

Analisis Numerik Perancangan Alat Penukar Kalor *Shell and Tube* pada Sistem *Vanadium Redox Flow Battery*

Abdulghani Ramadhan Munandar dan Ary Bachtiar Krishna Putra
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
E-mail: aribach@me.its.ac.id

Abstrak—Pembangkit listrik dengan sumber energi berjedat perlu dirangkaikan dengan perangkat penyimpan energi listrik yang dapat mengisi daya saat terjadi kelebihan pembangkitan energi listrik dan melepaskan daya saat diperlukan konsumsi energi listrik tambahan. *Vanadium Redox Flow Battery* (VRFB) menjadi perangkat penyimpan daya yang memiliki efisiensi energi yang tinggi, siklus hidup yang panjang, keamanan yang dapat diandalkan, terutama independensi kapasitas dan daya. Temperatur sel baterai harus dikendalikan dalam rentang temperatur 5°C sampai dengan 40°C untuk menghindari terjadinya presipitasi. Pada penelitian ini, dilakukan analisis rancangan penukar kalor tipe *shell and tube* untuk mendinginkan elektrolit pada VRFB agar dapat beroperasi dalam rentang temperatur operasi yang optimal serta analisis temperaturnya. Analisis dilakukan menggunakan *software* ANSYS Fluent dengan variasi laju aliran massa dan temperatur inlet fluida. *Shell and tube* yang digunakan adalah tipe 1-2 *pass* dengan *counter flow* dan standardisasi TEMA tipe CEP. *Over design* pada *shell and tube* memiliki nilai di bawah 30%. *Shell and tube* dapat mendinginkan elektrolit vanadium pada VRFB dengan laju aliran massa elektrolit vanadium 0,052 kg/s hingga 0,2 kg/s, dan laju aliran massa air 0,25 kg/s hingga 0,75 kg/s. Kontur temperatur menunjukkan penurunan temperatur outlet elektrolit vanadium saat peningkatan laju aliran massa air, dan peningkatan temperatur saat peningkatan laju aliran massa elektrolit vanadium. Temperatur inlet dan outlet elektrolit vanadium memiliki hubungan linear, dengan rentang pendinginan 30°C hingga 60°C. Peningkatan laju aliran massa mempengaruhi *pressure drop*, dengan nilai tertinggi 13,45 kPa pada sisi *shell* dan 0,538 kPa pada sisi *tube*, serta nilai terendah 1,258 kPa pada sisi *shell* dan 0,052 kPa pada sisi *tube*.

Kata Kunci—ANSYS Fluent, Battery, Elektrolit, Shell and Tube, VRFB.

I. PENDAHULUAN

ENERGI terbarukan (*renewable energy*) adalah sumber energi yang diharapkan dapat menggantikan peran dari energi tak terbarukan (*non-renewable energy*) seperti batu bara, minyak bumi, dan gas bumi, yang saat ini masih menjadi sumber energi utama dunia. Indonesia dalam hal ini juga berusaha melakukan percepatan pengembangan energi terbarukan melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik, yang di dalamnya dijelaskan bahwa PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) Persero harus menyusun Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) dengan mengutamakan pengembangan energi terbarukan dan mempercepat pengakhiran operasional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang masih menggunakan energi tak terbarukan berupa batu bara. Tidak seperti batu bara atau bahan bakar fosil yang memerlukan waktu lama dalam pembentukannya, energi terbarukan akan terus diproduksi selama masih dapat

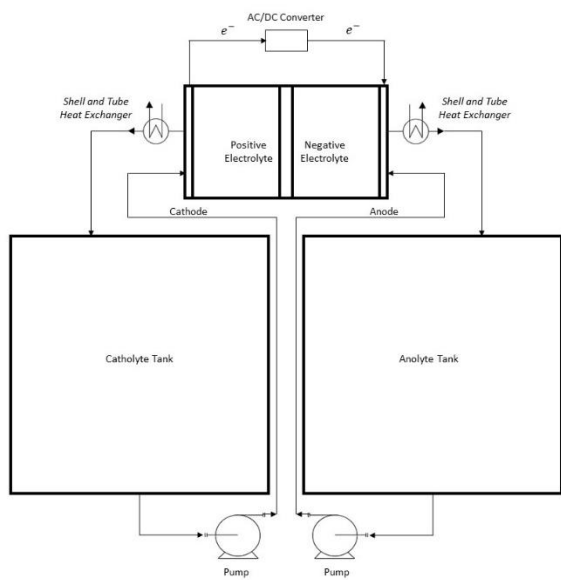
Tabel 1.
Spesifikasi VRFB yang akan diteliti.

Parameter	Nilai
Temperatur Operasi	-30°C s.d. 60°C
Rated Voltage	48 V <i>Direct Current</i>
Rated Current	105 A
Rated Power	5 kW
Rated Time	4 hours
Rated Energy	20 kWh
Rated Capacity	420 Ah
Daya Maksimum	20 kW
Jenis Elektrolit	1,5M Vanadium (IV/III)
Densitas Elektrolit	1300 kgm ⁻³

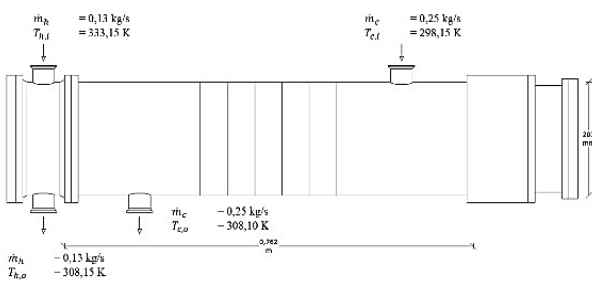
terjadi siklus pembentukan energinya secara alami dalam waktu yang relatif lebih singkat dari energi fosil. Selain itu, energi terbarukan juga menghasilkan polusi lingkungan lebih kecil dibandingkan energi tak terbarukan [1-2].

Energi surya dan energi angin adalah energi terbarukan yang termasuk dalam bauran energi primer nasional pada tahun 2025. Adapun upaya pemerintah dalam merealisasikan bauran energi terbarukan, yakni dengan menargetkan instalasi energi surya sebesar 0,87 GW pada tahun 2024 dan energi angin sebesar 0,97 GW pada tahun 2025. Di samping keutamaan yang dimiliki, energi surya dan energi angin merupakan *intermittent energy*, yakni sumber energi yang berjedat, energi surya hanya tersedia saat matahari sudah terbit dan energi angin hanya tersedia saat kecepatan angin memadai untuk menggerakkan baling-baling turbin. Ketidaksinambungan dalam sistem pembangkit tersebut mengakibatkan terjadinya ketimpangan antara ketersediaan sumber energi dan permintaan dari energi listrik. Maka dari itu, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga bayu/angin (PLTB) perlu dirangkaikan dengan perangkat penyimpan energi listrik yang dapat mengisi daya saat terjadi kelebihan pembangkitan energi listrik dan melepaskan daya saat diperlukan konsumsi energi listrik tambahan [3].

Di antara teknologi perangkat penyimpan energi listrik, *Vanadium Redox Flow Battery* (VRFB) menjadi salah satu baterai yang memiliki banyak keuntungan, yaitu efisiensi energi yang tinggi, siklus hidup yang panjang, keamanan yang dapat diandalkan, terutama independensi kapasitas dan daya. Oleh karena itu, VRFB sering digunakan untuk menyeimbangkan pembebanan, cadu daya yang tak terputus, cadangan energi darurat, dan memfasilitasi penyaluran energi listrik yang bersumber dari fotovoltaiik dan turbin angin. Bagaimanapun juga pemodelan VRFB perlu memperhatikan analisis termal, seperti pengaplikasian baterai konvensional, yaitu baterai litium, asam timbal, dan sel tunam, pada mobil



Gambar 2. Konfigurasi VRFB dengan shell and tube heat exchanger.

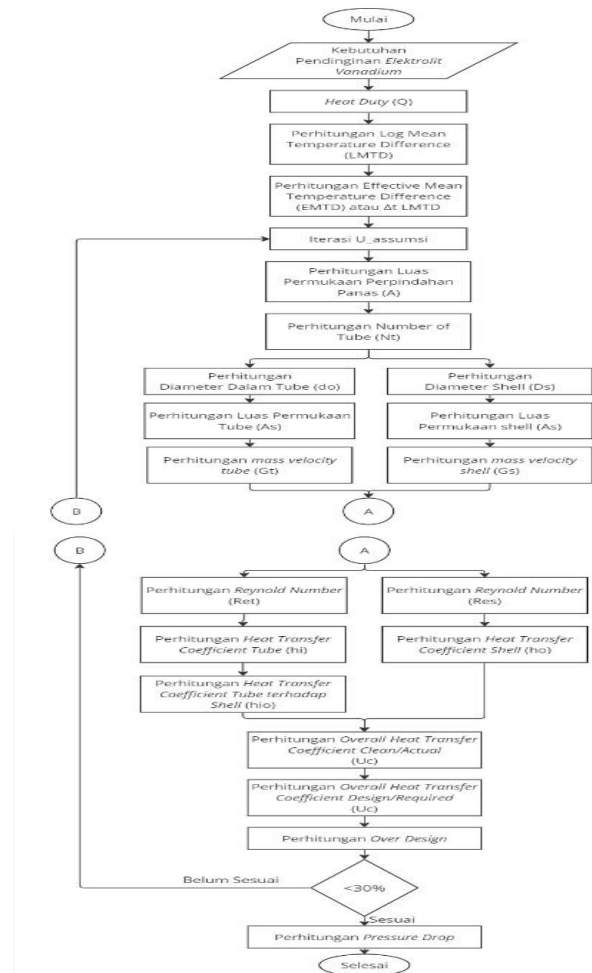


Gambar 3. Sketsa alat penukar kalor shell and tube.

listrik. Pada umumnya, panas dan temperatur adalah properti penting dalam mendesain baterai agar efisien dan dapat beroperasi dengan aman [3].

Stabilitas dari elektrolit dipengaruhi oleh temperatur. Pada beberapa jenis elektrolit presipitasi dapat terjadi ketika temperatur lebih tinggi dari 40°C dalam jangka waktu yang lama. Demikian pula presipitasi dapat terjadi ketika temperatur menurun di bawah 5°C. Presipitasi dapat memblokir saluran elektrolit dan membuat performa baterai menjadi buruk. Di samping itu, temperatur tinggi juga dapat merusak membrane perfluorinasi, dan mempercepat korosi pada plat elektroda. Oleh karena itu, temperatur sel baterai harus dikendalikan dalam rentang temperatur 5°C sampai dengan 40°C. Temperatur elektrolit pada VRFB dipengaruhi oleh berbagai kondisi operasi, seperti temperatur lingkungan, arus pengisian daya/pemakaian daya, dan kecepatan aliran elektrolit. Oleh karena itu, terdapat potensi peningkatan temperatur elektrolit di ambang batas temperatur optimal pengoperasian [4].

Apabila temperatur dari elektrolit meningkat maka temperatur dari sel baterai juga dapat meningkat. Kenaikan temperatur di ambang batas dapat menyebabkan penurunan performa baterai, sehingga diperlukan komponen perpindahan panas untuk mengontrol peningkatan dari temperatur elektrolit. Shell and tube adalah salah satu jenis penukar kalor yang sering digunakan pada sistem pembangkit. Shell and tube memiliki beberapa keutamaan, diantaranya penggunaan material dan bahan yang dapat divariasikan, perawatan yang relatif lebih mudah



Gambar 1. Diagram alir perhitungan alat penukar kalor shell and tube.

dibandingkan plat pendingin, thermal stress yang dapat ditekan, konstruksi sederhana dan kokoh, tidak memerlukan tempat instalasi yang luas dan biaya yang digunakan lebih rendah dibandingkan jenis penukar panas lainnya [5].

Berdasarkan uraian Gambar 3, akan dilakukan penelitian terkait analisis rancangan penukar panas tipe shell and tube yang dapat digunakan untuk mendinginkan elektrolit pada VRFB agar dapat beroperasi dalam rentang temperatur operasi yang optimal serta analisis temperaturnya dengan menggunakan software HTRI Exchanger Suite dan ANSYS Fluent.

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perancangan sistem pendinginan pada baterai VRFB. Tujuan spesifik dari penelitian ini adalah untuk merancang alat penukar kalor tipe shell and tube yang dapat digunakan dalam sistem pendinginan baterai VRFB.

Kemudian, menganalisis perpindahan panas, distribusi temperatur, dan tekanan yang terjadi pada shell and tube tersebut. Selanjutnya, mengetahui bagaimana laju aliran massa fluida dan temperatur inlet mempengaruhi proses pendinginan elektrolit pada baterai VRFB. Sehingga, dapat diperoleh informasi yang berguna untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem pendinginan baterai VRFB.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Spesifikasi

Pada penelitian ini menggunakan VRFB dengan spesifikasi dari manufaktur yang ditunjukkan Tabel 1.

Tabel 3. Parameter Awal Perhitungan

Parameter	Notasi	Nilai
Laju aliran massa elektrolit	\dot{m}_h	0,13 kg s ⁻¹
Temperatur elektrolit masuk	$T_{h,i}$	333,15 K
Temperatur elektrolit keluar	$T_{h,o}$	308,15 K
Densitas elektrolit	ρ	1300 kg m ⁻³
Viskositas dinamis elektrolit	μ	0,004298 Pa s
Panas jenis elektrolit	c_p	3,2 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Konduktivitas termal Elektrolit	k	0,67 W m ⁻¹ K ⁻¹
Temperatur masuk air	\dot{m}_c	0,25 kg s ⁻¹
Laju aliran massa air	$T_{c,i}$	298,15 K
Densitas air	ρ	997 kg m ⁻³
Viskositas dinamis air	μ	0,00089 Pa s
Panas jenis air	c_p	4,18 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Konduktivitas termal Air	k	0,56 W m ⁻¹ K ⁻¹

Tabel 4. Parameter Geometri Shell and Tube

Parameter	Notasi	Nilai
Tube pitch	Pt	0,032 m
Clearance	C'	0,038 m
Panjang Tube	L	0,762 m
Jumlah pass shell	N	1
Birmingham Gauge	Wire BWG	18
Diameter luar tube	Do	0,0254 m
Diameter dalam tube	Di	0,02291 m
Jumlah pass tube	n	2
Diameter dalam shell	Ds	0,203 m
Baffle spacing	B	0,0508 m
Overall heat transfer Coefficient asumsi	U _{assumsi}	120 W m ² K

B. Pemodelan Sistem Pendinginan VRFB

Sistem pendinginan VRFB ditujukan untuk mendinginkan baterai yang mengalami reaksi dari *battery stack* dengan merangkaikan alat penukar kalor *shell and tube* pada sistem VRFB. *Outlet battery stack* dihubungkan dengan *shell and tube* untuk mengalirkan dan mendinginkan fluida panas, yakni elektrolit vanadium dari *stack* menuju tangki elektrolit pada sisi positif dan sisi negatif baterai, seperti pada Gambar 1 dan Gambar 2. Desain dari *shell and tube* baterai dan tangki dibuat simetris dan seluruh properti dari fluida yang mengalir diasumsikan sama. Sehingga, simulasi yang dilakukan hanya pada salah satu sisi.

C. Perhitungan Alat Penukar Kalor Shell and Tube

Perhitungan dilakukan dengan metode Kern (1965) sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3. Dengan data awal pada Tabel 2 dan Tabel 3 [6].

Perhitungan *Heat Duty*,

$$Q = \dot{m}_h \cdot c_{p_h} \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{1}$$

$$Q = (0,052) \cdot (3200) \cdot (333,15 - 308,15) \tag{2}$$

$$Q = 10400 \text{ W} \tag{3}$$

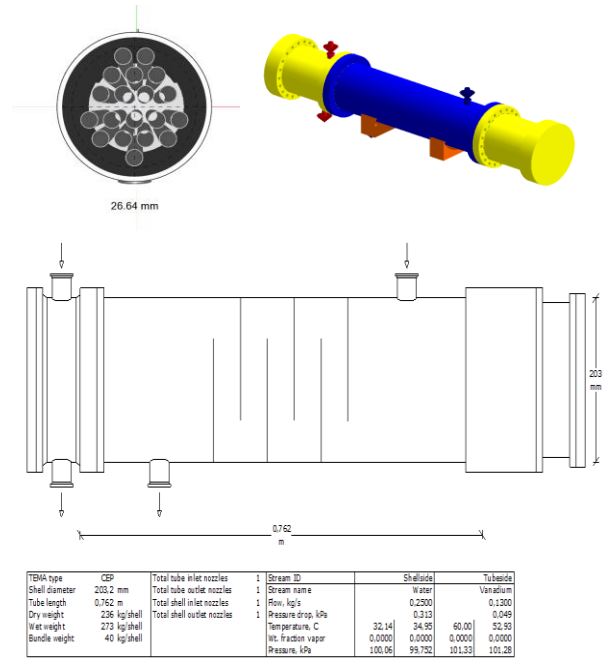
Perhitungan temperatur outlet air,

$$T_{c,o} = \frac{Q}{\dot{m}_c \cdot c_{p_c}} + T_{c,i} \tag{4}$$

$$T_{c,o} = \frac{10400}{(0,25) \cdot (4,18)} + 298,15 \tag{5}$$

Tabel 2. Error Perhitungan HTRI dan Perhitungan Manual

Parameter	Notasi	Nilai		Error
		HTRI	Perhitungan Manual	
<i>Effectiveness-NTU Method</i>	EMTD	16,2 K	16,2 K	0,00%
<i>Heat Duty Effective Area</i>	Q	10400 W	10400 W	0,00%
<i>Heat Transfer Coefficient</i>	A _{effective}	5,295 m ²	5,35 m ²	1,03%
	U _{actual}	147,78 W m ⁻² K ⁻¹	145,69 W m ⁻² K ⁻¹	1,43%



Gambar 4. Desain shell and tube HTRI exchanger suite.

$$T_{c,o} = 308,10 \text{ K} \tag{6}$$

Perhitungan *Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD)*,

$$LMTD = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)} \tag{7}$$

$$LMTD = \frac{(333,15 - 302,93) - (303,15 - 298,15)}{\ln\left(\frac{333,15 - 302,93}{303,15 - 298,15}\right)} \tag{8}$$

$$LMTD = 16,39 \text{ K} \tag{9}$$

$$F_T = 0,98 \tag{10}$$

$$\Delta t = LMTD \times F_T \tag{11}$$

$$\Delta t = 14,02 \times 0,8090 \tag{12}$$

$$\Delta t = 16,2 \text{ K} \tag{13}$$

Perhitungan luas permukaan perpindahan panas,

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta t \cdot LMTD} \tag{14}$$

$$A = \frac{10400}{120 \cdot 16,2} \tag{15}$$

$$A = 5,35 \text{ m}^2 \tag{16}$$

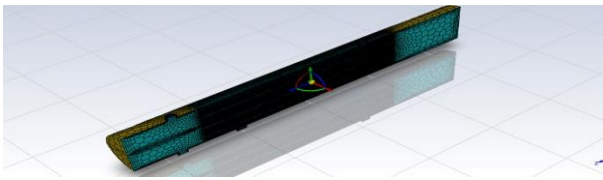
Perhitungan luas permukaan *shell*,

$$a_s = \frac{ID_s \times C' \times B}{P_T} \tag{17}$$

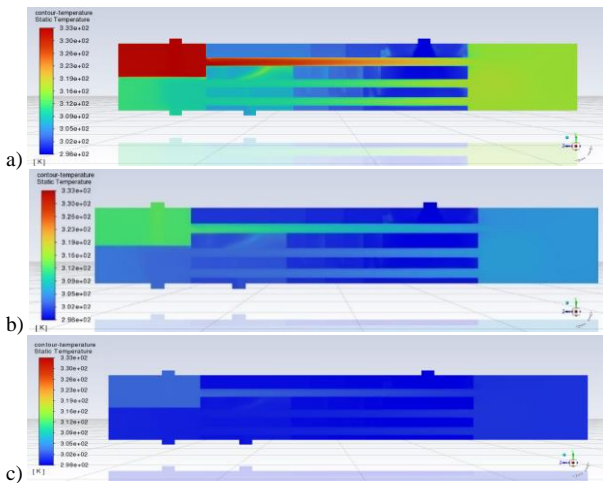
$$a_s = \frac{0,203 \times 0,038 \times 0,0508}{0,032} \tag{18}$$

$$a_s = 0,002062 \text{ m}^2 \tag{19}$$

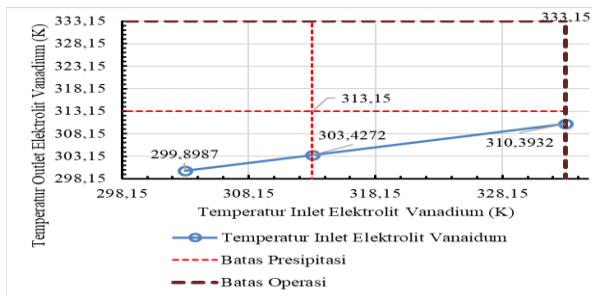
Perhitungan luas permukaan *tube*,



Gambar 7. Meshing shell and tube.



Gambar 8. Kontur temperatur shell and tube dengan laju aliran massa elektrolit vanadium 0,13 kg s⁻¹; laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹; serta temperatur inlet elektrolit vanadium a) 333,15 K; b) 313,15 K; dan c) 303,15 K.



Gambar 9. Grafik perbandingan temperatur inlet terhadap outlet elektrolit vanadium.

$$a_t = \frac{N_T \times a_t'}{N_P} \quad 20$$

$$a_t = \frac{19 \times \frac{\pi(0,02291)^2}{4}}{2} \quad 21$$

$$a_t = 0,007832 \text{ m}^2 \quad 22$$

Perhitungan Overall heat transfer coefficient shell side calculation,

$$G_s = \frac{m_s}{a_s} \quad 23$$

$$G_s = \frac{0,13}{0,002062} \quad 24$$

$$G_s = 121,2133 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad 25$$

$$D_e = \frac{1,10}{D_o} (P_t^2 - 0,917D_o^2) \quad 26$$

$$D_e = \frac{1,10}{0,0254} (0,032^2 - 0,917(0,0254)^2) \quad 27$$

$$D_e = 0,0217 \text{ m} \quad 28$$

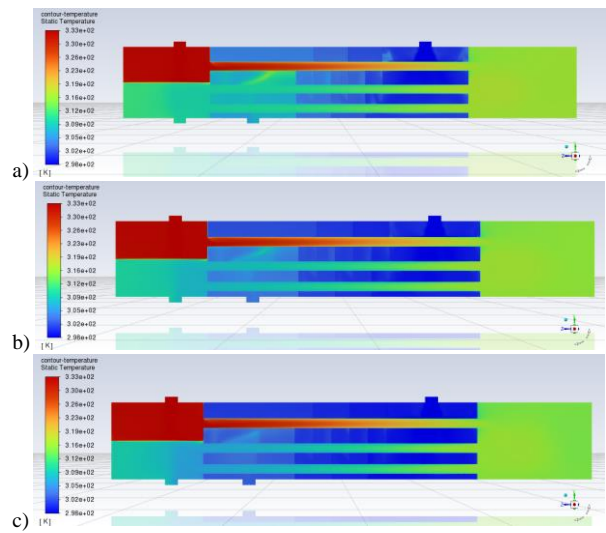
$$Re_s = \frac{G_s D_e}{\mu} \quad 29$$

$$Re_s = \frac{(121,2133)(0,0217)}{0,004298} \quad 30$$

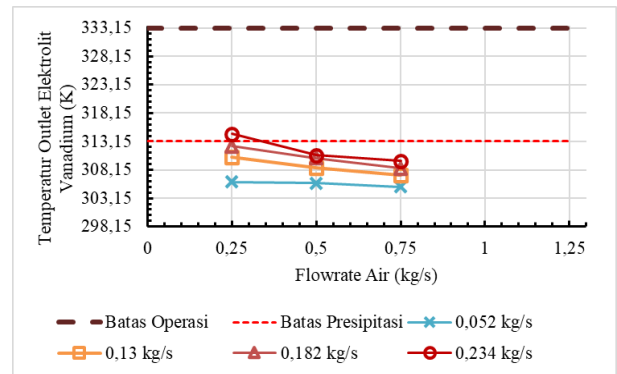
$$Re_s = 2958,61 \quad 31$$

$$j_H = 0,00536 \quad 32$$

$$h_o = \frac{k_s}{D_e} j_H Re_s \left(\frac{\mu C_P}{k_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 33$$



Gambar 5. Kontur temperatur shell and tube dengan temperatur inlet elektrolit vanadium 60°C; laju aliran massa elektrolit vanadium 0,13 kg s⁻¹; serta laju aliran massa air a) 0,25 kg s⁻¹; b) 0,5 kg s⁻¹; c); dan 0,75 kg s⁻¹.



Gambar 6. Perbandingan laju aliran massa elektrolit vanadium terhadap temperatur outlet elektrolit vanadium.

$$h_o = \frac{0,67}{0,0217} (0,00536) (2958,61) \left(\frac{(0,004298)(1300)}{0,67} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 34$$

$$h_o = 915,56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad 35$$

Perhitungan Overall heat transfer coefficient shell side calculation,

$$G_t = \frac{m_t}{a_t} \quad 36$$

$$G_t = \frac{0,25}{0,007832} \quad 37$$

$$G_t = 33,1955 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad 38$$

$$Re_t = \frac{G_t D_i}{\mu} \quad 39$$

$$Re_s = \frac{(33,1955)(0,02291)}{0,00089} \quad 40$$

$$Re_s = 118,17 \quad 41$$

$$j_H = 0,05762 \quad 42$$

$$h_i = \frac{k_s}{D_e} j_H Re_s \left(\frac{\mu C_P}{k_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 43$$

$$h_i = \frac{0,569}{0,02291} (0,05762) (118,17) \left(\frac{(0,00089)(997)}{0,569} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 44$$

$$h_i = 196,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad 45$$

$$h_{io} = h_i \times \frac{ID}{OD} \quad 46$$

$$h_{io} = 196,1 \times \frac{0,02291}{0,0254} \quad 47$$

$$h_{io} = 176,876 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad 48$$

Tabel 5.

Data Perbandingan Temperatur Inlet dan Outlet Elektrolit Vanadium

Laju Aliran Massa Elektrolit Vanadium (\dot{m}_h)	Laju Aliran Massa Air (\dot{m}_c)	Temperatur Inlet Elektrolit Vanadium ($T_{h,i}$)	Temperatur Outlet Elektrolit Vanadium ($T_{h,o}$)
0,13 kg s ⁻¹	0,25 kg s ⁻¹	303,15 K	299,8987 K
0,13 kg s ⁻¹	0,25 kg s ⁻¹	313,15 K	303,4272 K
0,13 kg s ⁻¹	0,25 kg s ⁻¹	333,15 K	310,3932 K

Tabel 6.

Perbandingan Laju Aliran Massa Air dengan Temperatur Outlet Elektrolit Vanadium

Laju Aliran Massa Elektrolit Vanadium (\dot{m}_h)	Laju Aliran Massa Air (\dot{m}_c)	Temperatur Inlet Elektrolit Vanadium ($T_{h,i}$)	Temperatur Outlet Elektrolit Vanadium ($T_{h,o}$)
0,13 kg s ⁻¹	0,25 kg s ⁻¹	303,15 K	299,8987 K
0,13 kg s ⁻¹	0,25 kg s ⁻¹	313,15 K	303,4272 K
0,13 kg s ⁻¹	0,25 kg s ⁻¹	333,15 K	310,3932 K

Perhitungan *Overall heat transfer coefficient actual*,

$$U_{actual} = \frac{h_{i0} \times h_o}{h_{i0} + h_o} \quad 49$$

$$U_{actual} = \frac{176,87 \times 915,56}{176,87 + 915,56} \quad 50$$

$$U_{actual} = 145,6903 \frac{W}{m^2K} \quad 51$$

Perhitungan *Over Design*,

$$Over\ Design = \frac{145,6903 - 120}{120} \quad 52$$

$$Over\ Design = 21,41\% \quad 53$$

Kemudian, parameter yang sama digunakan untuk perhitungan menggunakan *software* HTRI Exchanger Suite, sehingga didapatkan data perbandingan antara perhitungan manual dan *software* HTRI Exchanger Suite pada Tabel 4.

Berdasarkan nilai pada Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa perhitungan HTRI sudah mendekati perhitungan manual dengan nilai galat paling tinggi, yakni 1,43% yang berada di bawah 5%. Oleh karena itu, perhitungan HTRI dan manual dapat dikatakan valid. Sehingga desain dari HTRI Exchanger Suite dapat digunakan sebagai desain yang akan disimulasikan (Gambar 4).

Berikutnya pada Gambar 5 desain *shell and tube* disimulasikan dengan variasi temperatur inlet, laju aliran massa elektrolit vanadium, dan laju aliran massa air. Simulasi menggunakan *software* ANSYS Fluent untuk mengetahui kontur temperatur dan distribusi temperturnya. Dengan tahapan *meshing*, *setup fluent*, penentuan *boundary condition*, tahap perhitungan atau *solution*, *initialization*, *calculation*, dan validasi dengan *grid independence test*. Mesh yang digunakan memiliki jumlah *cell* 1893019 seperti pada Gambar 5.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Pengaruh Temperatur Inlet Elektrolit Vanadium terhadap Temperatur Outlet Elektrolit Vanadium

Gambar 6 menunjukkan kontur temperatur pada alat penukar kalor *shell and tube* dengan laju aliran massa elektrolit vanadium 0,13 kg s⁻¹ dan laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹. Variasi temperatur inlet elektrolit vanadium adalah 333,15 K, 313,15 K, dan 303,15 K (Tabel 5). Kontur

Tabel 7.

Pressure Drop

Variasi	Pressure Drop Shell (kPa)	Pressure Drop Tube (kPa)
1	1,8800	0,0620
2	1,5730	0,2480
3	1,2580	0,3650
4	1,2580	0,5380
5	6,0860	0,0520
6	4,8690	0,1980
7	4,8700	0,3650
8	3,6520	0,4370
9	13,4500	0,0520
10	10,7600	0,1980
11	8,0710	0,2740
12	8,0710	0,4370

Tabel 8.

Over Design

Variasi	Laju Aliran Massa Elektrolit Vanadium (kg s ⁻¹)	Laju Aliran Massa Air (kg s ⁻¹)	Over Design
1	0,052	0,25	17,13%
2	0,13	0,25	21,98%
3	0,182	0,25	6,47%
4	0,234	0,25	14,23%
5	0,052	0,5	13,55%
6	0,13	0,5	14,82%
7	0,182	0,5	26,56%
8	0,234	0,5	1,86%
9	0,052	0,75	19,77%
10	0,13	0,75	21,88%
11	0,182	0,75	0,73%
12	0,234	0,75	8,80%

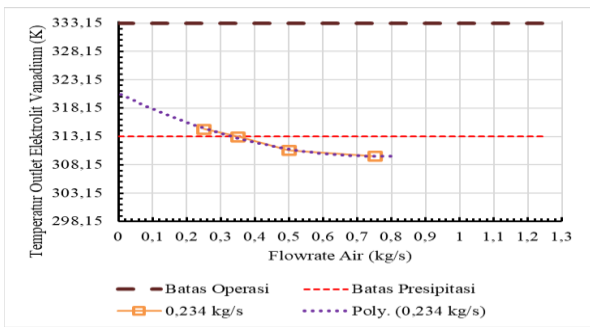
temperatur menunjukkan penurunan temperatur elektrolit vanadium menuju outlet *tube*, sementara temperatur inlet yang lebih tinggi menghasilkan temperatur outlet yang lebih tinggi juga. Perpindahan panas secara konveksi terjadi antara sisi *shell* dan *tube* sesuai dengan kesetimbangan energi.

Pada Gambar 6, temperatur inlet elektrolit vanadium 333,15 K memiliki rentang warna merah-hijau pada *tube*, sementara temperatur inlet lebih rendah, seperti pada 313,15 K dan 303,15 K, menghasilkan warna kontur biru pada sisi *tube*. Sisi *shell* menunjukkan gradasi warna dari biru ke hijau menuju outlet, menandakan perpindahan panas konvektif. Namun, pada temperatur inlet elektrolit vanadium 303,15 K, warna kontur *tube* tidak berubah signifikan karena mendekati temperatur inlet air pada sisi *shell*. Alat penukar kalor tidak dapat mendinginkan elektrolit vanadium di bawah suhu air (298,15 K atau 25°C) karena LMTD tidak dapat didefinisikan.

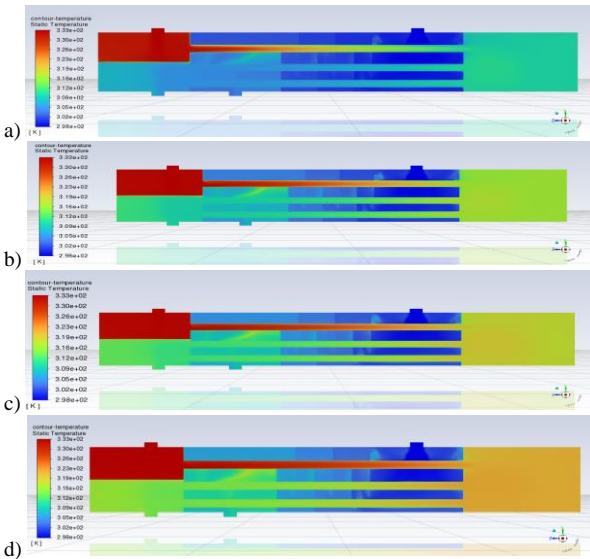
Data kuantitatif pada Tabel 5 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa temperatur outlet elektrolit vanadium meningkat seiring peningkatan temperatur inlet vanadium. Pada temperatur inlet elektrolit vanadium 333,15 K, temperatur tertinggi mencapai 310,39 K atau 37,24°C. Meskipun demikian, angka ini tetap berada di bawah suhu presipitasi elektrolit (313,15 K atau 40°C) dan suhu operasi maksimum (333,15 K atau 60°C). Alat penukar kalor *shell and tube* dapat mengontrol temperatur elektrolit vanadium di bawah suhu presipitasi, memastikan operasional yang efektif.

B. Analisis Pengaruh Laju Aliran Massa Air terhadap Temperatur Outlet Elektrolit Vanadium

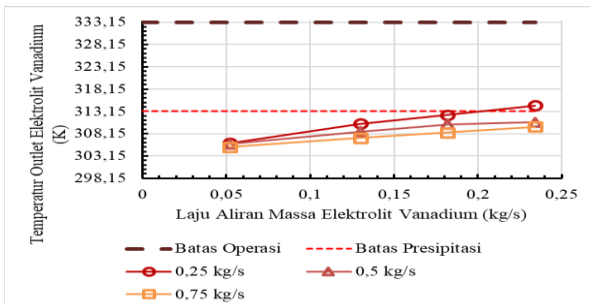
Gambar 8 menunjukkan kontur temperatur pada alat penukar kalor *shell and tube* dengan data input temperatur inlet elektrolit vanadium 60°C, laju aliran massa air 0,25 kg



Gambar 13. Regresi non-linear laju aliran massa air pada laju aliran massa elektrolit vanadium 0,234 kg s⁻¹.



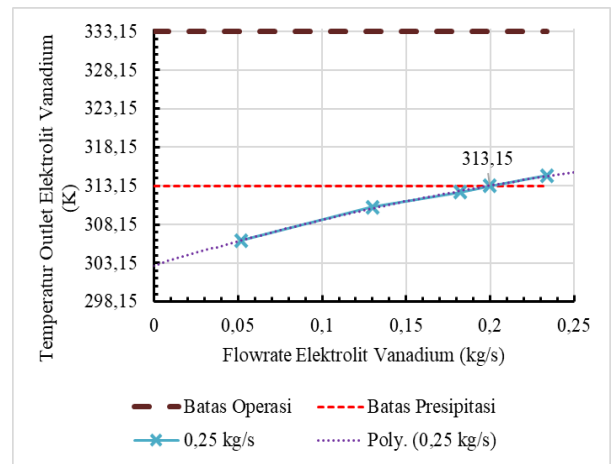
Gambar 14. Kontur temperatur *shell and tube* dengan temperatur inlet elektrolit vanadium 60°C; laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹; serta laju aliran massa elektrolit vanadium a) 0,052 kg s⁻¹; b) 0,13 kg s⁻¹; c) 0,182 kg s⁻¹; dan d) 0,234 kg s⁻¹.



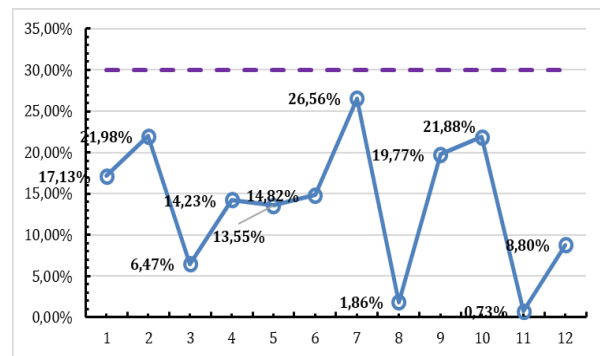
Gambar 15. Perbandingan laju aliran massa elektrolit vanadium terhadap temperatur outlet elektrolit vanadium.

s⁻¹, dan variasi laju aliran massa elektrolit vanadium 0,052 kg s⁻¹, 0,13 kg s⁻¹, 0,182 kg s⁻¹, dan 0,234 kg s⁻¹. Pada *tube*, gradasi warna dari merah ke biru terlihat saat laju aliran massa elektrolit vanadium 0,052 kg s⁻¹. Semakin tinggi laju aliran massa elektrolit vanadium, warna gradasi temperatur semakin mendekati kuning karena temperatur outlet elektrolit vanadium yang lebih tinggi. Pada sisi *shell*, gradasi warna dari biru ke hijau kekuningan terlihat karena perpindahan panas dari *tube* ke *shell*. Semakin tinggi laju aliran massa elektrolit vanadium, warna kontur temperatur outlet sisi *shell* semakin mendekati kuning, menunjukkan bahwa temperatur outlet air juga semakin tinggi.

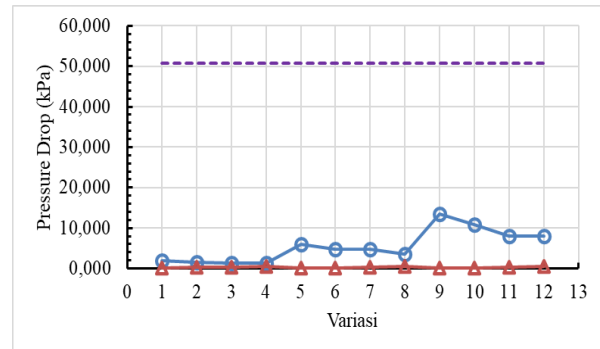
Data perbandingan laju aliran massa air dengan temperatur outlet elektrolit vanadium pada Tabel 6 dan Gambar 9 menunjukkan bahwa semakin tinggi laju aliran massa air, temperatur outlet elektrolit vanadium semakin rendah.



Gambar 10. Regresi non-linear laju aliran massa elektrolit vanadium pada laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹.



Gambar 11. Grafik *over design*.



Gambar 12. *Pressure drop*.

Temperatur tertinggi tercapai pada laju aliran massa elektrolit vanadium 0,234 kg s⁻¹ dan laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹, sementara temperatur terendah terjadi pada laju aliran massa elektrolit vanadium 0,052 kg s⁻¹ dan laju aliran massa air 0,75 kg s⁻¹. Grafik dari data Gambar 9 membentuk garis persamaan hiperbolik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada laju aliran massa elektrolit vanadium 0,234 kg s⁻¹ dan laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹, temperatur outlet elektrolit vanadium berada di atas batas presipitasi. Namun, pada laju aliran massa elektrolit vanadium 0,182 kg s⁻¹ dan laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹, temperatur elektrolit vanadium mendekati batas presipitasi. Selain itu, laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹ hingga 0,75 kg s⁻¹ memiliki temperatur yang aman untuk laju aliran massa 0,182 kg s⁻¹, 0,13 kg s⁻¹, dan 0,052 kg s⁻¹ karena tidak melebihi batas temperatur presipitasi dan operasi. Namun, pada laju aliran massa 0,234 kg s⁻¹ pada laju aliran massa air 0,25 kg s⁻¹, telah melewati batas presipitasi.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Wei et al. (2014),

yang mana kenaikan laju aliran dari $250 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ hingga $1250 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ dari fluida dingin menyebabkan penurunan temperatur elektrolit vanadium karena peningkatan *heat transfer coefficient* yang berbanding lurus dengan nilai *mass velocity* dan bilangan Reynold dari fluida. Dengan demikian, pemahaman mengenai hubungan antara laju aliran massa air dan elektrolit vanadium dalam alat penukar kalor *shell and tube* penting untuk mengoptimalkan proses pendinginan dan memastikan operasional yang aman dan efektif [7].

Dengan menggunakan pendekatan dengan *trendline polynomial least order* secara grafik, batas laju aliran massa air yang aman pada laju aliran massa $0,234 \text{ kg s}^{-1}$ dapat ditentukan seperti pada Gambar 10, yang mana nilai temperatur $313,15 \text{ K}$ dicapai ketika laju aliran massa air sebesar $0,35 \text{ kg s}^{-1}$. Pendekatan linear digunakan karena persamaan kesetimbangan energi membentuk regresi non-linear. Sehingga, pada penggunaan VRFB dengan laju aliran massa sebesar $0,234 \text{ kg s}^{-1}$ diperlukan laju aliran massa air setidaknya $0,35 \text{ kg s}^{-1}$.

C. Analisis Pengaruh Aliran Massa Elektrolit Vanadium terhadap Temperatur Outlet Elektrolit Vanadium

Gambar 11 merupakan kontur temperatur pada alat penukar kalor *shell and tube* yang diambil dengan data input temperatur inlet elektrolit vanadium 60°C , laju aliran massa air $0,25 \text{ kg s}^{-1}$, serta variasi laju aliran massa elektrolit vanadium $0,052 \text{ kg s}^{-1}$; $0,13 \text{ kg s}^{-1}$; $0,182 \text{ kg s}^{-1}$; dan $0,234 \text{ kg s}^{-1}$. Kontur temperatur pada *tube* menunjukkan warna gradasi merah ke biru pada variasi laju aliran massa elektrolit vanadium $0,052 \text{ kg s}^{-1}$. Kemudian, apabila diamati semakin meningkat laju aliran massa elektrolit vanadium maka warna gradasi temperatur semakin mendekati kuning. Hal tersebut disebabkan karena temperatur outlet elektrolit vanadium semakin tinggi. Pada sisi *shell* gradasi terlihat dari biru ke hijau kekuningan karena terjadi perpindahan panas dari sisi *tube* ke *shell*. Semakin tinggi laju aliran massa elektrolit vanadium maka warna dari kontur temperatur outlet sisi *shell* semakin mendekati kuning. Hal tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi laju aliran massa elektrolit vanadium, maka semakin tinggi pula temperatur outlet dari air.

Peningkatan laju aliran massa fluida panas, seperti elektrolit vanadium, menyebabkan peningkatan temperatur outlet karena lebih banyak energi panas ditransfer ke fluida tersebut dalam waktu yang lebih singkat. Kontak yang lebih singkat antara fluida panas dan pendingin juga dapat meningkatkan perbedaan temperatur antara keduanya, meningkatkan efisiensi pertukaran panas, dan menyebabkan suhu keluaran fluida panas lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan prinsip pertukaran panas dan sifat termal sistem. Kemudian, dengan data pada Tabel 6, nilai laju aliran massa elektrolit vanadium terhadap temperatur outlet elektrolit vanadium diplot pada koordinat kartesius dengan garis berdasarkan variasi laju aliran massa air seperti pada Gambar 12.

Jika diamati keempat garis tersebut terjadi peningkatan temperatur outlet elektrolit vanadium dengan grafik yang membentuk garis persamaan hiperbolik. Berdasarkan Gambar 12 garis tertinggi hingga terendah secara berturut-turut, yaitu $0,25 \text{ kg s}^{-1}$; $0,5 \text{ kg s}^{-1}$; dan $0,75 \text{ kg s}^{-1}$. Adapun pada laju aliran massa air $0,25 \text{ kg s}^{-1}$ dengan laju aliran massa elektrolit vanadium $0,234 \text{ kg s}^{-1}$; nilai dari temperatur outlet

elektrolit vanadium melebihi batas presipitasi elektrolit vanadium. Laju aliran massa elektrolit vanadium $0,052 \text{ kg s}^{-1}$ hingga $0,234 \text{ kg s}^{-1}$ memiliki temperatur yang aman untuk laju aliran massa air $0,5 \text{ kg s}^{-1}$ dan $0,75 \text{ kg s}^{-1}$ karena tidak melebihi batas temperatur presipitasi dan juga batas temperatur operasi. Sedangkan, untuk laju aliran massa $0,25 \text{ kg s}^{-1}$ pada laju aliran massa air $0,234 \text{ kg s}^{-1}$ telah melewati batas presipitasi.

Dengan menggunakan pendekatan dengan *trendline polynomial least order* secara grafik, batas laju aliran massa vanadium yang aman pada laju aliran massa air $0,25 \text{ kg s}^{-1}$ dapat ditentukan seperti pada Gambar 13, yang mana nilai temperatur $313,15 \text{ K}$ dicapai ketika laju aliran massa air sebesar $0,2 \text{ kg s}^{-1}$. Pendekatan *polynomial least order* digunakan karena persamaan kesetimbangan energi membentuk regresi non-linear. Sehingga, pada penggunaan alat penukar kalor *shell and tube* dengan laju aliran massa air sebesar $0,25 \text{ kg s}^{-1}$ diperlukan pengaturan laju aliran massa elektrolit vanadium pada VRFB di bawah $0,2 \text{ kg s}^{-1}$.

D. Analisis Over Design

Over design adalah kondisi di mana sistem, perangkat, atau komponen dirancang dengan spesifikasi yang melampaui kebutuhan sebenarnya. Model atau kapasitas yang dipilih lebih besar dari yang diperlukan untuk mencapai tujuan atau kegiatan yang diinginkan. Dalam perancangan sistem pendinginan *shell and tube* pada sistem VRFB, terdapat *over design* dengan pertimbangan, yang mana terdapat variasi laju aliran massa elektrolit vanadium pada kondisi operasi VRFB. Oleh karena itu, dalam perancangan sistem pendinginan dibutuhkan penyesuaian pada laju aliran massa air untuk mencapai target temperatur outlet dari elektrolit vanadium dengan menggunakan prinsip kesetimbangan energi. Adapun data *over design* dapat diperoleh menggunakan HTRI Exchanger Suite seperti pada Tabel 7.

Berdasarkan Gambar 14 nilai *over design* terkecil ada pada variasi ke 11 dengan laju aliran massa elektrolit vanadium sebesar $0,182 \text{ kg s}^{-1}$ dan laju aliran massa air $0,75 \text{ kg s}^{-1}$. Nilai *over design* terbesar ada pada variasi ke 7 dengan laju aliran massa elektrolit vanadium $0,182 \text{ kg s}^{-1}$ dan laju aliran massa air $0,5 \text{ kg s}^{-1}$. Kemudian, jika mengacu pada toleransi perancangan *shell and tube* pada umumnya nilai *over design* diharapkan berada di bawah 30%. Pada grafik terlihat bahwa seluruh variasi nilai *over design* berada di bawah 30% sehingga *design shell and tube* bisa dikatakan sesuai dengan kondisi operasi VRFB.

E. Analisis Pressure Drop Alat Penukar Kalor Shell and Tube

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, perubahan laju aliran massa elektrolit vanadium dan juga perubahan laju aliran massa air mengakibatkan terjadinya perubahan pada *pressure drop*. Dalam perancangan *shell and tube*, *pressure drop* menjadi parameter penting karena mempengaruhi efisiensi dari sistem. Dengan *pressure drop* yang tinggi maka mengharuskan pompa untuk berkerja lebih keras dan membutuhkan energi lebih. Berdasarkan simulasi menggunakan HTRI Exchanger Suite didapatkan data *pressure drop* sebagai berikut.

Berdasarkan data pada Tabel 8 dan Gambar 15 dapat dilihat bahwa *pressure drop* pada *shell and tube* tidak terlalu tinggi yakni berada di rentang $1,258 \text{ kPa}$ hingga $13,45 \text{ kPa}$ di

sisi *shell* dan 0,052 kPa hingga 0,5380 kPa di sisi *tube*. Jika dilihat hubungan antara laju aliran massa fluida. Semakin tinggi laju aliran massa, maka semakin tinggi pula *pressure drop* yang terjadi, baik pada *shell*, maupun pada *tube*. Data tersebut sesuai dengan penelitian, yakni laju aliran massa fluida dingin dan fluida panas mempengaruhi *pressure drop* secara signifikan [7]. Hal ini disebabkan semakin tinggi laju aliran massa, maka akan meningkat pula *Reynold Number* dan juga *mass velocity* dari fluida pada *shell and tube*, sehingga fluida semakin turbulen. Di mana, *pressure drop* berbanding lurus dengan *mass velocity* dan juga faktor gesekan yang merupakan fungsi dari *Reynold Number*. Apabila diamati, seluruh data tersebut berada di bawah *pressure drop allowance*, yakni 50,662 kPa; sehingga, *pressure drop* bisa dikatakan aman.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut: (1) *Shell and tube* yang digunakan adalah tipe 1-2 pass dengan *counter flow* dan standarisasi TEMA tipe CEP. Digunakan untuk pendinginan baterai VRFB dengan laju aliran massa elektrolit vanadium yang optimal pada rentang 0,052 kg s⁻¹ hingga 0,2 kg s⁻¹ dan laju aliran massa air yang optimal pada 0,35 kg s⁻¹ hingga 0,75 kg s⁻¹ serta *over design* optimal, pada 5,19%; 14,56%; dan 16,73%. (2) Kontur temperatur menunjukkan penurunan temperatur ketika terjadi peningkatan laju aliran massa air

dan peningkatan temperatur ketika terjadi peningkatan laju aliran massa elektrolit vanadium. (3) Temperatur inlet dan outlet elektrolit vanadium berhubungan linear, rentang pendinginan adalah 30°C hingga 60°C. (4) Peningkatan laju aliran massa dapat meningkatkan *pressure drop*, dengan nilai tertinggi pada sisi *shell* 5,315 kPa dan terendah pada sisi *tube* 0,0063 kPa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sugiyono, "Outlook Energi Indonesia 2015-2035: Prospek Energi Baru Terbarukan," *J Energi Dan Lingkungan*, vol. 12, pp. 87–96, 2016.
- [2] Pemerintah RI, "Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 112 Tahun 2022 Tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik." Badan Pemeriksaan Keuangan, Jakarta, p. 30, 2022. [Online]. Available: jdih.setneg.go.id
- [3] M. Messaggi *et al.*, "Analysis of flow field design on vanadium redox flow battery performance: Development of 3D computational fluid dynamic model and experimental validation," *Appl. Energy*, vol. 228, pp. 1057–1070, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.148.
- [4] H. Shen, X. Zhu, H. Cao, and B. Xue, "Thermal Modeling and Temperature Control of an All-Vanadium Redox Flow Battery," in *12th Asian Control Conference (ASCC)*, 2019, pp. 1536–1541.
- [5] M. S. Atikayanti, S. F. Nur, B. Santoso, and A. Ekayuliana, "Analisis Perbandingan Heat Exchanger Tipe Plate-Frame dan Shell And Tube pada Intercooler," in *Seminar Nasional Teknik Mesin*, 2018, pp. 335–345.
- [6] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, and others, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed., vol. 6. New York: Wiley, 1996, ISSN: 0470501979.
- [7] Z. Wei, J. Zhao, and B. Xiong, "Dynamic electro-thermal modeling of all-vanadium redox flow battery with forced cooling strategies," *Appl. Energy*, vol. 135, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.062.