TUGAS AKHIR - TF 181801

ANALISIS ENERGI PADA SISTEM PENGONDISIAN UDARA DI *DATA CENTER* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

SHAFLY SYAWAL DHIYANSYAH
NRP. 02311640000118

Dosen Pembimbing:
Ir. Roekmono, M.T

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT - TF 181801

ENERGY ANALYSIS OF AIR-CONDITIONING SYSTEM IN DATA CENTER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

SHAFLY SYAWAL DHIYANSYAH
NRP. 02311640000118

Supervisors:
Ir. Roekmono, M.T

Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama	: Shafly Syawal Dhiyansyah
NRP	: 02311640000118
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "***ANALISIS ENERGI PADA SISTEM PENGONDISIAN UDARA DI DATA CENTER MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 23 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,

Shafly Syawal Dhiyansyah

NRP. 02311640000118

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISIS ENERGI PADA SISTEM PENGONDISIAN UDARA DI *DATA CENTER* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Oleh:

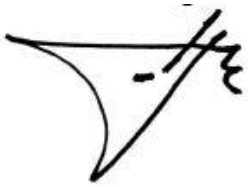
Shafly Syawal Dhiyansyah

NRP. 02311640000118

Surabaya, 3 Agustus 2020

Menyetujui,

Pembimbing I



Ir. Roekmono, M.T

NIP. 19580908 198601 1 001

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTI-ITS

Dr. Suyanto, S.T., M.T

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS ENERGI PADA SISTEM PENGONDISIAN UDARA DI *DATA CENTER* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SHAFLY SYAWAL DHIYANSYAH

NRP. 02311640000118

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Roekmono, M.T ……. (Pembimbing I)
2. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. ……. (Ketua Penguji)
3. Ir. Sarwono, M.M. …….. (Penguji I)
4. Dr. Gunawan Nugroho, S.T, M.T. …….. (Penguji II)
5. Erna Septyaningrum, S.T, M.T. …….. (Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS ENERGI PADA SISTEM PENGONDISIAN UDARA DI *DATA CENTER* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Nama	**:**	**Shafly Syawal Dhiyansyah**
NRP	**:**	**023111640000118**
Departemen	**:**	**Teknik Fisika FTIRS - ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Ir. Roekmono, M.T**

ABSTRAK

Keberadaan *data center* meningkat di beberapa tahun terakhir untuk membutuhi kebutuhan pemrosesan dan penyimpanan dari internet dan *cloud computing*. Fasilitas *data center* memiliki beban panas yang sangat tinggi yang menghasilkan jumlah konsumsi energi yang sangat besar. Perkembangan yang terjadi pada densitas panas dari IT server menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi untuk mendinginkannya, dan menghasilkan sekitar 40% dari daya yang dikonsumsi oleh *data center*. Sehingga, peningkatan efesiensi energi pada *data center* telah menjadi fokus penelitian di beberapa tahun belakangan ini. Pada penelitian ini, analisis pengaruh perubahan temperatur suplai *air conditioning* (AC) terhadap kapasitas refrigerasi dan kerja kompresor AC, daya server dan *power usage effectiveness* (PUE) *data center* menggunakan metode *computational fluid dynamics* (CFD) dilakukan. Variasi temperatur suplai AC berada pada skala 19-25^{o}C. Berdasarkan hasil simulasi, nilai kapasitas refrigerasi tertinggi dan terendah berada pada temperatur suplai AC 22^{o}C berturut-turut adalah 81,38 dan 5,24 kW. Nilai PUE yang paling optimal berada pada temperatur suplai AC 22^{o}C karena memiliki daya server keseluruhan cukup rendah yaitu 84,17 kW dan memiliki daya non-IT yang paling rendah dari rentang temperatur suplai AC lainnya yaitu 130,33 kW dan juga, daya AC pada temperatur 22^{o}C memiliki nilai paling rendah daripada yang lainnya yaitu 29,53 kW.

Kata Kunci: ***data center, air conditioning, server, power usage effectiveness.***

Halaman ini sengaja dikosongkan

ENERGY ANALYSIS OF AIR-CONDITIONING SYSTEM IN DATA CENTER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Name	**:**	**Shafly Syawal Dhiyansyah**
NRP	**:**	**02311640000118**
Department	**:**	**Engineering Physics FTIRS - ITS**
Supervisors	**:**	**Ir. Roekmono, M.T**

ABSTRACT

The number of data center has been increasing in the last few years due to the demand of a processing and storage for the internet and cloud computing. Data center facility has high heat loads, which result in a large amount of energy consumption. The growth in the heat densities of IT servers leads to a rise in the energy needed for cooling and constitutes approximately 40% of the power consumed by data centers. Therefore, improving the energy efficiency of data centers has become a research focus in recent years. In this study, analysis of the effect of changes in supply air conditioning temperature on the refrigeration capacity and compressor work, server power, and power usage effectiveness (PUE) of data centers was carried out using computational fluid dynamics (CFD). AC supply temperature was set on the range between 19 and 25^{o}C. The simulation results indicate that the highest and lowest refrigeration capacity values at 22^{o}C AC supply temperatures are 81,38 and 5,24 kW, respectively. The optimal AC supply temperature is found at 22^{o}C because it has a fairly low overall server power of 84,17 kW and yields the lowest non-IT power compared to other AC supply temperature with non-IT power of 130,33 kW and also, AC power on 22^{o}C AC supply temperature yields the lowest value than other AC supply temperature with AC power of 29,53 kW.

Keywords: data center, air conditioning, server, power usage effectiveness.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini dengan judul **"Analisis Energi Pada Sistem Pengondisian Udara di *Data Center* Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics.*"**

Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T, M.T selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS, atas segala dukungan dan fasilitas yang telah diberikan.
2. Bapak Ir. Roekmono, M.T selaku dosen pembimbing tugas akhir atas segala dukungan, bimbingan, dan segenap pembelajaran selama ini.
3. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc selaku dosen wali atas perhatian dan nasihat selama kuliah.
4. Kedua orang tua atas segala kasih sayang, dukungan, dan doa yang selalu diberikan kepada penulis
5. Partner tugas akhir saya yaitu Putri atas kerjasama dan dukungan selama kuliah dan tugas akhir.
6. Teman-teman KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan atas pembelajaran dan dukungan kepada penulis.
7. Teman-teman Teknik Fisika angkatan 2016, yang telah menemani penulis selama menuntut ilmu dan berkembang di kampus.
8. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademika Departemen Teknik Fisika ITS, atas ilmu dan kerjasamanya selama ini.
9. Laptop saya dan komputer nomor 3 dari kiri di lab atas teknologinya untuk membantu saya menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, namun diharapkan laporan ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, civitas akademik ITS pada umumnya.

Surabaya, 23 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL……i
COVER PAGE..... iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
LEMBAR PENGESAHAN vii
LEMBAR PENGESAHAN ix
ABSTRAK xi
ABSTRACT..... xiii
KATA PENGANTAR xv
DAFTAR ISI..... xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL..... xxi
BAB I PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan.....3
1.4 Batasan Masalah.....3
1.5 Sistematika Laporan 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... 5
2.1 *Data Center* 5
2.2 Siklus Refrigerasi 7
2.3 Dekomposisi Ortogonal.....11
2.4 *Abstract Heat Flow Model* 13
2.5 *Power Usage Effectiveness* (PUE) 14
2.6 *Computational Fluid Dynamics* 15

BAB III METODOLOGI PENELITIAN 19
3.1 Studi literatur 20
3.2 Pengambilan Data Pada Sistem Pendingin 21
3.3 Desain Ruangan *Data Center* 22
3.4 Simulasi CFD 25
3.5 Validasi Simulasi 28
3.6 Perhitungan Daya Server dan PUE 28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 31
4.1 Perhitungan Kerja Kompresor dan Kapasitas Refrigerasi terhadap Perubahan Temperatur Suplai AC 31
4.2 Validasi Simulasi 33
4.3 Simulasi dengan Temperatur 19^{o}C - 25^{o}C 42
4.4 Perhitungan Nilai *Power Usage Effectiveness* (PUE) 50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 55
5.1 Kesimpulan 55
5.2 Saran 55
DAFTAR PUSTAKA 57
LAMPIRAN 61
BIODATA PENULIS 63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peralatan yang ada di *data center*. 6
Gambar 2. 2 Distribusi daya pada *data center* dengan nilai PUE = 1,8 (Dai, Ohadi, Das, & Pecht, 2014). 7
Gambar 2. 3 Siklus refrigerasi ideal (Roekmono). 8
Gambar 2. 4 Siklus refrigerasi aktual (Roekmono). 9
Gambar 2. 5 Sistem kompresi uap sistem pendingin (Roekmono). 10
Gambar 3. 1 *Flowchart* pelaksaan tugas akhir. 19
Gambar 3. 2 Sistem pendingin CITEC ESD80. 21
Gambar 3. 3 Skema ruangan di *data center*. 22
Gambar 3. 4 Jenis server yang dipakai pada *data center*: (a) Server 2U merk HP (Hewlett Packard Enterprise Development LP, n.d.) dan (b) Server 2U merk Supermicro (Supermicro, n.d.) 24
Gambar 3. 5 Desain geometri *data center* pada ANSYS. 25
Gambar 3. 6 Hasil *meshing.* 26
Gambar 3. 7 Parameter nilai *skewness.* 26
Gambar 4. 1 Grafik hasil perhitungan kerja kompresor dan kapasitas refrigerasi terhadap perubahan temperatur suplai AC. 31
Gambar 4. 2 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 1. 33
Gambar 4. 3 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 1. 34
Gambar 4. 4 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 2. 34
Gambar 4. 5 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 2. 35
Gambar 4. 6 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 6. 35
Gambar 4. 7 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 6. 36
Gambar 4. 8 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 8. 36
Gambar 4. 9 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 8. 37
Gambar 4. 10 Kontur temperatur hasil simulasi pada *row* 10. 37
Gambar 4. 11 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 10. 38
Gambar 4. 12 Kontur temperatur hasil simulasi pada *row* 11 *rack* 1. 38

Gambar 4. 13 Kontur temperatur hasil validasi pada *row* 11 *rack* 1. 39
Gambar 4. 14 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 11 rak 5, 6 dan 7. 39
Gambar 4. 15 Kontur temperatur hasil validasi pada *row* 11 *rack* 5, 6 dan 7. 40
Gambar 4. 16 Kontur temperatur hasil simulasi pada *row* 12. 40
Gambar 4. 17 Kontur temperatur hasil validasi pada *row* 12. 41
Gambar 4. 18 Kontur temperatur hasil simulasi temperatur AC 19^{o}C pada posisi y = (a) 0,5, (b) 1, (c) 1,5, dan (d) 2 m. 42
Gambar 4. 19 Kontur temperatur hasil simulasi temperatur AC 19^{o}C pada posisi (a) x = 0,9 m, (b) x = 1,5 m, (c) x = 2,1 m dan (d) x = 2,7 m. 43
Gambar 4. 20 Kontur temperatur hasil simulasi temperatur AC 19^{o}C pada posisi (a) x = 3,3 m, (b) x = 3,9 m, (c) x = 4,5 m dan (d) x = 6,1 m. 43
Gambar 4. 21 Data rata-rata laju udara dan laju volumetrik udara per server hasil simulasi. 44
Gambar 4. 22 Data rata-rata temperatur *inlet* dan *outlet* hasil simulasi. 45
Gambar 4. 23 Grafik daya total server. 47
Gambar 4. 24 Grafik perubahan daya server terhadap perubahan temperatur AC. 48
Gambar 4. 25 Kontur persebaran temperatur pada daerah inlet dan outlet server baris 6 pada temperatur AC (a) 19^{o}C, (b) 20^{o}C dan (c) 21^{o}C 49
Gambar 4. 26 Hasil PUE tiap temperatur AC. 52
Gambar 4. 27 Grafik perubahan nilai PUE terhadap perubahan temperatur AC. 53

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data AC yang diambil. 22
Tabel 3. 2 Data dimensi ruangan, ... 23
Tabel 3. 3 Data daya server. 24
Tabel 3. 4 Detail *Mesh* Dari Simulasi, ... 26
Tabel 3. 5 Parameter yang digunakan 27
Tabel 3. 6 Kondisi batas pada simulasi CFD. 28
Tabel 4. 1 Data daya AC pada setiap variasi temperatur. 32
Tabel 4. 2 Nilai *error* dari hasil validasi. 41
Tabel 4. 3 Hasil daya konsumsi server tiap rentang temperatur AC 46
Tabel 4. 4 Data daya total *data center* tiap temperatur suplai AC, ... 51

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri *data center* telah berkembang secara signifikan selama dua dekade terakhir sebagaimana juga dengan industri telekomunikasi yang terus berkembang. Secara global, *data center* mengonsumsi 1,1-1,5% dari penggunaan listrik dunia pada 2010 (Koomey, 2008). Hampir semua daya listrik yang dipasok ke *server* terdisipasi dalam bentuk panas sehingga permintaan sistem pengondisian udara pendinginan sangat signifikan (Ebrahimi, Jones, & Fleischer, 2014). Hampir 40% dari total energi yang dikonsumsi di *data center* digunakan untuk sistem pengondisian udara pendinginan sehingga pendinginan memiliki peran yang signifikan dalam operasi *data center* sebagai sudut pandang ekonomi dan ekologi (Dai, Ohadi, Das, & Pecht, 2014).

Peningkatan metode pendinginan mungkin berdampak besar pada efisiensi energi dari industri telekomunikasi. Sistem pendingin untuk *data center* harus bekerja bertahun-bertahun secara penuh untuk menjaga temperatur dan kelembaban lingkungan pada nilai yang telah ditentukan untuk memastikan keamanan dan keandalan dari peralatan-peralatan yang ada pada *data center* (Sun, Wang, Yang, Hu, & Zeng, 2019). Selain itu, ada beberapa cara untuk meningkatkan efisiensi energi pada *data center* dimana salah satunya adalah dengan melakukan manajemen termal dan aliran udara. Dengan demikian, kondisi lingkungan dari *data center* dapat dijaga pada sebuah tingkat yang diperlukan untuk memastikan operasi *data center* yang andal, aman, dan efisien (Patterson, Energy efficient thermal management of data centers, 2012).

Berdasarkan ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) (9.9, ASHRAE Technical Committee (TC), 2011), rentangtemperatur ruangan yang direkomendasikan berada antara $18 - 27^0C$ dengan rentang yang diizinkan sebesar $15 - 32^0C$. Hal itu menyebabkan bahwa sistem pendingin perlu bekerja secara rutin untuk menjaga temperatur ruangan tetap berada pada rentang tersebut sehingga beberapa studi telah dilakukan pada evaluasi dan penilaian pada sistem pendingin dan hasilnya menunjukkan banyak sekali hal

yang dapat dilakukan. Seperti studi oleh Gao dkk (Gao, et al., 2016), variasi dari *pressure drop*, *fan duty cycle*, laju aliran udara dan temperatur air sistem refrigerasi dari sistem *chiller* berpengaruh terhadap efesiensi energi pada *data center*. Lebih lanjut, studi oleh Patterson (Patterson, The effect of data center temperature on energy efficiency, 2008) menjelaskan bahwa variasi temperatur suplai dari sistem pendingin mempengaruhi daya konsumsi dan efesiensi energi yang dihasilkan dari server di *data center*.

Selain itu, tidak hanya pada evaluasi dan penilaian sistem pendingin saja yang menjadi pengaruh terhadap efesiensi energi pada *data center* tetapi aliran udara pada *data center* juga berpengaruh. Hal ini disebabkan karena pada umumnya aliran udara pada *data center* memiliki sifat yang turbulen dan menunjukkan karakteristik pola aliran yang luas sehingga simulasi CFD (*computational fluid dynamics*) perlu digunakan untuk menganalisa distribusi aliran udara dan temperature di *data center* (Schere, 2017). Seperti pada studi oleh Schere (Schere, 2017), Samadiani dan Joshi (Samadiani & Joshi, 2010), Bai dkk (Bai, Gu, & Qi, 2018) serta Ghosh dan Joshi (Ghosh & Joshi, 2011), analisis aliran udara menggunakan CFD dengan berbagai variasi temperatur suplai AC, kecepatan udara suplai AC, jumlah dan daya *server*, dan persentase penggunaan *server* dilakukan untuk melihat pengaruh variasi tersebut terhadap efesiensi energi pada *data center*. Selain itu, validitas hasil simulasi CFD dapat dikonfirmasi menggunakan metode *proper orthogonal decomposition* (POD) untuk mengetahui karakteristik temperatur pada *data center* (Ghosh & Joshi, 2011; Samadiani & Joshi, 2010; Bai, Gu, & Qi, 2018; Schere, 2017).

Oleh karena peranan sistem pendingin pada *data center* cukup vital dalam operasionalnya, evaluasi kinerja sistem pengondisian udara melalui analisis energi perlu dilakukan secara berkala. Pada tugas akhir ini, objek penelitian yang dipilih ialah *data center* perusahaan X di Surabaya. Saat ini sistem pendingin yang terpasang pada *data center* perusahaan X ialah *precision air conditioning*. *Air conditioning* tersebut telah digunakan sejak tahun 2016 sehingga pada tugas akhir ini dilakukan analisa kembali pada sistem pendingin, manajemen termal dan aliran udara dan juga efesiensi energi dari *data center* tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah:

a) Bagaimana pengaruh perubahan temperatur suplai terhadap kapasitas refrigerasi dan kerja kompresor pada sistem pendingin di *data center*?
b) Bagaimana pengaruh temperatur suplai terhadap daya *server* di *data center*?
c) Bagaimana hasil efesiensi energi (*power usage efficiency*, PUE) terhadap perubahan temperatur suplai di *data center*?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dilakukannya tugas akhir ini adalah:

a) Mengetahui pengaruh perubahan temperatur suplai terhadap kapasitas refrigerasi dan kerja kompresor pada sistem pendingin di *data center*.
b) Mengetahui pengaruh perubahan temperatur suplai terhadap daya *server* di *data center*.
c) Mengetahui hasil efesiensi energi (PUE) terhadap perubahan temperatur suplai di *data center*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

a) Tipe sistem pendingin yang digunakan adalah *precision air-conditioning* tipe CITEC ESD80 dengan refrigeran R-407C.
b) *Server* yang digunakan adalah *server* pada *data center* neuCentrIX
c) Kondisi ruangan pada simulasi diasumsikan *steady*.
d) Simulasi untuk mengetahui profil aliran udara menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD) dengan persamaan model turbulensi *k-epsilon*.
e) Metode validasi data menggunakan metode *proper orthogonal decomposition*.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian tugas akhir ini terdiri atas lima bab. Bab pertama yaitu pendahuluan yang terdiri atas latar belakang, rumusan masalah dan tujuan serta batasan-batasan sebagai penyderhanaan masalah dan sistematika laporan. Bab

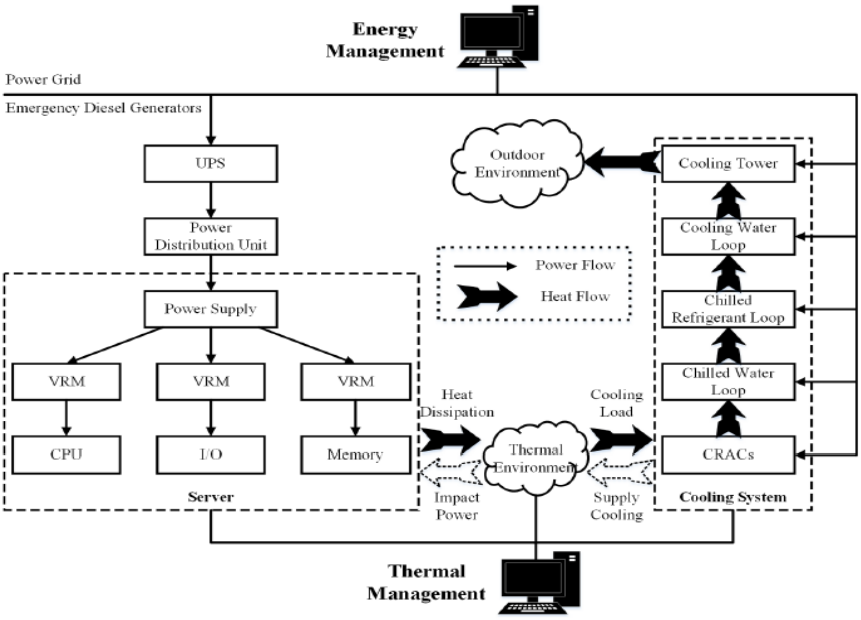
kedua yaitu tinjauan pustaka yang memaparkan teori dasar dan penunjang berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan sebagai landasan untuk menyelesaikan penelitian ini. Bab ketiga yaitu metodologi penelitian yang menjelaskan alur penelitian dari awal yakni perumusan masalah hingga penulisan laporan. Selanjutnya, bab keempat yaitu analisis dan data pembahasan berisikan hasil yang didapat dari penelitian, sebagian data dan hasil perhitungan yang disajikan dalam bentuk grafik ataupun tabel. Kemudian, pada akhir bab kelima berisi kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini dan saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut kedepannya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Data Center*

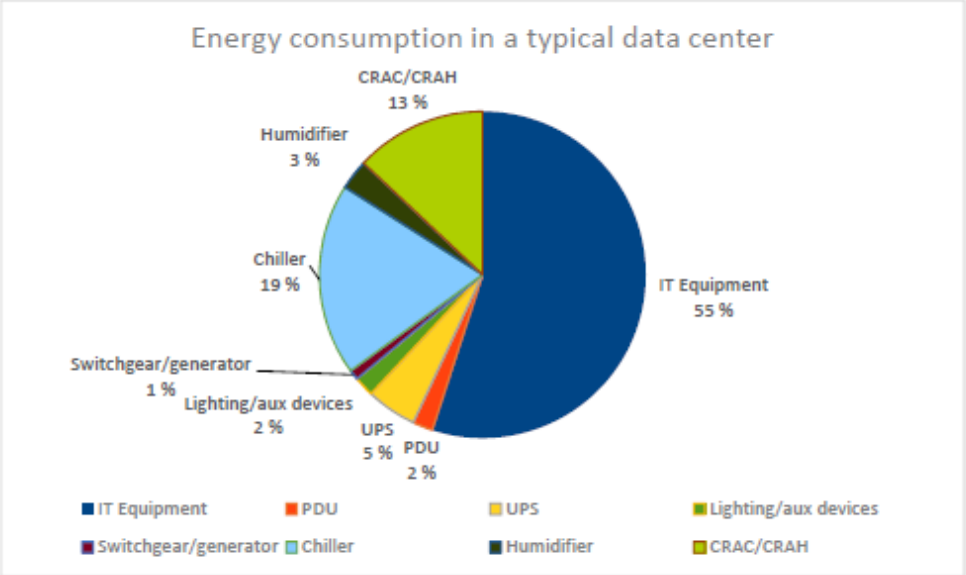
Peralatan di *data center* dapat dibagi dalam empat kategori: peralatan IT, peralatan listrik, peralatan pendingin, dan aneka komponen lainnya, termasuk penerangan dan sistem proteksi kebakaran. Peralatan IT meliputi server, perangkat penyimpanan dan telekomunikasi peralatan, dan peralatan tambahan sebagai *workstation* yang digunakan untuk mengontrol pusat. Objek utama pada *data center* adalah untuk menyimpan data dan menyediakan akses ke data saat diminta (Dai, Ohadi, Das, & Pecht, 2014).

Berdasarkan Gambar 2.1, peralatan listrik meliputi daya distribusi unit atau *power distribution unit* (PDU), sistem catu daya tak terputus atau *uninterrupted power system* (UPS), *switchgear*, generator dan baterai. Catu daya harus andal dan sistem PDU dan UPS biasanya dikerahkan secara berlebihan. Jika listrik gagal, generator mulai dan menjadi kekuatan aktif untuk *data center*. Sistem UPS digunakan untuk memastikan catu daya tidak terganggu. Sistem UPS mengubah daya input AC (arus bolak-balik) ke DC (arus searah) untuk mengisi baterai, yang menyediakan daya sementara jika ada gangguan catu daya dan UPS akan mengubah DC kembali ke AC lagi untuk peralatan di *data center* (Barroso, Clidaras, & Holzle, 2013).



Gambar 2. 1 Peralatan yang ada di *data center* (Jin, Bai, Yang, Mao, & Xu, 2020).

Peralatan pendingin yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 meliputi pendingin, pendingin udara atau *computerized room air conditioning* (CRAC), unit pengaliran udara atau *computerized room air handling* (CRAH), *cooling tower* dan perangkat otomasi. Udara pendingin untuk *data center* disediakan oleh unit CRAC atau CRAH langsung atau melalui lantai yang ditinggikan. Untuk menghindari pencampuran udara panas dan dingin, rak diposisikan untuk membentuk lorong panas dan dingin. Udara panas naik dan resirkulasi kembali ke CRAC. Di *data center* modern, lorong-lorong panas dan dingin dapat dipisahkan satu sama lain dengan tirai atau partisi keras. Kipas digunakan untuk mengalirkan udara melalui sistem pendingin dan melalui peralatan IT. Udara didinginkan di dalam unit CRAC dengan mendinginkan air atau cairan pendingin atau refrigeran yang dipompa ke *chiller* atau evaporator untuk pendinginan (Dai, Ohadi, Das, & Pecht, 2014). Berdasarkan survei terhadap 500 *data center*, perkiraan distribusi energi di salah satu contoh *data center* biasa dengan PUE = 1,8 disajikan pada Gambar 2.2 (Dai, Ohadi, Das, & Pecht, 2014).



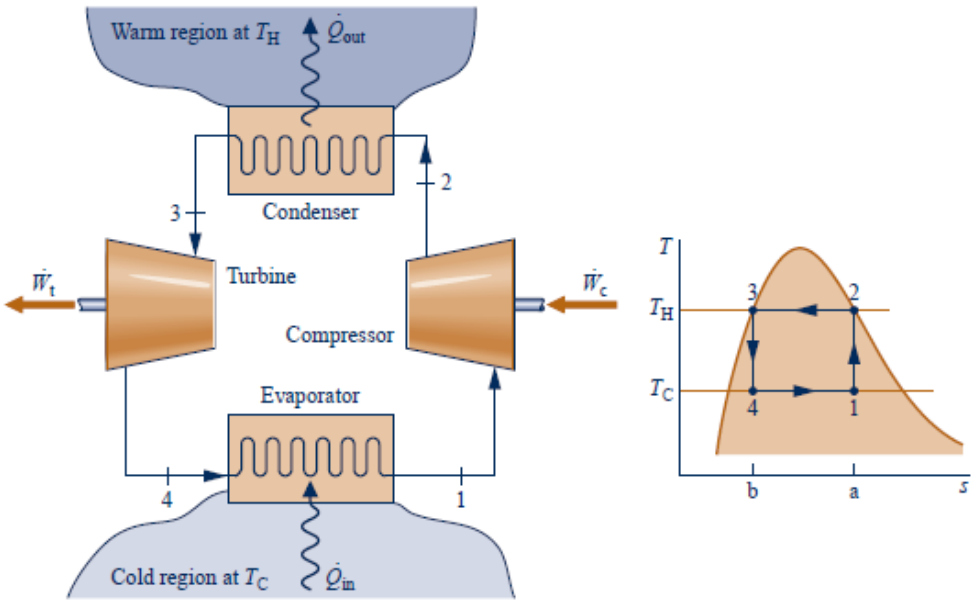
Gambar 2. 2 Distribusi daya pada *data center* dengan nilai PUE = 1,8 (Dai, Ohadi, Das, & Pecht, 2014).

Umumnya, ketika PUE memiliki proporsi yang lebih besar maka pendinginan pun juga lebih besar. Hal ini disebabkan oleh hampir 40% dari konsumsi energi di *data center* digunakan untuk pendinginan berdasarkan pada Gambar 2.2 sehingga meningkatkan kinerja pendinginan adalah cara yang baik untuk mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan dari industri telekomunikasi.

2.2 Siklus Refrigerasi

Siklus refrigerasi mempunyai fungsi untuk menjaga daerah dingin dengan temperatur di bawah temperatur lingkungan. Sebuah sistem refrigerasi memiliki beberapa komponen, yaitu:

a. Evaporator
b. Kompresor
c. Kondensor
d. Katup Ekspansi



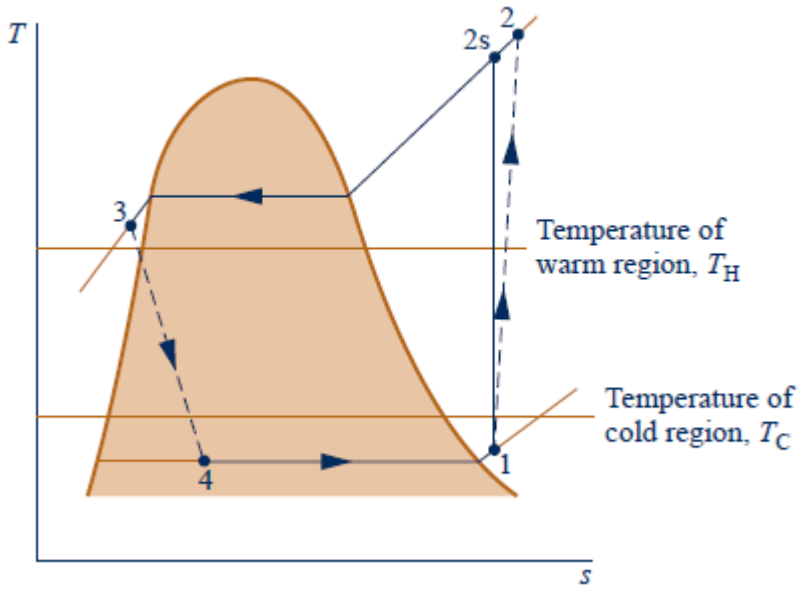
Gambar 2. 3 Siklus refrigerasi ideal (Roekmono).

Pada siklus ideal, refrigeran masuk ke dalam evaporator sebagai campuran dua fase cair-uap pada kondisi 4. Di dalam evaporator, sebagian dari refrigeran tersebut berubah fase dari cair menjadi uap sebagai hasil dari perpindahan kalor dari daerah dengan temperatur T_C ke refrigeran. Temperatur dan tekanan refrigeran tetap konstan selama proses dari kondisi 4 menjadi kondisi 1. Refrigeran kemudian dikompresi secara adiabatik dari kondisi 1, dimana refrigeran masih berupa campuran dua fase cair-uap, menuju kondisi 2, dimana refrigeran menjadi uap jenuh. Selama proses ini temperatur refrigeran meningkat dari T_C menjadi T_H, dan tekanan juga meningkat. Refrigeran melintas dari kompresor menuju kondensor, dimana refrigeran tersebut berubah fase dari uap jenuh menjadi cairan jenuh sebagai hasil dari perpindahan kalor ke daerah bertemperatur T_H. Temperatur dan tekanan tetap konstan selama proses dari kondisi 2 menjadi kondisi 3. Refrigeran kembali kepada kondisi di mulut evaporator dengan berekspansi secara adiabatik melalui katup eksapansi. Pada proses ini, dari kondisi 3 menuju kondisi 4, temperatur berkurang dari T_H menjadi T_C, dan terjadi pula penurunan tekanan. Pada siklus refrigerasi ideal terdiri dari proses yang dapat dibalik secara internal, area pada diagram T-s dapat diartikan sebagai perpindahan panas. Area 1-a-b-4-1 adalah panas yang diterima refrigeran $(\dot{Q}_{in})$ dari daerah dingin per satuan massa refrigeran

mengalir. Area 2-a-b-3-2 adalah panas yang dilepas ($\dot{Q}_{out}$) dari refrigeran ke sekeliling (daerah hangat) per satuan massa refrigeran mengalir. Area tertutup 1-2-3-4-1 adalah jumlah transfer panas netto dari refrigeran. Kerja netto adalah perbedaan antara kerja input kompresor dan kerja keluaran turbin. Maka koefisien kinerja β dari setiap siklus refrigerasi adalah rasio dari efek refrigerasi terhadap masukkan kerja netto yang dibutuhkan untuk mencapai efek tersebut (Moran & Shapiro, 2004). Pada siklus refrigerasi uap *Carnot* yang diperlihatkan di Gambar 2.3, koefisien kinerjanya adalah:

$$\beta_{maks} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \tag{2.1}$$

Adapun siklus refrigerasi uap yang aktual menyimpang cukup jauh dari siklus ideal yang dibahas di atas dan memiliki koefisien-koefisien kinerja yang lebih rendah daripada yang dihitung melalui persamaan (2.1).



Gambar 2. 4 Siklus refrigerasi aktual (Roekmono).

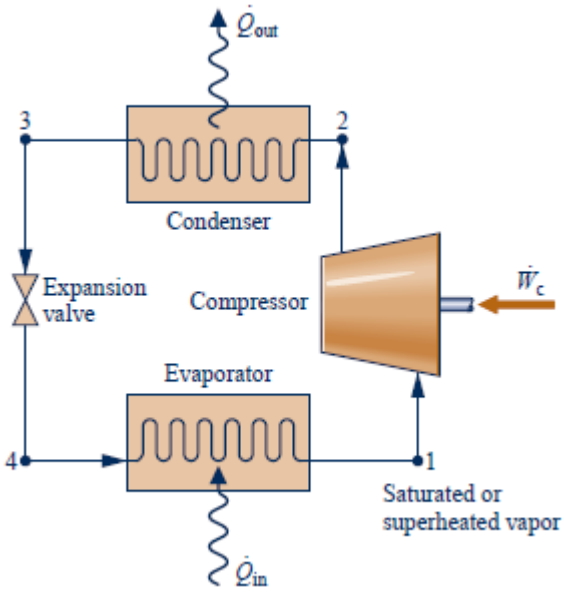
Di dalam sistem yang aktual, perpindahan kalor tidak terjadi secara revesibel seperti siklus ideal. Perbedaannya adalah untuk mencapai laju perpindahan kalor yang memadai untuk menjaga temperatur di daerah dingin untuk tetap pada T_c dengan menggunakan evaporator berukuran praktis memerlukan temperatur refrigeran di dalam evaporator, $T_C{}'$, beberapa derajat di bawah T_C. Demikian pula,

untuk memperoleh laju perpindahan kalor yang memadai dari refrigeran ke daerah hangat memerlukan temperatur refrigeran di dalam kondenser, $T_H{}'$, beberapa derajat di atas T_H. Penjagaan temperatur refrigeran di dalam alat penukar kalor pada nilai $T_C{}'$ dan $T_H{}'$ memiliki dampak berkurangnya koefisien kinerja (Moran & Shapiro, 2004). Dimana persamaannya ditunjukkan seperti berikut.

$$\beta' = \frac{T_C{}'}{T_H{}' - T_C{}'} \tag{2.2}$$

Dengan membandingkan persamaan (2.2) terhadap persamaan (2.1), dapat disimpulkan bahwa nilai β' adalah lebih kecil dari nilai β_{maks}.

Sistem refrigerasi kompresi uap merupakan sistem refrigerasi yang paling umum digunakan untuk saat ini. Gambar di bawah memperlihatkan kerja dan perpindahan kalor tiap-tiap komponen pada sistem refrigerasi.



Gambar 2. 5 Sistem kompresi uap sistem pendingin (Roekmono).

Pada saat refrigeran melewati evaporator, perpindahan kalor dari ruang yang direfrigerasi menghasilkan penguapan refrigeran. Kesetimbangan laju massa dan energi tereduksi untuk memberikan laju perpindahan kalor per satuan massa dari aliran refrigeran. Hal ini disebut sebagai kapasitas refrigerasi yang ditunjukkan seperti persamaan berikut.

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \tag{2.3}$$

Refrigeran yang meninggalkan evaporator dikompresikan ke tekanan dan temperatur yang relatif tinggi oleh kompresor. Dengan asumsi tidak ada perpindahan kalor ke atau dari kompresor, laju kesetimbangan massa dan energi untuk volume atur yang melingkupi kompresor menghasilkan rumusan:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \tag{2.4}$$

dimana $\dot{W}_c/\dot{m}$ adalah laju dari masukan daya per satuan massa dalam aliran refrigeran.

Selanjutnya refrigeran melalui kondenser, dimana refrigeran terkondensasi dan terjadi perpindahan kalor dari refrigeran ke lingkungan sekitarnya yang lebih dingin. Untuk volume atur yang melingkupi refrigeran pada sisi kondenser, laju perpindahan kalor dari refrigeran per satuan massa dari aliran refrigerasi adalah

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \tag{2.5}$$

Sehingga, refrigeran pada kondisi 3 memasuki katup ekspansi dan berekspansi hingga mencapai tekanan evaporator. Proses ini dapat dimodelkan sebagai berikut.

$$h_4 = h_3 \tag{2.6}$$

Tekanan refrigeran berkurang di dalam ekspansi adiabatik ireversibel, dan disertai dengan peningkatan entropi spesifik. Refrigeran yang keluar dari katup pada kondisi 4 berupa campuran dua fase cair-uap.

2.3 Dekomposisi Ortogonal

Metode *proper orthogonal method* (POD) atau dekomposisi ortogonal adalah jenis metode *reduced-order* yang banyak diaplikasikan di berbagai bidang. Metode ini mampu memperoleh set basis ortonormal dari data observasi untuk merekonstruksi proses asli yang berdimensi tinggi. Dekomposisi ortogonal yang dipakai adalah berdasarkan terhadap dasar dari data simulasi untuk memprediksi koefisien *cross-interference data center* di bawah temperatur udara suplai dari pendingin yang berbeda-beda (Bai, Gu, & Qi, 2018; Schere, 2017; Samadiani & Joshi, 2010; Ghosh & Joshi, 2011). POD memperluas sebuah set data yang

diobservasi ke satu set fungsi *m* dasar independen linier $\boldsymbol{\psi}_i$ berdasarkan pada hubungan matematis berikut:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^{m} b_i \psi_i \tag{2.7}$$

dimana T adalah bidang temperatur, T_0 adalah bidang temperatur referensi, ψ_i adalah *m* mode POD, dan b_i adalah koefisien POD yang sesuai.

Prosedur dari algoritma dekomposisi ortogonal sendiri untuk mendapatkan mode dan koefisien POD adalah sebagai berikut:

a. Perolehan data set observasi: Sebuah *m* observasi dari koefisien *cross-interference* diperoleh dari simulasi CFD dengan memvariasikan udara suplai dari pendingin. Koefisien *cross-interference* di *data center* dapat dinyatakan dengan bentuk vektor seperti berikut:

$$\overrightarrow{A_\iota} = \overrightarrow{A_0} + \widetilde{A_\iota} \tag{2.8}$$

dengan $\overrightarrow{A_\iota}$ menunjukan observasi ke-i, $\overrightarrow{A_0} = \sum_{i=1}^{m} \overrightarrow{A_\iota}$ adalah rata-rata dari *m* observasi, $\widetilde{A_\iota}$ menunjukkan nilai fluktuasi dari observasi ke-i.

b. Perhitungan basis POD $\overrightarrow{\psi_\iota}$: Pada sebuah set kasus observasi, basis POD dapat dihitung dengan

$$\overrightarrow{\psi_\iota} = \sum_{k=1}^{m} a_k (\overrightarrow{A_k} - \overrightarrow{A_0}) \tag{2.9}$$

Pada persamaan, koefisien a_k untuk menyambungkan basis POD diperoleh dengan menyelesaikan masalah *eigenvalue*:

$$\sum_{k=1}^{m} R(i,k) a_k = \lambda\, a_i\, \boldsymbol{\epsilon}[\mathbf{1}, \mathbf{2}, \dots, \boldsymbol{m}] \tag{2.10}$$

dimana $R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} (\overrightarrow{A_\iota} - \overrightarrow{A_0})^T \otimes (\overrightarrow{A_\iota} - \overrightarrow{A_0})$ adalah matriks korelasi. *Eigenvalue* menunjukkan energi dari basis POD yang sesuai.

c. Prediksi koefisien *cross-interference* $\overrightarrow{A_\iota}$ untuk kasus yang baru: Berdasarkan dengan model algoritma POD, koefisien *cross-interference* dapat dicari sebagai berikut:

$$\overrightarrow{A_\iota} = \overrightarrow{A_0} + \sum_{i=1}^{m} b_i \overrightarrow{\psi_\iota}, i \,\epsilon\, [1,2, \dots, m] \tag{2.11}$$

dengan b_i adalah koefisien dari basis POD. Pada kasus observasi, koefisien basis POD untuk merekonstruksi observasi yang asli ditentukan dengan

$$b_i = \left(\overrightarrow{A_i} - \overrightarrow{A_0}\right) \bullet \overrightarrow{\psi_i}, i \in [1,2, \dots, m] \quad (2.12)$$

Setelah itu, untuk setiap kasus observasi, sebuah set koefisien untuk mencocokkan dengan variabel rancangan, seperti suplai udara pendingin yang sudah disebut. Untuk memprediksi koefisien *cross-interference* dari *data center* dengan variabel aliran sistem pendingin, koefisien basis POD sesuai dengan udara suplai pendingin yang diperoleh dari interpolasi diantara koefisien dari solusi hasil yang diobservasi.

2.4 *Abstract Heat Flow Model*

Pemodelan yang dipakai pada tugas akhir ini adalah *abstract heat flow model* yang dijelaskan pada (Schere, 2017). Seperti pada mengenalkan evaluasi pemodelan termal yang cepat untuk *data center*, pemodelan ini mengkarakterisasi aliran panas sebagai interferensi silang diantara *node-node* pada *server*. Koefisien dari interferensi ini adalah a_{ij} yang berhubungan dengan fraksi dari panas yang mengalir dari *server node* i sampai j (Schere, 2017).

Adapun hubungan antara konsumsi daya P_i, temperatur inlet T_i^{in}, temperatur outlet T_i^{out}, dan laju udara volumetrik $\dot{V}_i$ dari node server diberikan seperti

$$P_i = \rho\, C_P\, \dot{V}_i \left(T_i^{out} - T_i^{in}\right) \quad (2.13)$$

dimana $\boldsymbol{\rho}$ adalah densitas dari udara dan C_P adalah kalor spesifik udara. Panas dari udara yang keluar dari *node* i Q_i^{out} dapat dijelaskan seperti

$$Q_i^{out} = \rho\, C_P\, \dot{V}_i^{out}\, T^{out} \quad (2.14)$$

atau dalam hubungannya kepada konsumsi daya P_i dari *node* i adalah

$$Q_i^{out} = Q_i^{in} + P_i \quad (2.15)$$

dimana Q_i^{in} adalah panas yang memasuki *node* i. Dengan jumlah *node server* sebanyak N pada *data center*, panas Q_i^{in} yang memasuki *node* i dimodelkan sebagai campuran panas dari sirkulasi ulang udara panas dan panas dari udara pendinginan dengan:

$$Q_i^{in} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}\; Q_j^{out} + Q_i^{sup} \quad (2.16)$$

dimana Q_i^{sup} adalah panas dari udara pendinginan yang disuplai dari sistem pendingin ke *node* i. Panas ini dihitung dengan,

$$Q_i^{sup} = \boldsymbol{\rho}\, C_P \left(\dot{V}_i - \sum_{j=1}^{N} a_{ij}\, \dot{V}_i \right) T^{sup} \tag{2.17}$$

dimana $K_i = \boldsymbol{\rho}\, C_P\, \dot{V}_i$ dan dengan mengombinasikan persamaan (2.14) sampai persamaan (2.17) didapatkan,

$$K_i T_i^{out} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}\, K_j T_j^{out} + \left(K_i - \sum_{j=1}^{N} a_{ij}\, K_j \right) T^{sup} + P_i \tag{2.18}$$

Berdasarkan dengan persamaan (2.18) koefisien interferensi-silang N x N dapat ditentukan dengan data temperatur N titik operasi yang independen dari *data center*. Selain itu, data temperatur harus tetap diambil pada keluaran di tiap *server* untuk N beban distribusi yang berbeda. Pemodelan ini merepresentasikan sebuah metode yang praktis dan efisien untuk memperkirakan temperatur udara keluaran untuk tiap beban distribusi yang diberikan (Schere, 2017).

2.5 *Power Usage Effectiveness* (PUE)

PUE adalah satuan metrik efisiensi yang telah menjadi standar dalam industri *data center* dan merupakan metrik yang paling umum digunakan untuk melaporkan efisiensi energi *data center* (Brady, Kapur, Summers, & Thompson, 2013). PUE dipromosikan oleh organisasi nirlaba profesional IT, *Green Grid*, pada 2007. PUE didefinisikan sebagai berikut:

$$PUE = \frac{jumlah\ energi\ fasilitas\ total}{jumlah\ energi\ dari\ peralatan\ ICT} \tag{2.19}$$

Energi peralatan IT terdiri dari energi yang terkait dengan semua peralatan IT (misalnya adalah server, peralatan jaringan dan penyimpanan) dan peralatan pelengkap yang digunakan untuk mengontrol *data center*. Total energi dari *data center* terdiri dari semua energi peralatan IT ditambah semua energi yang dibutuhkan untuk mendukung *data center* seperti energi yang digunakan untuk mendinginkan *data center*, komponen pengiriman daya, dan berbagai komponen

lainnya, seperti sistem penerangan dan keamanan. Sistem pendingin terdiri dari *chiller*, CRAH, CRAC, kipas, pompa, sistem refrigerasi dan lainnya. Pengiriman daya termasuk sistem UPS, generator, PDU, baterai dan energi yang hilang dalam distribusi dan konversi daya (Koskiniemi, 2016).

Sistem pendingin, iklim lokal, durasi dan frekuensi pengukuran mempengaruhi semua nilai PUE pada *data center*, dan oleh karena itu menentukan nilai-nilai PUE dari *data center* yang berbeda-beda menuntut ketelitian yang tinggi. Rentang nilainya diantaranya berkisar dari PUE = 2,7 untuk *data center* tradisional, 1,7-2,1 untuk *data center* yang menerapkan pendinginan dan rak *in-row* tambahan, dan PUE = 1.3 untuk *data center* yang menggunakan rak canggih dengan metode seperti penukar panas pintu belakang. Nilai yang lebih rendah dari yang telah disebutkan adalah untuk *data center* yang menggunakan sistem pendinginan tingkat lanjut dan memanfaatkan energi panas bumi (Koskiniemi, 2016).

2.6 *Computational Fluid Dynamics*

Computational fluid dynamics (CFD) adalah metode simulasi numerikal dari aliran fluida. CFD dapat digunakan untuk memprediksi laju fluida, temperatur, dan macam-macam variabel lainnya yang berhubungan untuk berbagai bidang aplikasi. Selama beberapa tahun, CFD digunakan untuk simulasi aliran udara pada sayap pesawat atau air pada lambung kapal, analisis komparatif pada badan otomotif, memprediksi waktu yang dibutuhkan pada campuran dua atau lebih zat cair, dan analisis pembakaran. CFD juga dapat digunakan untuk memodelkan aliran udara pada bangunan dengan ukuran dan fungsi yang berbeda-beda (Marshall & Bemis, 2011). Pada tugas akhir ini, simulasi CFD dilakukan untuk mengetahui aliran udara pada ruangan *data center* dengan menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 18.1.

Pemrograman CFD adalah program yang terstruktur dengan algoritma-algoritma numerik yang mampu memecahkan masalah-masalah aliran fluida. Tahapan pemrograman dibagi menjadi 3 yaitu: (i) *pre-processing*, (ii) *solver* dan (iii) *post-processing*.

a. *Pre-processing* adalah tahap dimana data diinput mulai dari pendefinisian domain serta pendefinisian kondisi batas atau *boundary condition.* Di tahap

ini juga, sebuah benda atau ruangan yang akan dianalisa dibagi-bagi dengan jumlah *grid* tertentu atau sering disebut juga dengan *meshing*.

b. *Solver*, pada tahap ini dilakukan proses perhitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Artinya perhitungan dilakukan hingga hasil menunjukkan nilai yang konvergen. Perhitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume kontrol dengan proses integrasi persamaan diskrit.

c. *Post-processing*, tahap ini menunjukkan hasil perhitungan yang diinterpretasikan dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola-pola warna (kontur) tertentu.

Komputasi dinamika fluida disusun berdasarkan persamaan-persamaan dasar yang berlaku pada dinamika fluida yaitu persamaan Navier-Stokes yang terbagi menjadi 2 persamaan umum yakni persamaan kontinuitas dan momentum. Persamaan kontinuitas (Ni, Jin, Zhang, & Wang , 2017) adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\rho u_y\right)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0, \qquad (2.20)$$

dimana u adalah laju dari fase ke-i. Tanda i menunjukkan mewakili sumbu x, y dan z.

Persamaan konservasi momentum (Ni, Jin, Zhang, & Wang , 2017) adalah:

$$\rho\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z}u_z\right) = \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) + f_x \qquad (2.21)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_y}{\partial z}u_z\right) = \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right) + f_y \qquad (2.22)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial u_z}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_z}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_z}{\partial z}u_z\right) = \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}\right) + f_z \qquad (2.23)$$

$$\sigma_i = -p + 2\mu\frac{\partial u_i}{\partial i}, \tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i}\right) \qquad (2.24)$$

dimana ρ adalah densitas (kg/m^3), f_i adalah gaya yang bekerja pada fase i yang disebabkan oleh keberadaan fase j, μ adalah viskositas geser (Ns/m^2), dan *p* adalah tekanan (N/m^2).

Umumnya, aliran udara di *data center* adalah turbulen dan pola alirannya menunjukkan rentang karakteristik yang luas. Dari banyaknya variasi jenis turbulen

yang tersedia, model turbulen $k-\boldsymbol{\varepsilon}$ adalah yang paling menjanjikan dalam hal komputasional (Schere, 2017; Samadiani & Joshi, 2010; Ni, Jin, Zhang, & Wang , 2017). Dimana model ini hanya mempunyai beberapa asumsi yang juga diaplikasikan luas. Persamaan model turbulen $k-\boldsymbol{\varepsilon}$ ini ditunjukkan seperti berikut,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \qquad (2.25)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \qquad (2.26)$$

Pada persamaan ini, G_k adalah generasi dari energi kinetik turbulen yang disebabkan oleh rata-rata gradien kecepatan, $G_b$adalah generasi dari energi kinetik turbulen yang disebabkan oleh *buoyancy*, Y_M adalah nilai kontribusi dilatasi yang berfluktuasi dalam turbulensi yang terkompresi ke tingkat disipasi keseluruhan, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, dan $C_{3\varepsilon}$ adalah nilai konstan, σ_k dan σ_ε adalah nilai turbulen bilangan Prandtl secara berturut-turut untuk k dan ε, dan S_k dan S_ε adalah nilai yang ditentukan sendiri.

Viskositas turbulen, μ_t, dapat dihitung dengan mengombinasikan nilai *k* dan ε sebagai berikut:

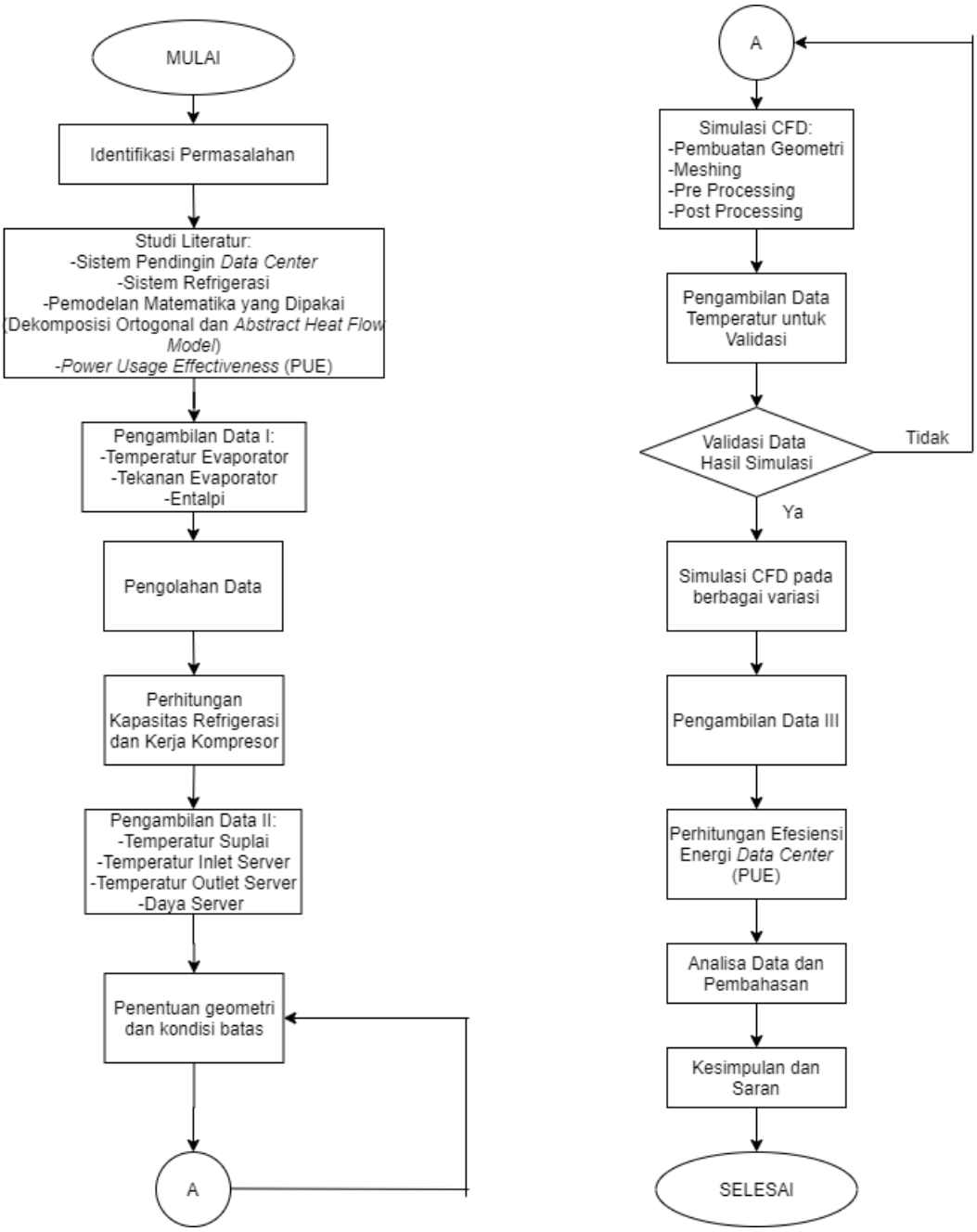
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}\,, \qquad (2.27)$$

dimana C_μ adalah konstan.Nilai $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ, σ_k dan σ_ε mempunyai nilai-nilai secara berturut-turut yaitu 1,44, 1,92, 0,09, 1 dan 1,3.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah yang telah dilakukan untuk menyelesaikan tugas akhir ini digambarkan pada diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3. 1 *Flowchart* pelaksaan tugas akhir.

3.1 Studi literatur

Penelitian ini diawali dengan studi literatur mengenai sistem pendingin *data center*, sistem refrigerasi, dekomposisi ortogonal, *abstract heat flow model*, dan *power usage effectiveness*. Literatur terkait bahasan tersebut selanjutnya akan dibahas secara berulang-ulang untuk memberikan pemahaman yang lebih utuh yang dibutuhkan dalam proses simulasi dan analisis hasil simulasi.

Langkah selanjutnya adalah pengambilan dan pengumpulan data primeryang didapat dari pihak ketiga yang mempunyai data. Data-data yang dibutuhkan untuk tugas akhir ini adalah skema atau ukuran *data center* milik pihak ketiga, temperatur evaporator dan kondensor, tekanan evaporator dan kompresor, temperatur suplai AC, temperatur inlet dan outlet *server*, dan daya *server*. Setelah data didapatkan, dilakukan desain skema *data center* sesuai dengan data yang telah diambil dan dilakukan juga perhitungan kerja evaporator dan kompresor sesuai dengan materi yang ada di subbab 2.2.

Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang didalamnya terdiri dari tahap geometri, *meshing*, pemberian *setup* yang sesuai untuk simulasi, *solution*, dan mengekstrak hasil-hasil simulasi pada CFD *result*. Apabila simulasi dasar untuk kondisi yang mewakili tujuan simulasi kali ini menunjukkan hasil dengan nilai *error* yang kurang dari 4.9% dari data acuan dari penelitian sebelumnya, maka variasi simulasi lainnya dapat dilakukan. Data yang didapat dari simulasi adalah data kontur temperatur masukan dan keluaran tiap-tiap rak server, data *streamline* kecepatan aliran udara, dan data kontur temperatur resirkulasi di tiap-tiap rak server. Pada simulasi ini terdapat 6 variasi yang disimulasikan diantaranya adalah 6 temperatur suplai AC yang berbeda-beda yang terdiri dari 19, 20, 21, 22, 23, 24 dan 25^{o}C. Hasil dari simulasi tersebut kemudian dianalisis untuk mencari nilai daya server dan nilai PUE sesuai dengan perhitungan pada subbab 2.4 dan 2.5. Berdasarkan perhitungan tersebut maka data dapat dianalisis kembali untuk diambil kesimpulan dan hubungan dari variasi yang dilakukan terhadap parameter yang akan dianalisis.

3.2 Pengambilan Data Pada Sistem Pendingin

Sistem pendingin yang dipakai pada ruangan *data center* Perusahaan X ini adalah sistem pendingin tipe CITEC ESD80. Sistem pendingin ini adalah sistem pendingin berjenis *precision air conditioning* (PAC) yang merupakan sistem pendingin yang dibuat untuk menjaga temperatur dan kelembaban pada ruangan tertutup yang didalamnya terdapat perangkat yang membutuhkan pendingin secara kontinyu dan selama beroperasi PAC dapat mempertahankan temperaturtemperatur dan kelembaban secara konstan dan stabil. Tipe PAC yang dipakai ditunjukkan pada Gambar 3.2.

Gambar 3. 2 Sistem pendingin CITEC ESD80.

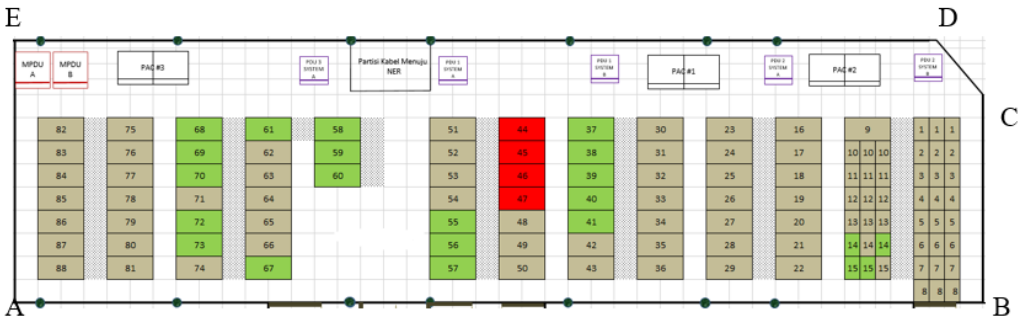
Data AC yang diambil pada 11 Februari 2020 adalah temperatur evaporator, temperatur kondensor, tekanan masukan dan keluaran kompresor di rentang temperatur suplai AC ruangan sebesar 19 – 25 ^{o} C. Data secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 3.1 dibawah.

Tabel 3. 1 Data AC yang diambil.

Temperatur AC (ºC)	T_C (ºC)	T_H (ºC)	P_C (bar)	P_H (bar)
19	1.35	51.2	4.83	20.68
20	1.35	48.9	4.83	20.68
21	-0.81	47.12	4.48	20.68
22	1.35	44.22	4.83	19.31
23	1.62	53.42	4.875	21.58
24	1.8	53.8	4.9	21.77
25	2.35	54.037	5	21.9

3.3 Desain Ruangan *Data Center*

Desain ruangan *data center* untuk tugas akhir ini adalah merujuk pada hasil data yang telah dikumpulkan pada pihak ketiga yaitu Perusahaan X. Skema ruangan *data center* ditunjukkan Gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3. 3 Skema ruangan di *data center*.

Berdasarkan Gambar 3.3 diatas, ruangan yang ada di Perusahaan X ini terdiri dari beberapa peralatan yaitu peralatan IT, 3 unit CRAC, 4 unit sistem PDU dan 2 unit UPS. Lantai pada ruangan *data centet* ini ditinggikan setinggi 40 cm guna sebagai penyaluran kabel dan untuk pengaliran udara dari AC. Dimensi ruangan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Data dimensi ruangan,

Ukuran Ruangan	Nilai
Panjang Sisi:	
AB	25,2 m
BC	5,4 m
CD	2,24 m
DE	24 m
EA	7,15
Tinggi Ruangan	3,5 m
Tinggi Lantai	40 cm
Ukuran Rack	0,6 x 1,2 x 2 m
Ukuran PAC	1,8 x 0,9 x 2 m

Data lainnya yang dibutuhkan adalah daya tiap server yang dihasilkan sesuai dengan keadaan aktual pada saat pengumpulan data. Pada *data center* Perusahaan X ini terdiri dari 13 baris kumpulan rak server yang mana 12 barisnya terdiri dari 7 rak server dan 1 baris terdiri dari 3 rak server. Namun, tidak semua rak server diisi oleh server dimana data-data server dan daya server ditunjukkan pada Tabel 3.3 dibawah.

Tabel 3. 3 Data daya server.

Daya Server (W)							
Row **(Baris)**	**Rak**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	-	-	-	-	-	413	823
2	-	-	-	-	-	756	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	5782	7432	8452	8827	5832	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	746	450	-
10	2352	8792	8776	-	-	-	-
11	2547	-	-	-	290	484	290
12	8560	568	290	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-

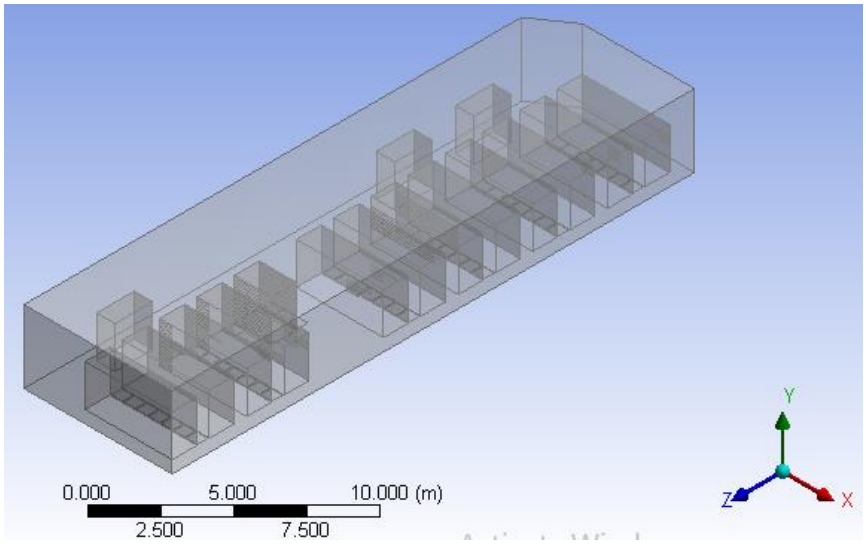
Jenis server yang dipakai pada *data center* ini adalah server dengan merk Supermicro dan HP.

Gambar 3. 4 Jenis server yang dipakai pada *data center*: (a) Server 2U merk HP (Hewlett Packard Enterprise Development LP, n.d.) dan (b) Server 2U merk Supermicro (Supermicro, n.d.)

Pada Gambar 3.4a menunjukkan server 2U milik HP yang memiliki daya server 290W-800W dan pada Gambar 3.4b menunjukkan server 2U milik *Supermicro* yang mempunyai daya sebesar 1000W-2200W.

3.4 Simulasi CFD

Tahap pertama dari simulasi CFD adalah pembuatan geometri yang akan disimulasikan. Perangkat lunak untuk mendesain geometri ruangan pada *data center* ini adalah menggunakan *Autodesk Inventor Proffesional 2018*. Skema ruangannya sesuai dengan ukuran dari data yang telah diambil berdasarkan subbab sebelumnya yaitu subbab 3.2. Selanjutnya geometri yang telah dibuat, di-*import* pada perangkat lunak CFD. Geometri ruangan yang telah di-*import* dapat dilihat pada Gambar 3.4 dibawah.



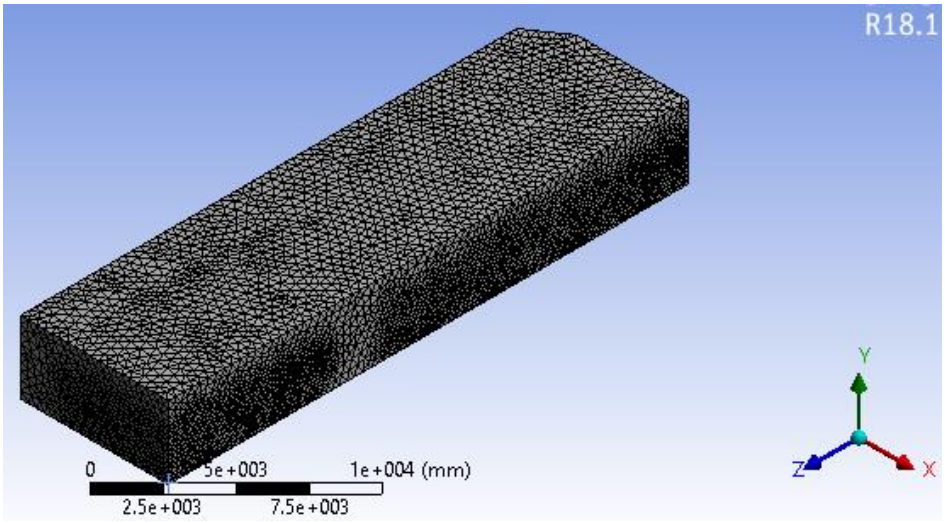
Gambar 3. 5 Desain geometri *data center* pada ANSYS.

Tahap kedua dari simulasi CFD yaitu *meshing*. Pada tahap ini, geometri yang telah dibuat dibagi menjadi kontrol volume yang lebih kecil. Kontrol volume yang terbentuk akan menjadi tempat perhitungan persamaan dasar pada simulasi CFD yaitu kekekalan massa, kekekalan energi, dan persamaan *navier-stokes*. Ukuran dari *meshing* harus diatur sedemikian rupa agar memiliki hasil yang akurat. Samadiani dan Joshi (Samadiani & Joshi, 2010) menjelaskan bahwa *meshing* yang harus diberikan pada geometri *data center* yang paling bagus adalah menggunakan *relevance center* tipe *fine* dengan ukuran *mesh*-nya adalah *skewness*. Sehingga, detail *mesh* ditunjukkan pada Tabel 3.4 dibawah.

Tabel 3. 4 Detail *Mesh* Dari Simulasi,

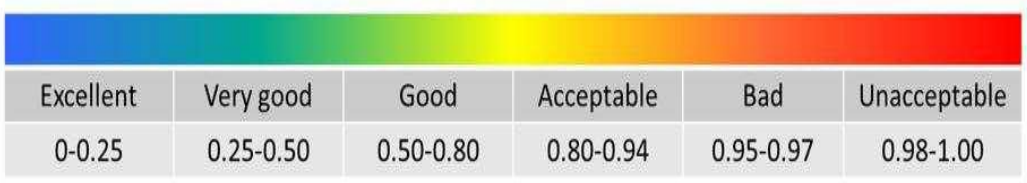
Mesh Quality	Fine
Nodes	816798
Elements	4368948
Mesh Metric	Skewness
Minimum	5.2894×10^{-5}
Maximum	0.849
Average	0.2334
Standard Deviation	0.1221

Dari parameter-parameter tersebut sehingga, gambar dari hasil *mesh* pada geometri ditunjukkan pada Gambar 3.5 dibawah.



Gambar 3. 6 Hasil *meshing*.

Penentuan kualitas dari tahap *meshing* salah satunya dapat diindikasikan dari nilai *skewness*. Parameter nilai *skewness* ditunjukkan pada Gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3. 7 Parameter nilai *skewness*.

Semakin kecil nilai *skewness*, hingga mendekati 0, maka kualitas *mesh* semakin baik berdasarkan pada Gambar 3.6. Berdasarkan dari Tabel 3.4, nilai

skewness pada *meshing* ini adalah 0,2334 sehingga bisa dikategorikan *excellent* dan mendekati 0.

Setelah *meshing* dilakukan, tahap selanjutnya adalah *pre-processing* atau memberikan masukan nilai inisiasi dan kondisi batas pada simulasi CFD. Parameter-parameter umum dari simulasi yang dilakukan terdapat pada Tabel 3.5. Model turbulensi yang digunakan pada simulasi ini adalah *k-*$\boldsymbol{\varepsilon}$ atau (k-epsilon). Menurut (Schere, 2017), (Bai, Gu, & Qi, 2018) dan (Samadiani & Joshi, 2010), model turbulensi ini memiliki performa bagus untuk digunakan pada simulasi aliran udara pada ruangan khususnya adalah fenomena aliran udara pada *data center* seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Parameter yang digunakan

Parameter	**Jenis**
Model Geometri	3D
Keadaan	*Steady-state*
Model Turbulensi	*k-*$\boldsymbol{\varepsilon}$ (k-epsilon)
Material Properties	Fluid: air Solid: wall *data center*

Penentuan kondisi batas pada simulasi CFD pada simulasi ini ditentukan sesuai dengan kondisi aktual pada *data center* yang ditunjukkan secara lengkap pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Kondisi batas pada simulasi CFD.

Kondisi		*Steady-state*		
Inlet	**Laju Udara (m/s)**	1		
	Rentang Temperatur (ºC)	19-25		
Wall	***Wall Motion***	*Stationary Wall*		
	Shear Condition	*No Slip*		
	Thermal Condition	*Heat Flux* (W/m^2)	Row 1	124,28
			Row 2	75,98
			Row 6	438,2
			Row 8	105,32
			Row 10	200,2
			Row 11	61,11
			Row 12	143,8
Outlet		*Outflow*		

3.5 Validasi Simulasi

Tahap validasi adalah membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen atau teori. Pada tahap ini yang dilakukan adalah mengambil data temperatur *inlet* di setiap server dari hasil simulasi pada simulasi kondisi aktual. Setelah itu, hal yang dilakukan adalah melakukan perhitungan dengan persamaan yang tertera di subbab 2.3 dan membandingkannya dengan hasil simulasi. Berdasarkan persamaan tersebut, perhitungan dilakukan dengan *matlab code* yang merujuk pada salah satu referensi (Weiss, 2019) menggunakan *software MATLAB* R2019a dengan hasilnya yang diambil adalah kontur temperatur dan nilai temperatur inlet di setiap server di *data center*.

3.6 Perhitungan Daya Server dan PUE

Setelah simulasi dilakukan, pengambilan data temperatur inlet, outlet, dan laju volumetrik udara pada server dilakukan di semua simulasi. Pengambilan data ini dilakukan untuk menghitung konsumsi daya per server sesuai dengan persamaan (2.13) dengan asumsi laju udara dan laju volumetrik udara per server memiliki nilai

yang sama untuk semua simulasi pada variasi temperatur AC karena laju udara inlet pada simulasi diasumsikan sama untuk semua simulasi variasi temperatur AC.

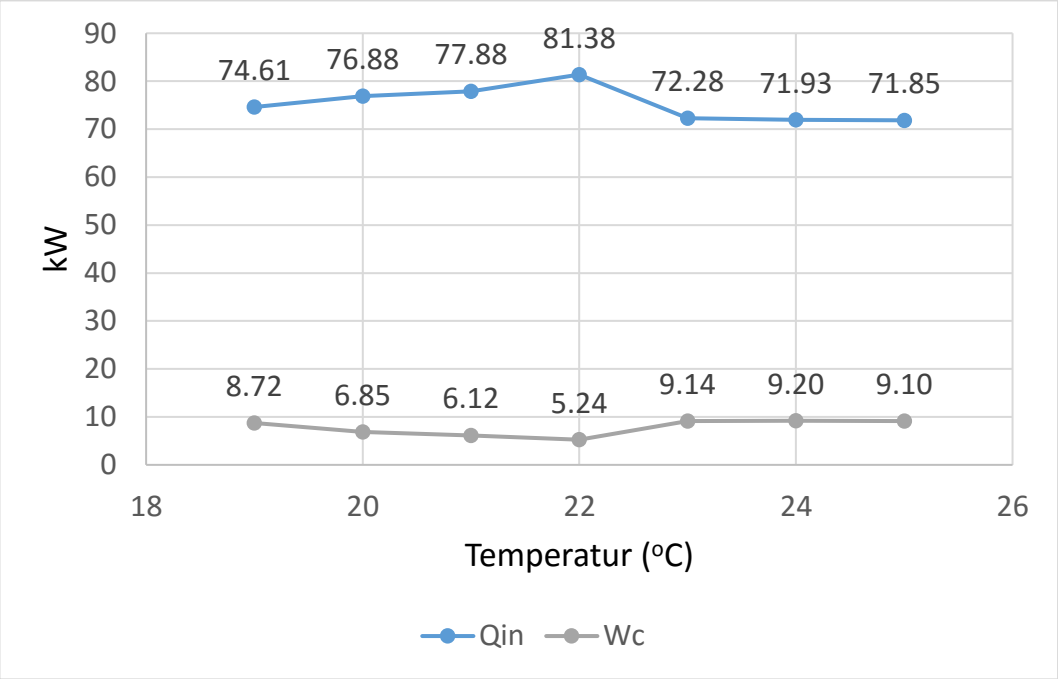
Setelah perhitungan daya server selesai, dilanjutkan untuk perhitungan nilai PUE sesuai dengan persamaan (2.19). Daya IT dan non-IT dari hasil perhitungan dan pengukuran dikumpulkan dari langkah-langkah sebelumnya guna mencari nilai PUE.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Kerja Kompresor dan Kapasitas Refrigerasi terhadap Perubahan Temperatur Suplai AC

Perhitungan kerja kompresor dan kapasitas refrigerasi sesuai dengan persamaan 2.3 dan 2.4, dimana rentang temperatur yang digunakan pada *data center* sendiri adalah 19-25^{o}C. Berdasarkan data yang sudah diambil sesuai dengan yang telah dilampirkan di subbab 3.2, maka hasil dari perhitungannya ditunjukkan pada Gambar 4.1. Dari hasil perhitungan tersebut, sesuai dengan persamaan 2.3 dan 2.4, nilai entalpi didapatkan dari tabel termodinamika untuk jenis refrigeran R-407C sehingga dari nilai entalpi dapat dihitung kerja kompresor dan kapasitas refrigerasi. Nilai entalpi dilampirkan pada Lampiran.



Gambar 4. 1 Grafik hasil perhitungan kerja kompresor dan kapasitas refrigerasi terhadap perubahan temperatur suplai AC.

Berdasarkan tujuan pertama tugas akhir ini, rumus perhitungan kapasitas refrigerasi dan daya kompresor telah ditampilkan sesuai dengan subbab 4.1. Berdasarkan Gambar 4.1, nilai kapasitas refrigerasi mengalami kenaikan pada rentang temperatur 19-22^{o}C dengan nilai berturut-turut 74,61, 76,88, 77,88, dan

81,38 kW. Hal ini disebabkan oleh penurunan temperatur kondensor dari 51,2^{o}C sampai 44,22^{o}C yang dialami pada rentang temperatur suplai AC tersebut sehingga menyebabkan nilai kapasitas refrigerasi menurun. Pada perhitungan daya kompresor dalam rentang temperatur ini, hal sebaliknya terjadi yaitu penurunan nilai terjadi pada rentang temperatur ini sehingga nilai daya kompresor terendah dan nilai kapasitas refrigerasi tertinggi terletak pada temperatur 22^{o}C.

Rentang temperatur selanjutnya yaitu 23-25^{o}C. Nilai kapasitas refrigerasi mengalami penurunan pada rentang ini yang disebabkan oleh naiknya temperatur kondensor dari temperatur 22^{o}C ke 23^{o}C dan seterusnya sehingga nilai kapasitas refrigerasi sesuai dengan Tabel 4.1 berturut-turut adalah 72,28, 71,93, dan 71,85 kW. Pada nilai daya kompresor, hal sebaliknya terjadi yaitu kenaikan hasil terjadi dimana nilai daya kompresor berturut-berturut adalah 9,14, 9,2, dan 9,1 kW. Nilai ini lebih tinggi daripada semua nilai daya kompresor di rentang temperatur sebelumnya dan mempunyai nilai daya kompresor yang konstan pada rentang temperatur 23-25^{o}C sehingga nilai kapasitas refrigerasi terendah terdapat pada temperatur suplai AC 25^{o}C dan nilai daya kompresor tertinggi terdapat pada temperatur 24^{o}C.

Dari hasil pada Gambar 4.1, daya dari unit AC dapat dihitung yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.1.

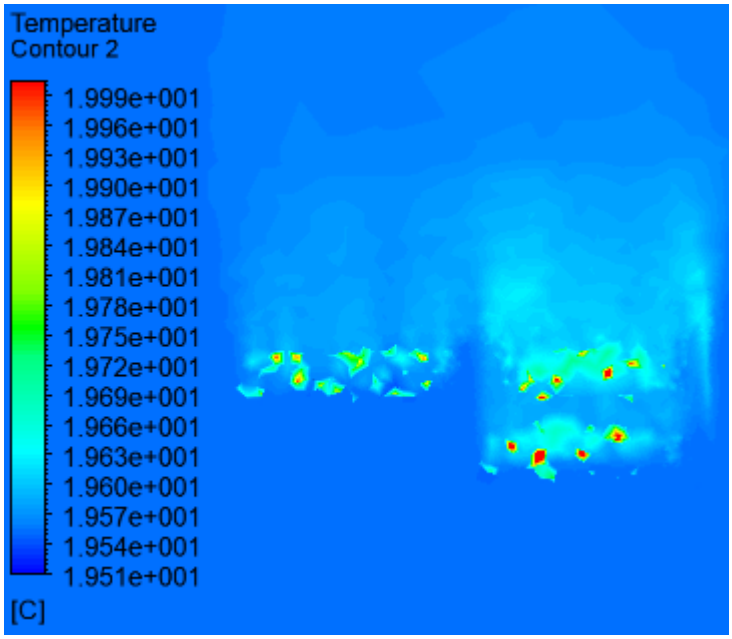
Tabel 4. 1 Data daya AC pada setiap variasi temperatur.

Temperatur AC (^{o}C)	**Daya Kompresor (kW)**	**Daya Kipas Evaporator (kW)**	**Daya Kipas Kondensor (kW)**	**Total Daya AC (kW)**
19	26,16	7,2	6,6	39,96
20	20,54			34,34
21	18,37			32,17
22	15,73			29,53
23	27,4			41,22
24	27,6			41,39
25	27,3			41,11

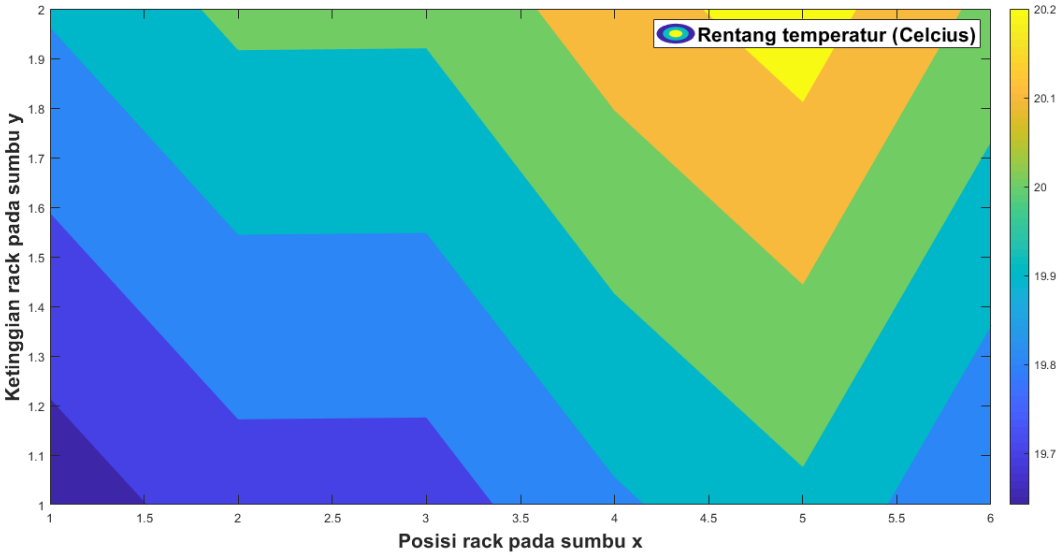
Berdasarkan Tabel 4.1, daya AC dipengaruhi oleh hanya pada daya kompresor hal ini disebabkan nilai daya kipas evaporator dan kondensor diasumsikan sama tiap temperatur AC. Nilai daya kompresor pada Tabel 4.1 adalah hasil dari nilai daya kompresor pada Gambar 4.1 yang dikalikan 3 karena jumlah unit AC adalah 3 dan semua AC diasumsikan bekerja dengan kondisi yang sama.

4.2 Validasi Simulasi

Tahap validasi adalah tahap membandingkan hasil simulasi yang didapat dengan hasil eksperimen atau teori. Pada simulasi untuk *data center* sendiri, Samadiani dan Joshi (Samadiani & Joshi, 2010) mendapatkan nilai *error* untuk pengaruh temperatur pada simulasi aliran udara di *data center* adalah sebesar 4,9% sehingga simulasi untuk tugas akhir ini bisa dikatakan *valid* atau bisa dilanjutkan dengan variasi selanjutnya bila mendapatkan nilai *error* yang lebih kecil dari teori yang sudah dilakukan yaitu 4,9%. Dengan tahap yang dilakukan sesuai dengan subbab 3.6, hasil simulasi dan validasinya ditunjukkan pada gambar-gambar yang ada dibawah ini.

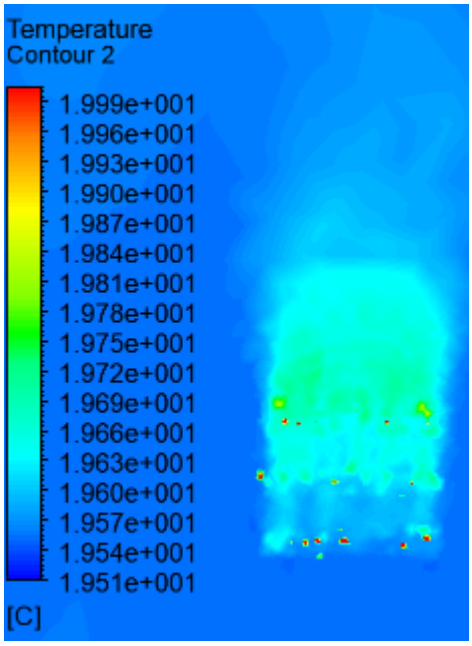


Gambar 4. 2 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 1.

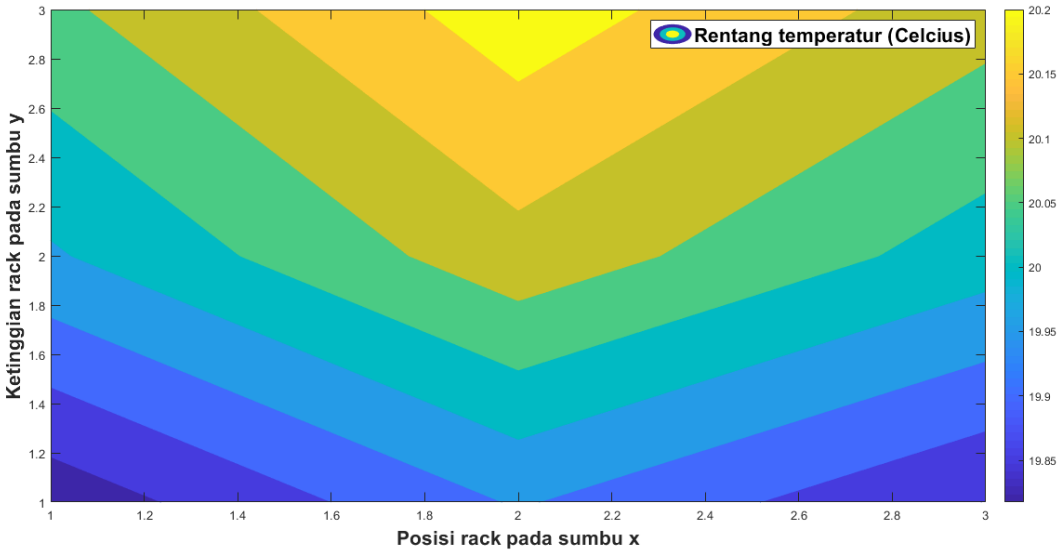


Gambar 4. 3 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 1.

Berdasarkan Gambar 4.2 dan 4.3, server yang terdapat di baris 1 hanya pada rak 6 dan 7 dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,25%.

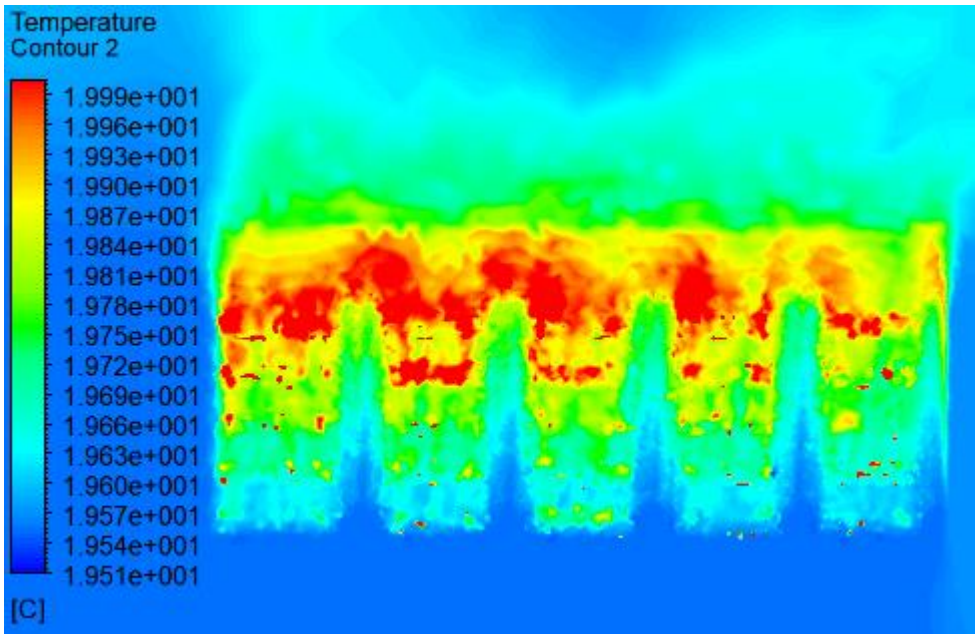


Gambar 4. 4 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 2.

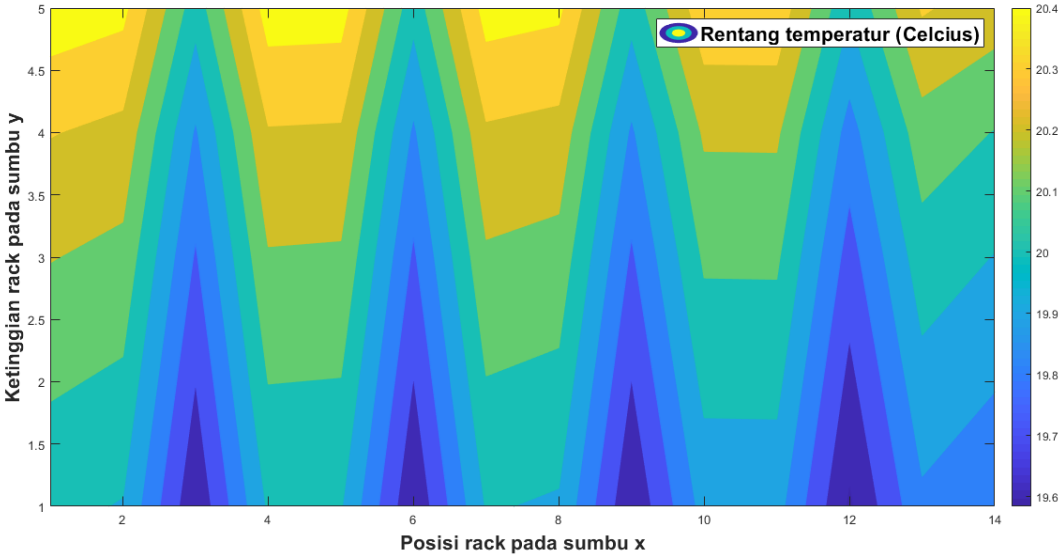


Gambar 4. 5 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 2.

Berdasarkan Gambar 4.4 dan 4.5, server yang terdapat di baris 2 hanya pada rak 6 saja dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,09%.

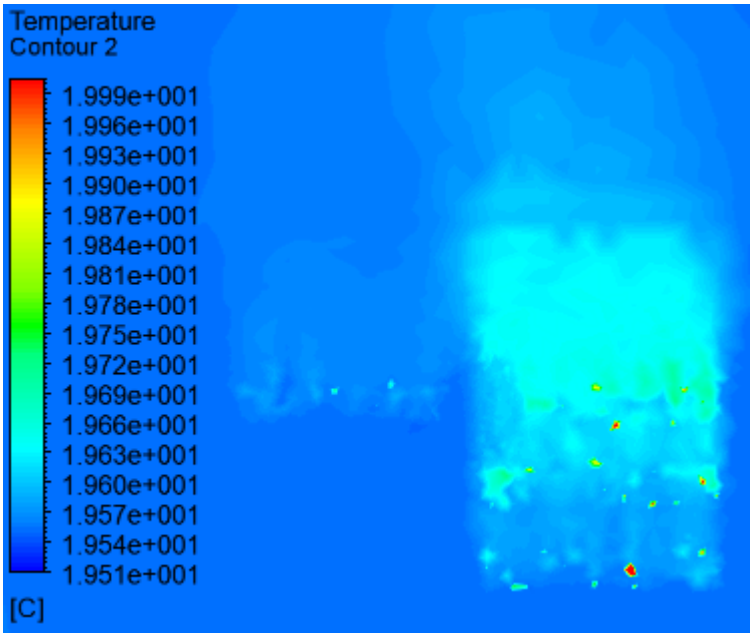


Gambar 4. 6 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 6.

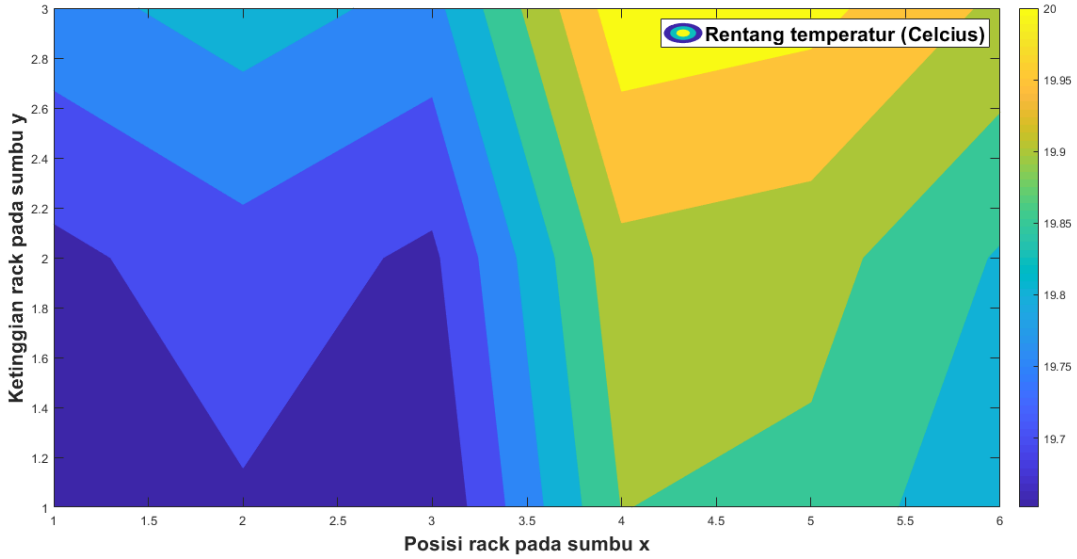


Gambar 4. 7 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 6.

Berdasarkan Gambar 4.6 dan 4.7, server yang terdapat di baris 6 adalah pada rak 1, 2, 3, 4 dan 5 dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,21%.

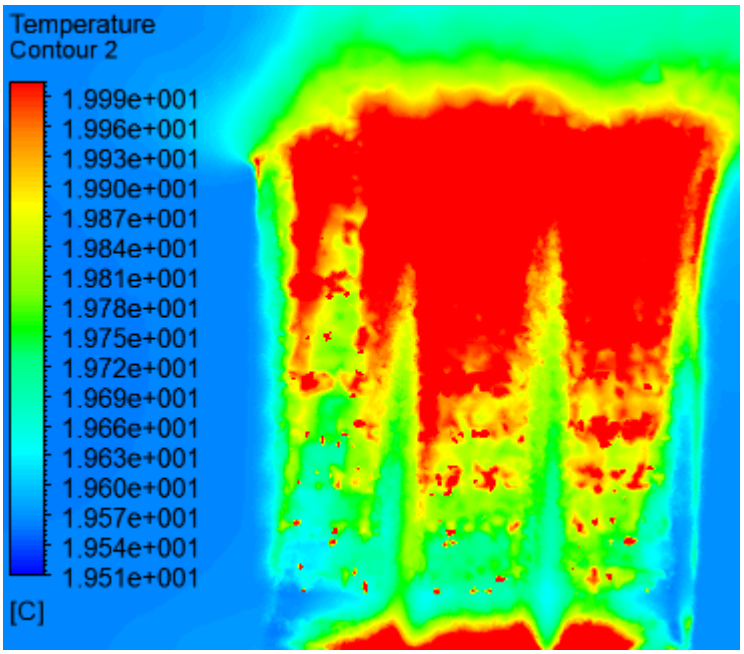


Gambar 4. 8 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 8.

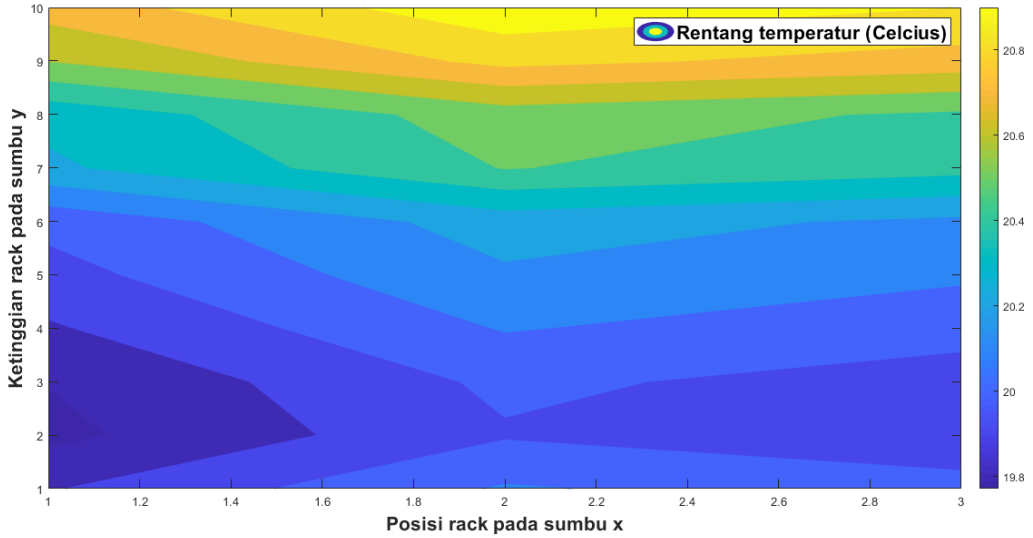


Gambar 4. 9 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 8.

Berdasarkan Gambar 4.8 dan 4.9, server yang terdapat di *row* 8 hanya pada *rack* 5 dan 6 dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,15%.

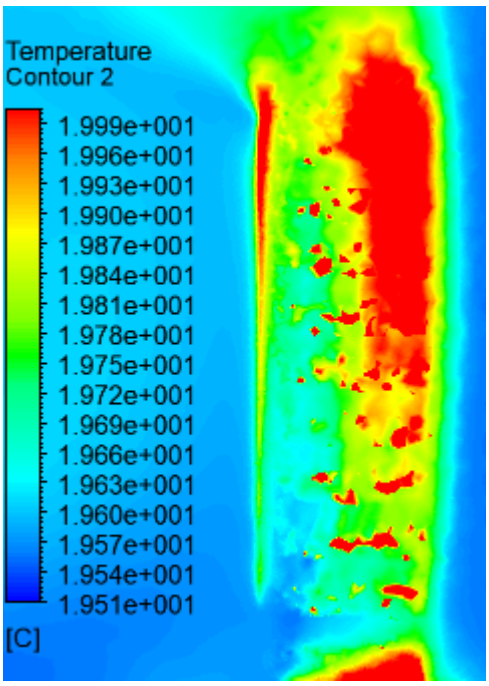


Gambar 4. 10 Kontur temperatur hasil simulasi pada *row* 10.

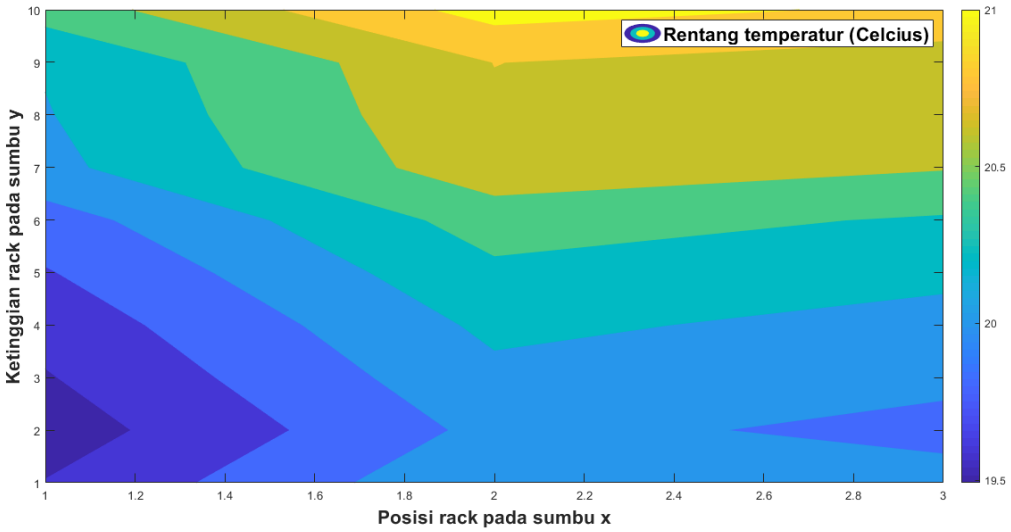


Gambar 4. 11 Kontur temperatur hasil validasi pada baris 10.

Berdasarkan Gambar 4.10 dan 4.11, *server* yang terdapat di baris 10 adalah pada rak 1,2 dan 3 dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,32%.

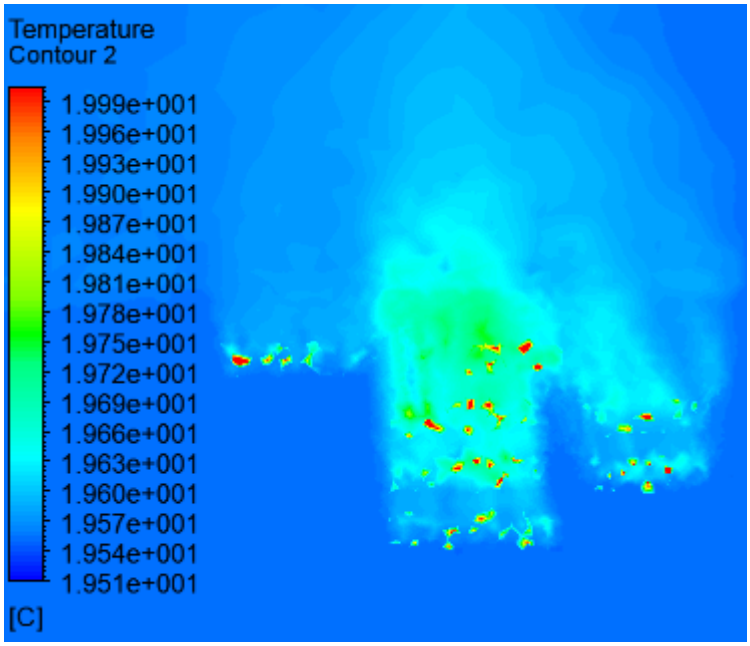


Gambar 4. 12 Kontur temperatur hasil simulasi pada *row* 11 *rack* 1.

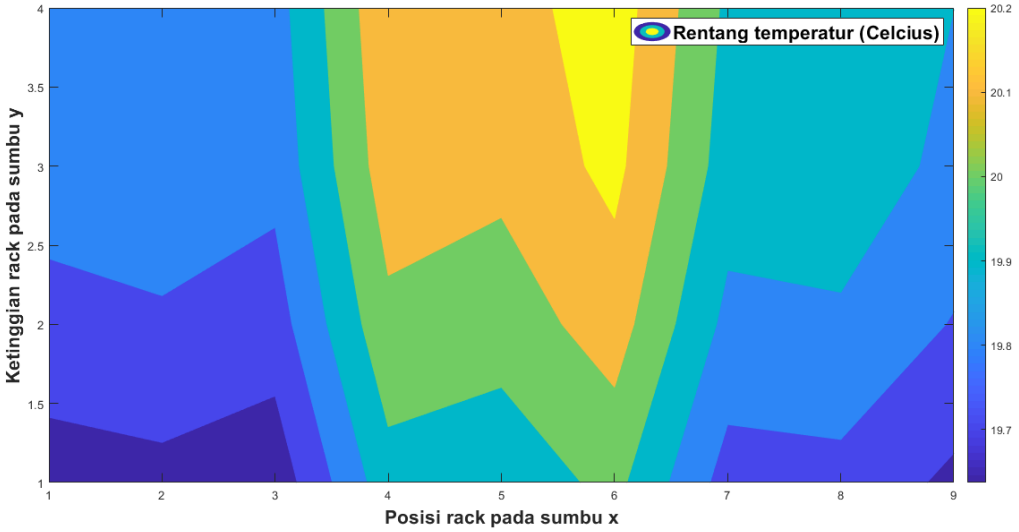


Gambar 4. 13 Kontur temperatur hasil validasi pada *row* 11 *rack* 1.

Berdasarkan Gambar 4.12 dan 4.13, terlihat hasil simulasi pada *row* 11 *rack* 1 dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,6%.

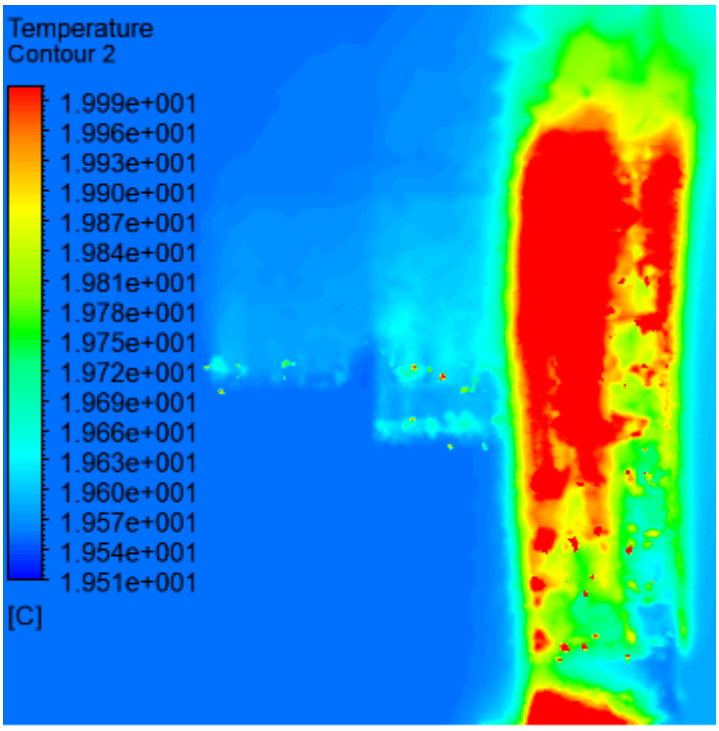


Gambar 4. 14 Kontur temperatur hasil simulasi pada baris 11 rak 5, 6 dan 7.

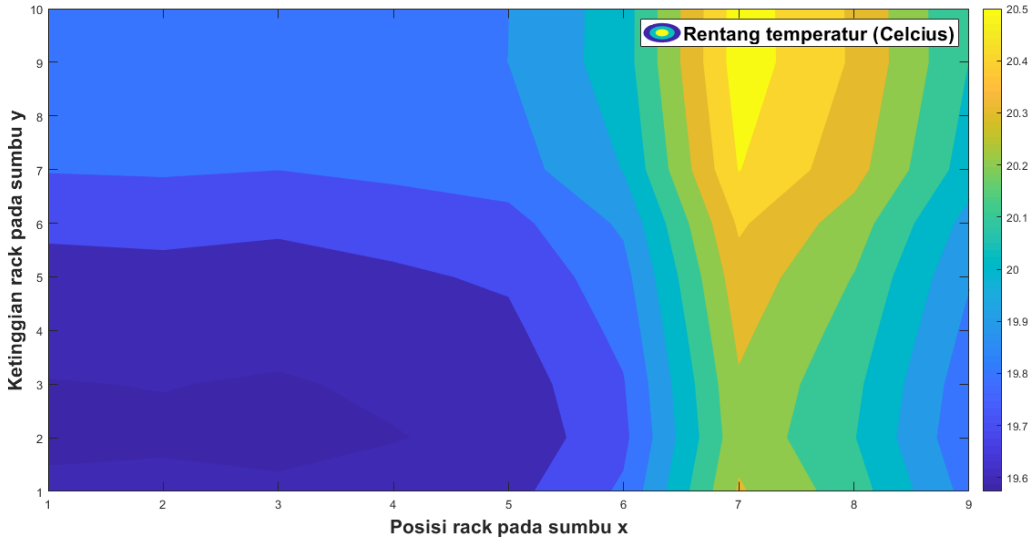


Gambar 4. 15 Kontur temperatur hasil validasi pada *row* 11 *rack* 5, 6 dan 7.

Berdasarkan Gambar 4.14 dan 4.15, terlihat hasil simulasi pada *row* 11 *rack* 5,6, dan 7 dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,15%.



Gambar 4. 16 Kontur temperatur hasil simulasi pada *row* 12.



Gambar 4. 17 Kontur temperatur hasil validasi pada *row* 12.

Berdasarkan Gambar 4.16 dan 4.17, server yang terdapat di *row* 12 hanya pada *rack* 1,2 dan 3 dan hasil validasinya menunjukkan bahwa *error* terhadap simulasinya adalah sebesar 0,45%.

Apabila semua hasil dari simulasi di tiap-tiap server di *data center* ini ditabulasikan didapatkan nilai *error* rata-rata untuk keseluruhan adalah 0,28% yang ditunjukkan secara lengkap seperti dibawah ini.

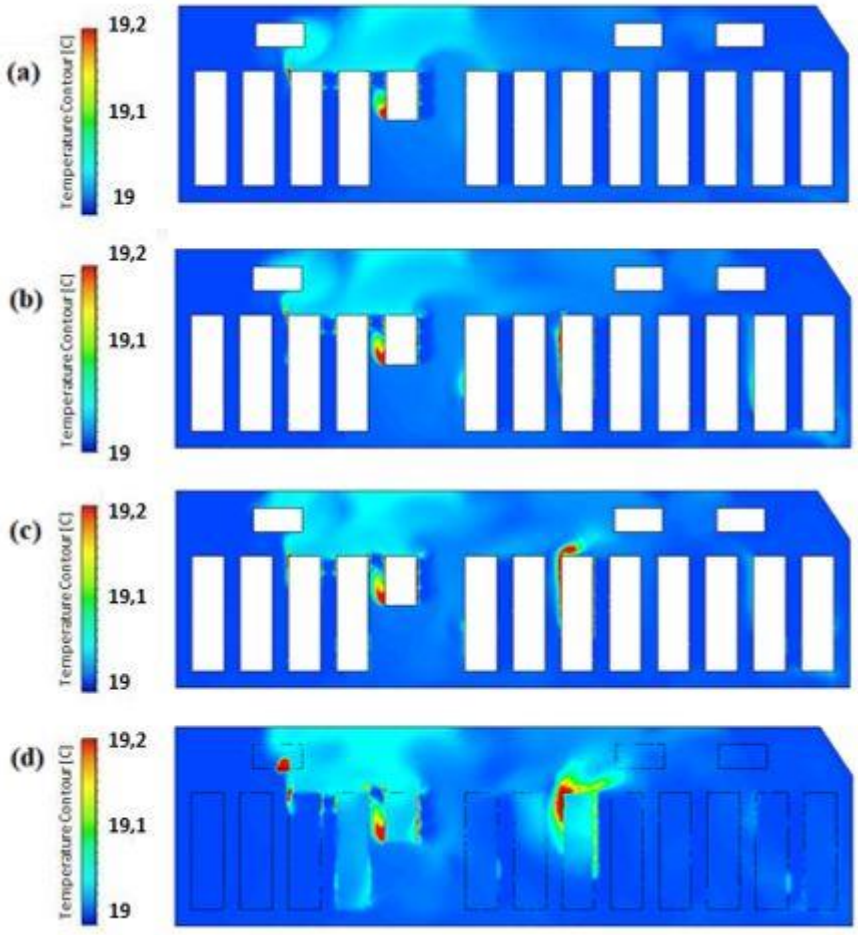
Tabel 4. 2 Nilai *error* dari hasil validasi.

Baris	Error per baris (%)	Error Rata-Rata (%)
1	0,245132109	0,276833389
2	0,087006486	
6	0,208039602	
8	0,147403581	
10	0,32133784	
11 Rak 1	0,604593577	
11 Rak 5, 6, 7	0,147403581	
12	0,453750334	

Berdasarkan nilai *error* yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 tersebut, nilai *error* sebesar 0,28% jauh lebih rendah dari hasil teori dari Samadiani dan Joshi (Samadiani & Joshi, 2010) dengan *error* sebesar 4,9% sehingga simulasi bisa dikatakan sesuai dan dapat dilanjutkan untuk variasi lainnya.

4.3 Simulasi dengan Temperatur 19ºC - 25ºC

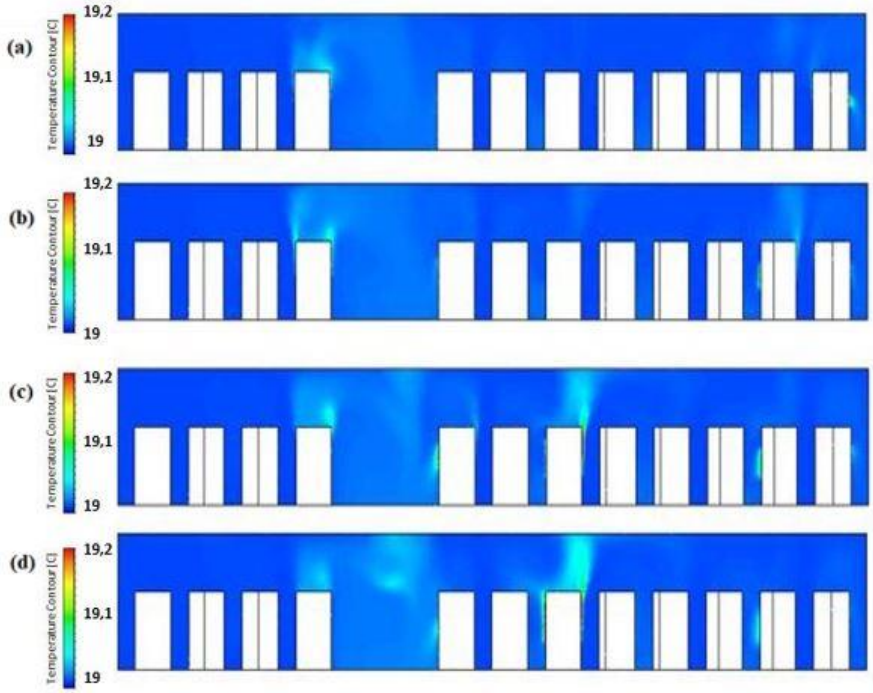
Simulasi dilakukan dengan variasi temperatur pada inlet AC dengan skala temperatur berada pada 19-25ºC dengan perbedaan variasi 1ºC. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.



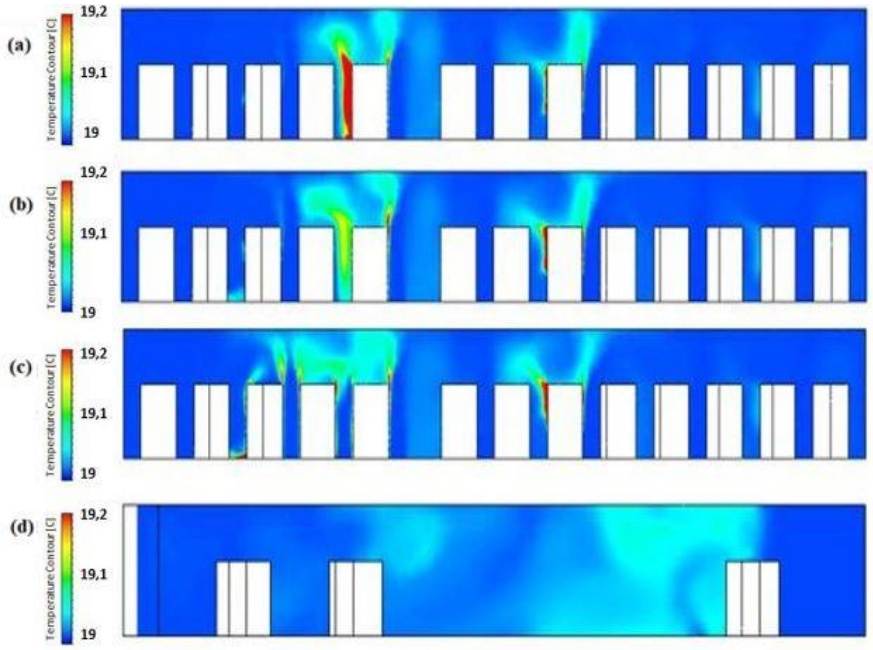
Gambar 4. 18 Kontur temperatur hasil simulasi temperatur AC 19ºC pada posisi y = (a) 0,5, (b) 1, (c) 1,5, dan (d) 2 m.

Berdasarkan dari Gambar 4.18, persebaran temperatur dapat dilihat berdasarkan ketinggian dari ruangannya. Gambar 4.18a-4.18d berturut-turut

menunjukkan persebaran temperatur yang berada pada pada ketinggian 0,5, 1, 1,5, dan 2 m dari lantai.

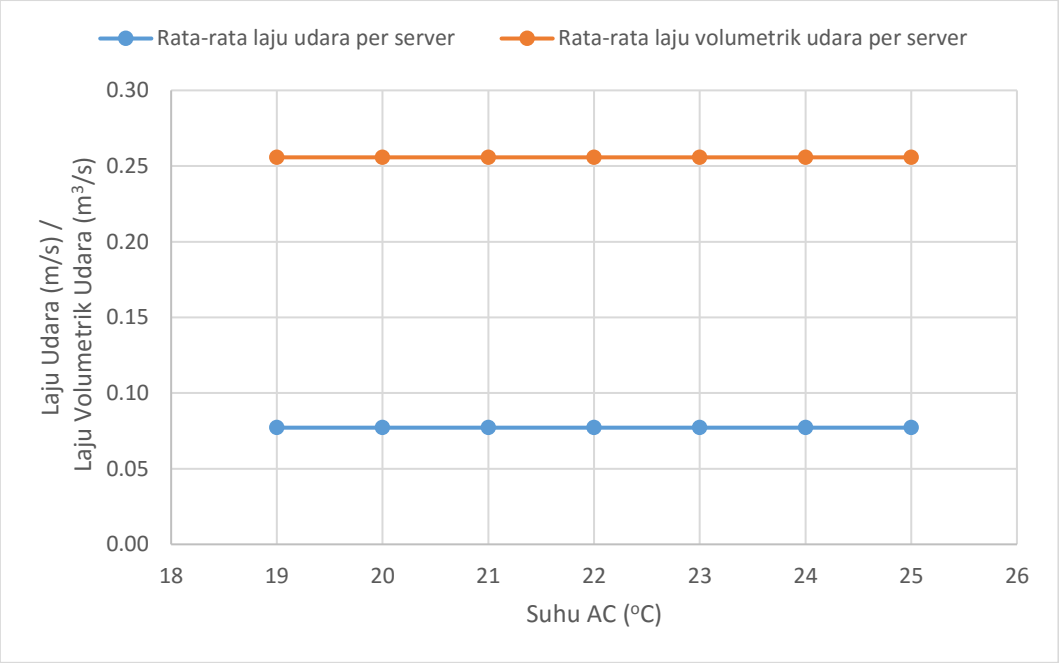


Gambar 4. 19 Kontur temperatur hasil simulasi temperatur AC 19^{o}C pada posisi (a) x = 0,9 m, (b) x = 1,5 m, (c) x = 2,1 m dan (d) x = 2,7 m.



Gambar 4. 20 Kontur temperatur hasil simulasi temperatur AC 19^{o}C pada posisi (a) x = 3,3 m, (b) x = 3,9 m, (c) x = 4,5 m dan (d) x = 6,1 m.

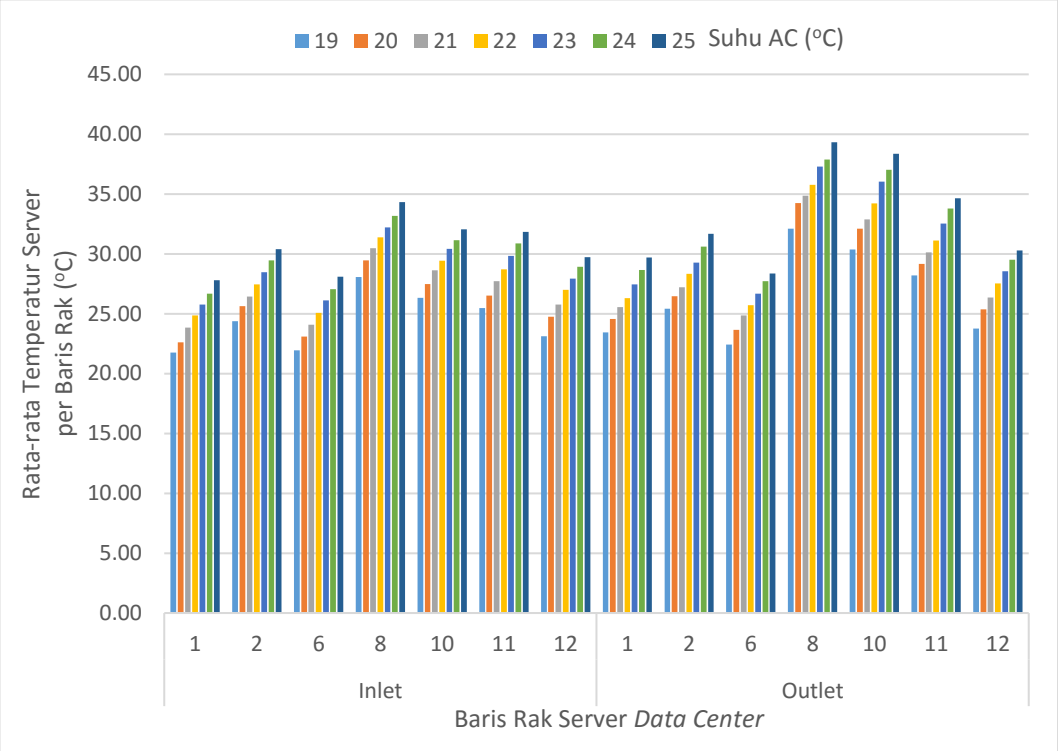
Berdasarkan Gambar 4.20 dan 4.21, hasil simulasi menunjukkan persebaran temperatur pada posisi *x*. Gambar 4.20a, 4.20b dan 4.20c menunjukkan terjadinya resirkulasi panas yang besar dari *server* pada baris 6, 10, 11 dan 12 yang masuk kembali ke inlet *server* yang disebabkan oleh jumlah daya yang dihasilkan *server* tersebut besar. Hasil kontur temperatur dari simulasi untuk semua variasi temperatur suplai AC menunjukkan persebaran suhu yang sama dan perbedaannya hanya pada nilai rentang temperatur kontur hasil simulasinya saja. Rentang temperatur pada kontur tidak dibuat sama pada semua simulasi karena jika dilihat dari warna konturnya tidak menunjukkan persebaran suhu secara detil dari keseluruhan simulasi. Data pertama yang diambil pada simulasi adalah laju udara dan laju volumetrik udara per server yang ditunjukkan seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 21 Data rata-rata laju udara dan laju volumetrik udara per server hasil simulasi.

Berdasarkan Gambar 4.21, nilai rata-rata laju udara dan laju volumetrik udara per server memiliki nilai yang konstan di tiap suhu AC yang dipakai yaitu 0,08 m/s dan 0,26 m^3/s secara berturut-turut. Hal ini disebabkan oleh nilai laju udara pada inlet AC yang dipasang adalah sebesar 1 m/s untuk semua temperatur suplai AC yang digunakan. Data selanjutnya yang diambil adalah data temperatur *inlet* dan

temperatur *outlet* per server di semua barisan rak server. Hasil dari simulasi untuk semua variasi temperatur suplai AC ditunjukkan pada Gambar 4.22 di bawah.



Gambar 4. 22 Data rata-rata temperatur *inlet* dan *outlet* hasil simulasi.

Berdasarkan Gambar 4.22, temperatur *inlet* dan *outlet* server meningkat secara rata-rata berturut-turut sebesar 1,03^{o}C dan 1,11^{o}C seiring dengan naiknya temperatur suplai AC. Semua hasil pengambilan data dari simulasi ini akan digunakan untuk menghitung daya server keseluruhan sesuai dengan persamaan 2.13.

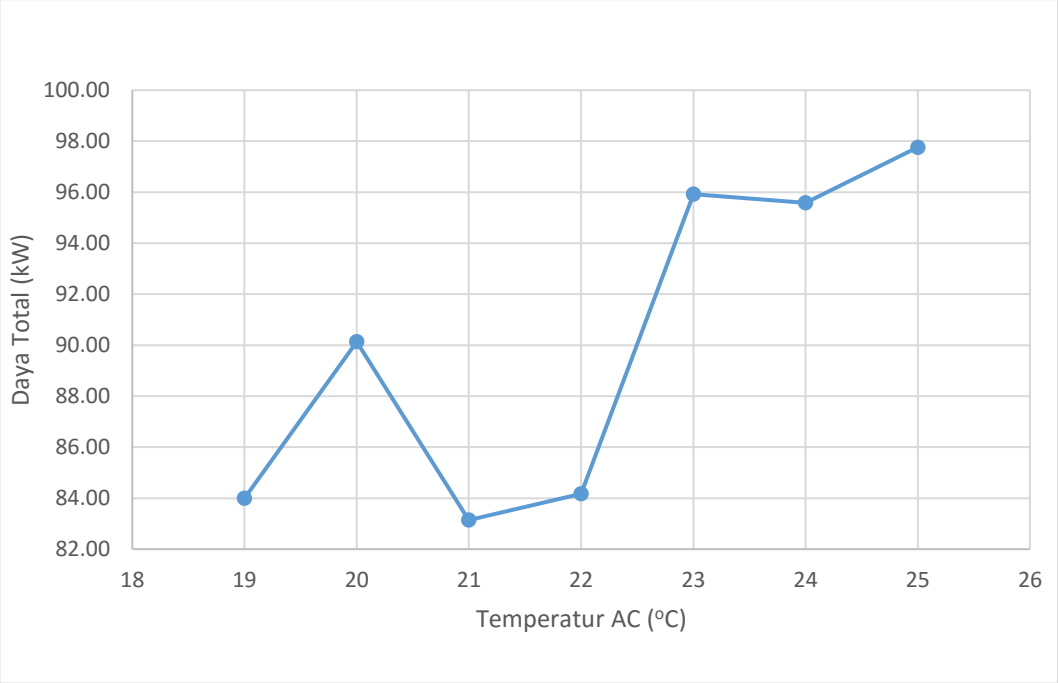
Hasil simulasi menunjukkan bahwa hasil kontur persebaran temperatur dalam ruangan *data center* tidak berubah pada rentang temperatur yang dilakukan. Hal ini disebabkan oleh kecepatan inlet udara dari AC di tiap rentang temperatur adalah sama yaitu 1 m/s. Akan tetapi, temperatur inlet dan outlet di tiap *server* berubah dengan kenaikkan temperatur sekitar 1-3^{o}C jika diubah temperatur suplai AC sebesar 1^{o}C dengan rentang temperatur AC 19-25^{o}C. Maka daripada itu, sesuai dengan persamaan (2.13) untuk perhitungan daya konsumsi tiap *server*, sehingga daya konsumsi tiap *server* juga berubah sebagaimana dengan berubahnya

temperatur pada tiap *server* tersebut. Hasil konsumsi *server* di tiap *server* dan tiap rentang temperatur ditunjukkan dengan Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil daya konsumsi server tiap rentang temperatur AC

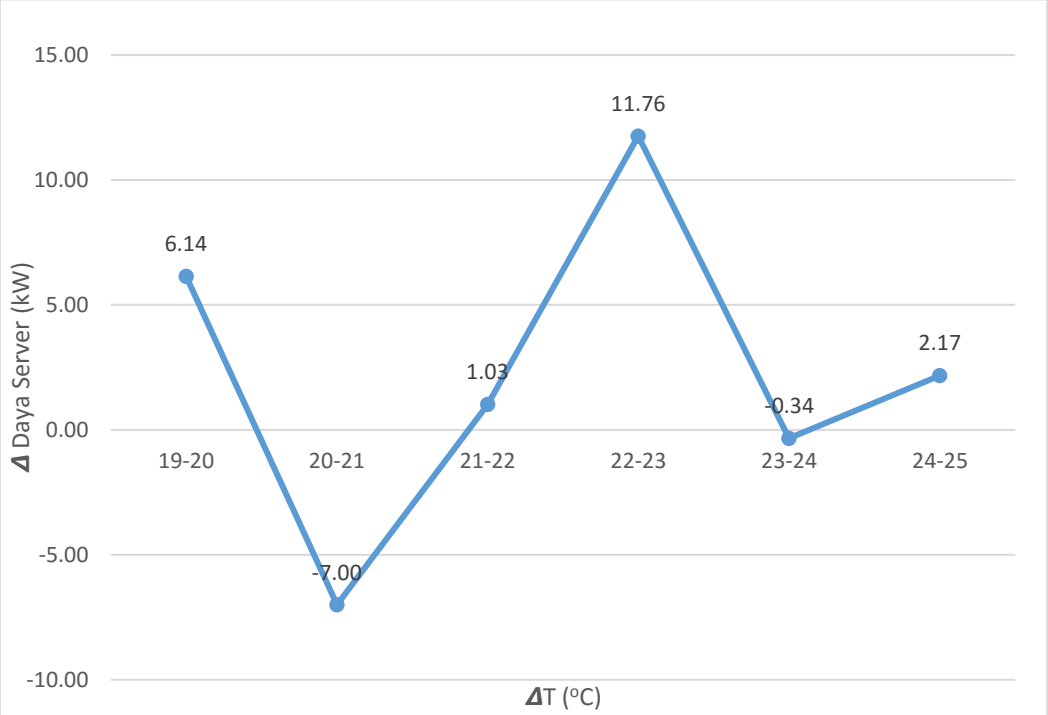
Temperatur AC	**Daya konsumsi server tiap *row* (kW)**						
	1	**2**	**6**	**8**	**10**	**11**	**12**
19	2,22	0,8	37,44	0,63	28,86	3,3	10,75
20	2,56	0,64	44,55	0,76	26,63	3,15	11,86
21	2,29	0,58	40,89	1	24,52	3,05	10,8
22	1,95	0,69	41,05	0,81	24,52	2,66	12,48
23	2,23	0,6	47,35	0,75	27,3	3,19	14,51
24	2,54	0,87	44,22	0,86	29,54	2,88	14,68
25	2,47	0,97	46,76	0,35	28,38	3,01	15,82

Berdasarkan Tabel 4.3, hasil konsumsi daya *server* jelas terlihat berbeda-beda dan berubah-ubah pada rentang temperatur suplai AC yang telah disebutkan. Daya *server* pada *data center* dapat berubah-ubah sesuai dengan permintaan konsumen dan berapa banyak beban kerja yang dihasilkan oleh *server* untuk mengolah data tersebut (Zhang, Wen, Wong, Toh, & Chen, 2016) sehingga dapat terlihat bahwa pada baris 6, konsumsi daya servernya lebih tinggi dari baris yang lain di tiap perubahan temperatur AC. Hal ini mengindikasikan bahwa pada baris 6 bekerja dengan mengonsumsi lebih banyak data. Jika dibandingkan dengan *server* yang ada di baris 10 dengan jumlah *server* yang lebih banyak daripada baris 6, nilai konsumsi daya *server* pada baris 6 masih lebih besar daripada *server* yang ada di baris 10 karena pada lorong panas dibelakang baris 10 rak 1 terdapat lubang udara pada lantai yang mengeluarkan udara dari AC sehingga *outlet* dari baris 10 rak 1 didinginkan kembali oleh udara AC. Hal ini menyebabkan berkurangnya konsumsi daya *server* karena kerja *server* yang berat dibantu dengan pendinginan pada *outlet server*-nya. Berdasarkan Tabel 4.3, grafik daya total *server* keseluruhan tiap variasi temperatur AC ditunjukkan pada Gambar 4.23.



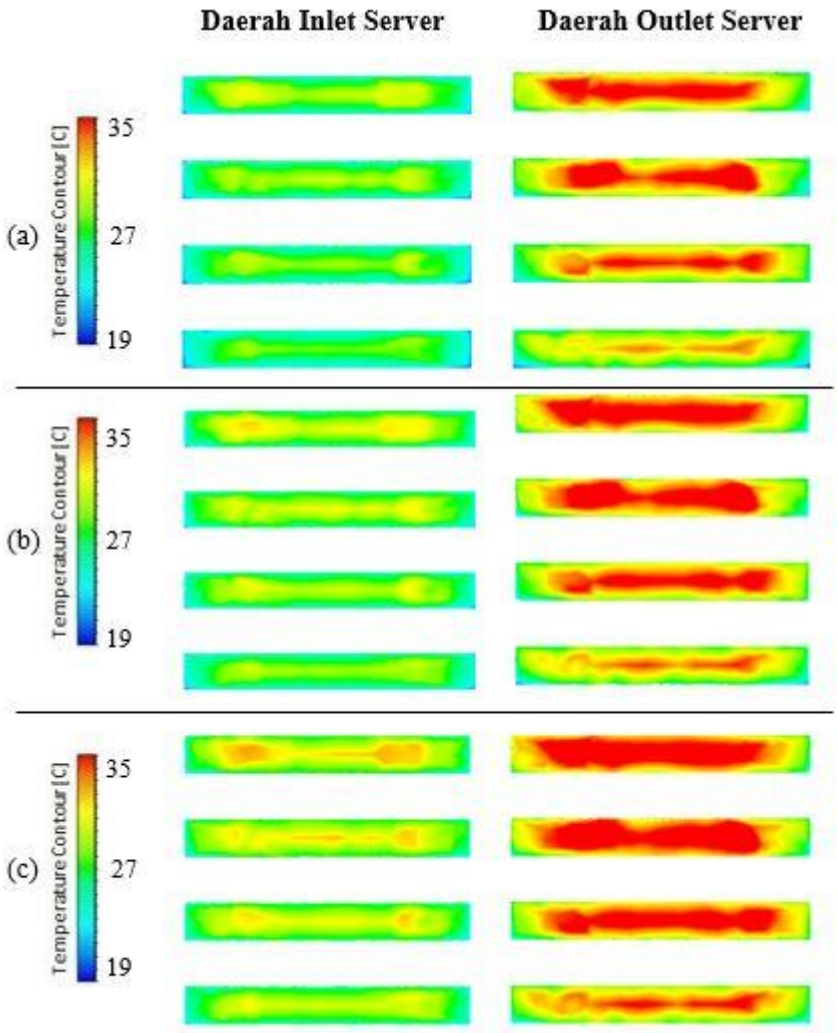
Gambar 4. 23 Grafik daya total server.

Berdasarkan Gambar 4.23, daya total *server* berubah secara fluktuatif terhadap perubahan temperatur suplai AC. Namun, jika dilihat dari tren grafiknya bahwa daya server meningkat seiring dengan kenaikan temperatur AC. Berikut adalah grafik perubahan daya server terhadap perubahan temperatur yang ditunjukkan pada Gambar 4.24 dibawah ini.



Gambar 4. 24 Grafik perubahan daya server terhadap perubahan temperatur AC.

Berdasarkan Gambar 4.23 dan 4.24, perubahan daya total *server* pada suhu AC 19-20^{o}C adalah sebesar 6,14 kW karena daya server pada temperatur 20^{o}C sebesar 90,14 kW meningkat drastis dari temperatur AC sebelumnya yaitu 84 kW. Namun, perubahandaya total server pada suhu AC 20^{o}C ke 21^{o}C memiliki nilai -7 kW karena daya server pada temperatur AC 21^{o}C mengalami penurunan yang drastis dari temperatur AC sebelumnya yaitu dari 90,14 kW menjadi 83,14 kW, hal ini disebabkan oleh adanya penurunan daya server sesuai dengan hasil perhitungan dari persamaan (2.13) yang berada di barisan 1, 2, 6, 10, 11 dan 12 yang ditunjukkan pada Tabel 4.3. Berikut adalah analisis server yang ada di barisan rak 6 yang mengalami penurunan daya server secara drastis tiap temperatur AC 19^{o}C, 20^{o}C dan 21^{o}C yang ditunjukkan pada Gambar 4.24 dibawah ini.



Gambar 4. 25 Kontur persebaran temperatur pada daerah inlet dan outlet server baris 6 pada temperatur AC (a) 19^{o}C, (b) 20^{o}C dan (c) 21^{o}C

Berdasarkan Gambar 4.25 tersebut, terjadi kenaikan temperatur inlet dan temperatur outlet server dari Gambar 4.25b ke Gambar 4.25c dengan rata-rata kenaikan temperatur sebesar 1,32^{o}C dan 0,77^{o}C secara berturut-turut. Nilai kenaikan rata-rata tersebut memiliki nilai kenaikan rata-rata yang lebih rendah dari pada nilai kenaikan rata-rata temperatur server dari Gambar 4.25a ke Gambar 4.25b terutama pada nilai kenaikan rata-rata pada temperatur outlet server yang menurun drastis dimana nilai kenaikan rata-rata server pada Gambar 4.25a ke Gambar 4.25b memiliki nilai 2,54^{o}C dan menurun pada nilai kenaikan rata-rata temperatur outlet server pada Gambar 4.25b ke Gambar 4.25c dengan nilai 0,77^{o}C. Maka daripada itu, akibat dari fenomena ini jika dihubungkan dengan persamaan 2.13 untuk

mencari daya server, nilai daya servernya menurun dari temperatur AC 20^{o}C ke 21^{o}C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.23.

Berdasarkan penelitian El-Sayed dkk, bahwa seiring dengan kenaikan suhu pada ruangan data center yang menyebabkan suhu pada server juga naik dapat terjadi penurunan performansi pada disk di dalam server tersebut khususnya dengan server yang menggunakan disk SAS dan SATA (El-Sayed, Stefanovici, Amvrosiadis, & Hwang, 2012). Maksud performansi disk ini adalah berapa banyak kapasitas disk ini dapat membaca data per detiknya. Sesuai dengan penelitian lain yang dilakukan Inoue dkk, menjelaskan bahwa seiring dengan meningkatknya pembacaan data dapat menaikkan konsumsi daya dari server (Inoue, Ikeda, Enokido, Aikebaier, & Takizawa, 2011). Namun, karena terjadinya penurunan performansi disk atau pembacaan data yang berkurang akibat naiknya temperatur pada server sehingga menyebabkan penurunan daya konsumsi server khususnya yang terjadi pada server di temperatur AC 21^{o}C ini. Hal inilah yang menyebabkan daya server pada temperatur AC 21^{o}C menurun drastis dari temperatur sebelumnya.

Selanjutnya, perubahan daya total *server* pada temperatur AC 21^{o}C ke 22^{o}C adalah sebesar 1,03 kW karena daya total server pada temperatur AC 21^{o}C meningkat lebih sedikit dari temperatur sebelumnya yaitu dari 83,14 kW menjadi 84,17 kW. Sementara itu pada temperatur 23^{o}C daya total *server* sebesar 95,93 kW meningkat drastis dari temperatur sebelumnya yaitu 22^{o}C. Namun, penurunan daya total server terjadi juga pada temperatur AC 24^{o}C yang diakibatkan seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya tetapi kali ini penurunan sangat kecil. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.24, bahwa perubahan daya server dari temperatur AC 23^{o}C ke 24^{o}C adalah sebesar -0,34 kW. Kemudian, untuk temperatur AC selanjutnya adalah pada temperatur AC 25^{o}C dimana daya total *server* terbesar diperoleh pada temperatur AC ini yaitu sebesar 97,76 kW. Hal ini mengindikasikan bahwa seiring dengan meningkatnya temperatur suplai AC menyebabkan peningkatan konsumsi daya *server*.

4.4 Perhitungan Nilai *Power Usage Effectiveness* (PUE)

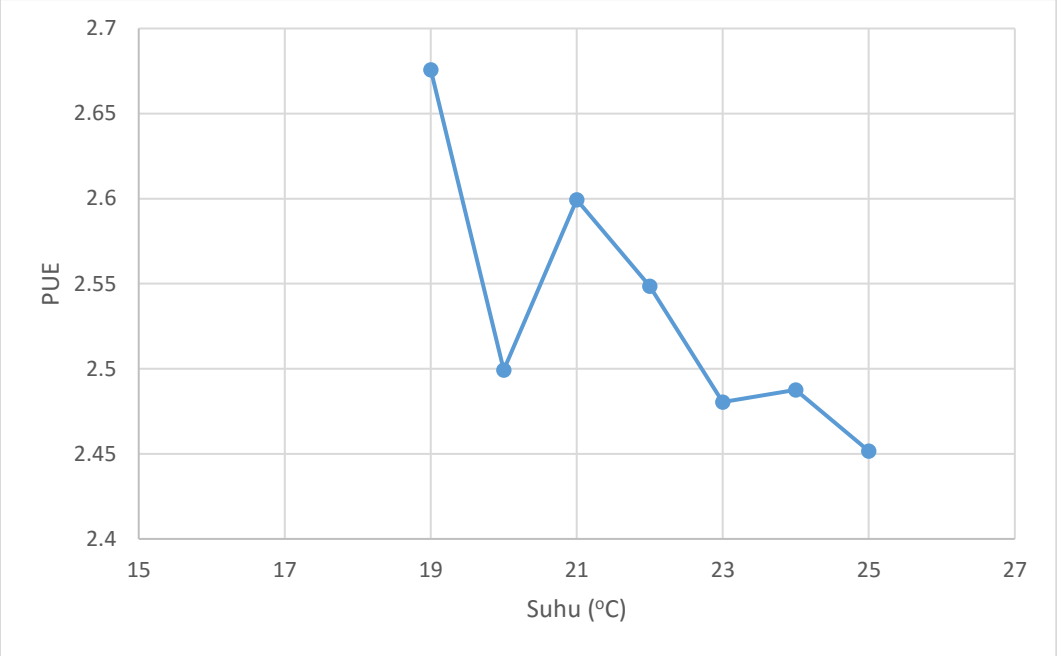
Pada subbab ini, nilai PUE pada *data center* di tiap-tiap temperatur suplai AC dievaluasi. Seperti penjelasan pada subbab 2.5, nilai-nilai yang dibutuhkan

untuk perhitungan nilai PUE adalah semua daya yang ada di *data center*. Semua daya pada *data center* meliputi daya non-IT dan daya IT. Daya non-IT diantaranya adalah daya pada UPS, lampu, dan daya AC. Sedangkan, daya IT adalah daya server yang ada di *data center* sehingga data daya total *data center* dari objek penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 4 Data daya total *data center* tiap temperatur suplai AC,

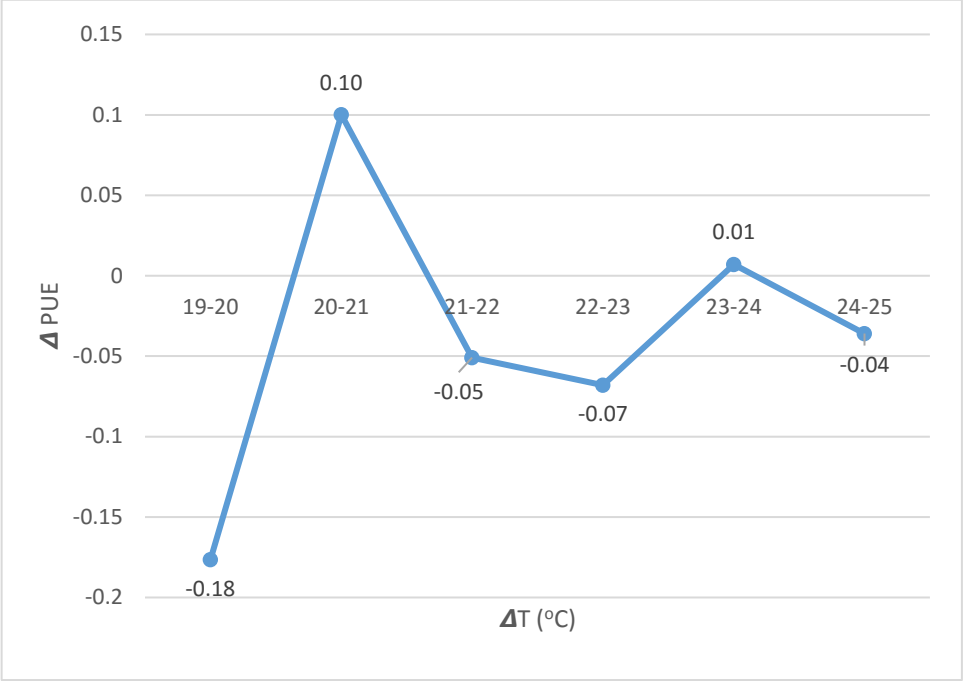
Temperatur (ºC)	**Daya UPS (kW)**	**Daya Lampu (kW)**	**Total Daya AC (kW)**	**Daya non-IT (kW)**	**Daya IT (kW)**	**Daya Total (kW)**
19	100	0,8	39,96	140,76	84	224,75
20			34,34	135,14	90,14	225,28
21			32,17	132,97	83,14	216,11
22			29,53	130,33	84,17	214,5
23			41,22	142,02	95,93	237,95
24			41,39	142,19	95,59	237,78
25			41,11	141,91	97,76	239,67

Berdasarkan pada Tabel 4.4, daya UPS dan daya lampu diambil dari data pengukuran pada *data center*. Daya AC diambil dari hasil perhitungan daya AC yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan daya IT diambil dari hasil perhitungan daya server yang ditunjukkan pada Gambar 4.23. Kemudian, berdasarkan persamaan (2.19), perhitungan nilai PUE terhadap variasi temperatur AC ditunjukkan pada Gambar 4.26 dibawah ini.



Gambar 4. 26 Hasil PUE tiap temperatur AC.

Berdasarkan Gambar 4.24, nilai PUE tiap temperatur suplai AC memiliki sifat yang fluktuatif pada rentang temperatur 19-25°C. Namun, walaupun memiliki sifat yang fluktuatif tetapi tren nilai PUE tetap terlihat menurun seiring dengan kenaikan temperatur AC. Perubahan hasil PUE terhadap perubahan temperatur AC juga ditunjukkan seperti Gambar 4.27 dibawah ini.



Gambar 4. 27 Grafik perubahan nilai PUE terhadap perubahan temperatur AC.

Berdasarkan Gambar 4.26 dan 4.27, pada temperatur AC 19ºC ke 20ºC, nilai perubahan PUE-nya adalah -0,18 karena nilai PUE yang menurun dari temperatur AC 19ºC ke 20ºC. Namun, pada nilai PUE dari temperatur AC 20ºC ke 21ºC dan 23ºC ke 24ºC mengalami kenaikan yang disebabkan oleh penurunan daya server yang telah dijelaskan pada subbab 4.3. Nilai PUE paling tinggi terdapat pada temperatur AC 19ºC, yaitu 2,68. Hal ini disebabkan oleh daya IT pada rentang temperatur ini paling rendah dan memiliki daya non-IT yang tinggi sehingga nilai PUE yang didapatkan sangatlah tinggi terlampau sangat jauh untuk mendekati angka 1. Pada temperatur 25ºC, PUE memiliki nilai paling rendah dan paling mendekati nilai 1 daripada yang lain, yaitu 2,45. Akan tetapi, daya IT dan non-IT yang dikonsumsi berturut-turut sangatlah tinggi, yaitu 97,76 kW dan 141,91 kW.

Dari hal ini dapat dideduksikan bahwa PUE harus dilihat dari banyak aspek, seperti pada apa yang telah dianalisis pada tugas akhir ini. Aspek yang dilihat adalah kapasitas refrigerasi, daya CRAC, dan daya *server*. Dari hasil perhitungan PUE, dapat dilihat bahwa dalam rentang temperatur 19-25ºC nilai PUE menurun mendekati nilai 1 seiring dengan kenaikan temperatur suplai sistem pendingin. Hasil PUE yang paling optimal adalah pada rentang temperatur 22ºC dengan nilainya yaitu 2,55 dengan konsumsi daya *server* yang cukup rendah dan memiliki

daya non-IT paling rendah dari yang lain berturut-turut yaitu 84,17 kW dan 130,33 kW. Hal ini dapat dikatakan optimal karena daya total CRAC pada temperatur AC 22^{o}C yaitu 29,53 kW sesuai hasil perhitungan daya kompresor yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dimana nilai ini merupakan nilai yang paling rendah daripada nilai daya CRAC yang lain.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

a. Nilai kapasitas refrigerasi terhadap perubahan temperatur suplai AC adalah memiliki sifat yang meningkat pada rentang temperatur AC 19-22^{o}C dan menurun pada rentang temperatur 22-25^{o}C. Nilai kapasitas refrigerasi tertinggi terdapat pada temperatur AC 22^{o}C yaitu 81,38 kW. Nilai kerja kompresor terhadap perubahan temperatur suplai AC memiliki sifat yang menurun pada rentang temperatur AC 19-22^{o}C dan meningkat pada rentang temperatur 22-25^{o}C. Dua hal ini terjadi karena adanya kenaikan nilai temperatur kondensor pada suhu AC 23-25^{o}C. Namun demikian, nilai kerja kompresor terendah terdapat pada temperatur suplai AC 22^{o}C yaitu 5,24 kW.

b. Pengaruh perubahan temperatur suplai AC terhadap daya server *data center* adalah memiliki nilai fluktuatif dengan rentang temperatur 19-25^{o}C berturut-turut adalah 84; 90,14; 83,14; 84,17; 95,93; 95,59; dan 97,76 kW. Perubahan daya server dipengaruhi oleh berapa besarnya alokasi kerja server tiap detiknya sehingga nilai daya server keseluruhan terendah dan tertinggi berturut-turut terdapat pada temperatur suplai AC 21^{o}C dan 25^{o}C.

c. Nilai PUE terhadap pengaruh perubahan temperatur suplai AC pada rentang temperatur AC 19-25^{o}C bersifat fluktuatif pada rentang temperatur 19-21^{o}C dan nilai PUE menurun pada rentang temperatur setelahnya. Nilai PUE yang tertinggi dan terendah berturut-turut terdapat pada temperatur suplai AC 19^{o}C dan 25^{o}C yaitu 2,68 dan 2,45. Namun, nilai PUE yang paling optimal pada tugas akhir ini adalah pada temperatur suplai AC 22^{o}C yaitu 2,55 dan dapat dikatakan optimal karena memiliki daya server yang cukup rendah yaitu 84,17 kW dan memiliki daya non-IT terendah yaitu 130,33 kW.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian berikutnya adalah:

a. Variasi variabel lainnya selain temperatur suplai AC harus dilakukan untuk penelitian berikutnya.
b. Perlu dilakukan optimisasi dengan algoritma pada keseluruhan aspek yang berpengaruh pada *data center*.
c. Direkomendasikan agar semua *data center* dilakukan simulasi CFD terlebih dahulu untuk mengevaluasi parameter penting yang dapat meningkatkan performansi *data center*.

DAFTAR PUSTAKA

9.9, ASHRAE Technical Committee (TC). (2011). *Thermal Guidelines for Data Processing Environments - Expanded Data Center Classes and Usage Guidance.* Atalanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Bai, Y., Gu, L., & Qi, X. (2018). Comparative Study of Energy Performance between Chip and Inlet Temperature-Aware Workload Allocation in Air-Cooled Data Center. *Journal of Energies, 11*(669), 1-23.

Barroso, L. A., Clidaras, J., & Holzle, U. (2013). The data center as a computer: An Introduction to the design of warehouse-scale machines. In *Synthesis lectures on computer architecture Lecture #8* (pp. 1-154). Madison: Morgan & Claypool Publishers.

Brady, G., Kapur, N., Summers, J., & Thompson, H. (2013). A case study and critical assessment in calculating power usage effectiveness for a data centre. *Energy Conversion and Management*(76), 155-161.

Dai, J., Ohadi, M. M., Das, D., & Pecht, M. G. (2014). Optimum Cooling of Data Centers. New York: Springer.

Ebrahimi, K., Jones, G. F., & Fleischer, A. S. (2014). A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31*, 622-638.

El-Sayed, N., Stefanovici, I., Amvrosiadis, G., & Hwang, A. A. (2012, June 11-15). Temperature Management in Data Centers: Why Some (Might) Like It Hot. *SIGMETRICS*. London, England, United Kingdom.

Gao, T., Kumar, E., Sahini, M., Ingalz, C., Heydari, A., Lu, W., & Sun, X. (2016). Innovative Server Rack Design with Bottom Located Cooling Unitq. *IEEE ITHERM Conference.* California.

Ghosh, R., & Joshi, Y. (2011). Dynamic Reduced Order Thermal Modeling of Data Center Air Temperatures. *ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference &*

Exposition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems. Portland.

Green Grid. (2012). *PUE: A COMPREHENSIVE EXAMINATION OF THE METRIC.* The Green Grid Association.

Hewlett Packard Enterprise Development LP. (n.d.). *Hewlett Packard Enterprise*. (Hewlett Packard Enterprise Development LP) Retrieved June 15, 2020, from https://buy.hpe.com/us/en/servers/rack-servers/proliant-dl100-servers/proliant-dl180-server/hpe-proliant-dl180-gen10-server/p/1010192775?q=1010192775:name-asc&pageSize=20

Inoue, T., Ikeda, M., Enokido, T., Aikebaier, A., & Takizawa, M. (2011). A Power Consumption Model for Storage-based Applications. *The 14th International Conference on Network-Based Information Systems*, (pp. 612-617). Tirana.

Jin, C., Bai, X., Yang, C., Mao, W., & Xu, X. (2020). A review of power consumption models of servers in data centers. *Applied Energy*, 1-18.

Koomey, J. G. (2008). Worldwide electricity used in data centers. *Environmentar Research Letters, 3*(034088), 1-8.

Koskiniemi, H. (2016). *Data Center Cooling.* Finland: Tampere University.

Marshall, L., & Bemis, P. (2011). *Using CFD for Data Center Design and Analysis.* Concord: Applied Math Modeling Inc.

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2004). Sistem Refrijerasi dan Pompa Kalor. In *Termodinamika Teknik* (pp. 144-148). Jakarta: John Wiley & Sons, Inc.

Ni, J., Jin, B., Zhang, B., & Wang , X. (2017). Simulation of Thermal Distribution and Airflow for Efficient Energy Consumption in a Small Data Centers. *Sustanability, 9*(664), 1-16.

Patterson, M. K. (2008). The effect of data center temperature on energy efficiency. *2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermochemical Phenomena in Electronic Systems.* Orlando.

Patterson, M. K. (2012). Energy efficient thermal management of data centers. In *Energy Efficient Metrics* (pp. 237-271). New York: Springer.

Roekmono. (n.d.). Termodinamika. In *BAB VII SISTEM POMPA PENDINGIN DAN POMPA PANAS* (pp. 1-19). Surabaya: Roekmono.

Samadiani, E., & Joshi, Y. (2010). Proper Orthogonal Decomposition for Reduced Order Thermal Modeling of Air Cooled Data Centers. *Journal of Heat Transfer, 132*, 1-14.

Schere, T. M. (2017). *Energy Efficient Thermal Management of Air-Cooled Data Centers.* Zurich: ETH Library.

Sun, Y., Wang, T., Yang, L., Hu, L., & Zeng, X. (2019). Research of an integrated cooling system consisted of compression refrigeration and pump-driven heat pipe for data centers. *Energy & Buildings*(187), 16-23.

Supermicro. (n.d.). *Super Micro Computer, Inc.* (Super Micro Computer, Inc.) Retrieved June 15, 2020, from https://www.supermicro.com/products/system/2U/index.cfm#dpXeon_Scalable

Weiss, J. (2019). A Tutorial on the Proper Orthogonal Decomposition. *2019 AIAA Aviation Forum* (pp. 1-21). Dallas, Texas, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Zhang, W., Wen, Y., Wong, Y. W., Toh, K. C., & Chen, C.-H. (2016). Towards Joint Optimization Over ICT and Cooling Systems in Data Centre: A Survey. *IEEE Communications Survey & Tutorials, 18*(3), 1596-1615.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

1. Data entalpi

Tsupply (°C)		**T (°C)**	**P (bar)**	**h_1 (kJ/kg)**	**h_{2s} (kJ/kg)**	**h_3 (kJ/kg)**
19	Evap	2	4,83	409,63	424,93	278,73
	Cond	51,2	20,68			
20	Evap	2	4,83	409,63	421,644	274,749
	Cond	48,9	20,68			
21	Evap	2	4,48	408,36	419,103	271,273
	Cond	47,12	20,68			
22	Evap	2	4,83	409,63	418,829	266,685
	Cond	44,22	20,68			
23	Evap	1,62	4,875	409,45	425,487	282,648
	Cond	53,42	21,58			
24	Evap	1,8	4,9	409,519	425,656	283,324
	Cond	53,8	21,77			
25	Evap	2,35	5	409,796	425,769	283,747
	Cond	54,037	21,9			

2. Kodingan *matlab* untuk validasi

```
U = [19.7 19.7 19.7 19.96 19.986 19.769; 19.853 20.075 20.073
20.081 20.244 20.105];
Nt = length(U);
% Create correlationmatrix
C_s = (U*U')/(Nt-1);
% Solve eigenvalue problem
[A_s, LAM_s] = eig(C_s,'vector');
% Sort eigenvalues and eigenvectors
[lambda_s,ilam_s] = sort(LAM_s,'descend');
A_s = A_s(:, ilam_s); % These are the temporal modes
% Calculate spatial coefficients
PHI_s = U'*A_s;
% Reconstruction on mode k
k = 1; % for example
Utilde_k_s = A_s(:,k)*PHI_s(:,k)';
% Normalization to match direct and snapshot modes (optional)
PHI = normc(PHI_s); % Spatial modes
A = U*PHI; % Time coefficients
```

```
Utilde_k = A(:,k)*PHI(:,k)'; % Reconstruction on mode k
figure(1);
contour(U, 'Fill', 'On');
hold on;
figure(2);
plot(U);
figure(3);
contour(Utilde_k, 'Fill', 'On');
x = legend('Rentang temperatur (Celcius)');
x.FontSize = 16;
x.FontWeight = 'bold';
y = xlabel('Posisi rack pada sumbu x');
y.FontSize = 16;
y.FontWeight = 'bold';
z = ylabel('Ketinggian rack pada sumbu y');
z.FontSize = 16';
z.FontWeight = 'bold';
hold on;
figure(4);
plot(Utilde_k);
```

BIODATA PENULIS

Penulis lahir di Kota Palembang, 29 Januari 1999. Penulis menempuh pendidikan di SD Patra Mandiri 2 Plaju (2004-2010), SMP Negeri 1 Palembang (2010-2011), SMP Negeri 1 Tangerang (2011-2013), SMA Negeri 2 Tangerang (2013-2016) dan pendidikan di S-1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengambil bidang minat Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan dan menjadi asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan. Penulis juga pernah menjadi *Physical Marketing Team Leader Outgoing Global Volunteer* di organisasi AIESEC periode 2018-2019 dan sekaligus menjadi *volunteer* di program *Global Volunteer* AIESEC di Turki pada Juni-Agustus 2018. Pada Juli-Agustus 2019, penulis melakukan kerja praktek di PT. Alkonusa Teknik Interkon di proyek HVAC VOZA *Office Tower*. Pada kerja praktet tersebut, penulis melakukan analisis pada *cooling load* dan *ducting loss* di ruangan pada kantor tersebut. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* **shaflysyawal_d@ymail.com**.