

Karakterisasi Kinerja Stratified Thermal Energy Storage Tank Menggunakan Difuser Radial Plat dengan Variasi Debit Aliran

Wahyu Hidayat¹, Wirawan Pisen¹, Asifa Asri², Heri Widiatoro³

¹) Teknik Mesin Universitas Jenderal Achmad Yani Cimahi, Indonesia

²) Fisika Universitas Tanjungpura Pontianak, Indonesia.

³) Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung, Indonesia.

email : wahyu.hidayat@lecture.unjani.ac.id

Received 22 Maret 2021 | Revised 21 April 2021 | Accepted 07 September 2021

ABSTRAK

Sistem kogenerasi adalah suatu sistem untuk menghasilkan energi termal selain energi listrik. Energi termal didapatkan dengan menggunakan gas yang tidak terpakai pada suhu yang masih cukup tinggi. Aplikasi sistem kogenerasi dikelompokkan menjadi dua tipe, yaitu untuk proses pemanasan dan pengkondisian udara. Pengaturan distribusi energi dilakukan sesuai dengan kebutuhan yaitu saat terjadi beban rendah dan beban tinggi. Sistem kogenerasi membutuhkan sebuah tangki untuk menyimpan energi termal yaitu tangki penyimpan energi termal (PET) stratifikasi. Tangki PET ini dipakai karena memiliki kinerja yang handal serta konstruksinya yang sederhana. Kinerja tangki PET pada kasus ini dilakukan dengan variasi debit aliran. Penelitian ini menggunakan pengujian eksperimen pada tangki PET berbentuk silinder dengan bentuk difuser radial plat. Variasi kasus dilakukan dengan tiga buah debit yang berbeda yaitu 1,22 dm³/menit, 1,27 dm³/menit dan 1,32 dm³/menit. Untuk menentukan kinerja tangki PET stratifikasi dilakukan dengan mengamati ketebalan termoklin menggunakan formulasi matematis serta analisa distribusi suhu menggunakan persamaan SDR (Sigmoid Dose Response). Hasil dari penelitian ini menunjukkan kinerja yang paling optimal terhadap debit aliran 1,22 dm³/menit. Hal ini merepresentasikan pencampuran air panas dan air dingin dipengaruhi oleh aliran air panas saat memasuki tangki PET. Aliran air panas yang masuk dengan tenang akan membuat ketebalan termoklin yang terbentuk semakin kecil.

Kata kunci: tangki PET stratifikasi, parameter distribusi temperatur, parameter kinerja, ketebalan termoklin.

ABSTRACT

Cogeneration system is a system for generating thermal energy other than electrical energy. Thermal energy is obtained by using gas that is not used at a temperature that is still high enough. Cogeneration system applications are grouped into two types, for heating and air conditioning. Energy distribution arrangements made in accordance with the needs that when there is a low load and high load. Cogeneration systems require a tank for storing thermal energy is thermal energy storage tank (PET) stratification. PET tank is used because it has reliable performance and simple construction. Performance of PET tank in this case was done by varying the flow rate. This study used experimental testing on a cylindrical PET tank with a radial plate diffuser. Variations of cases performed with three different discharge is 1.22 dm³ / minute 1.27 dm³ / minute and 1.32 dm³ / minute. To determine the performance of the stratified PET tank, it was carried out by observing the thickness of the thermocline using a mathematical formulation and analyzing the temperature distribution using the SDR (Sigmoid Dose Response) equation. The results of this study indicate that the most optimal performance against the flow rate of 1.22 dm³ / minute. This represents the mixing of hot and cold water is strongly influenced by the flow of hot water into the tank when the PET. The flow of hot water that enters calmly will make the thickness of the thermocline formed smaller.

Key words: PET tank stratification, temperature distribution parameters, performance parameters, thermocline thickness.

1. Pendahuluan

Tangki PET stratifikasi adalah salah satu alat penyimpan energi termal yang dapat digunakan untuk suplai panas (district heating), dimana energinya dihasilkan oleh HRSG (Heat Recovery Steam Generator) dengan memanfaatkan panas terbuang dari cerobong turbin [1]. Umumnya tangki PET stratifikasi adalah tangki berbentuk silinder dengan dua buah nosel yang terdapat pada bagian atas dan bawah tangki [2]. Pada ujung nosel-nosel tersebut dipasang difuser untuk menjaga proses terjadinya stratifikasi tetap stabil sehingga aliran air yang masuk ke dalam tangki tidak merusak area pencampuran air panas dan air dingin [3]. Pada district heating proses pengisian adalah pemasukan air panas ke dalam tangki PET melalui nosel bagian atas, sedangkan pengosongan dilakukan dengan mengeluarkan air dingin dari tangki PET stratifikasi melalui nosel bagian bawah. Sistem PET stratifikasi dapat digunakan untuk pengelolaan beban pada pengaturan beban tinggi sesuai dengan kebutuhan. Hal ini dapat dicapai dengan pengisian tangki PET stratifikasi selama periode beban rendah dan digunakan kembali pada periode beban tinggi [4]. Penggunaan PET stratifikasi ini memiliki nilai yang sangat ekonomis karena pengoperasiannya memanfaatkan sumber panas yang terbuang dari cerobong [5]. Selain mengatasi permasalahan pada pemenuhan kebutuhan energi, tangki PET stratifikasi juga lebih efisien dalam menurunkan ukuran peralatan pendukung yang digunakan sehingga dalam pengoperasiannya menjadi lebih ekonomis [6] [7]. Tangki PET stratifikasi memiliki manfaat yang sangat besar terutama dalam pengaturan beban energi, meskipun masih terdapat beberapa tantangan untuk meningkatkan unjuk kerja dan kehandalan dari tangki PET stratifikasi tersebut agar memiliki unjuk kerja yang lebih optimum [3]. Unjuk kerja tangki PET stratifikasi dipengaruhi dari mekanisme pemisahan air panas dan air dingin yang tersimpan di dalam tangki PET stratifikasi tanpa adanya penghalang secara fisik. Beberapa metode yang telah dilakukan oleh [8] adalah dengan menggunakan variasi difuser. Pengukuran parameter pada tangki PET stratifikasi dilakukan berdasarkan pada distribusi temperturnya. Untuk mengetahui distribusi temperatur pada tangki PET stratifikasi sangat sulit untuk dilakukan karena harus melakukan pengukuran secara langsung [9]. Penerapan cara ini menyebabkan sulitnya didapatkan hitungan unjuk kerja yang akurat dari tangki PET stratifikasi karena kesulitan dalam melakukan estimasi terhadap profil distribusi temperturnya, oleh karena itu diperlukan kajian lebih lanjut dan dilakukan karakterisasi distribusi temperatur pada tangki PET dengan menggunakan suatu persamaan matematis [3]. Hal utama yang disoroti di dalam penggunaan PET adalah perhitungan unjuk kerja berdasarkan ketebalan area termoklin [1],[10],[11]. Di tahap awal penentuan ketebalan area termoklin ini dilakukan dengan cara estimasi saja. Cara estimasi ini dilakukan dengan cara melakukan prediksi ujung area termoklin dengan menggunakan interpolasi. Metode estimasi ini memiliki kelemahan yaitu hasil yang tidak akurat dan kesulitan dalam implementasinya karena harus menggunakan prediksi dari capturing dari data distribusi temperatur. Pada tahap selanjutnya metode perhitungan unjuk kerja diperbaiki dengan cara formulasi berdasarkan analisa distribusi temperatur [12]. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian dan pengamatan terhadap penggunaan difuser radial plat dengan variasi debit untuk menjaga stabilisasi area pencampuran air dingin dan air panas. Karakterisasi terhadap fenomena pencampuran air dingin dan air panas dilakukan dengan cara formulasi matematis berdasarkan analisa distribusi temperturnya.

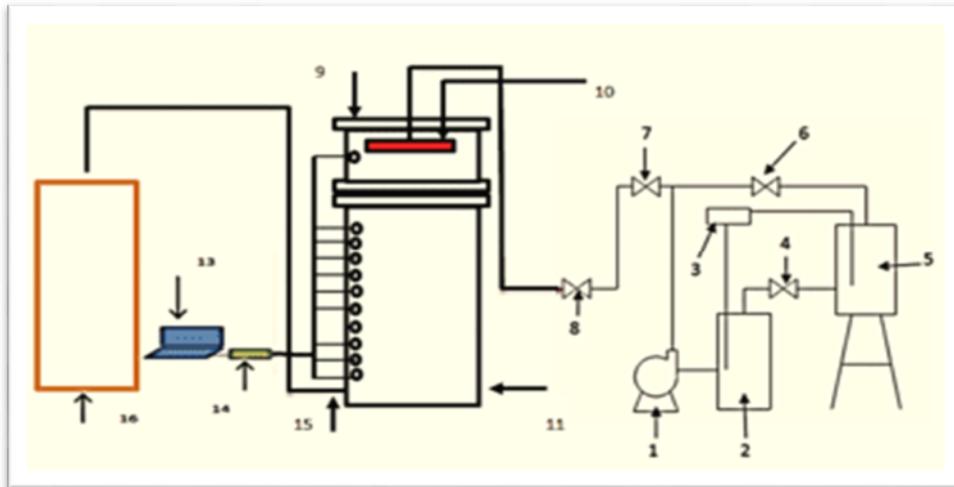
2. Metodologi

Pengkajian mengenai karakterisasi distribusi temperatur pada tangki PET yang terstratifikasi pada penelitian ini menggunakan diameter dalam tangki 200 mm dan tinggi tangki 1500 mm. Pada penelitian ini proses pengisian tangki PET stratifikasi dilakukan dengan mengalirkan air panas yang sudah dipanaskan dengan menggunakan pemanas elektrik ke dalam tangki PET stratifikasi menggunakan difuser. Difuser yang digunakan adalah jenis difuser jenis radial plat dengan arah semburan ke arah samping dengan variasi debit aliran. Pengisian dilakukan saat tangki berada dalam keadaan penuh dengan air dingin (kurang lebih memiliki rentang temperatur antara 28°C sampai 29°C). Kemudian air panas dengan temperatur 50°C dialirkan ke dalam tangki PET stratifikasi melalui difuser dengan debit tertentu. Selama proses pengisian air panas ke dalam tangki PET stratifikasi perubahan temperatur air dalam rentang 30 menit diambil menggunakan

data logger thermocoupe. Variasi-variasi yang diaplikasikan pada penelitian ini adalah variasi debit yang masuk kedalam difuser radial plat. Debit yang digunakan pada penelitian ini ada tiga buah debit yaitu 1,22 dm³/menit, 1,27 dm³/menit dan 1,32 dm³/menit.

2.1. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :



Gambar 1. Skema Instalasi Penelitian PET Stratifikasi

Keterangan Gambar 1

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| 1.Pompa | 9.Kepala tangki |
| 2.Tangki pemanas | 10.Difuser |
| 3.Pengontrol temperatur | 11.Tangki PET |
| 4.Valve | 12.Termokopel |
| 5.Tangki penampung | 13.PC |
| 6.By pass valve | 14.Data logger |
| 7.Valve | 15.Nosel Bawah |
| 8.Valve | 16.Tangki Pembuangan |

2.2. Sigmoid Dose Response

Sigmoid Dose Response (SDR) adalah sebuah persamaan dimana menggambarkan sebuah fungsi distribusi suhu, dapat dituliskan dengan persamaan

$$T = T_C + \frac{T_h - T_C}{(1 + 10)^{(C-x) \cdot S}} \quad (1)$$

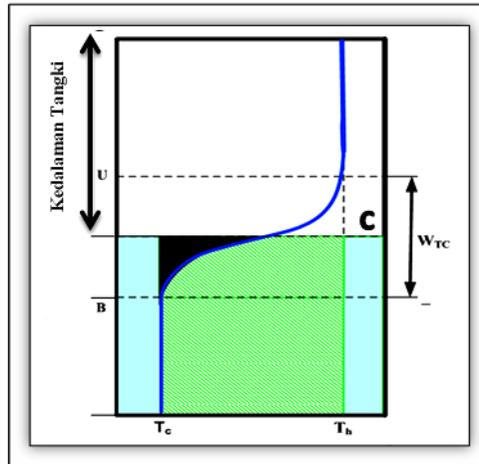
Persamaan SDR menghubungkan distribusi temperatur dengan 4 parameter T_c , T_h , C , and S dengan variasi kedalaman tak berdimensi (X) [3]. Variabel (X) adalah kedalaman tak berdimensi ($X = x \cdot N/H$).

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

Titik batas termoklin didefinisikan sebagai titik yang berada pada tepi profil temperatur yang membatasi ketebalan termoklin. Titik batas ditentukan dengan menggunakan temperatur air *cut-off* sebagai titik referensi pada profil termoklin. Temperatur *cut-off* tak berdimensi (Θ) diambil dari rumus [11].

$$\Theta = (T - T_c) / (T_h - T_c) \quad (2)$$

Titik batas atas pada tepi profil termoklin disebut batas atas dan batas bawah. U dan B dituliskan dengan fungsi dari temperatur *cut-off* tak berdimensi (Θ), posisi titik tengah termoklin (C), dan gradien slope (S). Ketebalan termoklin didefinisikan sebagai lebar dari area pencampuran antara air panas dan air dingin. Ketebalan termoklin (W_{TC}) dibatasi oleh batas atas (U) dan batas bawah (B). Ketebalan termoklin diperoleh dari fungsi antara temperatur *cut-off* tak berdimensi (Θ) dan gradien slope (S).



Gambar 2. Profil Temperatur Pada Tangki PET Stratifikasi [3]

Keterangan Gambar 2 :

- Temperatur rata-rata air panas, T_h
- Temperatur rata-rata air dingin, T_c
- Posisi titik tengah termoklin, C .
- Kemiringan *slope* dari profil termoklin, S .
- etebalan termoklin, W_{TC} .
- Batas bawah termoklin, B , yaitu titik di mana tepi bawah profil termoklin berada.
- Batas atas termoklin, U , yaitu titik di mana tepi atas profil termoklin berada.

Salah satu hal yang menunjukkan apakah unjuk kerja suatu tangki PET stratifikasi handal atau tidak adalah dari tebal atau tipisnya termoklin. Ketebalan termoklin didefinisikan sebagai lebar dari area pencampuran antara air panas dan air dingin. Ketebalan termoklin (W_{TC}) dibatasi oleh batas atas (U) dan batas bawah (B) [6]. Dengan demikian ketebalan termoklin (W_{TC}) bisa dirumuskan sebagai berikut :

$$W_{TC} = \frac{2 \cdot \log\left(\frac{1}{\Theta} - 1\right)}{S} \quad (3)$$

Energi tersimpan kumulatif digunakan untuk menentukan energi panas yang tersimpan pada waktu penelitian selama pengisian tangki PET stratifikasi. Energi tersimpan kumulatif ditentukan berdasarkan distribusi temperatur yang berada pada setiap slab tangki PET stratifikasi. Energi tersimpan kumulatif dirumuskan : [6].

$$Q_{cum} = A \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_h - T_c) \left| 1 - \frac{\log(1+10^{(SC-SX)})}{S \cdot \log 10} \right|_0^H \quad (4)$$

$FoM_{1/2}$ didefinisikan sebagai rasio kapasitas pengisian dengan kapasitas teoritis yang terkandung dalam satu volume tangki [6]. Formulasi *Figure of Merit* setengah diperoleh dari penyelesaian integral dari persamaan.

$$FoM_{1/2} = 1 - (C_{Lost}/C_{Max}) \quad (5)$$

Dengan persamaan SDR, formulasi C_{Max} didapatkan sebagai berikut :

$$C_{Max} = \rho \cdot A \cdot C_p \cdot C(T_h - T_c) \quad (6)$$

Formulasi C_{Lost} dilakukan dengan menyelesaikan integral persamaan kontinyu dari

$$C_{lost} = A \cdot \rho \cdot C_p \int_B^C (T_x - T_c) \cdot dX \quad (7)$$

kemudian hasilnya disubstitusikan kedalam

$$T_x = T_c + \frac{T_h - T_c}{1 + 10^{(c-x)s}} \quad (8)$$

Sehingga diperoleh formulasi C_{Lost} sebagai berikut :

$$C_{lost} = A \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_h - T_c) \left[X - \frac{\log(1 + 10^{(c-x)})}{S \cdot \log 10} \right] \Big|_B^C \quad (9)$$

2.3. Prosedur Eksperimen dan Pengambilan Data

Melakukan set-up instalasi penelitian serta melakukan proses kalibrasi terhadap termokopel yang digunakan dan mengisi air pada bak penampungan air (*reservoir*) serta bak pemanas. Setelah tahap kalibrasi dilakukan langkah berikutnya melakukan pengisian air pada bak penampungan air dan bak pemanas air, proses penyaringan terhadap air terlebih dahulu dilakukan agar material pengotor tidak masuk ke dalam tangki PET stratifikasi. Prosedur berikutnya menutup katup yang menuju *gate valve* dan membuka penuh katup *by pass* pompa serta melakukan setting *temperature controler* pada temperatur 50°C yang ada dalam bak pemanasan dan menghidupkan pemanas air. Langkah berikutnya menghidupkan pompa untuk sirkulasi air agar temperatur air merata pada temperatur 50°C. Menyeting *record* temperatur pada komputer setiap durasi satu menit selama 30 menit. Membuka perlahan - lahan *gate valve* hingga didapatkan debit yang diinginkan. Setelah debit yang diinginkan didapat maka proses mengalirkan air menuju difusser radial plat kemudian menuju kepala tangki dan tangki PET stratifikasi bisa dilakukan. Prosedur eksperimen pada penelitian ini adalah sebagai berikut : 1). Melakukan set-up peralatan penelitian, 2). Melakukan proses kalibrasi terhadap termokopel, 3). Mengisi air pada bak penampungan air (*reservoir*) dan bak pemanas, 4). Sebelum melakukan pengisian pada bak penampung dan bak pemanas air perlu disaring terlebih dahulu agar kotoran tidak masuk ke dalam tangki PET stratifikasi, 5). Menutup katup menuju *valve gate* dan membuka penuh katup *by pass* pompa, 6). Melakukan setting *temperature controler* pada temperatur 50°C yang ada dalam bak pemanasan dan menghidupkan pemanas air, 7). Menghidupkan pompa untuk sirkulasi air agar temperatur air merata pada temperatur 50°C, 8). Menyeting *record* temperatur pada komputer setiap durasi satu menit, 9). Membuka perlahan - lahan *valve gate* hingga didapatkan debit yang diinginkan, 10). Setelah debit yang diinginkan didapat maka proses mengalirkan air menuju difusser, kepala tangki dan tangki PET bisa dilakukan, 11).Seting debit aliran air panas sesuai dengan debit yang dibutuhkan dan ulangi kembali langkah - langkah di atas. Penelitian ini menggunakan beberapa variabel antara lain difuser radial plat, debit aliran, W_{Tc} , Q_{cum} , dan $FoM_{1/2}$.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan untuk mencari tahu kinerja kerja tangki PET stratifikasi dengan beberapa parameter kinerja diantaranya : W_{Tc} , Q_{cum} , dan $FoM_{1/2}$.

3.1. Data Distribusi Temperatur

Tabel 1 menunjukkan data distribusi temperatur untuk difuser radial plat (Ø16cm) dengan debit 1,22 dm³/menit). Data distribusi temperatur ini akan digunakan dalam analisis kinerja unjuk kerja tangki penyimpanan energi termal.

Tabel 1. Data Distribusi Temperatur Difuser Radial Plat (Ø16 cm), Debit 1,22dm³/menit)

Debit 1,22 liter/menit, Difuser Radial Plat (Ø16 cm)							
Kedalaman x (cm)	Waktu Pengisian (menit)						
	Kondisi Awal	5	10	15	20	25	30
	Temperatur (°C)						
4,5	29.2	46.38	48.33	49.99	49.99	50	50
16,5	29.2	36.91	44.54	49.46	49.99	50	50
28,5	29.2	30.63	38.69	48.26	49.99	50	50
40,5	29.2	29.78	31.22	44.56	49.99	49.99	50
52,5	29.2	29.2	29.2	36.69	48.85	49.99	50
64,5	29.2	29.2	29.1	30.56	45.36	49.69	49.99
76,5	29.1	29.1	29.1	29.1	36.78	47.69	49.99
88,5	29.1	29.1	29.1	29.1	30.86	43.38	48.69
100,5	29	29	29	29	29	34.69	45.85
112,5	29	29	29	29	29	29.69	37.68
124,5	29	29	29	29	29	29	31.26

Data distribusi temperatur untuk difuser radial plat (Ø16 cm) disajikan untuk debit 1,27 dm³/menit) disajikan di Tabel 2.

Tabel 2. Data distribusi temperatur difuser radial plat (Ø16 cm), debit 1,27 dm³/menit)

Debit 1,27 liter/menit, Difuser Radial Plat (Ø16 cm)							
Kedalaman x (cm)	Waktu Pengisian (menit)						
	Kondisi Awal	5	10	15	20	25	30
	Temperatur (°C)						
4,5	29.2	47.85	49.16	49.99	49.99	50	50
16,5	29.2	37.3	46.88	49.72	49.99	50	50
28,5	29.2	31.54	41.68	49.12	49.99	50	50
40,5	29.2	29.82	35.22	46.57	49.99	49.99	50
52,5	29.2	29.2	30.49	39.99	49.3	49.99	50
64,5	29.2	29.2	29.36	33.42	47	49.84	49.99
76,5	29.1	29.1	29.1	30.39	40.3	48.17	49.99
88,5	29.1	29.1	29.1	29.25	33.65	44.41	49.19
100,5	29	29	29	29	30.27	37.67	47.25
112,5	29	29	29	29	29	31.29	41.61
124,5	29	29	29	29	29	29.71	34.93

Data distribusi temperatur untuk difuser radial plat (Ø16 cm) disajikan untuk debit 1,32 dm³/menit) disajikan di Tabel 3.

Tabel 3. Data Distribusi Temperatur Difuser Radial Plat (Ø16 cm), Debit 1,32 dm³/menit)

Debit 1,32 liter/menit, Difuser Radial Plat (Ø16 cm)							
Kedalaman x (cm)	Waktu Pengisian (menit)						
	Kondisi Awal	5	10	15	20	25	30
	Temperatur (°C)						
4,5	29.2	49.32	49.99	49.99	50	50	50
16,5	29.2	37.69	49.22	49.99	50	50	50
28,5	29.2	32.45	44.68	49.99	50	50	50
40,5	29.2	29.87	38.78	48.59	49.99	50	50
52,5	29.2	29.2	31.78	43.29	49.75	50	50
64,5	29.2	29.2	29.63	36.29	48.65	49.99	50
76,5	29.1	29.1	29.1	31.68	43.82	48.66	49.99
88,5	29.1	29.1	29.1	29.4	36.45	45.45	49.69
100,5	29	29	29	29	31.55	40.65	48.65
112,5	29	29	29	29	29	32.89	45.55
124,5	29	29	29	29	29	30.42	38.65

3.B. Parameter Distribusi Temperatur Menggunakan SDR

Dengan penggunaan persamaan SDR dilakukan pengolahan data distribusi temperatur untuk mendapatkan parameter-parameter distribusi temperatur yaitu : T_c , T_h , C , S , dan koefisien determinasi R^2 . Hasil parameter-parameter distribusi temperatur untuk difuser radial plat (Ø16 cm) dengan debit 1,22 dm³/menit disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Distribusi Temperatur Menggunakan SDR (Difuser Radial Plat (Ø16 cm), Debit 1,22 dm³/menit)

Parameter Distribusi Temperatur (Sigmoid Dose Response)								
Debit 1,22 liter/menit, Difuser Radial Plat (Ø16 cm)								
Waktu Pengisian	T_h (°C)	T_c (°C)	C	C (cm)	AC (cm)	S	R^2	Keterangan
5 Menit	-	-	-	-	-	-	-	divergen
10 Menit	49,89	29,04	3,55	41,8	-	-1,245	0,9997	konvergen
15 Menit	49,91	29,22	5,34	62,63	20,83	-1,226	0,9999	konvergen
20 Menit	49,88	29,36	7,05	82,69	20,06	-1,210	0,9998	konvergen
25 Menit	49,99	28,92	8,77	102,87	20,18	-1,198	0,9999	konvergen
30 Menit	49,99	29,41	10,51	123,28	20,41	-1,192	0,9999	konvergen
AC = (20,37+0,339)					S = (-1,214+0,021)			

Hasil parameter-parameter distribusi temperatur untuk difuser radial plat (Ø16 cm) dengan debit 1,27 dm³/menit disajikan pada Tabel 5 dan hasil parameter-parameter distribusi temperatur untuk difuser radial plat (Ø16 cm) dengan debit 1,32 dm³/menit disajikan pada Tabel 6.

Tabel 4. Parameter Distribusi Temperatur Menggunakan SDR (Difuser Radial Plat (Ø16 cm), Debit 1,27 dm³/menit)

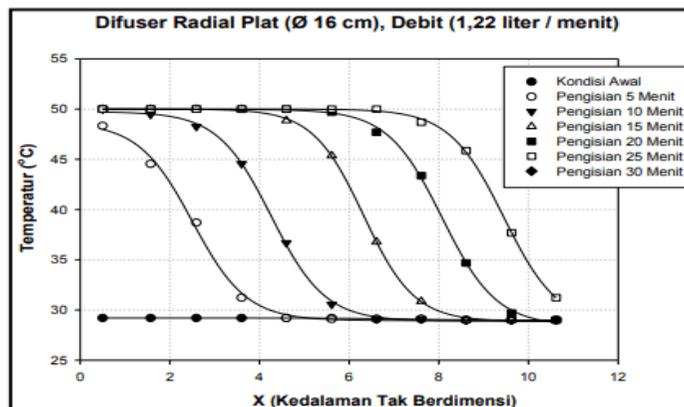
Parameter Distribusi Temperatur (Sigmoid Dose Response)								
Debit 1,27 liter/menit, Difuser Radial Plat(Ø16 cm)								
Waktu Pengisian	T _h (°C)	T _c (°C)	C	C (cm)	ΔC (cm)	S	R ²	Keterangan
5 Menit	-	-	-	-	-	-	-	Divergen
10 Menit	49.94	29.3	3.63	42.66		-1.1960	0,9999	Konvergen
15 Menit	49.83	29,27	5.41	63.51	20.85	-1.1830	0,9996	Konvergen
20 Menit	49.90	29.36	7.17	84.1	20.59	-1.1600	0,9997	Konvergen
25 Menit	49.89	29.27	8.91	104.51	20.415	-1.1470	0,9999	konvergen
30 Menit	49.99	29.36	10.68	125.27	20.76	-1.1370	0,9998	konvergen
ΔC = (20,65±0,192)					S = (-1,164±0,024)			

Tabel 5. Parameter Distribusi Temperatur Menggunakan SDR (Difuser Radial Plat (Ø16 cm), Debit 1,27 dm³/menit)

Parameter Distribusi Temperatur (Sigmoid Dose Response)								
Debit 1,32 liter/menit, Difuser Radial Plat (Ø16 cm)								
Waktu Pengisian	T _h (°C)	T _c (°C)	C	C (cm)	ΔC (cm)	S	R ²	Keterangan
5 Menit	-	-	-	-	-	-	-	divergen
10 Menit	49,89	29,04	3.71	43.52	-	-1.148	0.9999	konvergen
15 Menit	49,91	29,22	5.49	64.39	20.87	-1.142	0.9997	konvergen
20 Menit	49,88	29,36	7.29	85.51	21.12	-1.112	0.9999	konvergen
25 Menit	49,99	28,92	9.05	106.16	20.65	-1.098	0.9996	konvergen
30 Menit	49,99	29,41	10.85	127.27	21.11	-1.083	0.9998	konvergen
ΔC = (20,93±0,22)					S = (-1,117±0,027)			

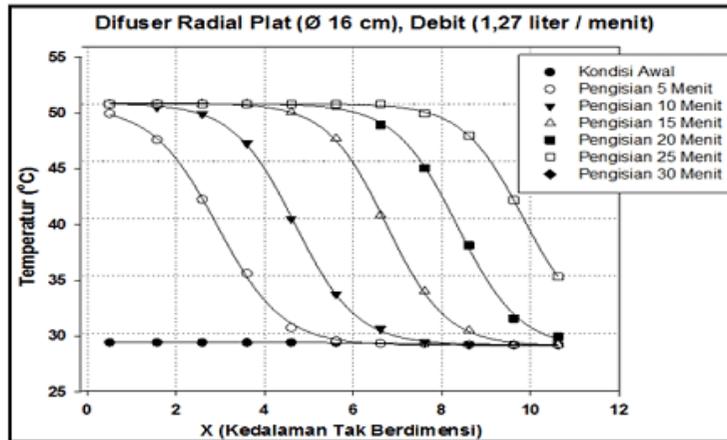
3.2. Profil Kurva-S Distribusi Temperatur

Hasil pengolahan data distribusi temperatur dengan menggunakan SDR akan mendapatkan bentuk profil kurva-S. Profil kurva-S untuk difuser radial plat (Ø16 cm) dengan debit 1,22 dm³/menit) disajikan pada Gambar 3.

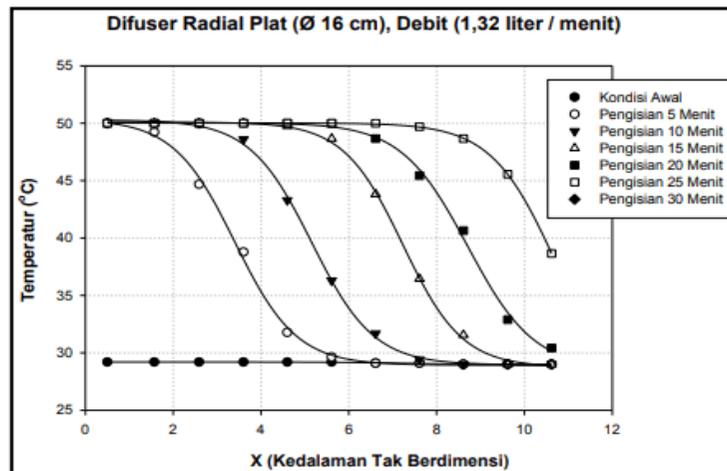


Gambar 3. Profil kurva-S distribusi temperatur menggunakan fungsi SDR (Difuser radial plat (Ø16 cm), debit 1,22 dm³/menit)

Profil kurva-S untuk difuser radial plat ($\varnothing 16$ cm) dengan debit $1,27 \text{ dm}^3/\text{menit}$ disajikan pada Gambar 4 dan Profil kurva-S untuk difuser radial plat ($\varnothing 16$ cm) dengan debit $1,32 \text{ dm}^3/\text{menit}$ disajikan pada Gambar 5.



Gambar 4. Profil kurva-S distribusi temperatur menggunakan fungsi SDR (Difuser radial plat ($\varnothing 16$ cm), debit $1,27 \text{ dm}^3/\text{menit}$)



Gambar 5. Profil kurva-S distribusi temperatur menggunakan fungsi SDR (Difuser radial plat ($\varnothing 16$ cm), debit $1,32 \text{ dm}^3/\text{menit}$)

Profil kurva-S yang tersaji pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5 merupakan hasil yang didapat dari penggunaan fungsi SDR dalam pembentukan profil distribusi temperatur. Hal ini membuktikan bahwa pencampuran air panas ke dalam air dingin di dalam tangki penyimpan energi termal akan membentuk profil kurva-S.

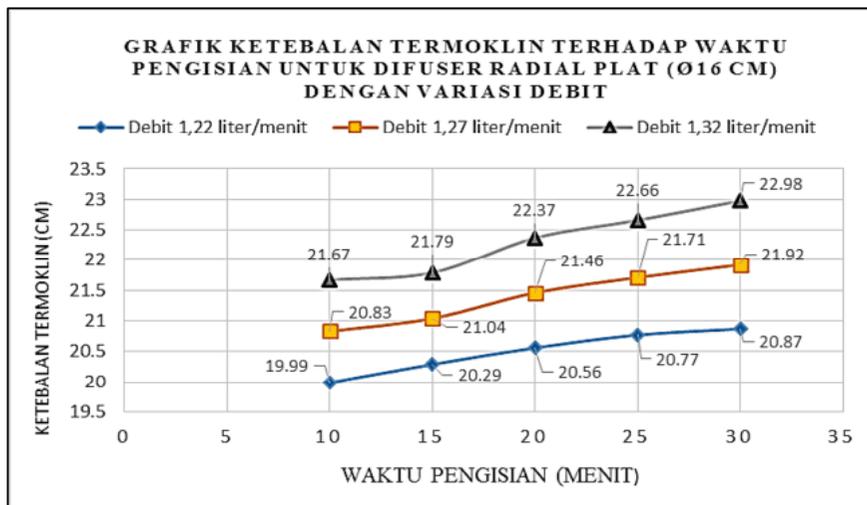
3.3. Nilai W_{TC} , $FoM_{1/2}$ dan Q_{cum}

Fungsi SDR mampu melakukan pencocokan kurva yang sangat baik terhadap sebaran data distribusi temperatur. Semua sebaran data terlewati oleh kurva fungsi SDR, nilai W_{TC} dan $FoM_{1/2}$ untuk setiap variasi debit disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai W_{TC} dan $FoM_{1/2}$ untuk Difuser Radial Plat terhadap Variasi Debit

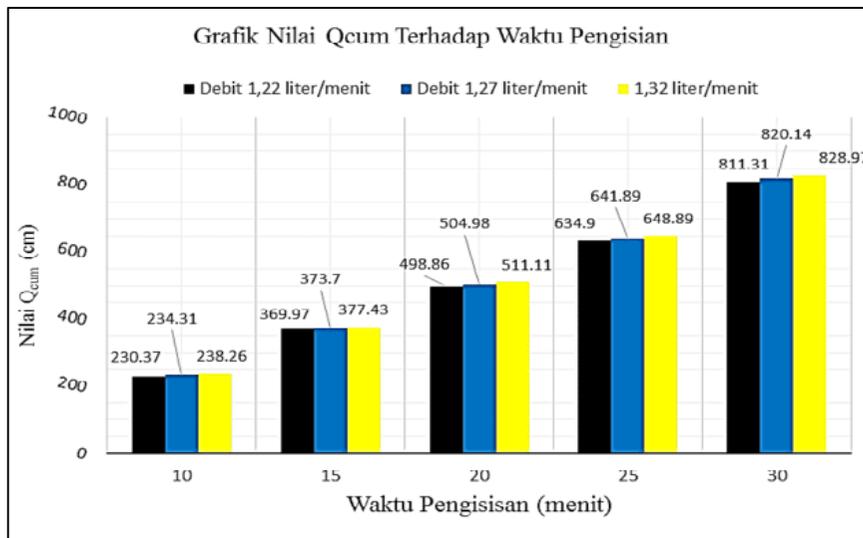
<u>Waktu Pengisian</u> (menit)	Debit 1,22 liter/menit		Debit 1,27 liter/menit		Debit 1,32 liter/menit	
	W_{TC} (cm)	$FoM_{1/2}$	W_{TC} (cm)	$FoM_{1/2}$	W_{TC} (cm)	$FoM_{1/2}$
10	19.99	0.8432	20.83	0.8441	21.67	0.845
15	20.29	0.9005	21.04	0.8962	21.79	0.892
20	20.56	0.9215	21.46	0.9224	22.37	0.9233
25	20.77	0.9344	21.71	0.9338	22.66	0.9332
30	20.87	0.9472	21.92	0.9443	22.98	0.9415
Rata - Rata	20.49	0.9093	21.392	0.90816	22.294	0.907
<u>St.Deviasi</u>	0.359	0.0408	0.453	0.04	0.5598	0.0394

Dari Tabel 6 dapat terlihat perbedaan ketebalan termoklin antara difuser radial plat ($\varnothing 16$ cm) dengan variasi 3 buah debit. Untuk melihat gambaran perbedaan ketebalan termoklin disajikan gambar grafik perbedaan ketebalan termoklin terhadap waktu pengisian untuk difuser ring ($\varnothing 16$ cm) untuk pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Ketebalan Termoklin terhadap Waktu Pengisian Untuk Difuser Radial Plat ($\varnothing 16$ cm) dengan Variasi Debit

Energi tersimpan kumulatif digunakan untuk menentukan jumlah energi panas yang tersimpan selama pengisian tangki PET stratifikasi. Energi tersimpan kumulatif ditentukan berdasarkan distribusi temperatur yang berada pada setiap slab pada tangki PET stratifikasi. Untuk melihat nilai perbandingan energi tersimpan kumulatif (Q_{cum}) terhadap variasi debit, disajikan dalam grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Nilai Q_{cum} terhadap Variasi Debit

4. Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian mengenai karakterisasi unjuk kerja tangki PET stratifikasi menggunakan difuser radial plat dengan variasi bentuk difuser dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut : Hasil perhitungan dengan variasi debit aliran menunjukkan bahwa debit aliran yang paling kecil (1,22 liter/menit) memiliki harga S yang besar sehingga ketebalan termoklin yang terbentuk lebih tipis yaitu sebesar 20,49 cm dan nilai $FOM_{1/2}$ yang dihasilkan lebih besar yaitu 0,9093. Hal ini terjadi karena aliran air panas yang masuk ke dalam tangki PET stratifikasi tenang dan halus. Untuk energi tersimpan kumulatif (Q_{cum}) semakin besar debit aliran yang masuk ke dalam tangki PET stratifikasi maka nilai Q_{cum} -nya akan semakin besar. Pada penelitian ini nilai Q_{cum} terbesar dihasilkan oleh debit 1,32 liter/menit yaitu sebesar 828,97 cm.

5. Ucapan Terima Kasih

Kami menghaturkan banyak terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin dan Teknik Industri Universitas Gadjah Mada atas keramahan dan kemudahan dalam pengambilan data untuk penelitian kami. Kami haturkan banyak terima kasih kepada Bapak Ir. Joko Waluyo, M.T., Ph.D dan Bapak Dr. Khasani, ST., M.Eng atas bimbingan serta arahan yang diberikan dalam menyelesaikan penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

- [1] M.A.A.Majid, J. Waluyo. *Thermocline Thickness Evaluation on stratified Thermal Energy storage tank of a cogenerated district cooling plant, Journal of Energy and Power Engineering, 2010 V. 4, Serial 27.*
- [2] Dincer I and Rosen MA, 2002, *Thermal Energy Storage System and Applications, John Wiley and Sons.*
- [3] Hidayat. W.2016. Karakterisasi Dan Visualisasi Unjuk Kerja Tangki Penyimpan Energi Termal Stratifikasi Dengan Variasi Bentuk Difuser. Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada.
- [4] Kolanovski. B.F.. 2008. *Small-scale Cogeneration Handbook. edisi ke tiga. Fairmont Press Inc.*
- [5] Wang. S.K.. 2000. *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration. 2nd ed. Mc. Graw Hill Company.*
- [6] Waluyo. J. dan Majid. M.A.A.. 2011. *Performance Evaluation of Stratification PET using Sigmoid Dose Response Function.*
- [7] M. A. A. Majid, M. Muhammad, C. C. Hampo, and A. B. Akmar, “Analysis of a Thermal Energy Storage Tank in a Large District Cooling System: A Case Study,” *Process. 2020, Vol. 8, Page 1158*, vol. 8, no. 9, p. 1158, Sep. 2020, doi: 10.3390/PR8091158.
- [8] Bahnfleth.W.P. dan Jing Song.. 2005. *Constant Flowrate Charging Characteristics of a full scale Stratified Chilled Water Tank With Double Ring Slotted Pipe Diffuser. Applied Thermal Engineering.* pp. 3067 – 3082.
- [9] Hidayat. W.2015. Perbandingan Unjuk Kerja Tangki Penyimpan Energi Termal Stratifikasi dengan Variasi Diameter Difuser. Prosiding Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri ke 21. ISBN : 978-602-70455-1-4.Yogyakarta.
- [10] Musser A and Bahnfleth WP, 1998a, *Evolution of Temperature Distributions in a Full-Scale Stratified Chilled-Water Storage Tank with Radial Diffusers, ASHRAE Transactions, Vol. 107(1).*
- [11] Musser A and Bahnfleth WP, 1998b, *Field-Measured Performance of Four Full-Scale Cylindrical Stratified Chilled-water Thermal Storage Tanks, ASHRAE Transaction 105 (2), pp. 218-230.*
- [12] Waluyo. J.. 2011. “Simulation Models for Single and Two-Stage Charging of Stratified Thermal Energy Storage”. *Universiti Teknologi Petronas.*