

Desain dan Analisis Sistem Pengkondisian Udara Berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada Kereta Ukur Sulawesi di PT. INKA (Persero)

Shinta Aprilia Safitri, Sarwono, dan Ridho Hantoro

Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail : shintasafitri2@gmail.com, sarwono@ep.its.ac.id

Abstrak—Sistem pengkondisian udara memegang peranan penting dalam menunjang tercapainya tingkat kenyamanan termal. Kenyamanan termal dalam kereta dapat tercapai apabila penumpang mendapatkan suplai temperatur, tingkat kelembaban, maupun pergerakan udara yang ideal dari lingkungannya. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, Kereta Ukur Sulawesi membutuhkan kapasitas pendinginan minimum sebesar 106.116,13 Btu/hr atau setara dengan 31,1 kW. Beban tersebut dapat ditangani dengan memasang 2 unit AC dengan kapasitas masing-masing sebesar 17,5 kW. Udara dari AC menuju ke dalam kereta Ukur Sulawesi akan disalurkan lewat saluran udara yang dirancang dengan 2 bentuk, yaitu lurus dan bercabang yang masing-masing memiliki variasi sudut pengarah pada lubang keluaran udara. Analisis desain saluran udara dilakukan dengan menggunakan software berbasis CFD. Variasi sudut pengarah menyebabkan terjadinya perubahan temperatur rata-rata dalam kereta. Pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa desain saluran udara yang paling baik untuk diterapkan pada Kereta Ukur Sulawesi adalah saluran udara bercabang dengan variasi sudut pengarah 75 derajat. Variasi tersebut menghasilkan temperatur rata-rata 7,513°F dengan kelembaban relatif 78,3%.

Kata Kunci—Beban Pendinginan, CFD, Kereta Ukur Sulawesi, Sistem Pengkondisian Udara.

I. PENDAHULUAN

BERDASARKAN SNI 03-6390-2000, pengkondisian udara diperlukan untuk mengendalikan temperatur ruangan, kelembaban relatif, kualitas serta persebaran udara [1]. Kenyamanan termal dalam kereta dapat tercapai ketika penumpang mendapatkan *supply* temperatur udara, tingkat kelembaban, maupun panas yang ideal dari lingkungan sekitarnya [2]. Oleh sebab itu, perlu dipasang suatu sistem pengkondisian udara (*Air Conditioning System*) pada Kereta Ukur Sulawesi untuk menunjang tercapainya tingkat kenyamanan termal yang dibutuhkan oleh penumpang.

Sesuai dengan spesifikasi teknis kereta ukur yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Perkeretaapian Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, pada Kereta Ukur Sulawesi akan dilengkapi dengan dua buah AC sentral [3]. Namun, penggunaan AC sentral seringkali mengakibatkan timbulnya beberapa masalah dari segi energi maupun segi ekonomi. Ditinjau dari sisi energi, sebanyak 70% dari total penggunaan energi dalam kereta api terpakai untuk memenuhi kebutuhan sistem pengkondisian udara. Sedangkan dari sisi ekonomi, penggunaan AC sentral menyebabkan peningkatan

initial cost untuk biaya instalasi saluran udara maupun isolasi termal.[4]

Sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka perlu dilakukan optimasi desain pada sistem pengkondisian udara. Perancangan desain sistem pengkondisian udara yang baik dan efektif akan menghasilkan *supply* udara yang lebih baik serta meminimalisir terjadinya kerugian pada saat proses pendistribusian udara.[5] Sehingga, pada studi ini akan dilakukan desain dan analisis sistem pengkondisian udara dengan menggunakan *software* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk diterapkan pada Kereta Ukur Sulawesi di PT. INKA (Persero).

II. TEORI PENUNJANG

A. Kenyamanan Termal

Berdasarkan SNI 03-6572-2001, terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kenyamanan seseorang, diantaranya [6]:

- Kelembaban Udara Relatif (RH)

Kelembaban udara relatif adalah kemampuan udara untuk menerima kandungan uap air atau perbandingan antara tekanan uap terhadap tekanan jenuh air[7]. Besarnya nilai RH didapatkan dari diagram psikrometrik, yaitu pada perpotongan nilai entalpi dan temperatur bola kering. Adapun persamaan untuk mendapatkan nilai h yaitu [8]:

$$h = (1,006 \cdot T_{ab}) + [W \cdot (2501 + 1,805 \cdot T_{ab})] \quad (1)$$

Nilai kelembaban udara relatif dikelompokkan menjadi beberapa kategori, diantaranya [9]:

- RH \leq 40% : kurang nyaman, kulit merasa kering yang tidak wajar.
- 50% \leq RH \leq 80% : nyaman, kulit kering wajar.
- 80% \leq RH \leq 90% : hangat nyaman.
- RH $>$ 90% : tidak nyaman, udara pengap (terasa berat menekan).

- Temperatur Udara Kering

Temperatur udara kering sangat besar pengaruhnya terhadap besar kecilnya kalor yang dilepas melalui penguapan (evaporasi) dan melalui konveksi. Daerah kenyamanan termal untuk daerah tropis dapat dibagi menjadi:

- a. sejuk nyaman, antara temperatur efektif 20,5^oC - 22,8^oC.
- b. nyaman optimal, antara temperatur efektif 22,8^oC - 25,8^oC.
- c. hangat nyaman, antara temperatur efektif 25,8^oC - 27,1^oC.
- Pergerakan Udara (Kecepatan Udara)
Untuk mempertahankan kondisi nyaman, kecepatan udara yang jatuh diatas kepala tidak boleh lebih besar dari 0,5 m/detik dan sebaiknya lebih besar dari 0,15 m/detik.
- Radiasi Permukaan yang Panas
- Aktivitas Orang

B. Beban Pendinginan

Tujuan utama sistem pengkondisian udara adalah mempertahankan keadaan udara didalam ruangan dan meliputi pengaturan temperatur, kelembaban relatif, kecepatan sirkulasi udara maupun kualitas udara. Pada tahap perencanaan, perhitungan beban pendinginan yang tepat akan menjadi dasar untuk pemilihan jenis dan kapasitas peralatan pendinginan. Perhitungan beban pendinginan dilakukan dengan menggunakan metode *Cooling Load Temperature Difference* (CLTD). Metode ini seringkali digunakan untuk memperkirakan besarnya beban pendinginan yang dipengaruhi oleh tiga jenis beban panas (beban panas akibat konduksi, beban panas akibat radiasi, dan beban panas internal)[10].

- Beban Panas akibat konduksi

$$Q = U \times A \times CLTD_C \tag{2}$$

$$CLTD_C = \frac{(CLTD + LM) \times K + (78 - t_R) + (t_{0a} - 85)}{1} \tag{3}$$

- Beban Panas akibat radiasi

$$Q = A \times SC \times SHGF \times CLF \tag{4}$$

- Beban Infiltrasi dan Ventilasi

$$Q_S = 1.1 \times CFM \times TD \tag{5}$$

$$Q_L = 0.68 \times CFM \times (W'_{OA} - W'_i) \tag{6}$$

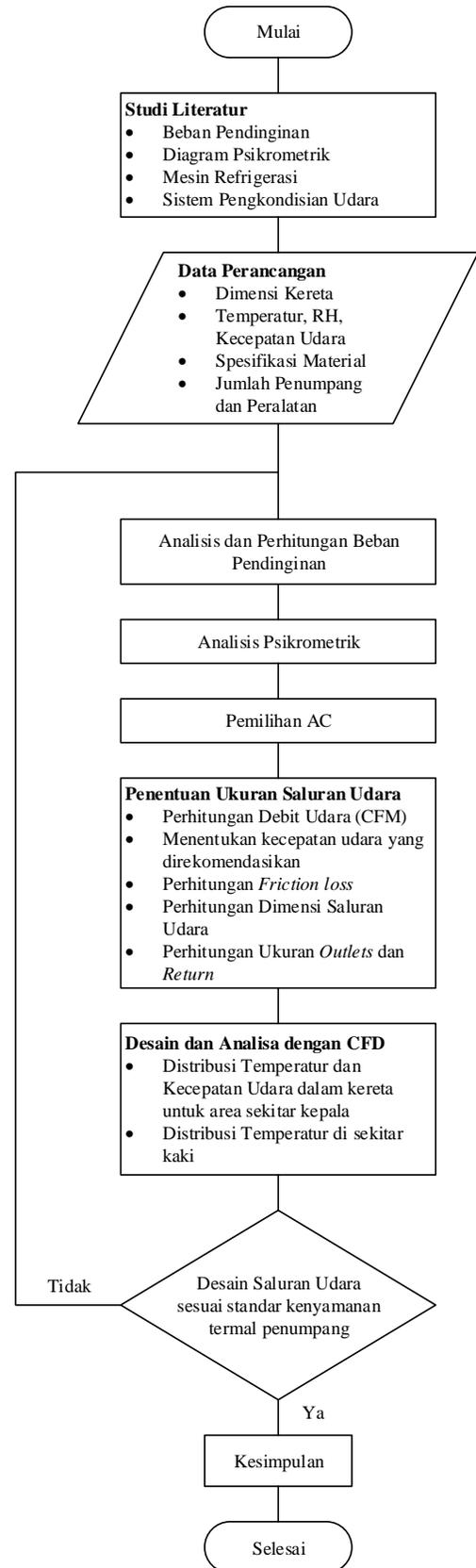
- Beban Panas Penumpang

$$Q_{OrangS} = q_s \times n \times CLF_p \tag{7}$$

$$Q_{OrangL} = q_L \times n \tag{8}$$

- Beban Panas Peralatan

$$Q_{Equipment} = (q_{EqS} \times CLF_{Eq}) + q_{EqL} \tag{9}$$



Gambar 1. Diagram Alir Studi

Dalam mencapai tujuan pada penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan utama, yaitu perhitungan dan simulasi dengan *software* berbasis CFD.

III. URAIAN PENELITIAN

Langkah-langkah dalam pelaksanaan penelitian studi ini ditunjukkan pada diagram alir di bawah ini.

A. Perhitungan Beban Pendinginan

Perhitungan beban pendinginan pada Kereta Ukur Sulawesi mengacu pada data primer yang ditampilkan pada tabel 1 dan data sekunder yang ditampilkan pada tabel 2. Kereta Ukur Sulawesi merupakan suatu kereta yang digunakan untuk keperluan pengukuran dan pengujian prasarana penunjang kereta api yang akan dioperasikan di wilayah Sulawesi dengan rute sepanjang Makassar sampai Manado. Kereta ini memiliki dimensi sepanjang 72,18 ft dengan lebar 10,67 ft. Kereta Ukur Sulawesi mampu melaju hingga kecepatan maksimal 328084 ft/hr atau setara dengan 100km/hr.

Tabel 1.
Data Spesifikasi Teknis Kereta Ukur Sulawesi

Beban Eksternal				
Jenis Beban	Material	Tebal		Konduktivitas Btu/h.ft.F
		mm	ft	
Dinding	Corten steel SPA-C	2	0,0065617	7,28
	GFRP	2	0,0065617	0,021
	Celah udara	20	0,0656168	
	Rock wool	10	0,0328084	0,039
Atap	Corten steel SPA-C	2	0,0065617	7,28
	GFRP	2	0,0065617	0,021
	Celah udara	20	0,0656168	
	Rock wool	10	0,0328084	0,039
Lantai	Corten steel SPA-C	1,2	0,003937	7,28
	Unitex	3,25	0,0106627	
	Lenoleum	2,5	0,0082021	
	Tempered laminasi (kegelapan 60%)	14,14	0,0463911	
Beban Internal				
Jenis Beban	Jumlah	Daya (Watt)		
Penumpang	25	-		
Lampu Fluorescent	4	820		
Dispenser	1	250		
Monitor <i>meeting room</i>	6	60		
Monitor cctv	1	90		
Komputer	1	120		

Tabel 2.
Data Perancangan

Data	
Temperatur indoor	75.20 °F
Temperatur outdoor	92.12 °F
RH indoor	50%
RH outdoor	70%

Beban pendinginan dihitung menggunakan metode *Cooling Load Temperature Difference* (CLTD). Metode ini seringkali digunakan untuk memperkirakan besarnya beban pendinginan yang dipengaruhi oleh tiga jenis beban panas (beban panas akibat konduksi, beban panas akibat radiasi, dan beban panas internal) [10].

Tabel 3.
Beban Pendinginan pada Kereta Ukur Sulawesi

Space Load components	Sensible Load		Latent Load	
	Btu/hr	W	Btu/hr	W
Konduksi dari Atap	7478,48	2191,73	0,00	0,00
Konduksi dari Dinding	9877,57	2894,83	0,00	0,00
Konduksi dari Kaca	9503,49	2785,20	0,00	0,00
Konduksi dari Lantai	2558,82	749,92	0,00	0,00
Radiasi Matahari dari Kaca	6388,51	1872,29	0,00	0,00
Penumpang	5750,00	1685,16	4625,00	1355,45
Penerangan	13940,00	4085,41	0,00	0,00
Peralatan	2788,00	817,08	0,00	0,00
Infiltrasi	1762,87	516,64	6174,92	1809,69
Total Space Cooling Load	60047,74	17598,25	10799,92	3165,14

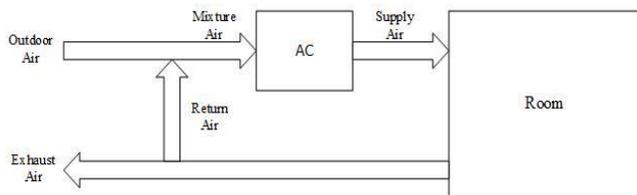
B. Perhitungan Udara Supply

Dari perhitungan beban pendinginan yang telah dilakukan, didapatkan nilai beban-beban sebagaimana ditunjukkan oleh tabel 4. Sehingga didapatkan beban total minimal yang harus ditanggung AC untuk mengkondisikan udara di dalam Kereta Ukur Sulawesi.

Tabel 4.
Beban-Beban pada Kereta Ukur Sulawesi

	Btu/hr	Kkal/hr	Watts	PK
RSHG	60047,74	15141,88	17598,26	6,67
RLHG	10799,92	2723,35	3165,14	1,20
RSHGk	63050,13	15898,97	18478,17	7,01
RTHG	70847,66	17865,23	20763,40	7,87
RTHGk	74390,04	18758,49	21801,57	8,27
OASH	6979,50	1759,98	2045,49	0,78
OALH	24447,62	6164,81	7164,89	2,72
OASHk	7328,48	1847,98	2147,76	0,81
OATHk	31776,09	8012,79	9312,65	3,53
GTH	106166,13	26771,28	31114,22	11,80

Sistem pendistribusian udara pada Kereta Ukur Sulawesi adalah pengkondisian udara dengan menggunakan *mixture air* sebagaimana diilustrasikan oleh gambar 2.



Gambar 2. Skema *mixture air*

Supply udara berperan penting dalam proses pendinginan ruangan. Temperatur udara suplai biasanya dapat ditentukan terlebih dahulu sehingga beda temperatur udara antara ruangan dan supply berkisar 15-30°F. Dalam hal ini, diasumsikan beda temperatur udara sebesar 18°F [11]

$$T_R - T_S = 18^\circ\text{F}$$

$$T_S = 75,2 - 18 = 57,2^\circ\text{F}$$

Sehingga besarnya debit udara supply dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$CFM_s = \frac{RSHG}{1,1 \times (T_R - T_S)}$$

$$= 1592,17 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$= 1600 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Debit udara tersebut adalah debit udara supply yang dibutuhkan oleh 1 AC. Jika Kereta Ukur menggunakan 2 buah AC, maka besarnya debit udara suplai yang dibutuhkan adalah:

$$CFM_{2S} = 2 \times 1600 = 3200 \text{ ft}^3/\text{min}$$

C. Perhitungan Ukuran Saluran Udara

Perancangan saluran udara dilakukan dengan menggunakan metode *equal friction*.

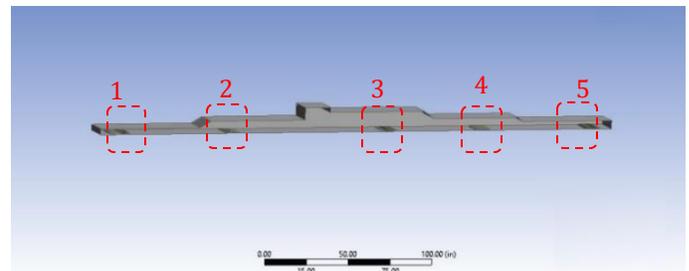
Tabel 5. Ukuran Saluran Lurus Kereta Ukur Sulawesi

Section	Airflow (ft ³ /min)	Velocity (ft/min)	Diameter (in)	Rect. Size (in)	Friction Loss (in.w.per 100 ft)
0	1600	900	18,0	16x16	0,067
0 - 2	700	750	13,2	9x16	0,067
0 - 3	900	800	15,1	12x16	0,067
2 - 1	400	650	10,8	6x16	0,067
3 - 4	600	700	12,4	7.5x16	0,067
4 - 5	300	600	9,6	5x16	0,067

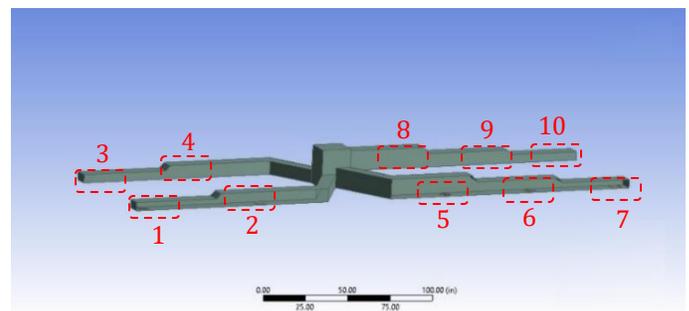
Tabel 6. Ukuran Saluran Bercabang Kereta Ukur Sulawesi

Section	Airflow (ft ³ /min)	Velocity (ft/min)	Diameter (in)	Rect. Size (in)	Friction Loss (in.w.per 100 ft)
0	1600	900	18,0	15x18	0,067
0-2	320	600	9,8	8x10	0,067
2-1	160	500	7,6	5x10	0,067
0-4	320	600	9,8	8x10	0,067
3-4	160	500	7,6	5x10	0,067
0-5	480	680	12,0	12x10	0,067

5-6	320	600	9,8	8x10	0,067
6-7	160	500	7,6	5x10	0,067
0-8	480	680	12,0	12x10	0,067
8-9	320	600	9,8	8x10	0,067
9-10	160	500	7,6	5x10	0,067



Gambar 3. Desain saluran udara lurus



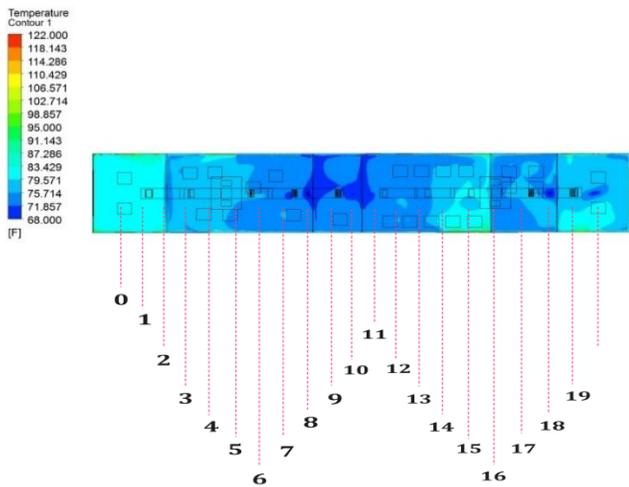
Gambar 4. Desain saluran udara bercabang

Desain saluran udara lurus memiliki 5 lubang keluaran dengan ukuran 12 inch x 12 inch untuk lubang yang mengeluarkan debit udara 400 ft³/min dan ukuran 12 inch x 9 inch untuk lubang yang mengeluarkan debit udara sebesar 300 ft³/min. Sedangkan saluran udara yang bercabang memiliki 10 lubang keluaran, dengan ukuran lubang udara 5 inch x 6 inch untuk lubang yang mengeluarkan debit sebesar 160 ft³/min. Pada masing-masing lubang udara dilengkapi dengan pengarah atau disebut *grill* dengan variasi 45 derajat, 60 derajat, 75 derajat, dan 90 derajat.

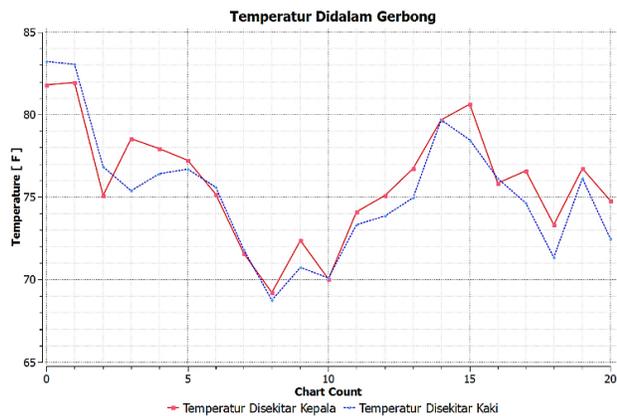
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Distribusi Temperatur pada Kereta Ukur Sulawesi

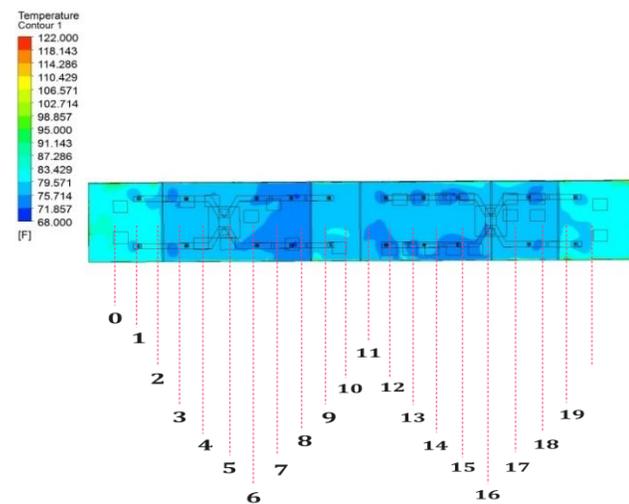
Dari hasil kontur temperatur, nampak bahwa distribusi temperatur dalam kereta pada saluran bercabang lebih merata jika dibandingkan dengan saluran lurus. Hal ini dikarenakan pada saluran udara bercabang udara keluar dari kedua sisi, yaitu sisi kanan dan kiri kereta, sehingga distribusinya lebih merata. Namun penggunaan saluran udara lurus lebih mampu menangani panas pada ruang masinis depan dan belakang. Pada saluran udara lurus, debit udara yang keluar pada bagian ujung saluran adalah 400 ft³/min. Sedangkan pada saluran bercabang, masing-masing ujungnya hanya mengeluarkan debit 160 ft³/min.



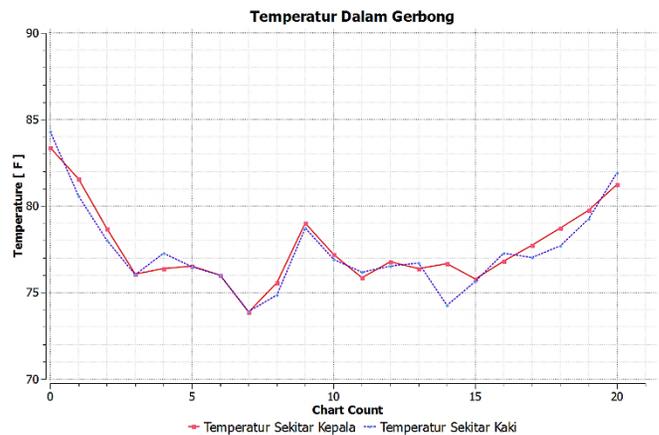
Gambar 5. Kontur distribusi temperatur saluran udara lurus dengan pengarah 75 derajat.



Gambar 6. Grafik distribusi temperatur saluran udara lurus dengan pengarah 75 derajat



Gambar 7. Kontur distribusi temperatur saluran udara bercabang dengan pengarah 75 derajat



Gambar 8. Grafik Distribusi Temperatur untuk Saluran Udara Bercabang

B. Analisis Psikrometrik

Kenyamanan termal di dalam kereta Ukar Sulawesi dapat dianalisa dengan menggunakan grafik psikrometrik. Dalam hal ini, parameter yang digunakan ada 3, yakni temperatur bola kering (Tdb), entalpi (h), dan kelembapan relatif (RH). Nilai Tdb didapatkan dari temperatur rata-rata pada Kereta Ukar Sulawesi. Sedangkan nilai RH didapatkan dari perpotongan antara nilai Tdb dan h.

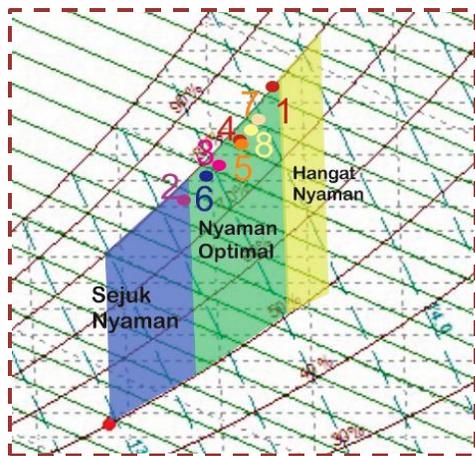
Tabel 7. Tingkat Kenyamanan Termal pada Saluran Udara

Saluran Udara Lurus				
No	Variasi Sudut	Tdb	h	RH
		F	(Btu/lb)	%
1	45	78,480	37,327	79,960
2	60	73,500	32,682	77,265
3	75	75,552	34,160	76,700
4	90	76,533	35,166	77,700
Saluran Udara Bercabang				
5	45	76,685	35,208	77,325
6	60	74,707	33,681	77,590
7	75	77,513	36,113	78,300
8	90	77,305	35,800	77,690

Berdasarkan hasil analisa psikrometrik yang ditampilkan pada tabel 7, diketahui bahwa variasi sudut pengarah pada lubang udara menyebabkan perubahan temperatur rata-rata di dalam kereta. Kenaikan temperatur rata-rata sebanding dengan kenaikan nilai entalpi. Entalpi merupakan sifat termal dari campuran udara dan uap air yang menunjukkan intensitas kalor dalam udara lembab per satuan massa udara kering di atas suhu acuan.

Analisa kenyamanan termal dilakukan untuk mengetahui tingkat kenyamanan termal yang diterima oleh penumpang. Analisa dilakukan dengan memasukkan nilai temperatur rata-rata, entalpi, serta RH dari tabel 7 ke dalam grafik psikrometrik sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 9.

Delapan titik pada gambar 8 mewakili tiap variasi yang dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa titik 2 (variasi saluran udara lurus dengan pengarah 60 derajat) berada pada daerah sejuk nyaman, sedangkan untuk variasi lainnya termasuk dalam kategori nyaman optimal.



Gambar 9. Comfort zone pada diagram psikrometrik

C. Analisis Kecepatan Udara di Sekitar Kepala

Selain faktor kenyamanan termal, kecepatan udara di sekitar kepala juga merupakan salah satu tolok ukur tingkat kenyamanan penumpang menurut SNI 03-6572-2001. Kecepatan udara di sekitar kepala tidak boleh melebihi 0,5 m/s atau setara dengan 98,425 fpm. Dari tabel 15 dan 16 didapatkan bahwa variasi yang memenuhi standar tersebut adalah saluran udara bercabang dengan sudut pengarah 75 derajat.

Tabel 8. Kecepatan Udara di dalam Kereta Saluran Lurus

Jarak	Kecepatan			
	fpm			
ft	Sudut 45°	Sudut 60°	Sudut 75°	Sudut 90°
3,287	228,149	138,189	77,165	58,071
10,577	106,496	129,921	266,535	45,669
17,867	93,504	101,378	66,142	17,323
25,157	86,023	35,827	85,433	24,213
32,448	237,598	41,535	46,850	39,370
39,738	319,094	374,015	80,709	70,275
47,028	58,464	141,929	31,496	120,079
54,318	56,693	38,976	34,449	45,866
61,608	335,039	250,393	482,283	384,251
68,898	110,630	36,614	178,149	253,149
Rata-rata	163,169	128,878	134,921	105,827

Tabel 9. Kecepatan Udara di Kereta pada Saluran Bercabang

Jarak	Kecepatan			
	fpm			
ft	Sudut 45°	Sudut 60°	Sudut 75°	Sudut 90°
3,287	44,291	173,819	54,527	11,417
10,577	96,653	59,055	78,346	90,748

17,867	93,701	132,480	82,677	55,512
25,157	49,016	160,236	88,385	122,638
32,448	55,512	107,086	29,724	49,409
39,738	133,858	330,314	90,354	18,898
47,028	171,260	114,764	59,055	48,819
54,318	119,094	314,763	75,787	79,921
61,608	67,913	131,890	48,818	71,850
68,898	108,071	67,913	60,432	28,150
Rata-rata	93,937	159,232	66,810	57,736

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Penelitian studi ini adalah membuat desain saluran udara pada Kereta Ukur Sulawesi. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Beban pendinginan untuk Kereta Ukur Sulawesi adalah sebesar 106.166,13 Btu/h atau setara dengan 31,11 kW. Sehingga dipasang 2 buah AC dengan kapasitas masing-masing sebesar 17,5 kW.
- Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa bentuk saluran udara bercabang dengan variasi sudut pengarah outlet 75 derajat paling sesuai untuk diterapkan pada Kereta Ukur Sulawesi. Variasi tersebut menghasilkan temperatur bola kering rata-rata dalam gerbong sebesar 77,51 °F dengan RH 78,3% dan kecepatan udara rata-rata disekitar udara sebesar 66,81 fpm.

B. Saran

Beban pendinginan pada kereta dapat berubah-ubah seiring dengan waktu operasi dan rute perjalanan yang dilalui. Sehingga perlu dilakukan pengukuran beban pendinginan secara aktual agar mendapatkan hasil beban pendinginan yang lebih akurat untuk digunakan dalam perancangan sistem saluran udara.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. S. Nasional, *Konservasi energi sistem tata udara*. 2000.
 [2] G. Haller, "Thermal Comfort in Rail Vehicles," 2006.
 [3] D. J. P. K. P. R. Indonesia, "Spesifikasi Teknis Kereta Ukur Lebar Spoor 1.435 mm," Jakarta, 2015.
 [4] A. Bhatia, *HVAC Ducting - Principles and Fundamentals*. 2012.
 [5] ISOVER, *HVAC Ducts Handbook Saint-Gobain Insulation*. 2011.
 [6] B. S. Nasional, *Tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengkondisian udara pada bangunan gedung*. 2001.
 [7] G. Ulfa, L. Hantoro, R., & Nugroho, "Analisis Temperatur dan Aliran Udara pada Sistem Tata Udara di Gerbong Kereta Api Penumpang Kelas Ekonomi Dengan Variasi Buka-an Jendela," *J.Tek POMITS*, 2012.
 [8] W. F. Stoecker, *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Jakarta: Erlangga, 1994.
 [9] P. Satwiko, *Fisika Bangunan*. Yogyakarta: Andi, 2008.
 [10] ASHRAE, *Fundamentals Handbook*. 1997.
 [11] T. H. Ardiyanto, "Perancangan Sistem Tata Udara Kereta Penumpang pada Rangkaian Kereta Api Eksekutif," 2008.