanks," *ASHRAE Transaction* vol. 105 (2), pp. 218-230, 1998.
- [10]. Musser A, "Field Measured and Modelled Performance of Full Scale Cylindrical Stratified Chilled Water Storage Tanks," in *Graduate School PhD Thesis: The Pennsylvania State University*, 1998.
- [11]. Wang S.K., *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, 2nd ed. Mc. Graw Hill Company, 2000.
- [12]. Yoo J, Wildin M.W. dan Truman C.R., "Initial Formation of Thermocline in Stratified Thermal Storage Tanks," *ASHRAE Transaction*, vol. 92(2A), pp. 280-292, 1986.
- [13]. Zurigat Y.H. dan Ghajar A.J., *Heat Transfer and Stratification in Sensible Heat Storage System, in Thermal energy Storage System and Applications*, 1st ed.: Dincer dan M Rosen: John Willey and Sons, 2002.