

OPTIMALISASI HUMAN COMFORT PADA FINISHED GOODS  
WAREHOUSE BERBASIS PREDICTED MEAN VOTE (PMV) DAN PREDICTED  
PERCENTAGE OF DISSATISFIED (PPD)

OPTIMIZATION HUMAN COMFORT ON FINISHED GOODS WAREHOUSE-  
BASED PREDICTED MEAN VOTE (PMV) AND THE PREDICTED PERCENTAGE  
OF DISSATISFIED (PPD)

Rizky Tiovana<sup>1)</sup>, Sugiono<sup>2)</sup>, Rio Prasetyo<sup>3)</sup>

Jurusan Teknik Industri, Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang, 65145, Indonesia

Email: [tiovanarizky@gmail.com](mailto:tiovanarizky@gmail.com)<sup>1)</sup>, [sugiono\\_ub@ub.ac.id](mailto:sugiono_ub@ub.ac.id)<sup>2)</sup>, [rio\\_pl@ub.ac.id](mailto:rio_pl@ub.ac.id)<sup>3)</sup>

**Abstrak**

Perusahaan Penyedap makanan dari hasil observasi diketahui bahwa suhu ruangan berkisar antara 32-33°C pada pagi hari. Dalam lingkungan kerja panas, tenaga kerja mendapatkan beban tambahan berupa tekanan panas. Penelitian ini menghitung nilai PMV dan PPD dan pada kondisi existing nilai PMV berada pada rentang +2,4 hingga +2,61 dengan nilai rata-rata sebesar +2,55, sedangkan nilai PPD berada pada rentang 91,2% hingga 95,4%. Rekomendasi perbaikan yang dilakukan ada 2 cara yaitu dengan administrative control dan engineering control. Secara administrative control sebaiknya pekerja dapat dilakukan pembagian job desc. Secara engineering control dengan 2 skenario yaitu dengan skenario pertama berupa penambahan 14 ventilasi dan skenario kedua dengan menambahkan exhaust fan sebanyak 33 buah. Rekomendasi perbaikan pertama memiliki nilai rata-rata PMV dan PPD dari 2,55 menjadi 1,63 dan nilai PPD dari 94,41 menjadi 58,58%.

**Kata Kunci:** *heat stress, predicted mean vote, predicted percentage of dissatisfied, computational fluid dynamic*

**1. Pendahuluan**

Lingkungan kerja fisik adalah salah satu faktor yang dapat memberikan pengaruh besar terhadap kinerja seseorang. Walaupun sistem tubuh manusia memiliki mekanisme psikologikal yang adaptif dimana mekanisme tersebut dapat memungkinkan tubuh kita untuk memberikan toleransi terhadap kondisi lingkungan kerja fisik pada rentang tertentu, tetapi hal tersebut sering memberikan dampak yang dapat merugikan tubuh [1]. Kerugian yang berdampak pada tubuh tentunya juga akan mempengaruhi kinerja dan dapat mengganggu performansi kerja seseorang. Untuk menghindari hal tersebut maka perlu dilakukan penyesuaian lingkungan kerja fisik dengan jenis pekerjaan yang dilakukan, sehingga dapat diperoleh performansi yang stabil atau bahkan meningkat.

Termal merupakan salah satu faktor lingkungan kerja fisik yang dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap performansi seseorang. Kenyamanan termal (*thermal comfort*) dapat didefinisikan sebagai kondisi yang menunjukkan kepuasan atau kenyamanan seseorang terhadap lingkungan kerja termalnya [2]. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi

kondisi termal dalam lingkungan kerja antara lain kelembaban, kecepatan udara, dan temperatur. Kondisi temperatur lingkungan kerja yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menyebabkan seseorang menjadi tidak nyaman. Beberapa penyakit akibat panas (*heat stress*) seperti *heat stroke*, *heat exhaustion*, *heat syncope*, *heat cramps*, *heat rash*, dan *transient heat fatigue* dapat terjadi akibat paparan suhu tinggi yang berlebihan [3].

Berdasarkan standar yang ditetapkan oleh SNI 03-6572-2001, temperatur yang nyaman berkisar antara 20,5°C hingga 27,1°C [4]. Apabila temperatur ruangan tidak sesuai dengan standar yang telah ditetapkan pekerja dapat cepat mengalami *heat stress*. *Heat stress* dapat menyebabkan pekerja lebih cepat mengalami kelelahan. Kelelahan pekerja dapat berdampak buruk bagi produktivitas pekerja. Ada banyak efek dari kelelahan (*fatigue*) telah menjadi faktor utama dari penyebab kecelakaan, terutama kecelakaan yang terjadi pada industri [5]. Tingkat dari kelelahan seseorang bisa mempengaruhi performansi manusia dari tingkat sepele hingga sangat berbahaya.

Perusahaan penyedap makanan memiliki beberapa kegiatan yang dilakukan. Kegiatan

yang dilakukan perusahaan produksi penyedap makanan antara lain proses pengadaan, produksi, *packaging*, dan pengiriman. Proses pengadaan, produksi dan *packaging* terjadi di satu gedung yang sama, sedangkan proses penyimpanan barang jadi terjadi di *finished goods warehouse*. Di dalam proses *warehouse* terdapat beberapa proses didalamnya antara lain proses penerimaan, penyimpanan dan pengiriman barang. Proses pengiriman produk perusahaan produksi penyedap makanan dibagi menjadi dua yakni proses pengiriman dalam negeri dan luar negeri (ekspor). Dalam proses pengiriman luar negeri terdapat 17 pekerja yang mempunyai jadwal kerja selama 8 jam mulai dari pukul 07.00 hingga 15.00. Dalam kegiatan ekspor ada beberapa proses yang harus dijalankan antara lain proses *unloading* yang berupa penjaminan antara nomor kontainer dan barang yang akan dikirim, proses *loading* yang berupa pengiriman produk ekspor. Pekerja *warehouse* terdiri dari 22 orang yang berjenis kelamin laki-laki yang bekerja pada bagian pengiriman yaitu 2 orang sebagai *leader*, 3 orang sebagai administrasi, dan 17 orang pekerja khusus bagian pengiriman.

*Warehouse* terbagi menjadi 4 bagian yaitu *warehouse* 1 dan 2 untuk menyimpan *material* dan *warehouse* 3 dan 4 untuk menyimpan barang jadi (produk). Untuk memperoleh kualitas produk yang baik ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu sterilisasi ruangan untuk mencegah material asing terutama serangga yang masuk dari lingkungan luar, selain itu dalam proses pembuatan produk suhu ruangan harus berkisar antara 16 °C-23 °C. Dari hasil observasi ditemukan bahwa suhu ruangan berkisar antara 32-33°C pada pagi hari, dan pada siang hari bisa mencapai 35°C.

Usaha yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kenyamanan termal adalah dengan melakukan *engineering* dan *administrative control* pada bagian *warehouse*. Penggunaan simulasi CFD dapat membantu untuk mengidentifikasi aliran fluida yang ada di dalam *finished goods warehouse* sehingga didapatkan area yang memerlukan perbaikan, setelah melakukan simulasi perbaikan, akan dilakukan estimasi perhitungan kembali kenyamanan termal yang dirasakan karyawan. Saat kenyamanan termal pekerja pada bagian *finished goods warehouse* meningkat, akan terjadi penurunan risiko terjadinya *heat stress*

yang akan berdampak pada peningkatan produktivitas pekerja pada bagian *finished goods warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan.

## 2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian deskriptif. Penelitian deskriptif adalah salah satu jenis penelitian yang bertujuan menyajikan gambaran data dengan analisis metode tertentu sehingga dapat mengeksplorasi, mengklarifikasi dan menginterpretasikan suatu fenomena maupun kenyataan sosial berdasarkan kenyataan yang sedang berlangsung. Adapun tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut.

### 2.1 Tahap Pendahuluan

Adapun tahap pendahuluan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Studi Lapangan  
Metode ini digunakan dalam pengumpulan data yang dilakukan secara langsung, dimana peneliti melakukan pengamatan secara langsung ke tempat penelitian.
2. Studi Literatur  
Studi literatur merupakan metode yang digunakan dalam mendapatkan data dengan cara mempelajari literatur serta membaca sumber-sumber data informasi lainnya yang berhubungan dengan pembahasan. Sumber literatur diperoleh dari buku cetak, jurnal ilmiah, maupun sumber tulisan lainnya.
3. Identifikasi Masalah  
Identifikasi masalah merupakan tahap awal dalam mengetahui dan memahami persoalan agar dapat diberikan solusi pada permasalahan kenyamanan termal.
4. Perumusan Masalah  
Setelah mengidentifikasi permasalahan, peneliti merumuskan permasalahan yang ada sesuai dengan kenyataan di lapangan, yaitu bagaimana *heat stress* dan kenyamanan termal pekerja.
5. Penetapan Tujuan  
Tujuan penelitian ini ditetapkan agar penulisan skripsi dapat dilakukan secara sistematis dan tidak menyimpang dari permasalahan yang dibahas. Selain itu, tujuan penelitian diperlukan untuk mengukur keberhasilan suatu penelitian. Tujuan penelitian ditentukan berdasarkan

perumusan masalah yang telah  
dijabarkan sebelumnya.

## 2.2 Tahap Pengumpulan Data

Pada penelitian ini digunakan dua jenis data yaitu data primer dan data sekunder.

### 1. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung dari objek penelitian dan diamati di tempat pelaksanaan penelitian. Data diperoleh dengan cara observasi dan wawancara. Berikut merupakan data yang termasuk dalam data primer.

- Observasi digunakan untuk mengetahui aktivitas yang dilakukan pekerja sebagai acuan dalam menentukan nilai metabolisme tubuh (met) dan seragam yang digunakan pekerja sebagai acuan dalam menentukan nilai hambatan pakaian (clo).
- Observasi digunakan untuk mengetahui parameter lingkungan yaitu suhu udara ( $^{\circ}\text{C}$ ), kecepatan udara (m/s), dan kelembaban relatif (%rh) di tempat pekerja beraktivitas yang diukur menggunakan *air velometer*.

### 2. Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang telah tersedia atau telah disajikan dari pihak perusahaan yang menjadi tempat pelaksanaan penelitian ini. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini antara lain profil perusahaan, struktur organisasi, dan *layout* perusahaan.

## 2.3 Tahap Pengolahan Data

Data yang telah dikumpulkan selanjutnya akan diolah dan dianalisis. Adapun langkah-langkah yang digunakan untuk melakukan pengolahan data adalah sebagai berikut.

### 1. Perhitungan Nilai *Predicted Mean Vote (PMV) Index*

Perhitungan nilai *PMV index* dilakukan berdasarkan data dari hasil simulasi CFD yang telah dibuat untuk mengetahui tingkat kenyamanan termal yang dirasakan pekerja.

### 2. Perhitungan Nilai *Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)*

Perhitungan nilai PPD dilakukan berdasarkan hasil perhitungan *PMV index* yang telah dilakukan sebelumnya. Dari perhitungan nilai PPD, akan

diketahui prosentase karyawan yang tidak puas dengan kondisi termal lingkungan tempat mereka bekerja.

### 3. Pembuatan Rekomendasi Perbaikan Menggunakan *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

Rekomendasi perbaikan dilakukan dengan melakukan eksperimen terhadap *engineering control* dan mempengaruhi kondisi termal lingkungan kerja pekerja *finished goods warehouse*.

### 4. Perhitungan Nilai *Predicted Mean Vote (PMV) Index*

Perhitungan nilai *PMV index* dilakukan berdasarkan data dari hasil simulasi CFD yang telah dibuat untuk mengetahui tingkat kenyamanan termal yang dirasakan pekerja yang ada di *finished goods warehouse*.

### 5. Perhitungan Nilai *Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)*

Perhitungan nilai PPD dilakukan berdasarkan hasil perhitungan *PMV index* yang telah dilakukan sebelumnya. Dari perhitungan nilai PPD, akan diketahui prosentase karyawan yang tidak puas dengan kondisi termal lingkungan tempat mereka bekerja.

## 2.4 Tahap Analisis dan Pembahasan

Tahap analisis dan pembahasan dilakukan setelah tahap pengolahan data selesai dilakukan. Analisis dan pembahasan dilakukan dengan melihat hasil perhitungan *PMV* dan *PPD*.

## 2.5 Tahap Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran merupakan proses akhir dari penelitian ini. Kesimpulan merupakan ringkasan yang diperoleh dari hasil pengumpulan, pengolahan, dan analisis yang menjawab tujuan penelitian yang ditetapkan. Saran berisi masukan yang diajukan kepada berbagai pihak dalam menindaklanjuti penelitian ini.

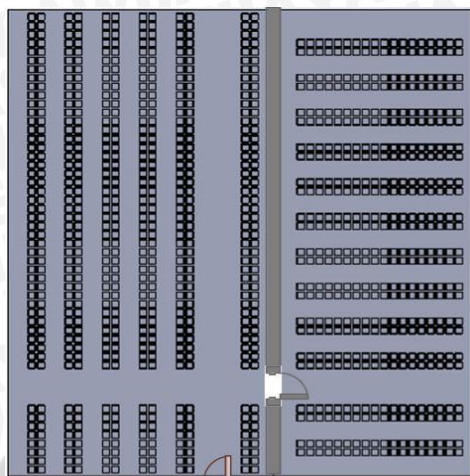
### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada sub bab ini akan dijabarkan hasil dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan.

#### 3.1 *Finished Goods Warehouse Layout*

*Finished goods warehouse layout* memiliki luas 2450 m<sup>2</sup> dengan tinggi 7 m.

*Finished goods warehouse* terdiri dari 2 warehouse, yaitu warehouse 3 dan warehouse 4. Warehouse 4 memiliki luas 1400 m<sup>2</sup>, sedangkan warehouse 3 memiliki luas 1050 m<sup>2</sup>. *Layout finished goods warehouse* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Layout finished goods warehouse*

### 3.2 Data Predicted Mean Vote

Data yang digunakan untuk perhitungan *Predicted Mean Vote (PMV) Index* terbagi menjadi data lingkungan, data hambatan pakaian (*clothing insulation*), dan data aktivitas pekerja. Data lingkungan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data *air temperature*, *air velocity*, dan *relative humidity*.

#### 3.2.1 Data Lingkungan

Pengukuran data lingkungan yang meliputi *air temperature*, *air velocity*, dan *relative humidity* dilakukan pada ketinggian 1,1 meter di atas permukaan tanah. Titik pengambilan data lingkungan merupakan lokasi para pekerja sering dikunjungi pekerja untuk aktivitasnya. Dalam penelitian ini, lokasi pengukuran berjumlah 44 titik. Pengumpulan data dilakukan pada pukul 09.00 hingga pukul 11.00 sesuai dengan ketentuan ASHRAE [2]. Tabel 1 menunjukkan rata-rata hasil data lingkungan yang telah dikumpulkan.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Pengukuran Data Lingkungan

| Titik | Air Temperature (°C) | Air Velocity (m/s) | Relative Humidity (%) |
|-------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 1     | 32,78                | 0,015              | 39,7                  |
| 2     | 32,79                | 0,029              | 40,59                 |
| 3     | 32,57                | 0,020              | 40,09                 |

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Pengukuran Data Lingkungan (Lanjutan)

| Titik | Air Temperature (°C) | Air Velocity (m/s) | Relative Humidity (%) |
|-------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 4     | 32,65                | 0,038              | 40,11                 |
| 5     | 32,66                | 0,012              | 40,29                 |
| 6     | 32,76                | 0,073              | 40,09                 |
| 7     | 32,74                | 0,013              | 40,20                 |
| 8     | 32,77                | 0,021              | 40,19                 |
| 9     | 32,77                | 0,011              | 39,92                 |
| 10    | 32,80                | 0,018              | 40,79                 |
| 11    | 32,73                | 0,019              | 40,11                 |
| 12    | 32,80                | 0,019              | 39,72                 |
| 13    | 32,79                | 0,014              | 39,65                 |
| 14    | 32,79                | 0,015              | 38,92                 |
| 15    | 32,79                | 0,017              | 40,38                 |
| 16    | 32,79                | 0,025              | 39,87                 |
| 17    | 32,80                | 0,018              | 41,39                 |
| 18    | 32,79                | 0,017              | 41,49                 |
| 19    | 32,79                | 0,018              | 41,59                 |
| 20    | 32,97                | 0,018              | 40,38                 |
| 21    | 32,97                | 0,020              | 41,19                 |
| 22    | 32,79                | 0,016              | 40,09                 |
| 23    | 32,93                | 0,015              | 40,09                 |
| 24    | 32,80                | 0,013              | 41,99                 |
| 25    | 32,97                | 0,015              | 40,05                 |
| 26    | 32,97                | 0,015              | 40,19                 |
| 27    | 32,97                | 0,029              | 40,09                 |
| 28    | 32,79                | 0,080              | 41,99                 |
| 29    | 32,29                | 0,219              | 43,09                 |
| 30    | 32,79                | 0,015              | 39,70                 |
| 31    | 32,79                | 0,012              | 40,29                 |
| 32    | 32,69                | 0,073              | 40,09                 |
| 33    | 32,69                | 0,013              | 40,19                 |
| 34    | 32,93                | 0,021              | 41,19                 |
| 35    | 32,79                | 0,025              | 38,92                 |
| 36    | 32,69                | 0,023              | 41,79                 |
| 37    | 32,69                | 0,027              | 40,09                 |
| 38    | 32,69                | 0,019              | 40,09                 |
| 39    | 32,67                | 0,017              | 41,99                 |
| 40    | 32,67                | 0,015              | 41,59                 |
| 41    | 32,78                | 0,015              | 39,7                  |
| 42    | 32,79                | 0,029              | 40,59                 |
| 43    | 32,57                | 0,020              | 40,09                 |
| 44    | 32,65                | 0,038              | 40,11                 |

#### 3.2.2 Data Hambatan Pakaian

Data *clothing insulation* atau hambatan pakaian pekerja didapatkan dari setiap *item* pakaian yang digunakan oleh pekerja di *finished goods warehouse*. Pakaian yang digunakan pekerja pada bagian *finished goods warehouse* merupakan seragam yang terdiri dari pakaian berkerah lengan pendek, celana bahan tipis, pakaian dalam, kaos kaki sepanjang pergelangan kaki, dan sepatu. Pakaian yang digunakan oleh pekerja sesuai dengan ketentuan

yang telah ditetapkan oleh perusahaan. Gambar 2 menunjukkan pakaian yang digunakan oleh pekerja saat bekerja.



Gambar 2. Pakaian seragam pekerja

### 3.2.3 Data Laju Metabolisme

*Metabolic rate* atau laju metabolisme pekerja *finished goods warehouse* memiliki nilai yang berbeda-beda. Berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh ASHRAE [2], penilaian laju metabolisme aktivitas pekerja dinilai berdasarkan hasil pengamatan aktivitas yang dilakukan pekerja selama 30 menit hingga 1 jam.

Tabel 2. Penilaian *Metabolic Rate*

| Aktivitas                                | Laju Metabolisme (met) |
|------------------------------------------|------------------------|
| Berdiri, berbicara                       | 1,2                    |
| Mengendarai Forklift                     | 1,5                    |
| Mengangkat produk                        | 1,2                    |
| Berjalan                                 | 2,0                    |
| Membaca dan memindahkan file kode produk | 1,4                    |

### 3.3 Pengolahan Data

Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang proses pengolahan data yang sudah didapatkan, mulai dari perhitungan PMV hingga pembuatan rekomendasi perbaikan.

#### 3.3.1 Penilaian *Heat Stress* Pekerja

Penilaian *heat stress* pekerja dilakukan menggunakan *Predicted Mean Vote (PMV) index*. Langkah pertama yang dilakukan untuk penilaian *PMV index* adalah menilai *clothing insulation* dan *metabolic rate* pekerja. Setelah melakukan penilaian pada *clothing insulation* dan *metabolic rate* pekerja, langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai *clothing insulation*, *metabolic rate*, dan data lingkungan yang didapatkan dari hasil observasi.

Penilaian *clothing insulation* atau hambatan pakaian pekerja didasarkan pada setiap *item* pakaian yang digunakan oleh pekerja. Nilai hambatan pakaian dinyatakan dalam satuan clo. Tabel 3 menunjukkan hasil

perhitungan nilai *clothing insulation* seragam yang digunakan oleh pekerja.

Tabel 3. *Heat Sources* pada *Finished goods warehouse*

| No    | Item Pakaian    | Nilai (clo) |
|-------|-----------------|-------------|
| 1     | Underwear       | 0,04        |
| 2     | Baju kerja      | 0,49        |
| 3     | Celana panjang  | 0,24        |
| 4     | Kaos kaki ankle | 0,02        |
| 5     | Sepatu          | 0,02        |
| TOTAL |                 | 0,81        |

Dari Tabel 3 didapatkan nilai *metabolic rate* atau laju metabolisme pekerja didasarkan pada aktivitas yang dilakukan oleh pekerja. Nilai laju metabolisme dinyatakan dalam satuan met. Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan nilai *metabolic rate* pekerja sesuai dengan aktivitas yang dilakukan.

Tabel 4. Rekapitulasi Penilaian *Metabolic Rate* Pekerja

| No | Kategori Aktivitas                       | Nilai Laju Metabolisme (met) |
|----|------------------------------------------|------------------------------|
| 1  | Berdiri, berbicara                       | 1,2                          |
| 2  | Mengendarai Forklift                     | 1,5                          |
| 3  | Mengangkat produk                        | 1,2                          |
| 4  | Berjalan                                 | 2,0                          |
| 5  | Membaca dan memindahkan file kode produk | 1,4                          |

Dari tabel 4 dapat diketahui bahwa aktivitas yang dilakukan oleh pekerja *finished goods warehouse* berkisar antara 1,2-2 met. Oleh karena itu, penelitian ini menghitung dengan laju metabolisme terendah yaitu sebesar 1,2 met untuk mendapatkan nilai PMV terendah pada *finished goods warehouse*. Hal ini dikarenakan penelitian ini ingin mengetahui nilai PMV dan PDD yang paling buruk. Selain digunakan sebagai representasi potensi tingkat *heat stress* pekerja, nilai PMV juga dijadikan *input* pada perhitungan nilai PPD.. Rekapitulasi *input* dan hasil perhitungan PMV, PPD, dan tingkat *heat stress* pada masing-masing lokasi pekerja ditunjukkan pada lampiran 1

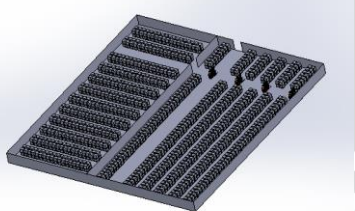
Berdasarkan lampiran 1 diketahui hasil dari perhitungan dapat diketahui bahwa nilai PMV tertinggi dirasakan oleh pekerja *finished goods warehouse* sebesar 2,61 sedangkan yang terendah sebesar 2,4 yaitu pada titik ke-33 yang terletak didekat pintu masuk. Nilai PMV rata-rata sebesar 2,55 dan nilai rata-rata dari PPD sebesar 94,41. Dapat diketahui bahwa semua titik pengambilan data berada pada *heat stress level* yang *strong*. Sedangkan nilai terendah yang didapatkan yang memiliki nilai PMV 2,4

dan nilai PPD 91,2%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa jika seseorang berada pada titik tersebut, maka kemungkinan 91,2% orang tersebut akan merasa tidak nyaman. Jika dilihat secara keseluruhan, pekerja *finished goods warehouse* seluruhnya memiliki potensi mengalami *strong heat stress* kecuali pada titik ke-33 dengan potensi *moderate heat stress*. Untuk menurunkan nilai PMV dan PPD maka akan dilakukan pembuatan simulasi *Computational Fluid Dynamic (CFD)* untuk beberapa rekomendasi perbaikan.

### 3.3.2 Pembuatan Rekomendasi dengan Simulasi *Computational Fluid Dynamic*

Terdapat beberapa proses yang harus dilakukan dalam pembuatan simulasi *computational fluid dynamic (CFD)*. Proses pertama dalam pembuatan simulasi CFD adalah pembuatan *three dimension computer aided design (3D CAD) model* dari *Finished goods warehouse* dan fasilitas yang ada di dalamnya. Sedangkan proses selanjutnya adalah proses *running* simulasi CFD.

1. Pembuatan 3D CAD  
Pembuatan 3D CAD mesin dan peralatan pada *finished goods warehouse* dilakukan menggunakan bantuan software SolidWork 2016. Setelah membuat 3D CAD model setiap mesin dan peralatan pada *Finished goods warehouse*, langkah selanjutnya adalah melakukan proses *assembly*. Proses *assembly* atau penyusunan dilakukan untuk menyesuaikan layout 3D CAD model sesuai dengan layout asli *Finished goods warehouse*. Hasil dari proses *assembly* *Finished goods warehouse* dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Hasil proses *assembly* 3D CAD model *Finished goods warehouse*

2. *Running* Simulasi CFD  
3D CAD model *Finished goods warehouse* yang telah dibuat digunakan untuk simulasi CFD. Secara umum

proses perhitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama yaitu *preprocessor*, *processor*, dan *post processor*. Tahap *preprocessor* dimulai dengan pengaturan awal pada *general setting* sebagai berikut:

- a. *Analysis type* atau tipe analisis yang digunakan adalah jenis analisis internal. Pertimbangan gravitasi bumi diperhitungkan dan berbasis pada sumbu Y dari 3D CAD model.
- b. *Fluids* atau jenis fluida yang dianalisis adalah udara (*air*) dengan tipe aliran *luminar* dan *turbulent*. Pada penelitian ini faktor kelembaban (*humidity*) juga ikut diperhitungkan..
- c. *Wall conditions* atau kondisi dari tembok dipilih jenis *adiabatic wall* atau tembok yang tidak dapat mentransfer panas dan udara dari kedua sisi.
- d. *Initial conditions* atau inisialisasi kondisi dari lingkungan simulasi diatur dengan keadaan *thermodynamic parameters* pada tekanan 1 atm dan suhu 30 °C. *Humidity* diatur pada kondisi 80%.

Proses selanjutnya adalah melakukan pendefinisian *boundary conditions* dari *Finished goods warehouse*. Hal yang akan didefinisikan pada *boundary conditions* antara lain adalah jalur masuk udara dan jalur keluar udara yang ada di *Finished goods warehouse*. Tabel 6 menunjukkan *boundary conditions* pada lokasi masuk dan keluarnya udara pada *Finished goods warehouse*.

**Tabel 6.** *Boundary Conditions* pada *Finished goods warehouse*

| No | Boundary Conditions | Lokasi  | Air Velocity (m/s) | Air Flow (cm <sup>3</sup> /s) | Air Temperature (°C) | Relative Humidity (%) |
|----|---------------------|---------|--------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1  | Inlet velocity 1    | Pintu 1 | 0,231              | -                             | 29                   | 50                    |

Setelah melakukan pendefinisian *boundary conditions*, proses yang dilakukan selanjutnya adalah melakukan pendefinisian sumber panas yang ada di dalam *Finished goods warehouse*. Laju transfer panas (*heat transfer rate*) dari masing-masing sumber panas tersebut dinyatakan dalam satuan watt. Tabel 7 menunjukkan sumber-sumber panas yang ada pada *Finished goods warehouse*.

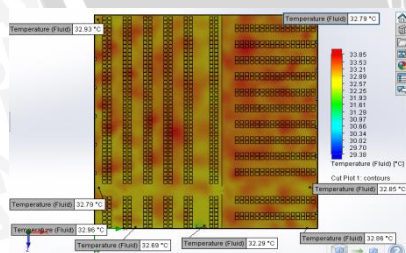
**Tabel 7.** *Heat Sources* pada *Finished goods warehouse*

| No | Heat Sources   | Lokasi | Heat Transfer Rate (Watt) |
|----|----------------|--------|---------------------------|
| 1  | Heat sources 1 | Lampu  | 55                        |
| 2  | Heat sources 2 | Atap   | 30306.8                   |

Setelah *general setting*, *boundary conditions*, dan *heat sources* didefinisikan, langkah selanjutnya adalah melakukan *meshing* atau membagi *Finished goods warehouse* menjadi *grid* dalam jumlah tertentu. Pada penelitian ini *level of initial mesh* yang digunakan adalah *level 3*. *Level 3* pada *level of initial mesh* membagi *Finished goods warehouse* menjadi 52 bagian pada sumbu X, 4 bagian pada sumbu Y, dan 16 bagian pada sumbu Z.

Tahap selanjutnya setelah melakukan *preprocessor* adalah melakukan tahap *processor*. Pada tahap ini akan dilakukan *running* simulasi CFD berdasarkan model yang telah dibuat. *Running* model *Finished goods warehouse* ini dilakukan berdasarkan *input* yang sebelumnya telah didefinisikan pada tahap *preprocessor*.

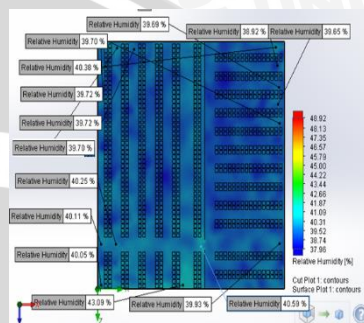
Tahap terakhir pada proses simulasi CFD adalah tahap *post processor*. Tahap *post processor* pada penelitian ini dilakukan dengan menginterpretasikan hasil simulasi ke dalam bentuk gambar. Interpretasi dari simulasi CFD pada penelitian ini digambarkan dengan sebuah *cut plot* atau potongan bidang datar. *Cut plot* yang digunakan merupakan *cut plot* dengan ketinggian 1,1 meter dari sumbu Y. Gambar 4, 5, dan 6 menunjukkan hasil dari tahap *post processor* kondisi *existing Finished goods warehouse*.



**Gambar 4.** Sebaran *temperature* ketinggian 1,1 m

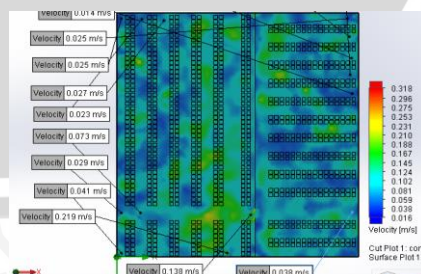
Gambar 4 menunjukkan sebaran *temperature* pada ketinggian 1,1 meter dalam *finished goods warehouse*. Sebaran *temperature* yang ditampilkan berada pada rentang warna biru tua untuk *temperature* 29,38°C hingga warna merah untuk *temperature* 33,85 °C. Sebaran *temperature* yang ada pada Gambar 4 bervariasi dari warna

kuning hingga warna merah. Hal tersebut menunjukkan bahwa *temperature* yang ada pada ketinggian 1,1 m berada pada rentang 30°C hingga 34 °C. Gambar 4.11 menunjukkan bahwa sebaran *temperature* hampir rata. Dari Gambar 4.20 dapat diketahui bahwa lokasi dengan *temperature* terendah adalah lokasi di dekat pintu masuk yaitu dengan *temperature* 32,29 °C. Sedangkan *temperature* tertinggi adalah sebesar 33,85 °C.



**Gambar 5.** Sebaran *relative humidity* ketinggian 1,1 m

Gambar 5 menunjukkan sebaran *relative humidity* pada ketinggian 1,1 meter dalam *finished goods warehouse*. Sebaran *relative humidity* yang ditampilkan berada pada rentang warna biru tua untuk *relative humidity* 37,96% hingga warna merah untuk *relative humidity* 48,92%. Sebaran *relative humidity* yang ada pada Gambar 5 bervariasi dari warna biru tua hingga warna biru muda. Hal tersebut menunjukkan bahwa *relative humidity* yang ada berada pada rentang 37,96% hingga 48,92%. Gambar 5 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan sebaran *relative humidity* pada lokasi pintu masuk, hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan udara yang masuk dari area luar gedung *finished goods warehouse*.



**Gambar 6.** Sebaran *air velocity* ketinggian 1,1 m

Gambar 6 menunjukkan sebaran *air velocity* pada ketinggian 1,1 meter dalam *finished goods warehouse*. Sebaran *air velocity* yang ditampilkan berada pada rentang warna

biru tua untuk *air velocity* 0,016 m/s hingga warna merah untuk *air velocity* 0,318 m/s. Sebaran *air velocity* yang ada pada Gambar 6 bervariasi dari warna biru tua hingga warna kuning. Dari Gambar 6 dapat diketahui bahwa lokasi pekerja dengan *air velocity* tertinggi ada di dekat pintu keluar sebesar 0,219.

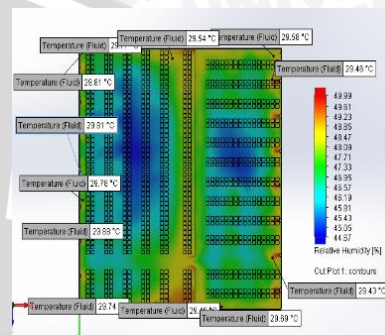
### 3.4 Pembuatan Rekomendasi Perbaikan

Nilai PMV pekerja pada *finished goods warehouse* saat ini menunjukkan terjadinya heat stress dengan skala *moderate* hingga *strong*, oleh karena itu perlu dilakukan rekomendasi perbaikan agar dapat mencegah terjadinya *human error*. Rekomendasi perbaikan ini bertujuan untuk menurunkan nilai PMV serta potensi heat stress yang dialami oleh pekerja. Rekomendasi perbaikan yang disarankan dalam penelitian ini ada dua yaitu secara *administrative control* dan *engineering control*. Untuk *administrative control* sebaiknya di dalam *finished goods warehouse* ada pembagian *job desc* yang jelas agar beban yang diterima oleh pekerja dapat lebih ringan misalnya, dilakukan pembagian *job desc* yaitu pekerja yang bertugas memeriksa kode barang dan pekerja yang bertugas sebagai *driver*.

*Engineering control* yang akan dilakukan berkaitan dengan upaya perbaikan faktor luar berupa suhu, kecepatan angin dan *relative humidity*. Kecepatan udara, kelembaban berkaitan erat dengan besar suhu yang ada di suatu area. Di dalam penelitian ini ada beberapa faktor yang menyebabkan besarnya nilai PMV adalah tingginya nilai *air temperature* dan aktivitas yang dikerjakan. Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai suhu yang tinggi dikarenakan kurangnya sirkulasi udara yang baik juga menyebabkan salah satu penyebab terjadinya perbedaan suhu yang terjadi di luar yakni sebesar 4 °C. Pembuatan simulasi CFD digunakan untuk rekomendasi berupa *engineering control*. Di dalam menurunkan suhu ruangan ada beberapa hal yang bisa dilakukan, antara lain penambahan *exhaust fan* dan penambahan ventilasi serta penggunaan AC.

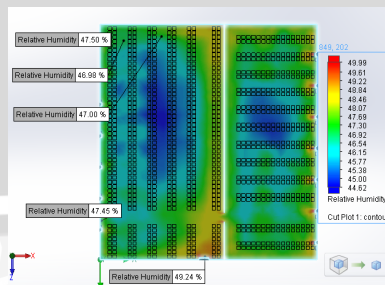
Rekomendasi yang akan disimulasikan yaitu menambah ventilasi dan penambahan *exhaust fan*. Penggunaan AC tidak disarankan karena biaya yang dibutuhkan tinggi serta dapat merusak produk yang ada di dalam *finished goods warehouse*. Kerusakan yang terjadi berupa penggumpalan yang ada di produk

*finished goods warehouse*. Skenario yang akan dibuat untuk rekomendasi perbaikan ada 2 yaitu rekomendasi 1 penambahan ventilasi dan rekomendasi kedua berupa penambahan *exhaust fan*. Output simulasi rekomendasi 1 berupa gambar dapat dilihat pada Gambar 7, 8 dan 9 sedangkan rekomendasi perbaikan 2 berupa gambar dapat dilihat pada Gambar 10, 11 dan 12.



Gambar 7. Sebaran temperature hasil rekomendasi 1

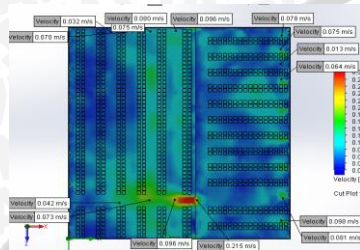
Kecepatan angin diperoleh dari hasil pengamatan langsung yang berada di luar *finished goods warehouse*. Dari perhitungan tersebut diperlukan ventilasi sebesar 14 yang berfungsi sebagai jalur pertukaran udara. Pada penelitian ini, rekomendasi yang akan diberikan akan disimulasi dengan CFD. Simulasi CFD dibuat ulang dengan langkah-langkah yang ada pada sub bab 4.3.5. Pada simulasi perbaikan ini terdapat perubahan nilai *heat sources* 1 dan 2 yaitu panas yang berasal dari lampu dan atap galvalum. Setelah menambah sirkulasi udara ditambahkan menjadi 14 dengan ukuran sebesar 2 x 1 meter. Sebaran variasi warna pada Gambar 4.8 berada pada warna biru tua hingga biru muda. Hal tersebut menunjukkan bahwa temperature 29,01 °C hingga 29,88 °C.



Gambar 8. Sebaran relative humidity hasil rekomendasi pada ketinggian 1,1 m

Gambar 4.8 menunjukkan sebaran *relative humidity* pada ketinggian 1,1 meter dalam ditambahkan ventilasi udara sebanyak 14 buah di *finished goods warehouse* ditambahkan

dengan 14 ventilasi. Ada perbedaan nilai *relative humidity* Sebaran nilai *relative humidity* yang dirasakan pekerja bagian *Finished goods warehouse* hasil simulasi telah berada pada rentang nilai rekomendasi nilai *relative humidity* yang ditetapkan ISO 7730 (1994) yaitu antara 30% hingga 70%. Dari Gambar 8 dapat diketahui bahwa titik-titik yang ada di *finished goods warehouse* mempunyai nilai *relative humidity* berkisar 44,05%.



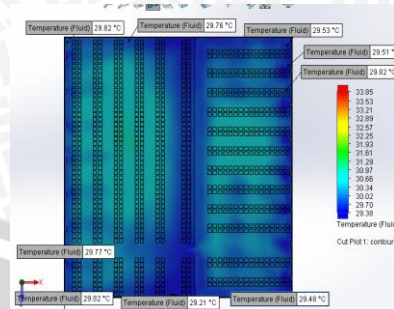
**Gambar 9.** Sebaran *air velocity* hasil rekomendasi pada ketinggian 1,1 m

Gambar 9 menunjukkan sebaran *air velocity* pada ketinggian 1,1 meter dalam setelah ditambahkan ventilasi udara sebanyak 14 buah *Finished goods warehouse*. Sebaran *air velocity* yang ada pada Gambar 9 bervariasi dari warna biru tua hingga warna hijau. Sebaran nilai *air velocity* yang dirasakan pekerja bagian *finished goods warehouse* hasil simulasi telah berada pada batas rekomendasi nilai *air velocity* yang ditetapkan ISO 7730 (1994) yaitu kurang dari 0,4 m/s.

Setelah rekomendasi perbaikan diinterpretasikan dalam bentuk gambar, kemudian dilakukan perhitungan ulang nilai PMV, PPD dan potensi tingkat *heat stress* pekerja. Tabel 9 menunjukkan rekapitulasi *input* dan hasil perhitungan ulang PMV, PPD, dan tingkat *heat stress*. *Input* data lingkungan yang digunakan pada perhitungan ulang merupakan hasil dari simulasi CFD rekomendasi di lampiran 2.

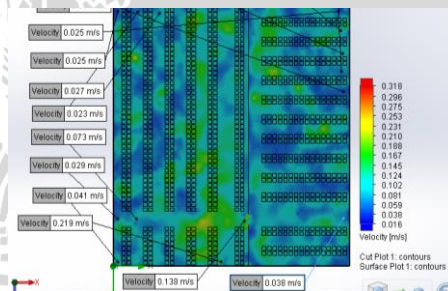
Lampiran 2 menunjukkan nilai PMV, PPD, dan potensi tingkat *heat stress* pekerja sesuai dengan rekomendasi perbaikan. Jika dilihat secara keseluruhan, berdasarkan rentang nilai PMV yang berada di antara +1,3 hingga +1,30 dengan rata-rata sebesar 1,63. Hal tersebut menunjukkan bahwa sensasi termal yang dirasakan seluruh titik pengamatan adalah hangat dan seluruh pekerja memiliki potensi *slightly warm heat stress*. Nilai PPD yang dirasakan pekerja menurun menjadi 40,36%

hingga 66,48% dengan rata-rata sebesar 58,58%.



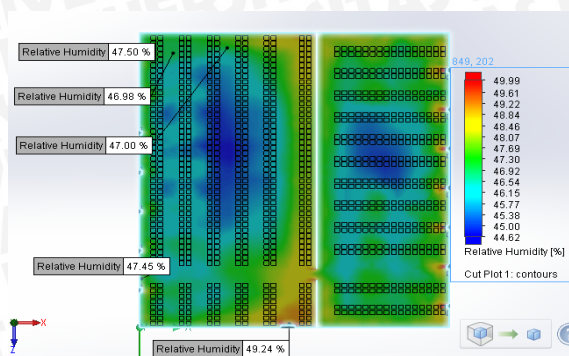
**Gambar 10.** Sebaran *temperature* hasil rekomendasi 2

Gambar 4.10 menunjukkan sebaran *temperature* pada ketinggian 1,1 meter setelah menambah sirkulasi udara berupa *exhaust fan* sebanyak 33 buah Sebaran variasi warna pada Gambar 4.18 berada pada warna biru tua hingga biru muda. Hal tersebut menunjukkan bahwa *temperature* 29,21 °C hingga 29,88 °C.



**Gambar 11.** Sebaran *relative humidity* hasil rekomendasi pada ketinggian 1,1 m

Gambar 11 menunjukkan sebaran *air velocity* pada ketinggian 1,1 meter setelah ditambahkan *exhaust fan* sebanyak 33 buah *finished goods warehouse*. Sebaran *air velocity* yang ada pada Gambar 11 bervariasi dari warna biru tua hingga warna hijau. Sebaran nilai *air velocity* yang dirasakan pekerja bagian *finished goods warehouse* hasil simulasi telah berada pada batas rekomendasi nilai *air velocity* yang ditetapkan ISO 7730 (1994) yaitu kurang dari 0,4 m/s. Adanya perpindahan udara bisa disebabkan oleh perbedaan nilai *air temperature* pada suatu ruangan.



Gambar 12. Sebaran air velocity hasil rekomendasi pada ketinggian 1,1 m

Gambar 12 menunjukkan sebaran *relative humidity* pada ketinggian 1,1 meter dalam ditambahkan *exhaust fan* sebanyak 33 buah di *finished goods warehouse*. Ada perbedaan nilai *relative humidity* Sebaran nilai *relative humidity* yang dirasakan pekerja bagian *finished goods warehouse* hasil simulasi telah berada pada rentang nilai rekomendasi nilai *relative humidity* yang ditetapkan ISO 7730 (1994) yaitu antara 30% hingga 70%. Dari Gambar 12 dapat diketahui bahwa titik-titik yang ada di *finished goods warehouse* mempunyai nilai *relative humidity* berkisar 47%. Elovitz (1999) menyebutkan bahwa meningkatnya nilai *temperature* tanpa perubahan jumlah kelembaban di udara dapat menurunkan nilai *relative humidity*, hal tersebut juga berlaku pada kondisi sebaliknya. Hal tersebut dapat terjadi karena seiring dengan meningkatnya *air temperature*, kemampuan udara untuk menampung air juga akan meningkat. Sedangkan jumlah air dalam udara cenderung konstan seiring dengan meningkatnya *air temperature*.

Setelah rekomendasi perbaikan diinterpretasikan dalam bentuk gambar, kemudian dilakukan perhitungan ulang nilai PMV, PPD dan potensi tingkat *heat stress* pekerja. Perhitungan ulang nilai PMV, PPD dan potensi tingkat *heat stress* pekerja dilakukan dengan cara yang dijelaskan pada sub bab 4.3.3. lampiran 3 menunjukkan rekapitulasi *input* dan hasil perhitungan ulang PMV, PPD, dan tingkat *heat stress* setelah rekomendasi. *Input* data lingkungan yang digunakan pada perhitungan ulang merupakan hasil dari simulasi CFD rekomendasi.

Lampiran 3 menunjukkan nilai PMV, PPD, dan potensi tingkat *heat stress* pekerja sesuai dengan rekomendasi perbaikan pertama. Jika dilihat secara keseluruhan, berdasarkan

rentang nilai PMV yang berada di antara +1,25 hingga +1,80 dengan nilai rata-rata sebesar 1,60. Hal tersebut menunjukkan bahwa sensasi termal yang dirasakan seluruh titik pengamatan adalah hangat dan seluruh pekerja memiliki potensi *slightly warm heat stress*. Nilai PPD yang dirasakan berkisar antara 38,08% hingga 67,31% dengan nilai rata-rata 56,88.

### 3.5 Perhitungan Biaya Rekomendasi Perbaikan

Untuk mencapai keberhasilan dalam mengaplikasikan rekomendasi perbaikan, diperlukan perhitungan biaya yang harus dikeluarkan oleh perusahaan dalam mengaplikasikan rekomendasi perbaikan yang telah dibuat. Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perhitungan biaya pemasangan dan pemakaian *exhaust fan* serta ventilasi pada *finished goods warehouse*. Perhitungan biaya tidak memperhatikan biaya yang hilang pada saat pemasangan *exhaust fan* dan ventilasi. Perhitungan pemakaian listrik untuk penggunaan *exhaust fan* pada *Finished goods warehouse* menurut PT. Perusahaan Listrik Negara dapat dilihat pada perhitungan di bawah ini.

$$\text{Konsumsi listrik} = 33 \times 50 \text{ W} = 1,65 \text{ kW}$$

$$\text{Jam kerja shift 1} = 07.00 - 15.00 = 8 \text{ jam}$$

$$1 \text{ bulan} = 22 \text{ hari kerja}$$

$$\text{Konsumsi listrik / bulan} = 290.4 \text{ kWh / bulan}$$

Perusahaan produksi penyedap makanan merupakan industri menengah yang menggunakan daya listrik di atas 200 kVA. Menurut Peraturan Menteri ESDM RI No. 31 Tahun 2014 tentang Tarif Tenaga Listrik Yang Disediakan Oleh Perusahaan Perseroan (Persero) PT. Perusahaan Listrik Negara, tarif tenaga listrik untuk keperluan industri menengah pada tegangan menengah, dengan daya di atas 200 kVA, termasuk ke dalam golongan tarif listrik I-3 / TM. Tarif listrik untuk golongan I-3 / TM ditentukan menurut Peraturan Menteri ESDM RI No. 31 Tahun 2014 yaitu sebesar Rp 1.115 / kWh. Berikut ini merupakan total biaya yang harus dikeluarkan oleh perusahaan makanan jika dilakukan penambahan *Exhaust Fan*.

Total biaya / bulan = Rp 323.796 / bulan

Total biaya yang dibutuhkan untuk pemasangan *exhaust fan* pada *finished goods warehouse* yaitu.

Total biaya pengadaan *exhaust fan*  
= Rp 46.725.000

Biaya yang dikeluarkan tiap bulan berikutnya  
= Rp 363.729/bulan

Selanjutnya untuk perhitungan rekomendasi perbaikan dengan menambahkan ventilasi dengan ukuran 2 m<sup>2</sup> sebanyak 14 buah, maka perusahaan akan mengeluarkan biaya, biaya yang dihitung tanpa memperhatikan hal-hal teknis.

Harga bongkar bangunan = Rp 700.000

Harga unit dengan ongkos pemasangan  
= Rp 750.000 x 14 = Rp 10.500.000

Biaya Bangunan (Semen dsb) = Rp 500.000

Harga total = Rp 11.700.000

#### 4. Kesimpulan

Pada kondisi existing nilai PMV berada pada rentang +2,4 hingga +2,61 dengan nilai rata-rata sebesar +2,55, sedangkan nilai PPD berada pada rentang 91,2% hingga 95,4% dengan nilai rata-rata sebesar 94,41 yang berarti pada keseluruhan *finished goods warehouse* pekerja berpotensi mengalami *moderate* hingga *strong heat stress* dan kemungkinan pekerja tidak nyaman berada pada rentang 91,2 % hingga 95,4%. Hal ini berarti sensasi termal yang dirasakan seluruh pekerja di *finished goods warehouse* ialah *moderate* hingga *strong heat stress*, oleh karena itu pekerja yang ada di *finished goods warehouse* belum mencapai *human comfort*.

Rekomendasi perbaikan yang dilakukan ada 2 cara yaitu dengan *administrative control* dan *engineering control*. Secara *administrative control* sebaiknya pekerja yang ada di *finished goods warehouse* dapat dilakukan pembagian *job desc* yaitu pekerja yang bertugas memeriksa kode barang dan pekerja yang bertugas sebagai *driver*. Secara *engineering control* dengan 2 skenario yaitu dengan skenario pertama berupa penambahan 14 ventilasi dan skenario kedua dengan cara menambahkan *exhaust fan* sebanyak 33 buah. Nilai PMV, PPD, dan potensi tingkat *heat stress* pekerja sesuai dengan rekomendasi perbaikan. Dari hasil

rekomendasi perbaikan pertama didapatkan bahwa nilai rata-rata PMV dan PPD menurun dari 2,55 menjadi 1,63 dan nilai PPD menurun dari 94,41 menjadi 58,58%, sedangkan rekomendasi kedua didapatkan bahwa nilai rata-rata PMV dan PPD menurun dari 2,55 menjadi 1,60 dan nilai PPD menurun dari 94,41 menjadi 56,88%. Oleh karena itu, rekomendasi perbaikan yang disarankan adalah penambahan ventilasi dikarenakan biaya yang lebih minimum dan dapat membuat tingkat kenyamanan termal menjadi *slight heat stress*.

#### Daftar Pustaka

- [1] Stanton, N., Brookhuis, K., Hedge, A., Hendrick, H., & Salas, E. 2005. *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*. United State of America: CRC Press.
- [2] ASHRAE. 2004. *ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: ASHRAE.
- [3] OSHA. 2012. *Heat Stress*. Minnesota: Department of Labor and Industry.
- [4] Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia. 2011. *Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor Per. 13/MEN/X/2011 Tentang Nilai Ambang Batas Faktor Fisika dan Faktor Kimia Di Tempat Kerja*. Jakarta: Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia.
- [5] ISO. 1994. *ISO 7730: Moderate Thermal Environments – Determination of The PMV and PPD Indices and Specification of The Conditions for Thermal Comfort*. Switzerland: ISO.