

Karakterisasi Distribusi Suhu Tangki Penyimpan Termal Stratifikasi dengan Persamaan *Sigmoid Dose Response*

Joko Waluyo

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik –Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta-55281.

waluyo.joko@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan tangki penyimpanan termal stratifikasi sangat berkembang beberapa dekade terakhir, karena kemampuannya untuk menyimpan energi saat beban termal rendah dan menyalurkannya pada saat beban puncak. Tangki penyimpanan termal stratifikasi ini terangkai dengan instalasi *cogeneration*, sehingga beroperasi ekonomis untuk menyimpan energi dari pemanfaatan panas terbuang dari cerobong turbin gas. Namun demikian unjuk kerja tangki belum terformulasikan, karena tidak ada representasi matematis distribusi suhu air di dalam tangki. Penelitian ini ditujukan untuk melakukan karakterisasi distribusi suhu di dalam tangki penyimpanan termal stratifikasi. Karakterisasi dilakukan dengan analisa regresi non linier untuk memilih suatu persamaan matematis yang sesuai dengan distribusi suhu tangki penyimpanan termal stratifikasi. Validasi persamaan menggunakan data operasi suatu tangki penyimpanan termal stratifikasi di instalasi *cogeneration* yang bekerja sebagai *district cooling*. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa distribusi suhu tangki penyimpanan termal stratifikasi mempunyai karakteristik sesuai dengan sebuah persamaan matematis yang disebut *Sigmoid Dose Response* (SDR). Persamaan SDR ini merepresentasikan distribusi suhu air di dalam tangki penyimpanan termal stratifikasi sebagai fungsi suhu air dingin, suhu air panas dan gradien suhu di area termoklin. Dari hasil regresi non linear didapatkan kesesuaian pola persamaan SDR dengan koefisien determinasi lebih dari 0.9 terhadap sebaran data. Persamaan SDR ini bisa dijabarkan untuk memformulasikan parameter batas bawah, batas atas dan ketebalan termoklin. Persamaan SDR ini selanjutnya bisa dikembangkan untuk pembuatan model simulasi untuk memprediksikan perilaku dinamis serta mengoptimisasi perancangan dan pengoperasian tangki penyimpanan termal stratifikasi.

Keywords : karakterisasi distribusi suhu, tangki penyimpanan termal stratifikasi, Sigmoid Dose Response

1. Pendahuluan

Kemajuan teknologi beberapa dekade terakhir telah menggiring pengembangan instalasi *cogeneration*, yang mampu menghasilkan listrik dan energi pendingin atau pemanas secara bersamaan. Pada aplikasi *cogeneration* di *district cooling*, energi pendingin dihasilkan oleh mesin pendingin pelayanan uap yang dihasilkan oleh HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) dengan memanfaatkan panas terbuang dari cerobong turbin gas [1]. Dengan demikian demikian dapat diperoleh energi pendingin yang murah di *district cooling*, karena memanfaatkan panas terbuang dari turbin gas.

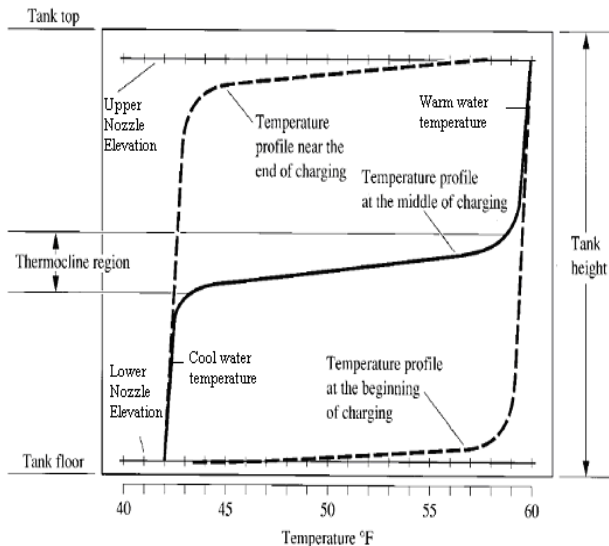
Energi pendingin ini dimanfaatkan untuk pengkondisi udara fasilitas perkantoran, universitas, maupun tempat hunian. Beban pendinginan fasilitas perkantoran ini umumnya mencapai beban puncak di siang hari, dan sebaliknya menurun drastis saat malam hari. Untuk mengoptimalkan pengaturan beban, maka diperlukan suatu tangki yang mampu menyimpan energi pendingin di malam hari agar bisa digunakan di siang harinya. Untuk keperluan ini, tangki penyimpanan termal stratifikasi sangat lazim

digunakan karena mempunyai kelebihan konstruksi yang sederhana namun mempunyai unjuk kerja yang handal [2].

Konsep kerja tangki penyimpanan termal stratifikasi adalah dengan menyimpan air dingin dan panas tanpa sekat di dalam tangki. Aliran air panas dilewatkan di nosel bagian atas, sedangkan air dingin disirkulasikan melalui di nosel bagian bawah. Dengan prinsip kerja seperti ini maka unjuk kerja tangki penyimpanan termal stratifikasi sangat terpengaruh oleh mekanisme pemisahan antara air dingin di bagian bawah dan air panas di bagian atas tangki [3]. Konstelasi distribusi suhu air di dalam tangki ini menyerupai kurva S, yang sangat berpengaruh untuk penentuan unjuk kerja tangki [4]. Ilustrasi konstelasi distribusi suhu menyerupai kurva S disajikan di Gambar 1. Terlihat di Gambar 4, bahwa air dingin berada di bagian bawah tangki dan air panas di bagian atas sedangkan area pencampuran disebut termoklin terletak di tengah.

Beberapa konsep parameter unjuk kerja tangki penyimpanan termal stratifikasi sudah dikembangkan antara lain berupa ketentuan ketebalan termoklin, Figure of Merit dan efisiensi thermal [5]. Parameter

unjuk kerja tersebut ditentukan dari distribusi suhu air yang berada di dalam tangki. Penentuan unjuk kerja yang tersedia saat ini dilakukan dengan melakukan *capturing* suhu yang didapatkan dari pencatatan langsung untuk mendapatkan profil distribusi suhu [6]. Dengan cara ini sulit didapatkan hitungan unjuk kerja yang akurat karena kesulitan estimasi terhadap profil distribusi suhu. Dengan kata lain, karena belum adanya representasi matematis distribusi suhu air di dalam tangki menyebabkan terkendalanya formulasi unjuk kerja tangki penyimpanan termal stratifikasi.



Gambar 1. Kurva S distribusi suhu [4]

Penelitian ini ditujukan untuk melakukan karakterisasi terhadap distribusi suhu air di dalam tangki penyimpanan termal stratifikasi. Karakterisasi dilakukan dengan mendefinisikan profil distribusi suhu dan dilanjutkan dengan pencarian persamaan matematis yang mampu merepresentasikan profilnya. Data observasi untuk penelitian ini menggunakan data pengukuran suhu suatu tangki penyimpanan termal stratifikasi yang dioperasikan di *district cooling*.

2. Metodologi

Beberapa langkah yang digunakan untuk karakterisasi distribusi suhu di dalam penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Pengambilan data observasi distribusi suhu dari suatu tangki penyimpanan termal stratifikasi.
2. Pendefinisian profil distribusi suhu di dalam tangki penyimpanan termal stratifikasi.
3. Pemilihan persamaan matematis yang mampu merepresentasikan profil distribusi suhu. Hal ini dilakukan dengan melakukan regresi non linear terhadap sebaran distribusi suhu data observasi.

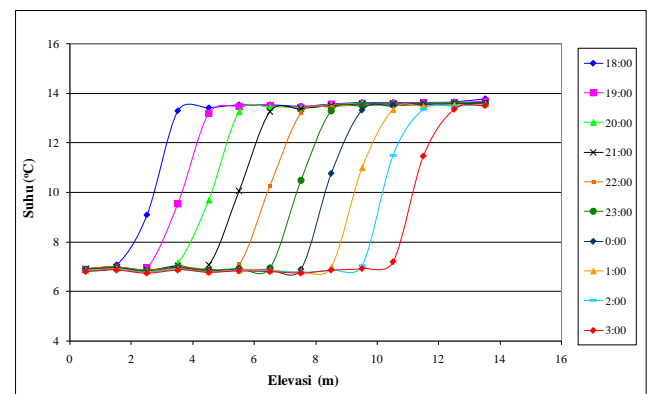
4. Penjelasan arti fisis persamaan matematis untuk distribusi suhu air di dalam tangki penyimpanan termal stratifikasi.
5. Formulasi lanjut parameter distribusi suhu.

2.1. Data observasi

Data observasi penelitian ini menggunakan data akuisisi distribusi suhu pada proses pengisian tangki penyimpanan termal stratifikasi di *district cooling*. Tangki ini berkapasitas 10.000 RTH, berbentuk silinder vertical dengan diameter 22,5 m dengan ketinggian 15,5 m. Tangki ini mempunyai kapasitas menyimpan air 5.400 m³. Nosel bawah terbuat dari pipa berdiameter 20 inci yang terpasang di elevasi 1,824 m di badan tangki, sedangkan nosel atas terbuat dari pipa 12 inci terpasang di elevasi 12,3 m, sedangkan permukaan tumpah dijaga pada elevasi 14,025 m. Keseluruhan badan tangki diisolasi dengan polysterene ketebalan 300 mm.

3 buah data yang digunakan untuk karakterisasi di penelitian diperoleh saat pengisian tangki tertanggal 9 September, 11 September dan 19 September tahun 2008. Pengisian tangki dilakukan memasukkan air bersuhu 6,5°C dengan debit aliran sebesar 393 m³/jam melalui nosel bawah, sementara air panas dikeluarkan dari nosel atas tangki tersebut. Data observasi diperoleh dari pencatatan 14 buah sensor suhu yang dipasangkan di dalam tangki dengan interval 1 meter, dengan posisi terbawah sensor terletak di elevasi 0,51 m.

Salah satu data observasi disajikan di gambar 1 berikut. Gambar 2 memperlihatkan data akuisisi distribusi suhu saat pengisian tangki yang dimulai dari pukul 18.00 sampai dengan 3.00. Terlihat di Gambar 1, bahwa distribusi suhu bergeser naik secara periodis selama durasi pengisian.



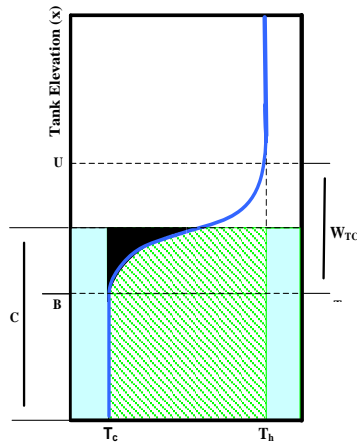
Gambar 2. Data observasi - distribusi suhu

2.2. Parameter distribusi suhu

Seperti dijelaskan di Gambar 1 bahwa profil distribusi suhu air di dalam tangki menyerupai kurva S. Sisi datar bawah merupakan air dingin, sisi datar atas merupakan air panas sedangkan di area lengkungan

disebut sebagai termoklin yang merupakan campuran air panas dan air dingin.

Untuk melakukan karakterisasi terhadap distribusi suhu tersebut, dilakukan pendefinisian berbagai parameter kurva S. Ilustrasi penentuan parameter kurva S disajikan di Gambar 3.



Gambar 3. Parameter di dalam profile kurva S [7]

Penentuan parameter kurva S dengan membuat asumsi kaki-kaki kurva S merupakan garis lurus. Dengan asumsi ini, air dingin dan air panas berada dalam keseimbangan suhu rata-rata. Asumsi ini menyatakan tidak adanya rugi panas melewati dinding tangki.

Parameter profil distribusi suhu adalah sebagai berikut :

- a. Suhu rata-rata air dingin adalah T_c .
- b. Suhu rata-rata air panas adalah T_h .
- c. Termoklin didefinisikan dengan hal berikut
 - Posisi tengah termoklin adalah C.
 - Gradien kelengkungan termoklin adalah S.
- d. Ketebalan termoklin adalah WTC.
- e. Batas bawah termoklin adalah B, yang menunjukkan menunjukkan posisi ujung bawah termoklin.
- f. Batas atas termoklin adalah U, yang menunjukkan posisi ujung atas termoklin.

Dari Gambar 3, dapat dijelaskan bahwa profil distribusi suhu merupakan fungsi 4 parameter yaitu T_c , T_h , C dan S, serta merupakan fungsi dari variabel elevasi tangki (x). Mengacu kepada hal tersebut, maka fungsi distribusi suhu dapat dituliskan sebagai berikut.

$$T(x) = f(T_c, T_h, C, S, x) \tag{1}$$

Karakterisasi selanjutnya dilakukan untuk memilih suatu persamaan matematis yang mampu merepresentasikan profil distribusi suhu. Kriteria untuk memilih persamaan matematis tersebut ada 2 hal yaitu mempunyai profil yang berbentuk kurva S, berisikan parameter T_c , T_h , C, S dan merupakan fungsi variabel x. Tahap pemilihan ini memerlukan analisa regresi non linear terhadap sebaran suhu di data observasi. Regresi non linear ini menggunakan piranti lunak SIGMAPLOT.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemilihan Persamaan Matematis

Pemilihan persamaan matematis dilakukan dengan menguji coba beberapa fungsi matematis yang mempunyai bentuk kurva S. Pemilihan dilakukan terhadap 16 buah fungsi yang didapatkan di katalog persamaan non linear [8]. Pengujian dilakukan dengan melakukan analisa regresi non linear fungsi-fungsi tersebut terhadap sebaran data distribusi suhu. Hasilnya terlihat di Tabel 1, yang disertai dengan alasan penolakan maupun penerimaannya.

Tabel 1. Pemilihan fungsi distribusi suhu.

Nomor	Persamaan	Hasil dan Alasannya
1	Three Parameter Sigmoid	Tidak sesuai, 3 parameters
2	Four Parameter Sigmoid	Tidak ada parameter yang sesuai
3	Five Parameter Sigmoid	Tidak sesuai, 5 parameters
4	Three Parameter Logistic	Tidak sesuai, 3 parameters
5	Four Parameter Logistic	Tidak ada parameter yang sesuai
6	Five Parameter Logistic	Tidak sesuai, 5 parameters
7	Four Parameter Weibull	Tidak ada parameter yang sesuai
8	Five Parameter Weibull	Tidak sesuai, 5 parameters
9	Four Parameter Gompertz Growth	Tidak ada parameter yang sesuai
10	Five Parameter Gompertz Growth	Tidak sesuai, 5 parameters
11	Three Parameter Chapman	Tidak sesuai, 3 parameters
12	Four Parameter Chapman	Tidak ada parameter yang sesuai
13	Three Parameter Hill	Tidak sesuai, 3 parameters
14	Four Parameter Hill	Tidak ada parameter yang sesuai
15	Sigmoid Dose Response	Tidak sesuai, 3 parameters
16	Sigmoid Dose Response (Variable Slope)	Diterima $Y = \min + \frac{\max - \min}{1 + 10^{(\text{LogEC}_{50} - X) \text{HillSlope}}}$

Dari tabel 1 terlihat bahwa model kurva S distribusi suhu bisa direpresentasikan dengan sebuah fungsi yang selanjutnya disebut persamaan Sigmoid Dose Response (SDR). Untuk menyesuaikan terhadap parameter yang ada di persamaan (1) dilakukan beberapa modifikasi sebagai berikut :

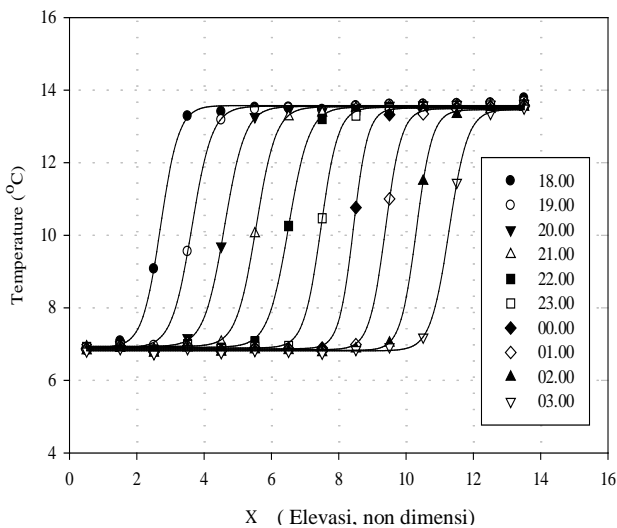
- Min dirubah menjadi T_c .
- Max disesuaikan menjadi T_h .
- Log EC disesuaikan menjadi C.
- Hill Kemiringane disesuaikan menjadi S.

Untuk menyamakan satuan di ruas kiri dan kanan fungsi tersebut, maka diperlukan modifikasi satuan. Parameter C dan S, serta variabel X dinyatakan sebagai satuan yang tak berdimensi. Untuk itu diberikan ketentuan bahwa X adalah satuan tak berdimensi dari elevasi. Selanjutnya satuan tak berdimensi X ini didefinisikan sebagai $X = x \cdot N / H$. Dimana x adalah elevasi posisi tengah dari segmen air (m), N adalah jumlah segmen dan H merupakan kedalam efektif tangki yang terisi air (m). Dari ketentuan tersebut selanjutnya persamaan SDR dapat dituliskan sebagai berikut.

$$T = T_c + \frac{T_h - T_c}{1 + 10^{(C-X)S}} \tag{2}$$

3.2 Pencocokan kurva SDR

Persamaan SDR selanjutnya digunakan untuk pencocokan kurva terhadap sebaran distribusi suhu di data observasi. Harga elevasi tak berdimensi X ditentukan dengan N sebanyak 14 segmen dan kedalaman efektif H sama dengan 14 m. Posisi x ditentukan sebanyak 14 buah, dimulai dari elevasi 0.51 m sampai dengan 13,51 m, dengan interval 1 m. Hasil plot pencocokan kurva fungsi SDR terhadap sebaran data observasi disajikan di gambar 4. Sementara parameter T_c , T_h , C dan S yang diperoleh dari hasil pencocokan kurva disajikan di Tabel 1. Di dalam tabel tersebut juga disertakan harga koefisien determinasi pencocokan kurva setiap jam sebaran datanya. Harga koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk uji penerimaan terhadap fungsi SDR.



Gambar 4. Pencocokan curva fungsi SDR

Sementara parameter T_c , T_h , C dan S yang diperoleh dari hasil pencocokan kurva disajikan di Tabel 1. Di dalam tabel tersebut juga dilampirkan harga koefisien determinasi pencocokan kurva setiap jam sebaran datanya. Harga koefisien determinasi digunakan untuk uji penerimaan terhadap fungsi SDR.

Terlihat di Gambar 4, bahwa fungsi SDR mampu melakukan pencocokan kurva yang sangat baik terhadap sebaran data. Semua sebaran data terlewati oleh kurva fungsi SDR. Hal yang lebih nyata terlihat di Tabel 2, bahwa harga koefisien determinasi (R^2) lebih dari 0.99. Hal ini menunjukkan bahwa pencocokan kurva untuk setiap jam pengisian, mulai dari jam 18.00 sampai dengan jam 03.00, mempunyai hasil yang sangat bagus. Dengan demikian fungsi SDR mampu untuk mewakili sebaran data distribusi suhu.

Tabel 2. Parameter SDR data observasi

Jam pengisian	T_c ($^{\circ}C$)	T_h ($^{\circ}C$)	C	S	R^2
18:00	6.9	13.6	2.7	1.6	0.999
19:00	6.9	13.6	3.6	1.4	0.999
20:00	6.9	13.6	4.6	1.4	1.000
21:00	6.9	13.5	5.5	1.5	1.000
22:00	6.9	13.5	6.5	1.4	1.000
23:00	6.9	13.5	7.5	1.7	1.000
0:00	6.9	13.5	8.4	2.0	1.000
1:00	6.8	13.5	9.4	1.8	1.000
2:00	6.8	13.5	10.3	1.8	1.000
3:00	6.8	13.5	11.3	1.6	1.000

3.3 Arti fisis persamaan SDR

Dari hasil pencocokan kurva yang merupakan analisa regresi non linear yang disajikan di Tabel 2, dapat dijelaskan bahwa selama pengisian tangki termal stratifikasi didapatkan hal sebagai berikut :

- Suhu rata-rata air dingin (T_c) cenderung konstan.
- Suhu rata-rata air panas (T_h) cenderung konstan.
- Selama pengisian tangki, posisi tengah termoklin naik secara periodis seiring dengan pengisian. Hal ini memberikan indikasi bahwa elevasi air dingin selama pengisian seiring dengan pengisian tangki. Kenaikan rata-rata elevasi air dingin ini adalah 0.98 m per jam. Kenaikan ini hampir sama hitungan volume penambahan air dibagi dengan area tangki sebesar 0.989 m.
- Harga gradien kemiringan fungsi termoklin sedikit berfluktuasi selama pengisian tangki, dengan rata-rata 1.62.

Dari pembahasan ini dapat digaris bawahi fungsi SDR mampu memberikan arti fisis yang bermakna terhadap sebaran data distribusi suhu di dalam tangki. Dengan menggunakan persamaan SDR, sebaran suhu air dia dalam tangki bisa diterjemahkan menjadi beberapa parameter penting antara lain suhu rata-rata air dingin, suhu rata-rata air panas, kedalaman air dingin maupun gradien kemiringan kurva termoklin di dalam pengoperasian tangki penyimpan termal stratifikasi.

Lebih dari itu, selanjutnya persamaan SDR ini dikembangkan untuk memformulasikan parameter batas bawah (B), batas atas (U) dan ketebalan termoklin (WTC). Untuk tujuan ini digunakan suatu parameter suhu tak berdimensi yang didefinisikan sebagai $\Theta = (T - T_c) / (T_h - T_c)$. Parameter ini didapatkan dengan mengadopsi ketentuan suhu cut-off tak berdimensi dari Musser [9]. Selanjutnya dengan

penjabaran lanjut terhadap persamaan SDR, dapat diperoleh formulasi beberapa parameter suhu air di dalam tangki sebagai berikut.

- a. Batas bawah termoklin (B) merupakan posisi dimana terletak ujung bawah area termoklin.

$$B = C - \frac{\log\left(\frac{1}{\Theta} - 1\right)}{S} \quad (3)$$

- b. Batas atas termoklin (U) merupakan posisi dimana terletak ujung atas area termoklin.

$$U = C + \frac{\log\left(\frac{1}{\Theta} - 1\right)}{S} \quad (4)$$

- c. Ketebalan termoklin (WTC), yang merupakan mekanisme terpenting untuk menentukan unjuk kerja tangki penyimpanan termal stratifikasi, juga bisa ditentukan sebagai berikut.

$$W_{TC} = \frac{2 \cdot \log\left(\frac{1}{\Theta} - 1\right)}{S} \quad (5)$$

Persamaan B, U dan WTC ini selanjutnya bisa dikembangkan lanjut untuk membuat model simulasi pengoperasian tangki penyimpanan termal stratifikasi.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan karakterisasi terhadap distribusi suhu air di dalam tangki penyimpanan termal stratifikasi. Profil distribusi suhu telah didefinisikan merupakan fungsi dari parameter T_c , T_h , C dan S, serta variabel elevasi tak berdimensi. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa distribusi bisa direpresentasikan dengan persamaan Sigmoid Dose Response (SDR) yang bisa dituliskan sebagai

$$T = T_c + \frac{T_h - T_c}{1 + 10^{(C-X)S}} \quad \text{. Dengan menggunakan}$$

persamaan SDR ini, sebaran suhu air di dalam tangki bisa diterjemahkan untuk mempunyai arti fisik suhu rata-rata air dingin, suhu rata-rata air panas, gradien kemiringan termoklin, serta mengetahui kedalaman air dinginnya. Temuan penting lainnya adalah bahwa dengan menggunakan persamaan SDR bisa dijabarkan lanjut untuk memformulasikan batas bawah, batas atas dan ketebalan termoklin. Temuan dari dari karakterisasi ini bisa dikembangkan untuk kajian lanjut memformulasikan unjuk kerja tangki penyimpanan termal stratifikasi yang akan bermanfaat untuk acuan pembuatan model simulasi untuk memprediksi perilaku dinamis pengoperasian tangki penyimpanan termal stratifikasi.

Terima kasih.

Penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada Universiti Teknologi Petronas, Perak, Malaysia yang telah berkenan memberikan data observasi distribusi suhu di tangki penyimpanan stratifikasi di district cooling, beserta peminjaman lisensi pranti lunak SIGMAPLOT.

Nomenklatur

B	Batas bawah termoklin
C	Posisi tengah termoklin (=kedalaman air dingin)
H	Kedalam efektif air, m
N	Jumlah segmen
S	Gradien kemiringan kurva termoklin
T	Suhu air ($^{\circ}\text{C}$)
T_c	Suhu rata-rata air dingin ($^{\circ}\text{C}$)
T_h	Suhu rata-rata air panas ($^{\circ}\text{C}$)
U	Batas atas termoklin
WTC	Ketebalan termoklin
x	Elevasi posisi tengah termoklin
X	Elevasi tak berdimensi = $x \cdot N/H$
Θ	Parameter suhu tak berdimensi = $(T - T_c)/(T_h - T_c)$

Referensi

- [1]. J.H. Horlock, *Cogeneration-combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics*, Pergamon, Oxford, England, 1987.
- [2]. O.E. Ataer, *Storage of Thermal Energy, in Energy Storage Systems: Encyclopedia of Life Support System (EOLSS)*, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2006.
- [3]. E. Macki and G. Reeves, "Stratified Chilled Water Storage Design Guide," Electric Power Research Institute, 1988.
- [4]. S.K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, 2nd ed. Mc. Graw Hill Company, 2000.
- [5]. A. Musser and W.P. Bahnfleth, "Field-Measured Performance of Four Full-Scale Cylindrical Stratified Chilled-Water Thermal Storage Tanks," *ASHRAE Transaction* vol. 105 (2), pp. 218-230, 1998.
- [6]. M. Karim, "Performance Evaluation of A Stratified Chilled-Water Thermal Storage System," *World Academy of Science Engineering and Technology*, vol. 53, pp. 328-334, 2009.
- [7]. Joko Waluyo, "Simulation Models for Single and Two-Stage Charging of Stratified Thermal Energy Storage", PhD Thesis, Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia, 2011.
- [8]. Systat Software Inc., "Regression Equation Library," in *SIGMAPLOT User's Guide*, Systat Software Inc., 2008.
- [9]. A. Musser, "Field Measured and Modelled Performance of Full Scale Cylindrical Stratified Chilled Water Storage Tanks," in *Graduate School PhD Thesis: The Pennsylvania State University*, 1998.