

BAB I PENDAHULUAN

Dalam melakukan penelitian ini maka diperlukan hal-hal penting yang digunakan sebagai dasar dalam melakukan penelitian. Pada bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang, identifikasi masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan asumsi penelitian.

1.1 Latar Belakang

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 (Stanton, 2005). Menurut Anoraga dan Widiyanti (2003) lingkungan kerja fisik merupakan salah satu penyebab dari keberhasilan dalam melaksanakan suatu pekerjaan, tetapi juga dapat menyebabkan suatu kegagalan dalam pelaksanaan suatu pekerjaan, karena lingkungan kerja dapat mempengaruhi pekerja. Menurut Nitisemito (2000) lingkungan kerja dapat berpengaruh terhadap tingkat kelelahan pekerja, sehingga setiap organisasi atau perusahaan harus mengusahakan agar lingkungan kerja dimana pegawai berada selalu dalam kondisi yang baik.

Termal merupakan salah satu faktor lingkungan kerja fisik yang dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja seseorang. Kenyamanan termal (*thermal comfort*) dapat didefinisikan sebagai kondisi yang menunjukkan kepuasan atau kenyamanan seseorang terhadap lingkungan kerja termalnya (ASHRAE, 2004). Ada 7 faktor yang mempengaruhi kenyamanan thermal seseorang yaitu kelembaban, kecepatan udara, temperatur, *expectation*, *clothing*, dan *activity level*. Kondisi temperatur lingkungan kerja yang tidak nyaman (terlalu tinggi atau terlalu rendah) dapat menyebabkan seseorang menjadi tidak nyaman. Hal tersebut dapat menyebabkan beberapa penyakit yaitu (*heat stress*) seperti *heat stroke*, *heat exhaustion*, *heat rash*, *heat syncope*, *heat cramps* transient *heat fatigue* dapat terjadi akibat paparan suhu tinggi yang berlebihan (OSHA, 2012:2).

Temperatur dalam ruangan yang sehat berdasarkan MENKES NO.1405/MENKES/SK/XI/2002 adalah temperatur ruangan yang berkisar antara 18°C-28°C. Berdasarkan standar yang ditetapkan oleh SNI 03-6572-2001, temperatur yang nyaman berkisar antara 20,5°C hingga 27,1°C. 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. Menurut Maurits (2010) ada banyak efek dari kelelahan (*fatigue*) telah menjadi faktor utama dari penyebab kecelakaan, terutama kecelakaan yang terjadi pada industri. Tingkat dari kelelahan seseorang bisa mempengaruhi performansi manusia dari tingkat sepele hingga sangat berbahaya.

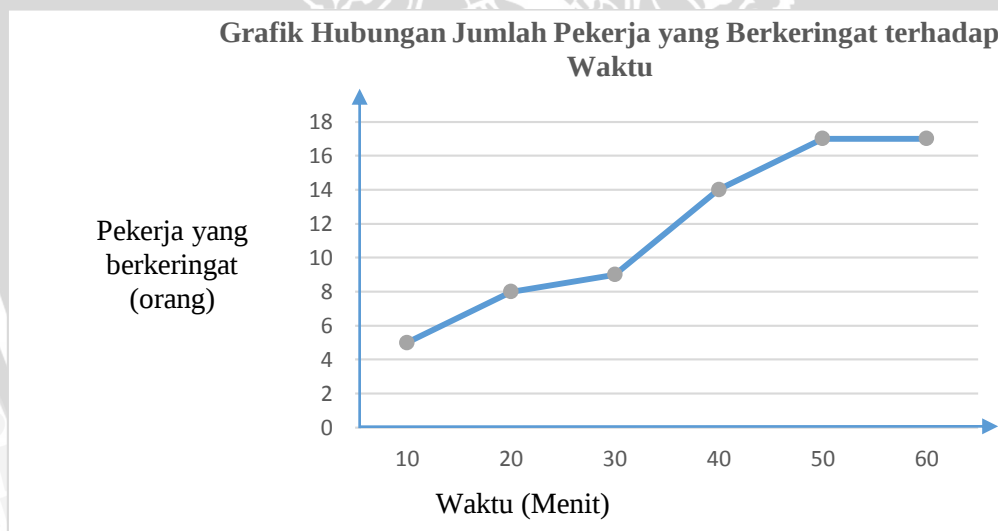
Perusahaan penyedap makanan memiliki beberapa kegiatan yang dilakukan. Kegiatan yang dilakukan perusahaan produksi penyedap makanan antara lain proses pengadaan, produksi, *packaging*, dan pengiriman. Proses pengadaan, produksi dan *packaging* terjadi di satu gedung yang sama, sedangkan proses penyimpanan 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. Tabel 1.1 merupakan tabel rekap data suhu pada *warehouse* perusahaan produksi penyedap makanan selama 1 minggu pada bulan Agustus hingga Oktober 2016.

Tabel 1.1 Rekap Suhu pada Warehouse Perusahaan Produksi Penyedap Makanan

Tgl	AGUSTUS 2016			SEPTEMBER 2016			OKTOBER 2016		
	Rata-Rata	Max	Min	Rata-Rata	Max	Min	Rata-Rata	Max	Min
1	33,1	34,1	27,6	32	33,8	28,9	32	34,6	27,9
2	32,4	33,4	29,7	32,2	34,6	27,6	33,2	34,6	28,9
3	32	34	29,5	31	34,1	28,4	31,2	33,6	28,8
4	33,3	34,3	28	32	33,8	28,3	30,1	32,2	27,8
5	33,8	34,2	27,8	33,2	34	28,6	32	33	29,1
6	33,5	34,5	27,5	31	29,2	26,5	30	32,2	28,4
7	30,4	33	27	33	33	28,4	33	34,4	29,2

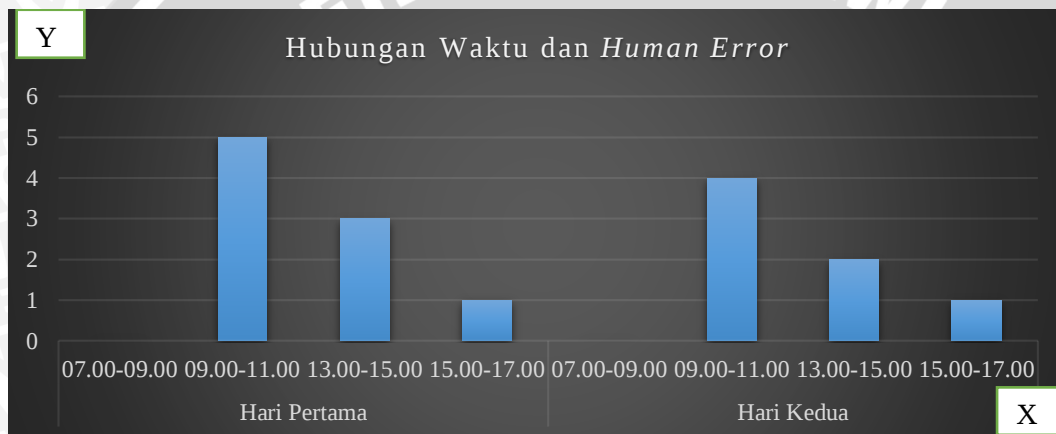
Berdasarkan Tabel 1.1 terlihat bahwa rata-rata suhu masih berada di atas 28°C yang berarti suhu yang berada di warehouse sudah melebihi SNI 03-6572-2001 dan MENKES NO.1405/MENKES/SK/XI/2002. Setelah dilakukan observasi langsung di lapangan melalui wawancara mengenai keluhan yang ada di warehouse. Semua pekerja menyatakan keluhan panas, 24% dari seluruh pekerja menyatakan keluhan terhadap pencahayaan, dan 18% dari seluruh pekerja menyatakan keluhan terhadap aktivitas yang diakibatkan transportasi. Dikarenakan seluruh pekerja mengeluhkan ruangan yang panas maka dilakukan penelitian mengenai apa dampak akibat panas yang ada di perusahaan produksi penyedap makanan.



Gambar 1.1 Grafik hubungan jumlah pekerja berkeringat terhadap waktu

Gambar 1.1 didapatkan dari hasil observasi pada kegiatan *briefing* pada pukul 07.00 WIB, dapat diketahui bahwa pekerja mulai merasa berkeringat pada menit ke-10 dan seluruh pekerja berkeringat pada menit ke-60. Dalam lingkungan kerja panas, tenaga kerja mendapatkan beban tambahan berupa tekanan panas (Zaenal. A dan Suharyo. W, 2009: 521). Hal tersebut dapat memperburuk kondisi kesehatan dan stamina selama kerja. Lingkungan kerja panas merangsang tubuh untuk berkeringat sebagai proses alamiah guna menurunkan suhu tubuh hingga pada temperatur normal tubuh manusia yaitu

37°C (J.F Gabriel, 1988). Hasil observasi awal menunjukkan bahwa dampak akibat paparan panas yang dirasakan pekerja *finished goods warehouse* memungkinkan terjadinya penurunan performansi pekerja dan meningkatnya kesalahan yang dilakukan pekerja. *Human error* yang sering terjadi adalah pembacaan *HSCode* yaitu kesalahan pembacaan kode barang yang dapat berakibat pengambilan barang yang salah. *Human error* pada pembacaan *HSCode* dapat membuat peluang terjadinya bagian *stuffing/loading* akan semakin tinggi. Kesalahan *human error* di bagian *stuffing/loading* adalah kesalahan peletakan barang ke destinasi yang berbeda. Kesalahan yang terjadi ini dapat menimbulkan pengembalian barang hingga pengembalian *container* dan hal tersebut dapat menimbulkan kerugian dari segi waktu dan biaya. Gambar 1.2 menunjukkan hasil observasi terhadap *human error* selama 2 hari pengamatan.



Gambar 1.2 Grafik hubungan waktu dan *human error*

Gambar 1.2 menunjukkan waktu seringnya terjadi *human error* adalah pukul 09.00-11.00 dimana sumbu y menunjukkan banyaknya *human error* dan sumbu x menunjukkan waktu terjadinya *human error*. Adanya *human error* ini dapat menyebabkan efek domino dan dapat menyebabkan efek kerugian untuk perusahaan produksi penyedap makanan. Untuk mencegah hal tersebut perlu dilakukan penelitian agar *human comfort* dapat meningkat dan *human error* bisa berkurang. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengetahui *human comfort* yang dialami pekerja, beberapa diantaranya adalah *Physiological Heat Strain*, *Heat Strain Score Index (HSSI)*, *Predicted Mean Vote (PMV)* dan *Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)*. *Physiological Heat strain* membutuhkan waktu lebih untuk melakukan pengukuran. *Heat stain Score Index (HSSI)* mempunyai hasil penelitian yang lebih subyektif. Metode PMV dan PPD Indeks PMV memiliki parameter yang paling lengkap dengan mempertimbangkan 6 parameter dan memiliki indeks pembandingan ketidaknyamanan, yaitu PPD (Stanton, 2005:63).

Permasalahan *heat stress* yang ada di perusahaan produksi penyedap makanan penulis memilih metode PMV dan PPD dikarenakan PMV dapat diketahui nilai kenyamanan termal dari individu yang berada pada suatu kondisi termal tertentu, sedangkan dari PPD dapat diketahui prosentase individu yang merasa kurang nyaman dengan keadaan termal. Dimana untuk nilai PMV yang baik adalah mendekati nilai 0 dimana nilai 0 ini merepresentasikan keadaan netral (tidak terlalu dingin dan tidak terlalu panas), sedangkan untuk nilai PPD semakin kecil PPD berarti prosentase individu yang tidak nyaman juga semakin kecil. Setelah mengetahui nilai PMV dan PPD pekerja pada bagian *warehouse*, selanjutnya dapat dilakukan upaya perbaikan untuk meningkatkan kenyamanan termal dengan bantuan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Usaha yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kenyamanan termal adalah dengan melakukan *engineering* dan *administratif 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.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, maka permasalahan yang diteliti adalah sebagai berikut.

1. Temperatur di perusahaan produksi penyedap makanan rata-rata masih berada di atas 28°C yang berarti suhu yang berada di *warehouse* sudah melebihi SNI 03-6572-2001 dan MENKES NO.1405/MENKES/SK/XI/2002.
2. Pekerja mulai berkeringat pada menit ke-10 dan bisa menimbulkan kelelahan yang bisa berdampak pada *human error*.
3. Adanya kesalahan manusia (*human error*) berupa pembacaan *HSCode* yang bisa berakibat pada kesalahan *stuffing/loading* di *warehouse* perusahaan produksi penyedap makanan yang diduga diakibatkan temperatur.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang didapat dari permasalahan yang ada adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana tingkat kenyamanan termal yang saat ini dirasakan oleh pekerja bagian oleh pekerja bagian *warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan?
2. Bagaimana rekomendasi peningkatan kenyamanan termal yang saat ini dirasakan oleh pekerja bagian oleh pekerja bagian *warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Melakukan pengukuran tingkat kenyamanan termal pekerja bagian *warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan dengan menggunakan *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) dan *Predicted Mean Vote* (PMV).
2. Memberikan rekomendasi peningkatan kenyamanan termal pekerja bagian *warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah mengetahui perhitungan dan analisis kenyamanan termal serta upaya dalam meningkatkan kenyamanan termal pekerja bagian *warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan sehingga dapat meminimasi terjadinya *human error*.

1.6 Batasan Penelitian

Batasan masalah digunakan untuk membatasi ruang lingkup penelitian agar lebih terfokus. Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian dilakukan pada 17 pekerja yang khusus ditempatkan pada bagian *finished goods warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan.
2. Perbaikan yang diberikan terbatas pada *engineering* dan *administratif control*.

1.7 Asumsi Penelitian

Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Tidak terjadi perubahan jumlah karyawan dan *layout* selama penelitian dilakukan.
2. Pekerja pada bagian *finished goods warehouse* menggunakan pakaian seragam sesuai dengan standar yang ditentukan perusahaan produksi penyedap makanan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penelitian yang akan dilaksanakan diperlukan dasar-dasar (teori) argumentasi ilmiah yang berhubungan dengan konsep yang berkaitan dalam penelitian dan akan dipakai dalam analisis. Dalam bab ini akan dijelaskan beberapa dasar-dasar (teori) argumentasi atau teori yang digunakan dalam penelitian.

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya dan akan dijadikan acuan untuk penelitian yang akan dilaksanakan. Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan dan bandingan penelitian ini disajikan pada Tabel 2.1. Hal tersebut nantinya akan berdampak pada perhitungan nilai PMV dan PPD.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian ini

No	Penulis	Metode	Objek Amatan	Hasil Penelitian
1.	Walker, Wat erfield, dan Thompson (2014)	PMV-PPD, survei	Ruang kontrol pada platform produksi lepas pantai 	Hasil PMV sebesar 0.29 yang setara dengan 8% PPD. Hasil yang sebanding untuk ruang kontrol SCADA di darat yang PMV = 0.82 yang setara dengan 12% PPD. Dalam kedua kasus, PMV berarti yang bias oleh sejumlah kecil menuju sensasi panas hangat, meskipun pakaian cahaya yang sedang dipakai. Berdasarkan analisis ini aman untuk menyimpulkan bahwa masalah yang signifikan dengan lingkungan termal di kedua lokasi tidak terdeteksi. Satu-satunya pengecualian untuk ini adalah 36% responden yang menunjukkan bahwa, bertentangan dengan BS11064:6 (1995), mereka tidak memiliki kontrol atas suhu.
2.	Khalil dan El-Bialy (2012)	PMV-PPD, CFD	Stasiun kereta api bawah tanah Kota Kairo	Nilai PMV dapat diturunkan hingga berada diantara 0 hingga 0,9 dengan cara meningkatkan beban pendinginan dari 175 KW menjadi 424 KW
3.	Fardian, Ryan (2015)	PMV-PPD, CFD	Bagian <i>converting</i> PT. KTG	Nilai PMV pekerja pada bagian <i>converting</i> dapat diturunkan hingga di bawah 2,5 dengan nilai PPD 58,2% hingga 84,2 % setelah jenis kaca pada langit-langit Gedung G diganti menjadi <i>reflective clear glass</i> .

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian ini (Lanjutan)

No	Penulis	Metode	Objek Amatan	Hasil Penelitian
4.	Penelitian ini	PMV-PPD, CFD	Bagian <i>finished goods warehouse</i> perusahaan produksi penyedap makanan	<i>Heat stress</i> pekerja pada <i>finished goods warehouse</i> dihitung berdasarkan nilai <i>Predicted Mean Vote</i> (PMV). Perhitungan PMV diambil menggunakan 44 titik. Hasil dari perhitungan PMV menunjukkan bahwa nilai tertinggi berada pada hampir seluruh titik pekerja pada <i>finished goods warehouse</i> dengan nilai +2,4. Sedangkan nilai PMV terendah berada pada titik pertama dengan nilai +2,64. Hal ini berarti sensasi termal yang dirasakan seluruh pekerja di <i>finished goods warehouse</i> ialah <i>moderate</i> hingga <i>strong heat stress</i> , oleh karena itu pekerja yang ada di <i>finished goods warehouse</i> belum mencapai <i>human comfort</i> .

Tabel 2.1 menjelaskan mengenai perbandingan penelitian terdahulu dan penelitian yang dilakukan. Penelitian ini menggunakan beberapa pedoman seperti penelitian yang ada di tabel 2.1.

1. Walker,dkk (2014) melakukan penelitian mengenai kenyamanan termal pada ruangan ruang kontrol pada produksi lepas pantai. Tujuan penelitian ini adalah untuk memprediksi tingkat kenyamanan termal pada objek penelitian. Obyek penelitian sebesar 25 dari 28 peserta memberikan penilaian terhadap tujuh nilai skala meramalkan berarti suara (PMV), mulai dari -3 (terlalu dingin) hingga 3 (terlalu panas). Tujuannya adalah untuk mencapai situasi *thermally netral* (rating 0) dimana panas yang dihasilkan oleh aktivitas dan metabolisme (ketika dipengaruhi oleh isolasi pakaian) adalah seimbang dengan kehilangan panas yang ada karena adanya perbedaan suhu ruangan. Di kontrol lingkungan pada ruang operator melakukan menetapkan untuk pencahayaan saat bekerja (tingkat metabolisme sekitar 70-90 W/m²) dengan 96% melaporkan bahwa mereka mengenakan pakaian ringan. Persentase orang yang merasakan tidak puas (PPD) adalah suatu teknik atau sebuah metode untuk mengetahui peringkat PMV tersebut untuk populasi-tingkat persentase orang yang merasakan tidak puas (PPD) (BS ISO 7730, 1995). PMV sebesar 0.29 yang setara dengan 8% PPD. Hasil yang sebanding untuk ruang kontrol SCADA di darat yang PMV = 0.82 yang setara dengan 12% PPD. Dalam kedua kasus ini, PMV berarti yang bias oleh sejumlah kecil menuju

sensasi panas hangat, meskipun pakaian cahaya yang sedang dipakai. Berdasarkan analisis ini aman untuk menyimpulkan bahwa masalah yang signifikan dengan lingkungan termal di kedua lokasi tidak terdeteksi. Satu-satunya pengecualian untuk ini adalah 36% responden yang menunjukkan bahwa, bertentangan dengan BS11064:6 (1995), mereka tidak memiliki kontrol atas suhu.

2. Khalil dan El-Bialy (2012) melakukan penelitian pada stasiun kereta api bawah tanah yang berada di Kota Kairo. Penelitian tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mengoptimalkan kenyamanan termal pengguna jasa stasiun kereta bawah tanah dengan cara melakukan modifikasi pada sistem *air conditioning* (AC). Model PMV dan PPD digunakan untuk memprediksi tingkat kenyamanan termal objek penelitian ini. Simulasi CFD juga digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan kondisi optimal dari modifikasi sistem *air conditioning*. Identifikasi awal penelitian ini menunjukkan bahwa nilai PMV untuk keadaan stasiun bawah tanah di Kota Kairo bervariasi diantara 1 (sedikit hangat) hingga 2 (hangat). Setelah dilakukan simulasi CFD, nilai PMV dapat diturunkan hingga berada diantara 0 hingga 0,9 dengan cara meningkatkan beban pendinginan dari 175 KW menjadi 424 KW.
3. Penelitian ini dilakukan pada bagian *converting* di Gedung G PT. Kencana Tiara Gemilang. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan penilaian *heat stress* dan kenyamanan termal pekerja pada bagian *converting*. Berdasarkan hasil yang didapatkan, 7 dari 22 pekerja pada bagian *converting* berpotensi mengalami *strong heat stress* sedangkan sisanya berpotensi mengalami *moderate heat stress*. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa tingkat kenyamanan termal pekerja berada pada rentang 68,9% hingga 98%. Berdasarkan rekomendasi yang diberikan, nilai PMV pekerja dapat diturunkan menjadi di bawah 2,5 dengan nilai PPD berada pada rentang 58,2% hingga 84,2% dengan mengganti jenis kaca yang berada pada langit-langit Gedung G menjadi *reflective clear glass*.
4. Penelitian ini dilakukan pada bagian *warehouse* di Gedung *finished goods warehouse* perusahaan produksi penyedap makanan. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan penilaian *human comfort* yang dilihat dari nilai PMV dan PPD dan kenyamanan termal pekerja pada bagian *warehouse*.

2.2 Ergonomi

Istilah ergonomi berasal dari Bahasa Latin yakni *ergon* (kerja) dan *nomos* (hukum alam) dan dapat didefinisikan sebagai ilmu studi yang mempelajari tentang aspek-aspek manusia dalam lingkungan kerjanya yang ditinjau dari berbagai aspek, yakni secara anatomi, fisiologi, psikologi, *engineering*, manajemen, dan desain/perancangan (Nurmianto, 2003). Ergonomi berkenaan pula dengan peningkatan produktivitas, optimasi, efisiensi, kesehatan, keselamatan, serta kenyamanan manusia di tempat kerja, di rumah, dan tempat rekreasi. Di dalam ergonomi dibutuhkan studi tentang sistem dimana manusia, fasilitas kerja, dan lingkungannya saling berinteraksi dengan tujuan utama yaitu menyesuaikan suasana kerja dengan manusianya agar menciptakan lingkungan kerja yang baik. Ergonomi juga biasa disebut dengan istilah *human factors*. Ilmu ergonomi dapat digunakan oleh berbagai macam ahli dan cendekiawan pada berbagai bidang.

Penerapan ergonomi pada umumnya merupakan aktivitas rancang ulang (re-desain) maupun rancang bangun (desain). Hal ini dapat meliputi perangkat keras seperti misalnya alat kerja (*tools*), bangku kerja (*benches*), *platforms*, kursi, pegangan alat kerja (*workholders*), sistem pengendali (*controls*), alat peraga (*displays*), jalan/lorong (*access ways*), pintu (*doors*), jendela (*windows*), dan lain sebagainya. Masih dalam kaitan dengan hal tersebut di atas adalah bahasan mengenai rancang bangun lingkungan kerja atau *working environment*, karena jika sistem perangkat keras berubah maka akan berubah pula lingkungan kerjanya.

2.3 Lingkungan Kerja Fisik

Tinjauan dari berbagai prinsip, metode dan model yang digunakan dalam lingkungan kerja fisik merupakan dampak dari panas dan dingin, getaran, kebisingan dan cahaya pada kesehatan, kenyamanan dan kinerja seseorang (Parsons, 2000). Lingkungan kerja fisik merupakan bagian integral dari disiplin ilmu ergonomi dan harus dilihat dan dilakukan dari berbagai perspektif. Manusia tidak merespon lingkungan dengan cara yang monoton berkaitan dengan tindakan langsung dari lingkungan kerja fisik. Beberapa karakteristik manusia dapat menentukan sejauh mana kepekaan tanggapan manusia terhadap lingkungan kerja fisik.

2.4 Kenyamanan Termal

Hoppe (2002) mengatakan bahwa terdapat tiga macam pendekatan kenyamanan, yaitu pendekatan *thermophysiological*, pendekatan *heat balance* dan pendekatan psikologis

(Sugini, 2004: 6). Sedangkan menurut Karyono, (2001: 24) kenyamanan termal adalah sensasi panas atau dingin yang merupakan suatu respon dari sensor indra perasa manusia yaitu kulit terhadap stimuli temperatur disekitar manusia tersebut. Menurut ISO 7730 (2005) *Thermal (heat) balance is obtained when the internal heat production in the body is equal to the loss of heat to the environment*. Dengan demikian kenyamanan termal faktor psikologis perlu diperhatikan dikarenakan setiap individu memiliki persepsi yang berbeda-beda terhadap kenyamanan termal berdasarkan kenyamanan tubuhnya (Purnomo, H. dan Rizal, 2000: 38).

Menurut Frogass (2003) kenyamanan termal dapat dipengaruhi oleh penyesuaian perilaku (termasuk pakaian), adaptasi fisiologis (termasuk aklimatisasi) dan reaksi psikologis (termasuk keinginan). Namun pendekatan psikologis lebih banyak digunakan oleh para ahli dibanding dua pendekatan lainnya.

2.4.1 Faktor Kenyamanan Termal

Ilmu kenyamanan termal hanya membatasi kondisi udara tidak ekstrim *moderate thermal environment*, keadaan yang manusia masih bisa beradaptasi pada perubahan temperatur di sekitarnya (Karyono, 2007: 5). Para ahli sepakat variabel kenyamanan termal yaitu faktor personal; faktor lingkungan: temperatur udara, temperatur radian, kecepatan angin dan kelembaban (Sugini, 2004: 4). Namun Szokolay, Humphreys dan Nicol menambah variabel lain. Tabel 2.2 merupakan rekap pendapat dari Talarosha terkait faktor yang dapat mempengaruhi kenyamanan termal.

Tabel 2.2 Faktor Kenyamanan Termal

Szokolay	Fanger, Standar Amerika (ANSI/ASHRAE 55-1992), (ISO 7730:1994)	Humphreys dan Nicol
Iklim: 1. Radiasi matahari 2. Temperatur udara 3. Kecepatan angin 4. Kelembaban udara	Iklim: 1. Radiasi matahari 2. Temperatur udara 3. Kecepatan angin 4. Kelembaban udara	Iklim: 1. Radiasi matahari 2. Temperatur udara 3. Kecepatan angin 4. Kelembaban udara
Faktor Individu: 1. Pakaian 2. Aklimatisasi 3. Usia dan jenis kelamin 4. Tingkat kegemukan 5. Tingkat kesehatan 6. Makanan & minuman 7. Suku bangsa	Faktor Individu: 1. Aktivitas 2. Pakaian	Faktor Individu: 1. Aktivitas 2. Pakaian 3. Adaptasi Individu Lokasi Geografis

Sumber: Talarosha (2005: 149)

2.1.1 Kenyamanan Termal Iklim Tropis

Terdapat rentang temperatur, manusia tidak perlu usaha menjaga temperatur tubuh sekitar 37°C yang disebut 'temperatur nyaman' dan membuat produktifitas kerja optimal (Karyono, 2007: 5). Lippsmeier (1997: 47) menyatakan bahwa batas kenyamanan untuk kondisi khatulistiwa berkisar antara 19°C TE-26°C TE dengan pembagian berikut:

1. Temperatur 26°C TE: Umumnya penghuni sudah mulai berkeringat.
2. Temperatur 26°C TE–30°C TE: Daya tahan dan kemampuan kerja mulai menurun.
3. Temperatur 33,5°C TE–35,5°C TE: Kondisi lingkungan mulai sukar.
4. Temperatur 35°C TE–36°C TE: Kondisi lingkungan tidak memungkinkan lagi.

Temperatur ruangan yang sehat berdasarkan MENKES NO. 1405/MENKES/SK/IX/2002 adalah temperatur ruangan yang berkisar antara 18°C-28°C namun tergantung pada luasan daerah. Selain itu, berdasarkan standar yang ditetapkan oleh SNI 03-6572-2001, ada tingkatan temperatur yang nyaman untuk orang Indonesia atas tiga bagian yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Standar Temperatur Nyaman SNI 03-6572-2001

	Temperatur Efektif (TE)	Kelembaban/RH (%)
Sejuk Nyaman Ambang Atas	20,5°C TE – 22,8°C TE 24°C TE	50% 80%
Nyaman Optimal Ambang Atas	22,8°C TE – 25,8°C TE 28°C	70%
Hangat Nyaman Ambang Atas	25,8°C – 27,1 °C TE 31 °C TE	60%

Sumber: SNI 03-6572-2001

2.5 Perpindahan Panas

Kalor (panas) selalu berpindah dari substansi yang lebih hangat ke substansi yang lebih dingin. Dalam kenyataannya, molekul yang getarannya lebih cepat memindahkan sebagian dari energi ke molekul yang getarannya lebih lambat. Molekul yang getarannya cepat akan menjadi sedikit melambat dan molekul yang lebih lambat menjadi lebih cepat. Gambar 2.1 merupakan skema proses pertukaran panas yang terjadi pada tubuh manusia. Pertukaran panas yang terjadi pada tubuh dapat dibagi menjadi 4 jenis, yaitu:

1. Konduksi panas

Pertukaran panas melalui proses konduksi bergantung pada sifat konduktivitas suatu objek dan material yang bersentuhan secara langsung dengan kulit. Konduktivitas panas sangat penting dalam pemilihan material untuk keperluan perancangan alat dan ruang kerja.

Berikut merupakan perhitungan *heat transfer* melalui permukaan material.

$$q = \Delta T \times h \quad (2-8)$$

Sumber : Chaiyapinunt (2005)

dengan:

q = intensitas *heat transfer* sinar matahari melalui permukaan galvalum (Watt)

ΔT = selisih suhu antara di dalam dan di luar gedung (K)

h = nilai konduktivitas material (Watt/K)

2. Konveksi panas

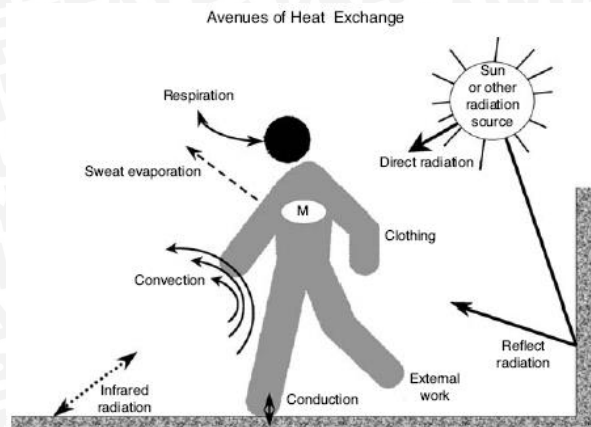
Pertukaran panas melalui proses konveksi bergantung pada perbedaan temperatur antara kulit dan udara yang berada di sekeliling tubuh serta gerakan aliran udara. Pertukaran panas melalui proses konveksi mempengaruhi sekitar 25% - 30% dari total proses pertukaran panas dalam tubuh manusia.

3. Evaporasi keringat

Hilangnya panas melalui proses keluarnya keringat dari dalam tubuh terjadi karena keringat pada bagian kulit menguap atau mengalami proses evaporasi. Pada kondisi normal, manusia akan menguapkan kurang lebih 1 liter keringat per hari. Hal tersebut berarti bahwa dalam satu hari kita akan kehilangan sekitar seperempat dari total panas yang hilang melalui proses evaporasi keringat. Apabila temperatur sekeliling kita melebihi ambang batas kenyamanan, kulit akan menyesuaikan dengan cara mengeluarkan lebih banyak keringat untuk menyeimbangkan temperatur tubuh.

4. Radiasi panas

Radiasi merupakan proses perpindahan panas atas dasar gelombang-gelombang elektromagnetik. Sebagai contoh, tubuh manusia akan mendapatkan pancaran panas dari setiap permukaan yang memiliki temperatur lebih tinggi dan akan kehilangan panas atau memancarkan panas kepada objek atau permukaan yang memiliki temperatur lebih rendah dari tubuh manusia tersebut. Proses pertukaran panas melalui radiasi yang terjadi antara tubuh manusia dan sekelilingnya terjadi dalam dua arah sepanjang waktu.



Gambar 2.1 Skema proses pertukaran panas pada tubuh manusia
Sumber: Stanton (2005: 60-2)

Purnomo, H. dan Rizal (2000: 48) mengatakan manusia memiliki temperatur tubuh sekitar 37°C . Temperatur tersebut diradiasikan oleh tubuh. Untuk mempertahankan temperatur maka tubuh melakukan transpirasi atau evaporasi atau mengeluarkan keringat. Penguapan keringat diperlukan agar panas yang berlebihan dapat dilepas sehingga pada akhirnya kenyamanan temperatur dapat tercapai. Panas yang dihasilkan oleh tubuh manusia harus segera dilepas, hal ini bisa kita ketahui bila kita berkeringat sebagai tanda bahwa mekanisme tubuh kita bekerja. Kemampuan individu untuk beradaptasi dengan lingkungan sekitarnya berbeda antara individu satu dengan yang lainnya, saat beraktifitas dengan temperatur yang tinggi, tubuh akan mengalami kehilangan banyak cairan. Pada kondisi ini tubuh akan melakukan mekanisme fisiologis mengeluarkan panas untuk menstabilkan temperatur tubuh. Perubahan patofisiologis akibat penurunan temperatur tubuh pada manusia dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Perubahan Patofisiologis Akibat Penurunan Temperatur Tubuh

Temperatur Tubuh	Perubahan Patofisiologis
36°C	Peningkatan laju metabolisme
35°C	Menggigil Perubahan neurologis <i>Hyperreflexia</i> <i>Dysarthria</i> Lambat berfikir
34°C	Lambat berfikir Temperatur lebih rendah kompetibel dengan <i>Continued Exercise</i>
33°C	Amnesia
32°C	Penurunan tingkat kesadaran
31°C	Penurunan kinerja organ vital tubuh
$29^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$	Hilangnya kesadaran Kekakuan fungsi otot Perlambatan detak jantung
$27^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$	Hilangnya kemampuan gerak refleks Menyebabkan kematian

Sumber: Purnomo dan Rizal (2000: 51)

2.6 Predicted Mean Vote (PMV)

Predicted Mean Vote (PMV) merupakan indeks yang digunakan untuk memprediksi keseluruhan sensasi termal yang dirasakan oleh orang-orang dalam grup yang besar (Stanton, 2005: 63-1). Model PMV menunjukkan bahwa sensasi termal dapat dideskripsikan sebagai fungsi dari beban termal pada mekanisme efektor dari sistem *thermoregulatory* manusia. Pada keadaan lingkungan yang normal, sistem *thermoregulatory* manusia akan secara otomatis memodifikasi temperatur kulit dan sekresi keringat untuk menjaga keseimbangan panas tubuh manusia. Nilai PMV menentukan rentang sensasi temperatur yang dirasakan orang terhadap lingkungan di sekitarnya. Indeks PMV ini berkisar dari -3 (sangat dingin) sampai dengan +3 (sangat panas). Tabel 2.5 merupakan perbandingan penilaian untuk tiap level terhadap kenyamanan termal menurut ASHRAE, Bedford, General Comfort, dan Mc Intyre.

Tabel 2.5 Perbandingan Penilaian Kenyamanan Termal

ASHRAE		Bedford		General Comfort		Mc Intyre
Strong	2,5-3	Much Too Warm	(7)	Very Uncomfortable	(3)	(7)
Moderate	2-2,5	Too Warm	(6)	Uncomfortable	(2)	(6)
Slightly Warm	(1-2)	Comfortably Warm	(5)	Comfortably Warm	(1)	(5)
Neutral	(0)	Comfortably	(4)	Comfortably	(0)	(4)
Slightly Cool	(-1)	Comfortably Cool	(3)	Comfortably Cool	(-1)	(3)
Cool	(-2)	Too Cool	(2)	Uncomfortable	(-2)	(2)
Cold	(-3)	Much Too Cool	(1)	Very Uncomfortable	(-3)	(1)

Sumber: Nicol & Humphreys, 2002 & Mc Intyre, 1980 (Sugini, 2004)

2.6.1 Faktor-faktor dalam Perhitungan PMV

Persamaan PMV dapat digunakan saat aktivitas (laju metabolisme) dan pakaian (resistensi termal) diestimasi, dan beberapa parameter lingkungan seperti: temperatur udara, *mean radiant temperature*, kecepatan udara relatif dan kelembaban udara relatif diukur secara langsung (ISO 7730, 1994: 2). Berikut merupakan penjelasan lebih lanjut mengenai faktor-faktor dalam perhitungan PMV.

1. Metabolisme tubuh

Metabolisme tubuh adalah tingkat transformasi energi kimia menjadi panas dan mekanik kerja oleh aktivitas metabolik suatu organisme (ASHRAE, 2004: 2). Metabolisme tubuh dinyatakan dalam satuan luas permukaan tubuh keseluruhan yaitu met, dimana 1 met setara dengan 58,2 W/m². Tabel 2.6 menunjukkan laju metabolisme tubuh untuk berbagai aktivitas.

Tabel 2.6 Laju Metabolisme Tubuh Berdasarkan Aktivitas

Aktivitas	Laju Metabolisme (met)	Aktivitas	Laju Metabolisme (met)
Istirahat		Pekerjaan Lain	
Tidur	0,7	Reparasi jam tangan, duduk	1,1
Berbaring	0,8	Mengangkat atau mengepak	1,2 - 2,4
Duduk, membaca	0,9	Bengkel (mengganti ban, dll)	2,2 - 3,0
Pekerjaan Kantor		Mengendarai Kendaraan	
Duduk, menulis	1,0	Mobil	1,5
Duduk, mengetik atau berbicara	1,2 - 1,4	Sepeda motor	2,0
Membuat <i>file</i> duduk	1,2	Kendaraan berat	3,2
Berdiri, berbicara	1,2	Pesawat terbang	1,4
Membuat <i>draft</i>	1,1 - 1,3	Pendaratan	1,8
Pekerjaan kantor lain	1,1 - 1,3	Pesawat tempur	2,4
Membuat <i>file</i> berdiri	1,4	Aktivitas Senggang	
Berjalan (Permukaan Datar)		Memancing	1,2 - 2,0
2 mph (0,89 m/s)	2,0	Golf dan berjalan	1,4 - 2,6
3 mph (1,34 m/s)	2,6	Golf dan menggunakan golf <i>cart</i>	1,4 - 1,8
4 mph (1,79 m/s)	3,8	Berdansa	2,4 - 4,4
Pekerjaan Domestik		Kebugaran	3,0 - 4,0
Berbelanja	1,4 - 1,8	Tenis	3,6 - 4,6
Memasak	1,6 - 2,0	Bola dan raket	5,0 - 7,2
Membersihkan rumah	2,0 - 3,4	Basket	5,0 - 7,6
Mencuci dan menyetrika	2,0 - 3,6	Gulat atau tinju	7,0 - 8,7
Pekerjaan Kayu			
Menggergaji dengan mesin	1,8 - 2,2		
Menggergaji dengan tangan	4,0 - 4,8		
Memahat kayu	5,6 - 6,4		

Sumber: ASHRAE (2004: 15)

2. Hambatan pakaian

Hambatan pakaian atau *clothing insulation* adalah isolasi termal yang diakibatkan oleh pakaian yang dikenakan (ASHRAE, 2004: 2). Hambatan pakaian memiliki pengaruh langsung terhadap kenyamanan termal dan keseimbangan panas yang dirasakan manusia. Hambatan pakaian dinyatakan dalam satuan clo, dimana 1 clo setara dengan 0,155 m²K/W. 1 clo setara dengan jumlah isolasi pakaian yang memungkinkan seseorang menjaga keseimbangan panas saat istirahat pada temperatur 21 °C dalam ruangan berventilasi normal. Terdapat tiga metode untuk memperkirakan hambatan pakaian (ASHRAE, 2004: 16), yaitu:

- Jika nilai hambatan pakaian yang ditunjukkan pada Tabel 2.7 sudah cukup mewakili pakaian yang digunakan, maka nilai Tabel 2.7 dapat langsung digunakan. Tabel 2.8 menjelaskan nilai hambatan pakaian dari *clothing ensemble*.

Tabel 2.7 Nilai Hambatan Pakaian *Clothing Ensemble*

Deskripsi <i>Clothing Ensemble</i>	I _{cl} (clo)
Celana pendek, kemeja lengan pendek	0,36
Celana, kemeja lengan pendek	0,57
Celana, kemeja lengan panjang	0,61
Celana, kemeja lengan panjang, jas	0,96
Celana, kemeja lengan panjang, rompi, <i>T-shirt</i> , dan jas	0,96
Celana, kemeja lengan panjang, <i>sweater</i> lengan panjang, <i>T-shirt</i>	1,01
Celana, kemeja lengan panjang, <i>sweater</i> lengan panjang, <i>T-shirt</i> , jas, celana panjang	1,30
<i>Sweat pants</i> , <i>sweat shirt</i>	0,74
Atasan piyama lengan panjang, celana piyama panjang, sandal (tanpa kaos kaki)	0,96
Rok selutut, kemeja lengan pendek, <i>stocking</i> , sandal	0,54
Rok selutut, kemeja lengan panjang, androk panjang, <i>stocking</i>	0,67
Rok selutut, kemeja lengan panjang, androk, <i>stocking</i> , <i>sweater</i> lengan panjang	1,10
Rok selutut, kemeja lengan panjang, androk, <i>stocking</i> , jas	1,04
Rok sepanjang <i>ankle</i> , kemeja lengan panjang, jas, <i>stocking</i>	1,10
Baju lengan panjang, <i>T-shirt</i>	0,72
<i>Cattlepack</i> , kemeja lengan panjang, <i>T-shirt</i>	0,89
<i>T-shirt</i> , pakaian dalam lengan panjang, celana panjang	1,37

Sumber: ASHRAE (2004: 18)

- b. Jika perlu menambahkan atau mengurangi pakaian yang ada pada Tabel 2.8, maka dapat digunakan tabel hambatan pakaian *garment* sebagai faktor penyesuaian. Tabel 2.8 menjelaskan nilai hambatan pakaian *garment*.
- c. Jika kombinasi dari pakaian yang dikenakan jauh dari yang tersedia pada Tabel 2.8, maka nilai hambatan pakaian dapat menggunakan nilai masing-masing hambatan pakaian yang ada pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Nilai Hambatan Pakaian *Garment*

Deskripsi <i>Garment</i>	I _{cl} (clo)	Deskripsi <i>Garment</i>	I _{cl} (clo)
Pakaian Dalam		Pakaian dan Rok	
<i>Bra</i>	0,01	Rok (tipis)	0,14
Celana dalam wanita	0,03	Rok (tebal)	0,23
Dalaman celana pria	0,04	Baju tanpa lengan, tanpa kerah (tipis)	0,23
Kaos Oblong	0,08	Baju tanpa lengan, tanpa kerah (tebal), seperti <i>jumper</i>	0,27
Androk	0,14	Baju lengan pendek (tipis)	0,29
Dalaman celana pria panjang	0,15	Baju lengan panjang (tipis)	0,33
Androk panjang	0,16	Baju lengan panjang (tebal)	0,47
Baju dalaman panjang	0,20	<i>Sweater</i>	
Alas Kaki		Rompi (tipis)	0,13
Kaos kaki sepanjang <i>ankle</i>	0,02	Rompi (tebal)	0,22

Tabel 2.8 Nilai Hambatan Pakaian *Garment* (Lanjutan)

Deskripsi <i>Garment</i>	I _{cl} (clo)	Deskripsi <i>Garment</i>	I _{cl} (clo)
Stocking	0,02	Lengan panjang (tipis)	0,25
Sandal	0,02	Lengan panjang (tebal)	0,36
Sepatu	0,02	Jaket jas dan rompi	
Sandal (tebal)	0,03	Rompi (tipis)	0,10
Kaos kaki sebetis	0,03	Rompi (tebal)	0,17
Kaos kaki selutut (tebal)	0,06	Jas kancing tunggal (tipis)	0,36
Sepatu bot	0,10	Jas kancing tunggal (tebal)	0,44
Kaos dan Blus		Jas kancing ganda (tipis)	0,42
Blus tanpa kerah	0,12	Jas kancing ganda (tebal)	0,48
Kaos rajut lengan pendek	0,17	Pakaian Tidur dan Jubah	
Kemeja lengan pendek	0,19	Gaun pendek tanpa lengan (tipis)	0,18
Kemeja lengan panjang	0,25	Gaun panjang tanpa lengan (tipis)	0,20
Kemeja flanel lengan panjang	0,34	Gaun rumah sakit lengan pendek	0,31
Kaos lengan panjang	0,34	Jubah pendek lengan pendek (tipis)	0,34
Celana		Piyama lengan pendek (tipis)	0,42
Celana pendek	0,06	Gaun panjang lengan panjang (tebal)	0,46
Celana jalan pendek	0,08	Jubah panjang lengan pendek (tebal)	0,48
Celana bahan tipis	0,15	Piyama lengan panjang (tebal)	0,57
Celana bahan tebal	0,24	Jubah panjang lengan panjang (tebal)	0,69
Celana olahraga	0,28		
<i>Cattlepack</i>	0,30		
Baju kerja	0,49		

Sumber: ASHRAE (2004: 19)

3. Temperatur udara

Temperatur udara adalah temperatur rata-rata yang berada di sekitar seseorang pada lokasi dan waktu tertentu (ASHRAE, 2004: 3). Temperatur dapat diukur menggunakan termometer yang dihubungkan langsung dengan udara, tetapi tanpa memperhatikan kelembaban dan radiasi. Temperatur dinyatakan dalam satuan *Celcius* (°C), *Kelvin* (K), atau *Fahrenheit* (°F).

4. Mean radiant temperature

Mean radiant temperature (MRT) berhubungan dengan jumlah radiasi panas yang dikeluarkan dari sebuah permukaan (ASHRAE, 2004: 3). MRT sangat bergantung pada emisivitas atau kemampuan material dalam menyerap maupun memancarkan panas. Selain itu MRT juga bergantung pada luas permukaan suatu objek. Konsep MRT muncul dari kenyataan bahwa pertukaran energi radiasi antara dua benda sebanding dengan emisivitasnya. Pada penelitian ini, nilai *mean radiant temperature* (MRT) diasumsikan sama dengan temperatur udara. Hal tersebut didasarkan pada pernyataan bahwa ketika objek amatan tidak berada di dekat jendela yang dingin atau permukaan lain yang dingin atau panas, *mean radiant temperature* (MRT) memiliki nilai yang sama dengan temperatur udara (Stanton, Neville 2005: 63-4).

5. Kecepatan udara

Kecepatan udara dapat didefinisikan sebagai laju pergerakan udara pada suatu titik tanpa memperhatikan arah (ASHRAE, 2004: 2). Pada umumnya kecepatan udara dinyatakan dalam satuan meter per detik.

6. Kelembaban relatif

Kelembaban relatif atau *relative humidity* adalah rasio antara jumlah uap air di udara dengan jumlah uap air di udara yang mampu ditahan pada temperatur dan tekanan udara tertentu (ASHRAE, 2004: 2). Pada suatu lokasi dengan kelembaban relatif tinggi akan berdampak pada berkurangnya kemampuan tubuh untuk berkeringat dan akan mengakibatkan berkurangnya pula kemampuan *heat loss* tubuh. Lokasi dengan nilai kelembaban relatif yang rendah (<25%) juga tidak nyaman bagi tubuh. Tingkat kelembaban relatif yang disarankan pada ruangan berkisar antara 30% - 70%.

2.6.2 Persamaan PMV

Persamaan (2-1) merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai PMV dengan kondisi ruangan tidak mendapatkan radiasi sinar matahari secara langsung. Dan persamaan (2-2) sampai dengan persamaan (2-4) merupakan persamaan untuk membantu menghitung PMV.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3}x[5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42x[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5}M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}x[(t_{cl} + 273)^4 - (MRT + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad (2-1)$$

Sumber: Stanton (2005: 63-4)ACCE

Dimana:

$$t_{cl} = 3.57 - 0.028(M - W) - I_{cl}\{3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)\} \quad (2-2)$$

Sumber: Stanton (2005: 63-4)

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \text{ untuk } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{ar}}$$

$$h_c = 12.1\sqrt{v_{ar}} \text{ untuk } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \quad (2-3)$$

Sumber: Stanton (2005: 63-4)

$$f_{cl} = 1.00 + 1.290 I_{cl} \text{ untuk } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645 I_{cl} \text{ untuk } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W} \quad (2-4)$$

Sumber: Stanton (2005: 63-4)

dengan:

PMV = *Predicted mean vote*

M = nilai metabolisme dari area permukaan tubuh (W/m^2)

W = kegiatan eksternal = 0 untuk kebanyakan aktivitas (W/m^2)

I_{cl} = daya tahan termal pada pakaian ($\text{m}^2\text{K/W}$)

f_{cl} = rasio area permukaan area berpakaian dengan area tidak berpakaian

t_a = temperatur udara ($^{\circ}\text{C}$)

$\bar{t}_r$ = rata-rata temperatur radiant ($^{\circ}\text{C}$)

v_{ar} = kecepatan relatif udara terhadap tubuh (m/s)

p_a = *partial water vapour pressure* (Pa)

h_c = *convective heat transfer* ($\text{W/m}^2\text{K}$)

t_{cl} = temperatur permukaan pakaian ($^{\circ}\text{C}$)

2.7 Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) merupakan turunan dari PMV yang memprediksi persentase orang yang tidak puas secara termal dari sejumlah besar orang (Stanton, 2005:63-1). Saat nilai dari PMV sudah diketahui, nilai PPD bisa dihitung menggunakan Persamaan (2-5).

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2)} \quad (2-8)$$

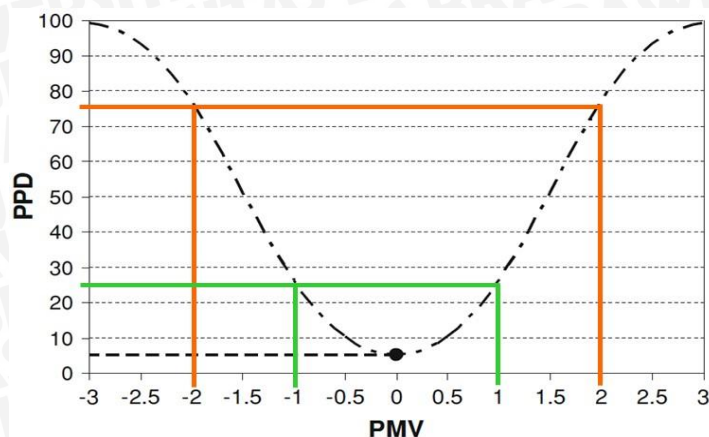
Sumber: ISO 7730 (1994: 3)

PPD = *Predicted Percentage of Dissatisfied*

Untuk kondisi ruangan dengan radiasi sinar matahari langsung, terdapat penyesuaian persamaan untuk menghitung nilai PPD. Penyesuaian tersebut dapat dilihat pada Persamaan (2-9). Prediksi dari distribusi nilai PPD terhadap PMV dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.2. Berdasarkan Gambar 2.2, dapat diketahui bahwa nilai terendah PPD adalah 5%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada keadaan netral sekalipun, akan ada sekitar 5% orang yang merasa tidak puas terhadap kondisi termal yang ada.

$$PPD = PPD_{no\ solar} + PPD_{solar\ radiat} \quad (2-9)$$

Sumber: Chaiyapinunt (2004: 3)



Gambar 2.2 Evolution of PPD on the basis of PMV

Sumber: ASHRAE (2004: 55)

Hubungan antara PMV sebagai fungsi dari PPD tertera pada Gambar 10 berikut ini. Pada grafik tersebut dapat disimpulkan secara garis besar adalah: ketika skala PMV -3 atau 3, maka 100% pengguna tidak puas; Ketika skala PMV -2 atau 2, maka sekitar 75% pengguna tidak puas atau 25% puas; Ketika skala PMV -1 atau 1, maka sekitar 25% pengguna tidak puas atau sekitar 75% puas; Ketika skala PMV 0 (netral), maka sekitar 5% pengguna tidak puas atau 95% puas, ini realitas yang ada bahwa tidak bisa mencapai kepuasan pengguna sampai 100%.

2.8 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational fluid dynamics (CFD) adalah metode perhitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas, dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya (Chung, 2002:3). Prinsip dari CFD adalah suatu ruang yang berisi fluida dibagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel dan prosesnya dinamakan *meshing*. Bagian-bagian yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol penghitungan yang akan dilakukan. Nantinya, pada setiap titik kontrol penghitungan akan dilakukan penghitungan oleh aplikasi dengan batasan domain dan *boundary condition* yang telah ditentukan. Prinsip inilah yang banyak dipakai pada proses penghitungan dengan menggunakan bantuan komputasi komputer.

Pada awalnya pemakaian konsep CFD hanya digunakan untuk aliran fluida dan reaksi kimia. Namun seiring dengan perkembangannya industri, ditahun 90-an membuat CFD makin dibutuhkan pada berbagai aplikasi lain. Contoh sekarang ini banyak sekali paket-paket *software* CAD menyertakan konsep CFD yang dipakai untuk menganalisis *stress* yang terjadi pada desain yang dibuat. Pemakaian CFD secara umum dipakai untuk memprediksi

aliran dan panas, transfer massa, perubahan fasa, reaksi kimia, gerakan mekanis, tegangan dan tumpuan pada benda solid, serta gelembung elektromagnetik

Secara umum proses penghitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama yaitu *pre processor*, *processor*, dan *post processor*.

1. Tahap *pre processor*

Pada tahap ini dilakukan *input data*, mulai dari pendefinisian domain serta pendefinisian kondisi batas atau *boundary conditions*. Selain *boundary conditions*, pada tahap ini juga didefinisikan sumber panas atau *heat sources*. Untuk sumber panas yang masuk melalui permukaan galvalum, dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-8. Pada tahap ini juga sebuah benda atau ruangan yang akan dianalisa dibagi-bagi dengan jumlah *grid* tertentu atau sering juga disebut dengan *meshing*.

Berikut merupakan perhitungan *heat transfer* melalui permukaan galvalum.

$$q = \Delta T \times h \quad (2-8)$$

Sumber : Chaiyapinunt (2005)

dengan:

q = intensitas *heat transfer* sinar matahari melalui permukaan galvalum

ΔT = selisih suhu antara di dalam dan di luar gedung

h = nilai konduktivitas material

Menurut Prasasto satwiko (2005), Di dalam penentuan ventilasi udara yang baik, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan diantaranya adalah *volume ruangan*, dan *air change rate*.

$$Q = V \times ACH \quad (2-9)$$

Dengan:

Q = kapasitas ventilasi

V = Volume ruangan

ACH = *Air Change Rate* (4,5 t/h= ketentuan untuk warehouse);

Area ventilasi yang dibutuhkan:

$$A = Q / v$$

Dengan:

A = Area ventilasi yang dibutuhkan (m^2)

Q = Kapasitas Ventilasi (m^3/h)

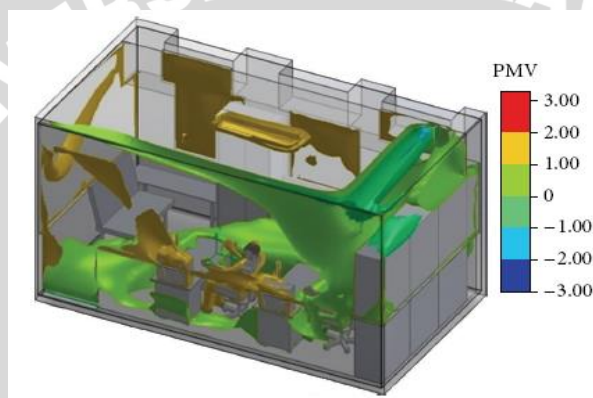
v = kecepatan angin (m/s)

2. Tahap *processor*

Pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data-data *input* dengan persamaan yang terlibat secara *iteratif*. Artinya penghitungan dilakukan hingga hasil menuju eror terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Penghitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume kontrol dengan proses integrasi persamaan diskrit.

3. Tahap *post processor*

Pada tahap ini hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik, bahkan animasi dengan pola warna tertentu. Gambar 2.3 merupakan contoh dari hasil tahap *post processor* yang berupa gambar sebaran nilai PMV pada suatu ruangan. Nilai PMV dapat diketahui berdasarkan warna yang ada pada ruangan tersebut.



Gambar 2.3 Contoh hasil tahap *post processor*

Sumber: Chou (2014:5)

Hal yang paling mendasar mengapa konsep CFD (*software* CFD) banyak sekali digunakan dalam dunia industri adalah dengan CFD dapat dilakukan analisis terhadap suatu sistem dengan lebih mudah. Dengan bantuan CFD maka biaya eksperimen dan waktu yang panjang dalam melakukan eksperimen dapat dikurangi. Dengan kata lain proses *design engineering* yang dilakukan menjadi lebih singkat. Hal ini yang mendasari pemakaian konsep CFD adalah pemahaman lebih dalam atas suatu masalah yang akan diselesaikan atau dalam hal ini mengenai karakteristik aliran fluida dilihat dari grafik, kontur, atau animasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian adalah langkah-langkah terstruktur yang dilakukan dalam penelitian. Pada bab ini akan digambarkan mengenai prosedur dalam mengumpulkan dan mengolah data, termasuk di dalamnya jenis penelitian, tempat dan waktu penelitian, serta langkah-langkah penelitian yang didukung dengan gambar diagram alir penelitian.

3.1 Jenis Penelitian

Jenis 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 agar dapat mengeksplorasi, mengklarifikasi dan menginterpretasikan dari suatu fenomena ataupun kenyataan sosial berdasarkan kenyataan yang sedang berlangsung. Jenis penelitian ini menghasilkan gambaran akurat tentang sebuah mekanisme proses atau hubungan, dan baik secara verbal maupun numerikal.

3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di perusahaan produksi penyedap makanan yang bergerak di bidang makanan. Penelitian dimulai pada bulan September 2016 sampai bulan Maret 2017.

3.3 Tahap Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahap yakni tahap pendahuluan, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data serta tahap analisis dan pembahasan.

3.3.1 Tahap Pendahuluan

Adapun tahap pendahuluan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Studi Lapangan

Metode ini digunakan di dalam pengumpulan data yang dilakukan secara langsung, dimana peneliti melakukan pengamatan secara langsung ke tempat penelitian yaitu di *warehouse* perusahaan produksi penyedap makanan. Kegiatan ini dimaksudkan

untuk memperoleh data primer dan permasalahan nyata yang terjadi pada perusahaan.

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 di *warehouse* perusahaan produksi penyedap makanan.

4. Perumusan Masalah

Setelah mengidentifikasi permasalahan, peneliti merumuskan permasalahan yang ada sesuai dengan kenyataan di lapangan, yaitu bagaimana *heat stress* dan kenyamanan termal pekerja pada bagian *warehouse* di perusahaan produksi penyedap makanan.

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.

3.3.2 Tahap Pengumpulan Data

Data-data yang telah disebutkan sebelumnya diperoleh dengan berbagai metode. Berikut adalah metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Metode penelitian kepustakaan (*Library Research*)

Metode penelitian kepustakaan merupakan suatu metode yang digunakan untuk mendapatkan data dengan cara studi literatur di perpustakaan serta dengan membaca sumber-sumber data informasi lainnya yang berhubungan dengan pembahasan. Literatur yang digunakan adalah buku-buku terkait penerapan *thermal comfort*.

2. Metode penelitian lapangan (*Field Research*)

Metode ini digunakan dalam pengumpulan data secara langsung pada objek penelitian, teknik penelitian lapangan yang dipakai dalam penelitian ini adalah

sebagai berikut:

a. *Interview* atau Wawancara Pekerja

Suatu metode yang digunakan untuk memperoleh data dengan cara mengajukan pertanyaan kepada orang yang bersangkutan. Data yang diperoleh dari teknik wawancara ini adalah kenyamanan pekerja terhadap keadaan temperatur di perusahaan.

b. *Observasi*

Suatu metode yang digunakan untuk memperoleh data dengan cara mengadakan pengamatan langsung terhadap keadaan yang sebenarnya. Data yang diperoleh dari teknik observasi ini adalah data temperatur, data kecepatan udara, data kelembaban relatif baik di dalam *warehouse* maupun di luar *warehouse*.

c. *Dokumentasi*

Suatu metode yang digunakan untuk memperoleh data dengan cara menelusuri arsip-arsip atau catatan yang ada yang berkaitan dengan permasalahan yang sedang diteliti. Data yang diperoleh dari teknik dokumentasi ini adalah dokumentasi mengenai situasi masalah yang ditinjau dari segi kenyamanan termal pada masing-masing *warehouse*.

3.3.3 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 *clothing insulation*.

Nilai *clothing insulation* ini nantinya akan menjadi inputan untuk menghitung PMV dan PPD. Dimana *clothing insulation* di dapat dari seluruh pakaian yang digunakan oleh pekerja ketika berada di dalam *warehouse*. Satuan dari *clothing insulation* adalah *clo*. Dan untuk nilai *clothing insulation* digunakan asumsi bahwa pakaian yang dikenakan oleh pekerja menggunakan pakaian standar yang telah ditetapkan oleh perusahaan produksi penyedap makanan.

2. Perhitungan nilai *metabolic rate*.

Nilai *metabolic rate* juga nantinya akan menjadi inputan untuk menghitung PMV dan PPD. Nilai *metabolic rate* di dapat dari jenis kegiatan yang dilakukan pekerja *warehouse* perusahaan produksi penyedap makanan. Satuan dari *metabolic rate* adalah *met*.

3. Perhitungan nilai *Predictive Mean Vote* (PMV).

Perhitungan PMV dilakukan dengan dua cara yaitu dengan menggunakan persamaan rumus serta dengan menggunakan *software PMV calculator* yaitu CBE *Thermal Comfort*. Untuk nilai PMV yang baik harus mendekati nilai 0, dimana nilai 0 ini merepresentasikan keadaan normal yang tidak terlalu dingin maupun terlalu hangat.

4. Perhitungan nilai *Predicted Percentage of Dissatisfaction* (PPD).

Perhitungan PPD juga dilakukan menggunakan dua cara yaitu dengan persamaan rumus dan dengan menggunakan *software PMV calculator* yaitu CBE *Thermal Comfort*. Semakin kecil nilai PPD maka semakin baik keadaan termal tersebut. Karena semakin kecil nilai PPD, berarti semakin sedikit pula prosentase pekerja yang merasa tidak nyaman dengan keadaan termal tersebut.

5. Pemberian rekomendasi

Ada beberapa rekomendasi yang dapat diberikan. Untuk pemberian rekomendasi akan dilakukan simulasi agar mengetahui apakah hasil rekomendasi memberikan dampak yang signifikan terhadap human comfort pekerja. Dengan bantuan CFD maka biaya eksperimen dan waktu yang panjang dalam melakukan eksperimen dapat dikurangi. Dengan kata lain proses *design engineering* yang dilakukan menjadi lebih singkat. Hal ini yang mendasari pemakaian konsep CFD adalah pemahaman lebih dalam atas suatu masalah yang akan diselesaikan atau dalam hal ini mengenai karakteristik aliran fluida dilihat dari grafik, kontur, atau animasi.

3.3.4 Tahap Analisis dan Pembahasan

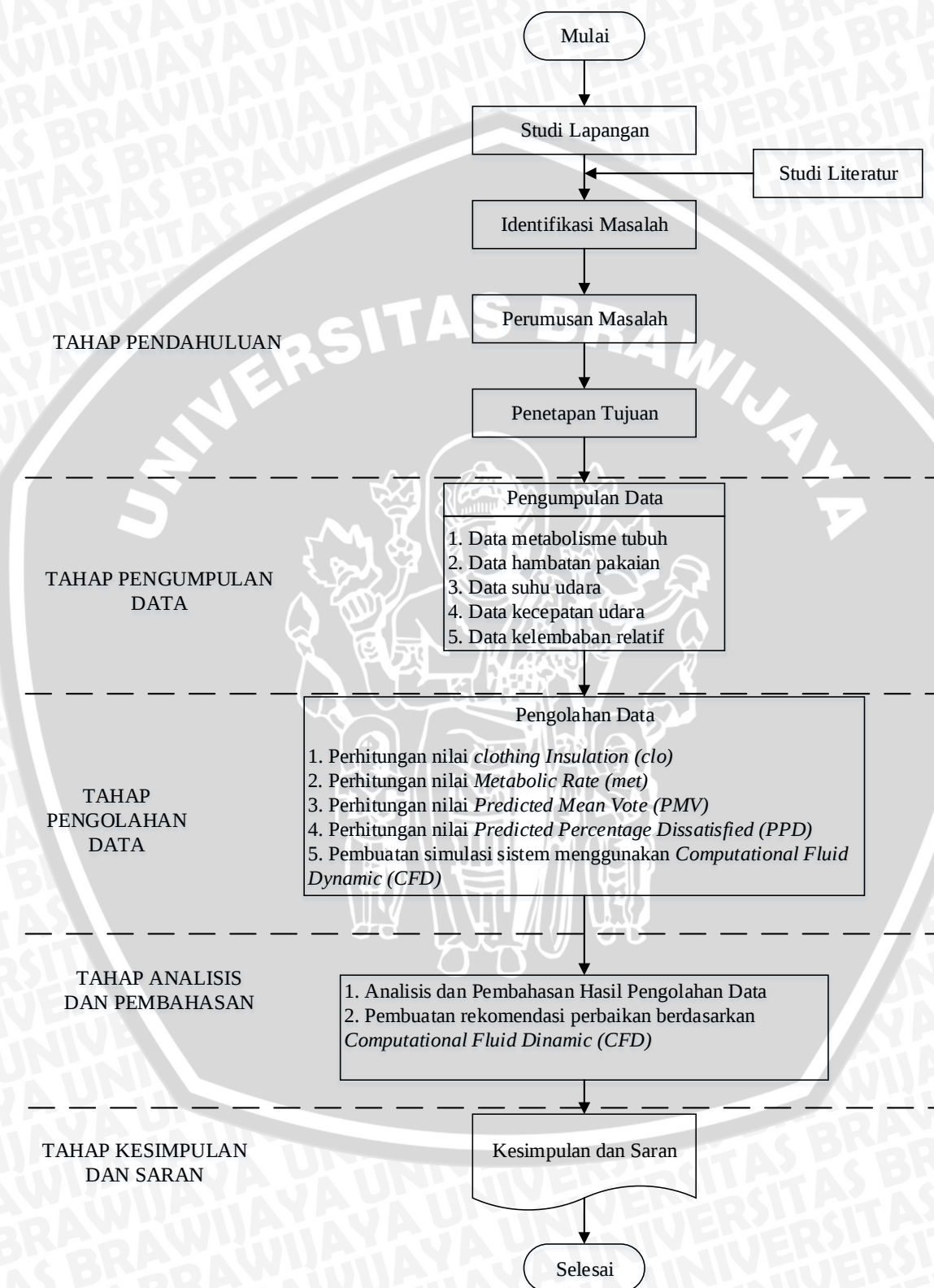
Tahap analisis dan pembahasan dilakukan setelah tahap pengolahan data selesai dilakukan. Analisis dan pembahasan dilakukan dengan melihat hasil perhitungan PMV dan PPD.

3.3.5 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.

3.4 Diagram Alir Penelitian

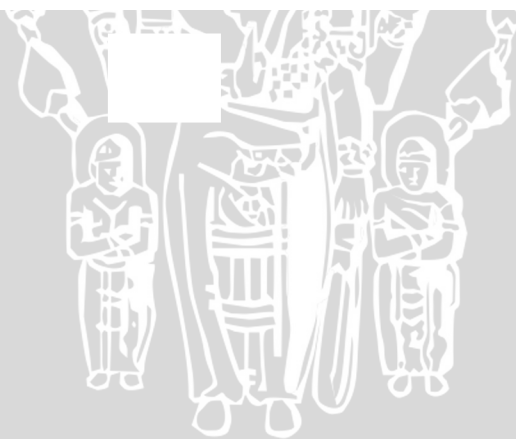
Berikut merupakan diagram alir penelitian yang akan dilakukan seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1 hingga 3.3.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai profil perusahaan, penjelasan tentang data-data yang dikumpulkan, pengolahan data menggunakan teori yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, serta pembahasan dari hasil penelitian untuk menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian.

4.1 Profil Perusahaan

Pada sub bab profil perusahaan ini akan dijelaskan mengenai sejarah berdirinya perusahaan produksi penyedap makanan, filosofi, visi, misi, *value*, struktur organisasi, dan proses produksi.

4.1.1 Gambaran Umum Perusahaan

Perusahaan produksi penyedap makanan berdiri pada tahun 1969 di Indonesia. Perusahaan produksi penyedap makanan ini telah berpengalaman lebih dari 100 tahun di dunia dan 40 tahun di Indonesia. Perusahaan produksi penyedap makanan ini aktif di 23 negara dan daerah di dunia, mempekerjakan sekitar 24.861 orang pada tahun 2004 dengan pendapatan tahunan AS\$9,84 milyar. Perusahaan ini dengan cepat berkembang ke negara lainnya, dengan adanya peresmian pada tahun 1956 oleh perusahaan induk. Sejak itu, perusahaan produksi penyedap makanan telah menjadi perusahaan yang bergerak ke bidang lainnya, meskipun kebanyakan dalam industri makanan, kemudian pada tahun 1969 perusahaan produksi penyedap makanan ini membuka pabrik besar di Indonesia yang berlokasi di Jawa Timur, hingga sampai saat ini perusahaan tersebut telah berkembang luas dan mendirikan lagi banyak cabang di beberapa kota di Indonesia.

Adanya pengelolaan yang baik dengan manajemen baru yang profesional untuk mengejar visi dalam persaingan internasional. Untuk mendukung hal tersebut perusahaan produksi penyedap makanan ini terus mengembangkan produk yang didukung dari teknologi yang ada. Kemampuan perusahaan dalam memenuhi semua kebutuhan *customer* dan selalu memberikan kualitas terbaik membuat perusahaan produksi penyedap makanan ini diterima secara luas tidak hanya di Indonesia, namun juga di beberapa negara berkembang dan maju, seperti New Zealand, Thailand, Jepang, Jerman.

Perusahaan produksi penyedap makanan memiliki memiliki filosofi, visi dan misi untuk mencapai target yang ditetapkan. Berikut ini merupakan visi dan misi dari Perusahaan produksi penyedap makanan yaitu:

1. Visi

Menjadi perusahaan yang memberikan kontribusi kepada kesehatan manusia secara global dengan menciptakan nilai-nilai yang unik secara terus menerus yang bermanfaat bagi pelanggan

2. Misi

Untuk dapat mencapai visi tersebut, Perusahaan produksi penyedap makanan telah membuat target yang lebih spesifik:

- a. Menjadi perusahaan bumbu No.1 di Indonesia
- b. Menjadi grup perusahaan yang mempromosikan kesehatan dengan pendekatan ilmiah untuk rasa dan kesehatan yang lebih baik

3. Nilai-Nilai

Dalam upaya mencapai visi yang besar, Perusahaan produksi penyedap makanan menerapkan nilai-nilai perusahaan yang merupakan prinsip-prinsip dasar yang memberi jalan tentang bagaimana segenap karyawan dan jajaran manajemen untuk bertindak setiap hari, berkembang, hingga berhubungan, baik di internal maupun pihak luar perusahaan. Nilai-Nilai yang ada di perusahaan dibagi menjadi dua yakni nilai-nilai perusahaan dan nilai-nilai SDM. Nilai-nilai perusahaan ini adalah

- a. Mematuhi peraturan pemerintah dan memperhatikan nilai-nilai yang berlaku di masyarakat
- b. Memperhatikan dan memenuhi kebutuhan konsumen
- c. Komunikasi dua arah yang terbuka dan jujur
- d. Disiplin dan bertanggung jawab
- e. Perbaikan dan kemajuan dimulai dari kegiatan sehari-hari, sehingga setiap individu serta organisasi perusahaan dapat tumbuh dan berkembang bersama-sama

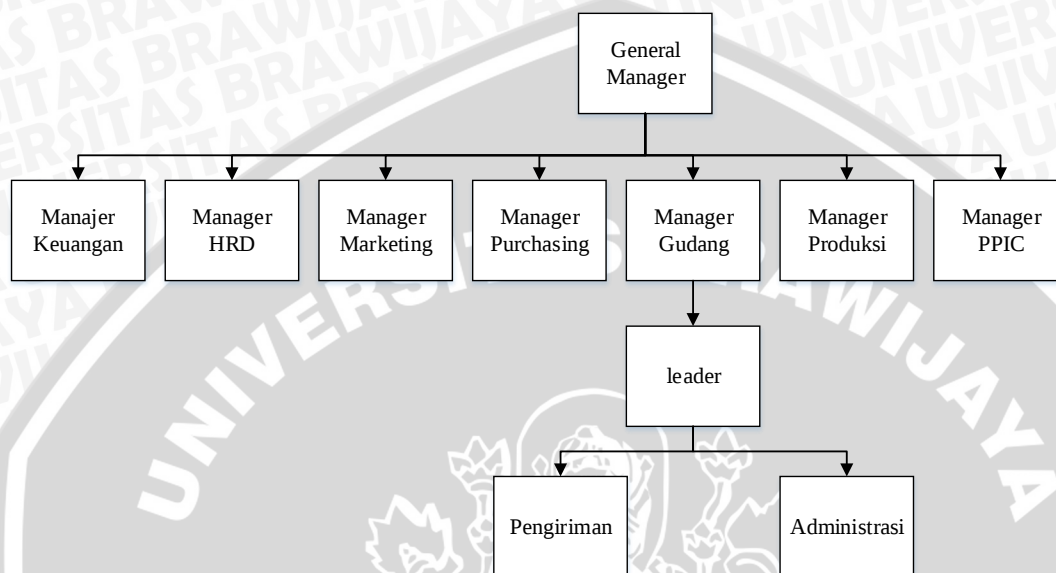
Nilai-nilai SDM yang diterapkan di perusahaan produksi penyedap makanan ini adalah:

- a. Komitmen yang kuat
- b. Kerjasama tim dan komunikasi yang baik
- c. Saling menghargai

d. Tantangan dan keinginan untuk maju

4.1.2 Struktur Organisasi

Dalam menjalankan usahanya perusahaan produksi penyedap makanan dipimpin oleh seorang *Manager*. Struktur organisasi pada perusahaan produksi penyedap makanan ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Struktur organisasi perusahaan produksi penyedap makanan

Penelitian ini dilaksanakan pada pengawasan bagian gudang. Pada penelitian ini studi kasus difokuskan pada bagian barang jadi seperti yang telah dijelaskan pada latar belakang. *Manager* gudang bertugas untuk bertanggung jawab terhadap *general manager* dan mengkoordinasi semua hal yang berhubungan dengan kegiatan penyimpanan yang ada di gudang, *manager* gudang ini harus mengawasi semua gudang yang ada di perusahaan produksi penyedap makanan. *Leader* setiap gudang terdiri dari 2 *leader* di mana tugas *leader* adalah memimpin jalannya kegiatan penyimpanan atau pengiriman maupun kegiatan administrasi. Divisi pengiriman mempunyai fungsi menjalankan kegiatan pengiriman baik itu berupa kegiatan *loading* maupun kegiatan *unloading*. Divisi administrasi bertugas untuk kegiatan administrasi untuk mengeluarkan atau memasukkan barang yang ada di *warehouse*. Untuk penelitian hanya terfokus di *finished goods warehouse*.

4.1.3 Foto Satelit Perusahaan

Perusahaan produksi penyedap makanan terletak pada lahan seluas kurang lebih 35 Ha di kawasan industri strategis dan mudah diakses di Jawa Timur, Indonesia. Total karyawan yang dimiliki saat ini ada 2007 orang dengan rincian karyawan reguler sebesar 1042 dan non reguler sebesar 965 orang. Gambar 4.2 menggambarkan foto satelit perusahaan produksi penyedap makanan.



Gambar 4.2 Foto satelit perusahaan produksi penyedap makanan

4.1.4 Proses Produksi

Proses produksi penyedap makanan pada perusahaan ini melalui 9 proses mulai dari *fermentation*, *crystallization*, *separation*, *decolorization*, *filtration*, *cystallization*, *separation*, *drying* dan *sieving*. Proses Fermentasi mengubah zat gula yang diambil oleh bakteri fermentasi dan bakteri ini akan mengubah zat gula menjadi asam glutamat. Produk ini selanjutnya dilakukan kristalisasi dengan menggunakan *sulfuric acid*, selanjutnya dilakukan pemisahan zat yang akan diambil adalah zat amina. Zat amina akan ditambahkan dengan NaOH agar mempunyai kadar Ph yang netral.

Proses selanjutnya adalah proses *decolorization* yaitu proses pelunturan warna dengan menggunakan karbon aktif yang berguna mengambil zat-zat yang tidak diperlukan. Setelah itu dilakukan proses penyaringan yang digunakan untuk mengambil zat cair dan dilakukan kristalisasi. Proses selanjutnya adalah proses pemisahan dan pengeringan. Tujuan proses pengeringan adalah agar produk yang dihasilkan dapat lebih tahan lama. Selanjutnya dilakukan proses *sieving* guna menganalisis hasil produk yang telah dibuat.

4.2 Pengumpulan Data

Pada sub bab pengumpulan data ini akan dijelaskan mengenai *layout* gudang, alat yang digunakan dalam pengambilan data pada *warehouse* barang jadi, mekanisme pengukuran, data metabolisme tubuh, data hambatan pakaian, dan data suhu udara kecepatan udara serta kelembaban udara.

4.2.1 Finished Goods Warehouse Layout

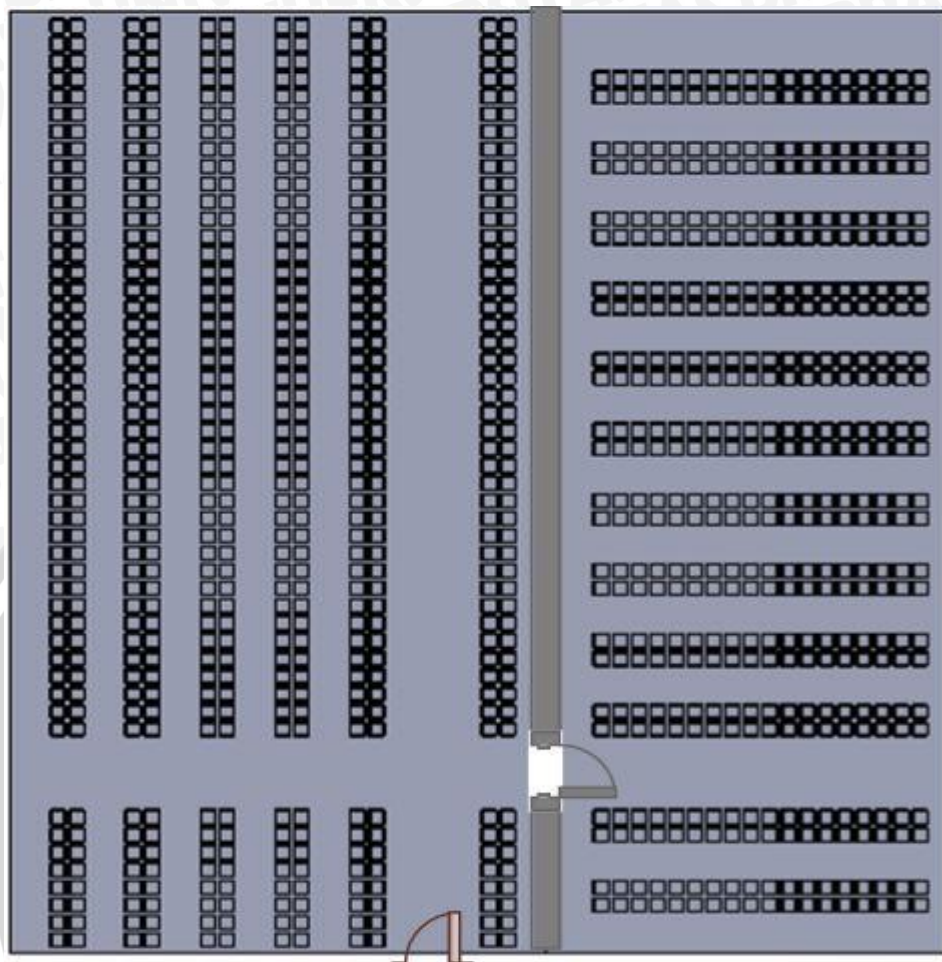
Finished goods warehouse layout memiliki luas 2450 m² dengan tinggi 7 m. *Finished goods warehouse* terdiri dari 2 *warehouse*, yaitu *warehouse 3* dan *warehouse 4*. *Warehouse 4* memiliki luas 1400 m², sedangkan *warehouse 3* memiliki luas 1050 m². Tabel 4.1 dimensi dari ruangan serta masing-masing pintu yang ada pada *finished goods warehouse*.

Tabel 4.1 Dimensi Bagian *Finished Goods Warehouse*

No	Bagian	Dimensi
1	<i>Finished goods warehouse layout</i>	Panjang : 70 m Lebar : 35 m Tinggi : 8 m
2	<i>Warehouse 3</i>	Panjang : 40 m Lebar : 35 m Tinggi : 8m
3	<i>Warehouse 4</i>	Panjang : 30 m Lebar : 35 m Tinggi : 8m
4	Pintu 1 (<i>Warehouse 4</i>)	Lebar : 3 m Tinggi : 4 m
5	Pintu 2 (<i>Warehouse 3</i>)	Lebar : 3 m Tinggi : 4 m

Di dalam *finished goods warehouse* mempunyai sistem *racking* dimana jumlah *racking* yang diperbolehkan hanya mencapai 2 produk saja. Di *warehouse* ini hanya ada 1 pintu yang berfungsi untuk pintu masuk dan pintu keluar. Jenis penyimpanan yang ada

di dalam warehouse ini adalah barang jadi. Untuk gambaran *finished goods warehouse* dapat dilihat di gambar 4.3.



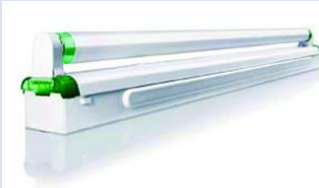
Gambar 4.3 *Finished goods warehouse layout*

Di dalam *finished goods warehouse* terdapat fasilitas pendukung. Tabel 4.2 menunjukkan jumlah, fungsi, dan spesifikasi fasilitas yang ada pada *finished goods warehouse*.

Tabel 4.2 Fasilitas Pendukung *Finished Goods Warehouse*

No	Nama Mesin/Alat	Jumlah	Fungsi	Dimensi	Gambar
1	Forklift	4	Digunakan untuk memindahkan produk ke kointainer	Panjang : 220,5 cm Lebar : 1100 cm Tinggi : 2000 cm	
2	Pallet	1020	Digunakan untuk proses penyimpanan produk	Panjang : 110 cm Lebar : 110 cm Tinggi : 15 cm	

Tabel 4.2 Fasilitas Pendukung *Finished Goods Warehouse* (Lanjutan)

No	Nama Mesin/Alat	Jumlah	Fungsi	Dimensi			Gambar
3	Lampu	42	Penerangan	Panjang	:	64 cm	
				Lebar	:	4 cm	
				Tinggi	:	8 cm	

4.2.2 Alat yang digunakan

Penelitian ini menggunakan beberapa alat untuk mengukur beberapa data yang nantinya akan digunakan dalam menghitung *thermal comfort* yang ada di *finished goods warehouse*. Adapun peralatan yang digunakan dalam pengumpulan data pada penelitian ini antara lain:

1. *Measuring Tape*

Measuring tape digunakan untuk mengukur dimensi- dimensi fasilitas yang tersedia pada *finished goods warehouse*. Gambar 4.4 adalah gambar dari *measuring tape*. *Measuring tape* yang digunakan pada penelitian ini merupakan *measuring tape* yang memiliki kapasitas ukur hingga 5 meter.



Gambar 4.4 *Measuring tape*

2. *Air Velometer*

Air velometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur *air velocity*, *air temperature*, dan *relative humidity*. *Air velometer* yang digunakan pada penelitian ini adalah *air velometer* dengan tipe AVM440-A. Gambar 4.5 adalah gambar dari *air velometer* dengan tipe AVM440-A. *Air velometer* dengan tipe AVM440-A mampu mengukur *air temperature* (suhu udara) mulai dari -10 °C hingga 60 °C dengan tingkat akurasi $\pm 0,3$ °C. Untuk *air velocity* (kecepatan udara), *air velometer* dengan tipe AVM440-A mampu mengukur kecepatan udara mulai dari 0 m/s hingga 30 m/s dengan

tingkat akurasi $\pm 0,015$ m/s, sedangkan untuk *relative humidity* (kelembaban relatif), *air velometer* dengan tipe AVM440-A mampu mengukur kelembaban relatif mulai dari 0% hingga 95% dengan tingkat akurasi $\pm 3\%$.



Gambar 4.5 Air velometer dengan tipe AVM440-A

4.2.3 Data Metabolisme Tubuh

Laju metabolisme atau *metabolism rate* pekerja *finished goods warehouse* akan memiliki nilai yang sama. Hal ini dikarenakan pekerjaan yang dilakukan pekerja ini sama. Berdasarkan standar yang diterapkan oleh ASHRAE 55 tahun 2004, penilaian *metabolism rate* aktivitas pekerja dinilai melalui pengamatan aktivitas yang dilakukan pekerja minimal selama 30 menit hingga 1 jam. Pekerjaan yang dilakukan oleh perusahaan *finished goods warehouse* belum memiliki SOP yang jelas, sehingga pembagian *job description* masih berubah-ubah setiap waktu dan bergantung situasi dan kondisi yang ada di perusahaan. Berdasarkan hasil pengamatan, pekerjaan yang dilakukan pekerja di *finished goods warehouse* meliputi mengendarai *forklift*, memeriksa nomor barang, memindahkan barang. Pekerjaan yang dilakukan oleh perusahaan *finished goods warehouse* belum memiliki pembagian yang jelas. Pembagian *job description* ini masih diberikan kepada orang yang berubah-ubah setiap waktu dan bergantung situasi dan kondisi yang ada di perusahaan.

4.2.4 Data Hambatan Pakaian

Data hambatan pakaian atau *clothing insulation* pekerja diperoleh dari setiap *item* pakaian yang digunakan oleh pekerja *finished goods warehouse*. Pakaian yang digunakan pekerja pada *finished goods warehouse* merupakan seragam yang terdiri dari pakaian berkerah lengan pendek, celana panjang, pakaian dalam, kaos kaki sepanjang pergelangan

kaki, dan sepatu. Pakaian yang digunakan oleh pekerja sesuai dengan ketentuan yang telah ditetapkan oleh perusahaan. Gambar 4.6 menunjukkan pakaian yang digunakan oleh pekerja *finished goods warehouse* saat bekerja. telah oleh pekerja *finished goods*. telah *warehouse* saat bekerja oleh pekerja *finished goods warehouse* saat telah ditetapkan oleh oleh perusahaan.



a. Tampak depan



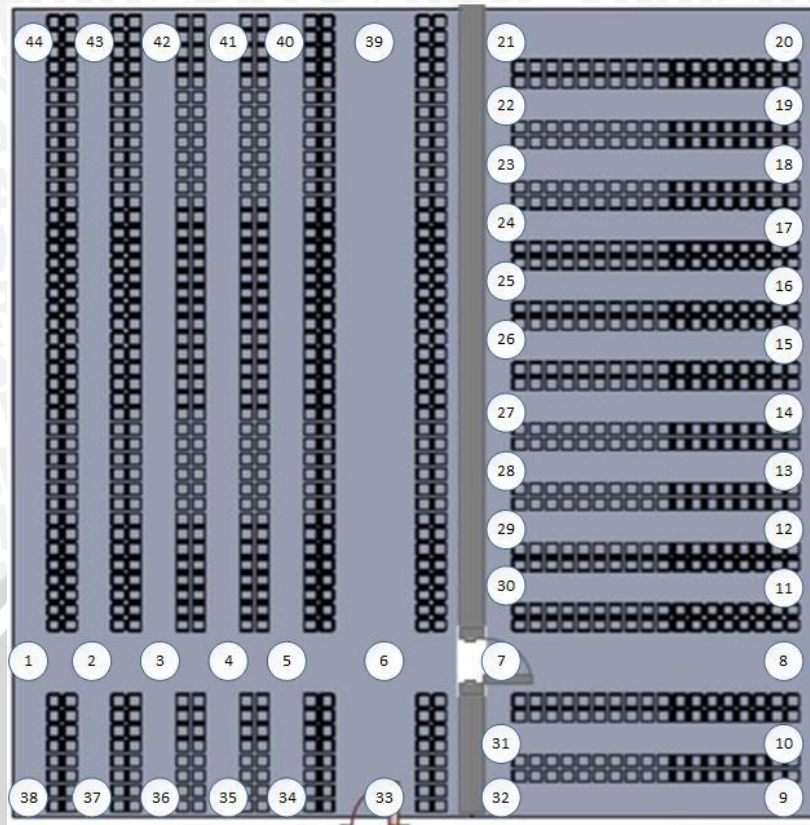
b Tampak samping

Gambar 4.6 Pakaian seragam pekerja *finished goods warehouse*

4.2.5 Mekanisme Pengukuran

Penelitian ini melakukan pengukuran data lingkungan *finished goods warehouse* dengan mekanisme sebagai berikut ini.

1. Pengambilan data lingkungan *finished goods warehouse* didasarkan ketentuan yang ditetapkan oleh ASHRAE (2004) yaitu data yang digunakan adalah pada saat terjadinya puncak aktivitas. Puncak aktivitas ekspor yang dilakukan di *finished goods warehouse* terjadi pada saat pukul 09.00-11.00.
2. Pengukuran lingkungan kerja dalam *finished goods warehouse* akan dilakukan sesuai dengan standar ASHRAE55-2004 yaitu dengan ketinggian 1,1 meter. Gambar 4.7 adalah *layout* titik pengambilan data lingkungan untuk *finished goods warehouse layout*.



Gambar 4.7 *Layout jalur pengambilan data finished goods warehouse layout.*

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat ada 44 titik dengan bulatan berwarna yang merupakan jalur tempat pengambilan data untuk penelitian ini pengambilan data dilakukan dengan ketinggian 1,1 m. Titik tersebut merupakan titik-titik pekerja yang paling sering dikunjungi untuk melakukan permindahan barang.

3. Pengukuran lingkungan kerja dalam *finished goods warehouse* akan dilakukan sesuai dengan standar ASHRAE55-2004 yaitu pengukuran keadaan termal tergantung dari elemen-elemen yang diukur. Air temperatur seharusnya diukur dalam rentang waktu lima menit paling sedikit dalam waktu selama dua jam. *Air velocity* seharusnya diukur dalam rentang waktu tiga menit paling sedikit selama dua jam dan *relative humidity* (RH) seharusnya diukur dalam rentang waktu lima menit paling sedikit selama dua jam.

Dari pengambilan data didapatkan data pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai Input PMV PPD

Titik	Air Tempt. °C	Air Speed m/s	RH ri%
1	32,78	0,029	40,05
2	32,76	0,012	40,25
3	32,77	0,015	39,71
4	32,73	0,015	39,72

Tabel 4.3 Nilai Input PMV PPD (Lanjutan)

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

Dari tabel 4.3 dapat diketahui bahwa nilai dari *air temperature* yang ada di *finished goods warehouse* hampir sama. *Air temperature* yang ada di *finished goods warehouse* berkisar antara 32,29 hingga 32,79. Nilai 32,29 berada di titik didekat pintu masuk yaitu titik ke-33 pada saat pengambilan data, sedangkan nilai 32,79 merata hampir disemua titik. Untuk kecepatan angin (*air speed*) mempunyai nilai dari 0,011 hingga 0,219. Nilai

0,219 berada di titik ke-33 pengambilan data di dekat pintu masuk, sedangkan nilai 0,011 berada di titik ke 9. *Relative Humidity* (RH) mempunyai nilai dari 38,92% hingga 43,09%. Nilai 38,92% berada di titik ke tigabelas pengambilan data, sedangkan nilai 43,09 berada di titik ke-33 pengambilan data.

4.3 Pengolahan Data

Pada sub bab pengolahan data ini akan dijelaskan mengenai perhitungan data metabolisme tubuh, perhitungan hambatan pakaian, perhitungan *Predicted Mean Vote* (PMV), perhitungan *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD).

4.3.1 Perhitungan Metabolisme Tubuh

Metabolisme tubuh adalah tingkat transformasi energi kimia menjadi kalor (panas) dan mekanik kerja oleh aktivitas metabolik dalam suatu organisme. Untuk penelitian ini penilaian dalam metabolisme tubuh pekerja *finished goods warehouse* berdasarkan kegiatan yang dilakukan pekerja *finished goods warehouse* ketika bekerja. Berdasarkan hasil pengamatan, aktivitas yang dilakukan pekerja di *finished goods warehouse* meliputi mengendarai forklift, memeriksa nomor barang, memindahkan barang. Dengan demikian maka nilai *metabolic rate* pekerja *finished goods warehouse* ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Penilaian *Matabolic 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

Dari tabel 4.4 dapat diketahui bahwa aktivitas yang dilakukan oleh perkerja *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.

4.3.2 Perhitungan Hambatan Pakaian

Berdasarkan Gambar 4.6 maka nilai *clothing insulation* atau hambatan pakaian untuk penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.5 yang merupakan penilaian terhadap *clothing insulation* atau hambatan pakaian pekerja di *finished goods warehouse* berdasarkan standar jenis pakaian yang digunakan oleh perusahaan.

Tabel 4.5 Nilai *Clothing Insulation* atau Hambatan Pakaian

Laki-laki	
Underwear	0.04
Baju kerja	0,49
Celana panjang	0.24
Kaos kaki <i>ankle</i>	0.02
Sepatu	0.02
Total	0.81

Dari tabel 4.5 dapat diketahui bahwa nilai dari *clothing insulation* atau hambatan pakaian pekerja di *finished goods warehouse* sebesar 0,81.

4.3.3 Perhitungan *Predicted Mean Vote (PMV)*

Untuk mengetahui kenyamanan termal yang dirasakan pekerja *finished goods warehouse* maka dilakukan penilaian PMV terhadap semua posisi yang memungkinkan pekerja melakukan pekerjaan. Nilai PMV didapatkan dari hasil perhitungan menggunakan Persamaan 2-1 hingga 2-4. Nilai PMV yang akan didapatkan dari hasil perhitungan akan digunakan untuk menunjukkan potensi kenyamanan thermal pekerja *finished goods warehouse*. Dalam hal ini semakin nilai PMV mendekati nilai 0 maka pekerja akan semakin nyaman. *Input* yang digunakan dalam menghitung nilai PMV ada 6 yaitu *air temperature*, *mean radiant temperatur*, *relative air velocity*, *relative humidity*, *clothing*, dan *metabolic rates*. Berikut merupakan contoh langkah-langkah perhitungan nilai PMV.

1. Mengkonversi satuan pada laju metabolisme dan hambatan pakaian.

$$M = 1,2 \text{ met}$$

$$1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$$

Sumber: ISO 7730 (1994)

$$M = 1,2 \times 58,2 = 69,84 \text{ W/m}^2$$

$$I_{cl} = 0,81 \text{ clo}$$

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

$$I_{cl} = 0,81 \times 0,155 = 0,12555 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

2. Menghitung f_{cl} , h_c , dan t_{cl}

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 I_{cl} \text{ karena } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{°C/W}$$

$$= 1,00 + (1,290 \times 0,12555)$$

$$= 1,1619595$$

$$h_c = 12,1 \sqrt{v_{ar}} \text{ karena } 2.38 (t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1 \sqrt{v_{ar}}$$

$$= 12,1 \sqrt{0,3}$$

$$= 20,957 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\begin{aligned} t_{cl} &= 35,7 - 0,028 (M - W) - I_{cl} \{3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (MRT + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \\ &= 35,7 - 0,028 (69,84 - 0) - 0,065 \{3,96 \times 10^{-8} 1,10062 \times [(t_{cl} + 273)^4 - (31,1 + 273)^4] + 1,084 \times 7,934 (t_{cl} - 31,1)\} \\ &= 31,1 \text{ °C} \end{aligned}$$

3. Menghitung nilai PMV

$$\begin{aligned} PMV &= (0,303e^{-0,036M} + 0,028)\{(M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6,99 (M - W) - p_a] - 0,42 \times [(M - W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,0014 M (34 - t_a) - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (MRT + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PMV &= (0,303e^{-0,036 \times 343,38} + 0,028)\{(69,84 - 0) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6,99 (122,22 - 0) - 69,8] - 0,42 \times [(122,22 - 0) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} 122,22 (5867 - 69,8) - 0,0014 122,22 (34 - 31,1) - 3,96 \times 10^{-8} 1,08 \times [(41,87 + 273)^4 - (31,1 + 273)^4] - 1,084 \times 7,934 (41,87 - 31,1)\} \end{aligned}$$

$$PMV = 2,40$$

4. Mengkonversi nilai PMV menjadi potensi tingkat *heat stress*

Tingkat *heat stress* yang dialami pekerja adalah *moderate heat stress* karena nilai PMV di titik ke-33 (+2,4) berada di bawah nilai +2,5. Dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa nilai dari PMV tersebut sebesar 2,4 dan memiliki tingkat *heat stress moderate*. Menurut Stanton nilai *mean radiant temperature* (MRT) diasumsikan sama dengan nilai *air temperature* jika tidak ada sumber panas yang mendekati objek penelitian. Dikarenakan tidak adanya alat untuk mengukur *mean radiant temperature* (LSI-LASTEM) dan tidak adanya sumber panas yang mendekati obyek penelitian, maka *mean radiant temperature* diasumsikan sama dengan *air temperature*. Rekapitulasi input dan hasil perhitungan PMV dan tingkat *heat stress* pada masing-masing lokasi pekerja ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 *Input dan Hasil Perhitungan PMV*

Titik	t_a (°C)	MRT (°C)	v_{ar} (m/s)	rh (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	PMV	Heat Stress Level
1	32,78	32,78	0,029	40,05	0,81	1,2	2,55	Strong
2	32,76	32,76	0,012	40,25	0,81	1,2	2,55	Strong
3	32,77	32,77	0,015	39,71	0,81	1,2	2,54	Strong
4	32,73	32,73	0,015	39,72	0,81	1,2	2,53	Strong
5	32,78	32,78	0,015	39,7	0,81	1,2	2,54	Strong
6	32,79	32,79	0,029	40,59	0,81	1,2	2,56	Strong
7	32,57	32,57	0,020	40,09	0,81	1,2	2,50	Strong
8	32,65	32,65	0,038	40,11	0,81	1,2	2,51	Strong
9	32,66	32,66	0,012	40,29	0,81	1,2	2,52	Strong
10	32,76	32,76	0,073	40,09	0,81	1,2	2,53	Strong
11	32,74	32,74	0,013	40,20	0,81	1,2	2,54	Strong
12	32,77	32,77	0,021	40,19	0,81	1,2	2,55	Strong
13	32,77	32,77	0,011	39,92	0,81	1,2	2,54	Strong
14	32,80	32,80	0,018	40,79	0,81	1,2	2,56	Strong
15	32,73	32,73	0,019	40,11	0,81	1,2	2,54	Strong
16	32,80	32,80	0,019	39,72	0,81	1,2	2,55	Strong
17	32,79	32,79	0,014	39,65	0,81	1,2	2,55	Strong
18	32,79	32,79	0,015	38,92	0,81	1,2	2,54	Strong
19	32,79	32,79	0,017	40,38	0,81	1,2	2,55	Strong
20	32,79	32,79	0,025	39,87	0,81	1,2	2,55	Strong
21	32,80	32,80	0,018	41,39	0,81	1,2	2,57	Strong
22	32,79	32,79	0,017	41,49	0,81	1,2	2,57	Strong
23	32,79	32,79	0,018	41,59	0,81	1,2	2,57	Strong
24	32,97	32,97	0,018	40,38	0,81	1,2	2,60	Strong
25	32,97	32,97	0,020	41,19	0,81	1,2	2,61	Strong
26	32,79	32,79	0,016	40,09	0,81	1,2	2,55	Strong
27	32,93	32,93	0,015	40,09	0,81	1,2	2,58	Strong
28	32,80	32,80	0,013	41,99	0,81	1,2	2,57	Strong
29	32,97	32,97	0,015	40,05	0,81	1,2	2,59	Strong
30	32,97	32,97	0,015	40,19	0,81	1,2	2,59	Strong
31	32,97	32,97	0,029	40,09	0,81	1,2	2,59	Strong
32	32,79	32,79	0,080	41,99	0,81	1,2	2,55	Strong
33	32,29	32,29	0,219	43,09	0,81	1,2	2,40	Moderate
34	32,79	32,79	0,015	39,70	0,81	1,2	2,55	Strong
35	32,79	32,79	0,012	40,29	0,81	1,2	2,55	Strong
36	32,69	32,69	0,073	40,09	0,81	1,2	2,51	Strong
37	32,69	32,69	0,013	40,19	0,81	1,2	2,53	Strong
38	32,93	32,93	0,021	41,19	0,81	1,2	2,60	Strong
39	32,79	32,79	0,025	38,92	0,81	1,2	2,54	Strong
40	32,69	32,69	0,023	41,79	0,81	1,2	2,55	Strong
41	32,69	32,69	0,027	40,09	0,81	1,2	2,53	Strong
42	32,69	32,69	0,019	40,09	0,81	1,2	2,53	Strong
43	32,67	32,67	0,017	41,99	0,81	1,2	2,54	Strong
44	32,67	32,67	0,015	41,59	0,81	1,2	2,54	Strong

Berdasarkan rekap hasil dari perhitungan pada Tabel 4.6 dapat diketahui bahwa nilai PMV tertinggi dirasakan oleh pekerja *finished goods warehouse* sebesar 2,61 sedangkan yang terendah sebesar 2,4 yaitu pada titik pintu masuk dan rata-rata sebesar 2,55. Dari

hasil penilaian *heat stress* dapat diketahui bahwa semua titik pengambilan data berada pada *heat stress level* yang *strong* kecuali titik ke-33 pengambilan data dengan *moderate heat stress*. Untuk mengetahui tingkat persentase kenyamanan thermal yang di rasakan pekerja *finished goods warehouse* maka dilakukan perhitungan *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD).

4.3.4 Perhitungan *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD).

Setelah menghitung nilai PMV, selanjutnya kita menghitung nilai PPD untuk mengetahui banyak pekerja *finished goods warehouse* yang merasa tidak puas. Nilai PMV akan dijadikan *input* pada perhitungan nilai PPD yang dihitung menggunakan Persamaan 2-7. Berikut merupakan contoh langkah-langkah perhitungan nilai PPD untuk pekerja *finished good warehouse*.

1. Menghitung nilai PPD

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2)}$$

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0,03353 \times 2,4^4 + 0,2179 \times 2,54^2)}$$

$$PPD = 91,2$$

Seluruh rekap perhitungan akan ditampilkan pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 *Input dan Hasil Perhitungan PMV, PPD, dan Tingkat Heat Stress Pekerja*

Titik	t_a (°C)	MRT (°C)	v_{ar} (m/s)	rh (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	PMV	PPD	Heat Stress Level
1	32,78	32,78	0,029	40,05	0,81	1,2	2,55	94,4	Strong
2	32,76	32,76	0,012	40,25	0,81	1,2	2,55	94,4	Strong
3	32,77	32,77	0,015	39,71	0,81	1,2	2,54	94,3	Strong
4	32,73	32,73	0,015	39,72	0,81	1,2	2,53	94,1	Strong
5	32,78	32,78	0,015	39,7	0,81	1,2	2,54	94,4	Strong
6	32,79	32,79	0,029	40,59	0,81	1,2	2,56	94,6	Strong
7	32,57	32,57	0,020	40,09	0,81	1,2	2,50	93,5	Strong
8	32,65	32,65	0,038	40,11	0,81	1,2	2,51	93,8	Strong
9	32,66	32,66	0,012	40,29	0,81	1,2	2,52	93,9	Strong
10	32,76	32,76	0,073	40,09	0,81	1,2	2,53	94,0	Strong
11	32,74	32,74	0,013	40,20	0,81	1,2	2,54	94,3	Strong
12	32,77	32,77	0,021	40,19	0,81	1,2	2,55	94,4	Strong
13	32,77	32,77	0,011	39,92	0,81	1,2	2,54	94,4	Strong
14	32,80	32,80	0,018	40,79	0,81	1,2	2,56	94,7	Strong
15	32,73	32,73	0,019	40,11	0,81	1,2	2,54	94,2	Strong
16	32,80	32,80	0,019	39,72	0,81	1,2	2,55	94,5	Strong
17	32,79	32,79	0,014	39,65	0,81	1,2	2,55	94,4	Strong
18	32,79	32,79	0,015	38,92	0,81	1,2	2,54	94,3	Strong
19	32,79	32,79	0,017	40,38	0,81	1,2	2,55	94,6	Strong
20	32,79	32,79	0,025	39,87	0,81	1,2	2,55	94,4	Strong
21	32,80	32,80	0,018	41,39	0,81	1,2	2,57	94,8	Strong
22	32,79	32,79	0,017	41,49	0,81	1,2	2,57	94,8	Strong

Tabel 4.7 *Input dan Hasil Perhitungan PMV, PPD, dan Tingkat Heat Stress Pekerja (Lanjutan)*

Titik	t_a (°C)	MRT (°C)	v_{ar} (m/s)	rh (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	PMV	PPD	Heat Stress Level
23	32,79	32,79	0,018	41,59	0,81	1,2	2,57	94,8	Strong
24	32,97	32,97	0,018	40,38	0,81	1,2	2,60	95,3	Strong
25	32,97	32,97	0,020	41,19	0,81	1,2	2,61	95,4	Strong
26	32,79	32,79	0,016	40,09	0,81	1,2	2,55	94,5	Strong
27	32,93	32,93	0,015	40,09	0,81	1,2	2,58	95,1	Strong
28	32,80	32,80	0,013	41,99	0,81	1,2	2,57	94,9	Strong
29	32,97	32,97	0,015	40,05	0,81	1,2	2,59	95,2	Strong
30	32,97	32,97	0,015	40,19	0,81	1,2	2,59	95,3	Strong
31	32,97	32,97	0,029	40,09	0,81	1,2	2,59	95,2	Strong
32	32,79	32,79	0,080	41,99	0,81	1,2	2,55	94,5	Strong
33	32,29	32,29	0,219	43,09	0,81	1,2	2,40	91,2	Moderate
34	32,79	32,79	0,015	39,70	0,81	1,2	2,55	94,4	Strong
35	32,79	32,79	0,012	40,29	0,81	1,2	2,55	94,5	Strong
36	32,69	32,69	0,073	40,09	0,81	1,2	2,51	93,7	Strong
37	32,69	32,69	0,013	40,19	0,81	1,2	2,53	94,1	Strong
38	32,93	32,93	0,021	41,19	0,81	1,2	2,60	95,3	Strong
39	32,79	32,79	0,025	38,92	0,81	1,2	2,54	94,3	Strong
40	32,69	32,69	0,023	41,79	0,81	1,2	2,55	94,4	Strong
41	32,69	32,69	0,027	40,09	0,81	1,2	2,53	94,0	Strong
42	32,69	32,69	0,019	40,09	0,81	1,2	2,53	94,0	Strong
43	32,67	32,67	0,017	41,99	0,81	1,2	2,54	94,3	Strong
44	32,67	32,67	0,015	41,59	0,81	1,2	2,54	94,3	Strong

Berdasarkan rekap hasil dari perhitungan pada Tabel 4.7 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.

4.3.5 Pembuatan Simulasi *Computational Fluid Dynamic*

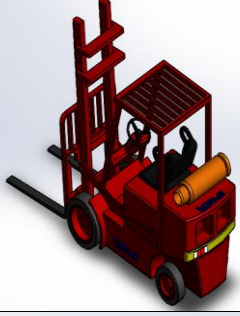
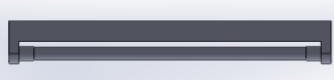
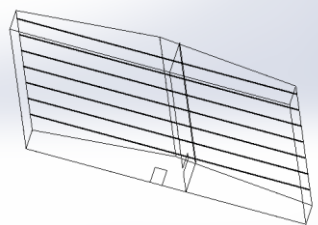
Terdapat beberapa proses yang harus dilakukan sebelum melakukan simulasi dengan *computational fluid dynamic (CFD)*. Proses pertama dalam pembuatan simulasi CFD adalah pembuatan *three dimension computer aided design (3D CAD)* model dari *finished*

goods warehouse. Pada proses ini menggambarkan semua produk yang ada di dalam *warehouse*. Proses selanjutnya adalah proses *running simulasi* yang terdapat beberapa tahap, yaitu *preprocessor* dan *processor* serta *post processor* hingga selanjutnya didapatkan hasil yang akan digunakan untuk melakukan penilaian dan evaluasi *heat stress* yang dialami oleh pekerja di *finished goods warehouse*.

4.3.5.1 Pembuatan 3D Computer Aided Design (3D CAD) Model

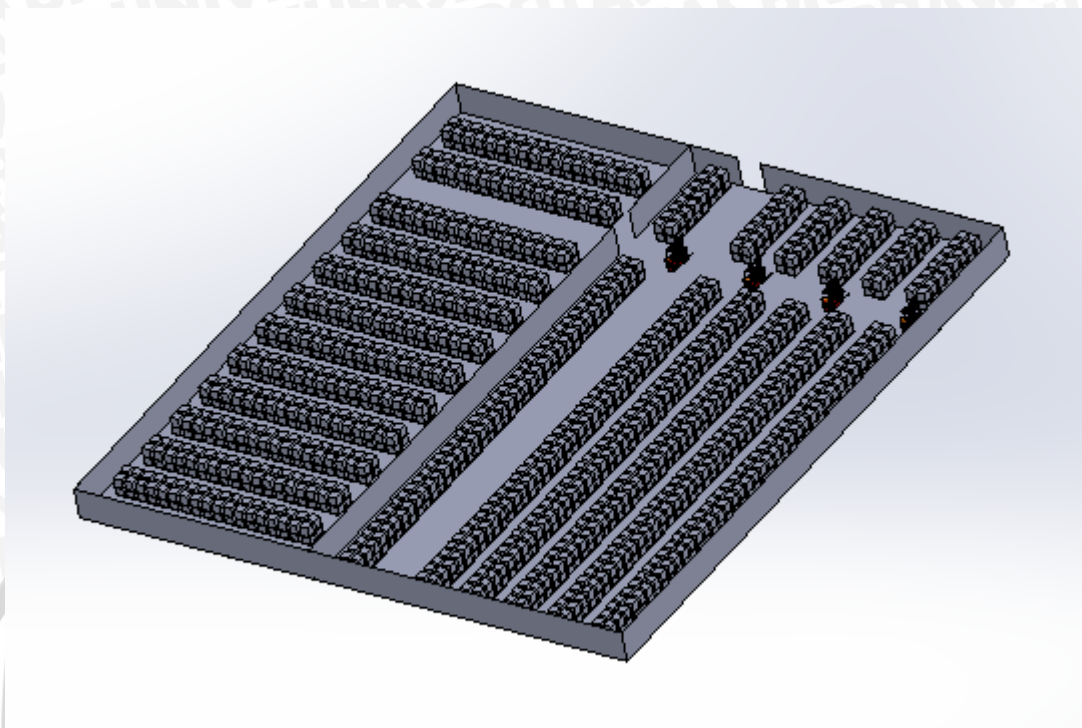
Proses pertama yang dilakukan dalam pembuatan *simulasi computational fluid dynamic (CFD)* merupakan pembuatan *3D computer aided design (CAD)* model. Seluruh benda dan fasilitas yang ada di *finished goods warehouse* digambarkan dalam bentuk *3D CAD model*. Sebelum melakukan pembuatan *3D CAD model*, terlebih dahulu dilakukan pengukuran dimensi masing-masing benda dan fasilitas yang terdapat pada *finished goods warehouse*. Setelah seluruh dimensi dari benda dan fasilitas didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah menggambarkan bentuk benda dan fasilitas menggunakan bantuan *software SolidWork 2016*. Tabel 4.8 menunjukkan hasil *3D CAD model* dari *finished goods warehouse* dan fasilitas pendukung yang ada di dalamnya.

Tabel 4.8 3D CAD Model Finished Goods Warehouse dan Fasilitasnya

No	Fasilitas	Gambar	No	Fasilitas	Gambar
1	Forklift		3	Lampu	
2	Produk		4	Finished Goods Warehouse	

Setelah membuat seluruh *3D CAD model* setiap benda dan fasilitas yang ada pada *finished goods warehouse*, langkah selanjutnya adalah melakukan proses *assembly*. Proses *assembly* (penyusunan) dilakukan guna menyesuaikan *layout 3D CAD model*

sesuai dengan *layout* asli dari *finished goods warehouse*. Hasil dari proses *assembly* *finished goods warehouse* dapat dilihat pada 4.8.



Gambar 4.8 Hasil dari proses *assembly* 3D CAD model *finished goods warehouse*

4.3.5.2 Running Simulasi Computational Fluid Dynamic Model Existing

Secara umum proses perhitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama yakni tahap *preprocessor*, *processor*, dan *post processor*. Pada tahap *preprocessor* dilakukan pendefinisian *boundary condition* hingga penentuan *meshing*. Pada tahap *processor* dilakukan pengolahan data yang telah dimasukkan pada proses awal secara otomatis. Pada tahap akhir yaitu *post processor*, hasil perhitungan yang telah didapatkan diinterpretasikan ke dalam gambar dengan pola warna tertentu sesuai dengan *flow simulation*.

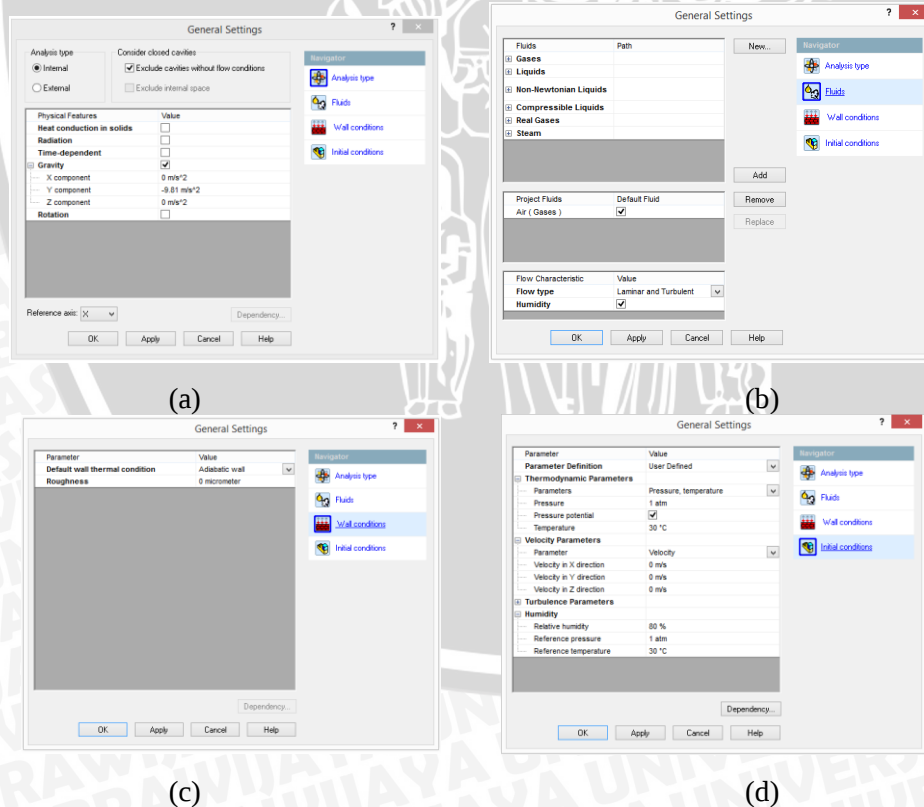
1. *Pre processor*

Pre processor merupakan pengaturan awal pada kondisi simulasi CFD dilakukan untuk menentukan proses perhitungan yang akan disimulasikan. Pengaturan yang digunakan untuk simulasi CFD penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. *Analysis type* atau tipe analisis yang digunakan merupakan jenis analisis internal. Analisis internal dipilih karena dalam penelitian ini akan dilakukan analisis terhadap aliran fluida yang ada dalam *finished goods warehouse*. Pertimbangan gravitasi bumi diperhitungkan dan berbasis pada sumbu Y dari 3D CAD model.

- b. *Fluids* atau jenis fluida yang dianalisis merupakan udara (*air*) dengan tipe aliran *luminar* dan *turbulent*. Kedua tipe aliran ini dipilih untuk proses analisis mempertimbangkan aliran udara baik secara paralel (*luminar*) maupun secara berputar-putar (*turbulent*). Simulasi CFD dalam penelitian ini juga mempertimbangkan kelembaban relatif (*humidity*).
- c. *Wall conditions* atau kondisi dari tembok dipilih jenis *transfer rate* atau tembok yang dapat mentransfer panas dan udara dikarenakan tembok terbuat dari galvalum dengan tingkat *heat transfer* sebesar 65 w/m^2 .
- d. *Initial conditions* atau inisialisasi kondisi dari lingkungan simulasi CFD diatur untuk *thermodynamic parameters* dan *humidity*. *Thermodynamic parameters* diatur pada tekanan 1 atm dan suhu $29,1^\circ \text{C}$. *Humidity* diatur pada kondisi 50%. *nitial conditions* di sekitar *finished goods warehouse* didapatkan dari pengukuran langsung.

Pengaturan awal simulasi CFD pada *software* SolidWork 2016 diatur pada menu *general setting*. Gambar 4.9 menunjukkan *user interface* pengaturan awal dari simulasi CFD kondisi *existing* pada penelitian ini.



Gambar 4.9 Pengaturan awal simulasi CFD

- (a) *Analysis type*
- (b) *Fluids*
- (c) *Wall Conditions*
- (d) *Initial conditions*

Setelah pengaturan awal pada menu *general setting* selesai dilakukan, proses selanjutnya merupakan melakukan pendefinisian *boundary conditions* dari *finished goods warehouse*. *Boundary conditions* batas kondisi pada lingkungan awal saat melakukan simulasi CFD. Hal yang harus didefinisikan pada *boundary conditions* antara lain adalah jalur masuk udara dan jalur keluar udara yang ada di *finished goods warehouse*. Data-data *boundary conditions* pada penelitian ini didapatkan dari pengukuran langsung maupun spesifikasi fasilitas yang ada. Tabel 4.9 menunjukkan *boundary conditions* pada lokasi masuk dan keluarnya udara pada *Finished goods warehouse*.

Tabel 4.9 *Boundary Conditions* pada *Finished Goods Warehouse*

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

Pintu 1 merupakan pembatas antara *finished goods warehouse* dengan area terbuka yang menjadi lokasi jalur pertukaran udara yang ada di *finished goods warehouse*. Berdasarkan hal tersebut, pintu 1 dapat didefinisikan sebagai *inlet velocity 1*. Udara yang masuk melalui pintu 1 memiliki kecepatan 0,231 m/s, suhu 29 °C, dan kelembaban relatif 50%. Nilai tersebut didapatkan dari pengukuran langsung yang dilakukan di pintu 1.

Setelah melakukan pendefinisian *boundary conditions*, proses yang dilakukan selanjutnya ialah melakukan pendefinisian sumber panas yang ada di dalam *finished goods warehouse*. Terdapat sumber panas pada *finished goods warehouse* yang dapat mempengaruhi udara di dalam *finished goods warehouse*. Sumber panas tersebut dapat mempengaruhi suhu, kelembaban, dan kecepatan udara dalam *finished goods warehouse*.

Sumber panas yang ada di *finished goods warehouse* ada 2 jenis yaitu yang berasal dari lampu dan juga dari atap. Laju transfer panas (*heat transfer rate*) dari masing-masing sumber panas tersebut dinyatakan dalam satuan watt. Lampu mempunyai daya 55 watt dan atap yang ada di *finished goods warehouse* terbuat dari galvalum. Menurut Nippon Stell & Sutitomo galvalum memiliki nilai *thermal conductivity* sebesar $111 \frac{W}{K}$. Hubungan antara *thermal conductivity* dan *heat transfer* dapat dilihat dari persamaan 2.8

Berikut merupakan perhitungan *heat transfer* melalui permukaan galvalum.

$$q = \Delta T \times h \quad (2-8)$$

$$q = 276.8 K \times 111 \frac{W}{K}$$

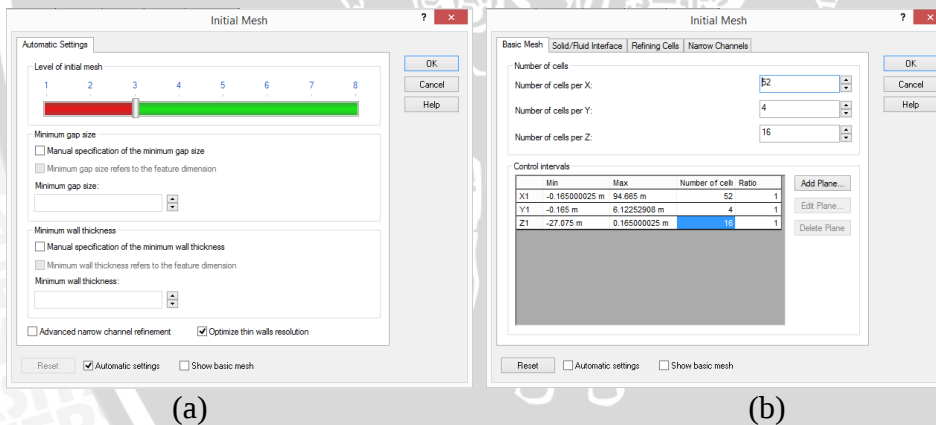
$$q = 30306.8 W$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, didapatkan nilai *heat transfer* sebesar

Tabel 4.10 *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. *Level of initial mesh* merupakan pilihan *level* yang disediakan *software* dalam membagi jumlah *grid* pada objek yang disimulasikan. Semakin besar *level of initial mesh* akan menghasilkan analisis yang lebih akurat namun perhitungannya akan memakan waktu yang lebih lama, begitu juga sebaliknya. Pada penelitian ini, *level of initial mesh* yang digunakan adalah 3. Gambar 4.10 menunjukkan pengaturan pada *initial mesh* secara otomatis dan manual. *Level 3* pada *level of initial mesh* dipilih karena *level* tersebut merupakan rekomendasi yang diberikan oleh *software*. *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. Ukuran *grid* yang dihasilkan dari *level 3 initial mesh* masih berada di bawah 200 cm, dimana ukuran tersebut merupakan batas ukuran *grid* yang disarankan dalam pengukuran kenyamanan termal (Bonefacic, 2015).

Gambar 4.10 *Initial mesh*

- (a) *Automatic settings*
(b) *Manual settings*

2. Processor

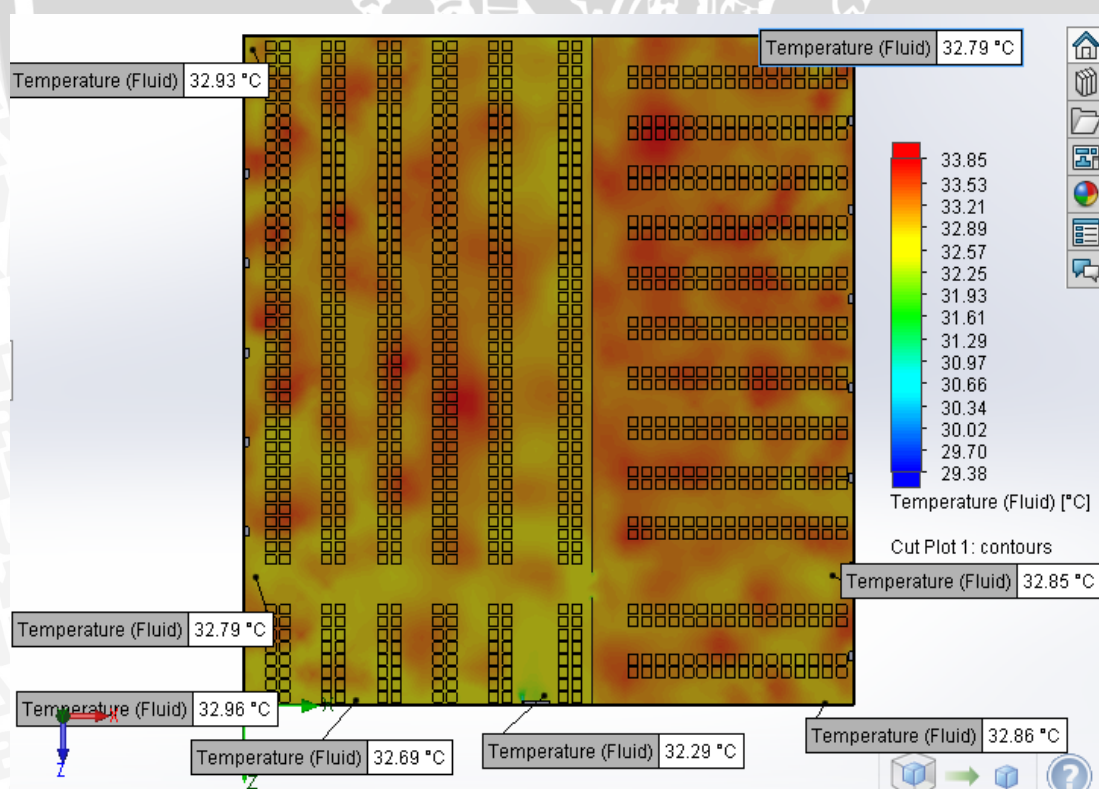
Tahap kedua setelah melakukan *preprocessor* adalah melakukan tahap *processor*. Pada tahap ini akan dilakukan *running* simulasi CFD berdasarkan model yang telah dibuat. *Running model finished goods warehouse* ini dilakukan berdasarkan *input* yang sebelumnya telah didefinisikan pada tahap *preprocessor*.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

secara otomatis oleh *software* SolidWork 2016 hingga didapatkan hasil simulasi CFD yang sesuai dengan kondisi nyata.

3. *Post processor*

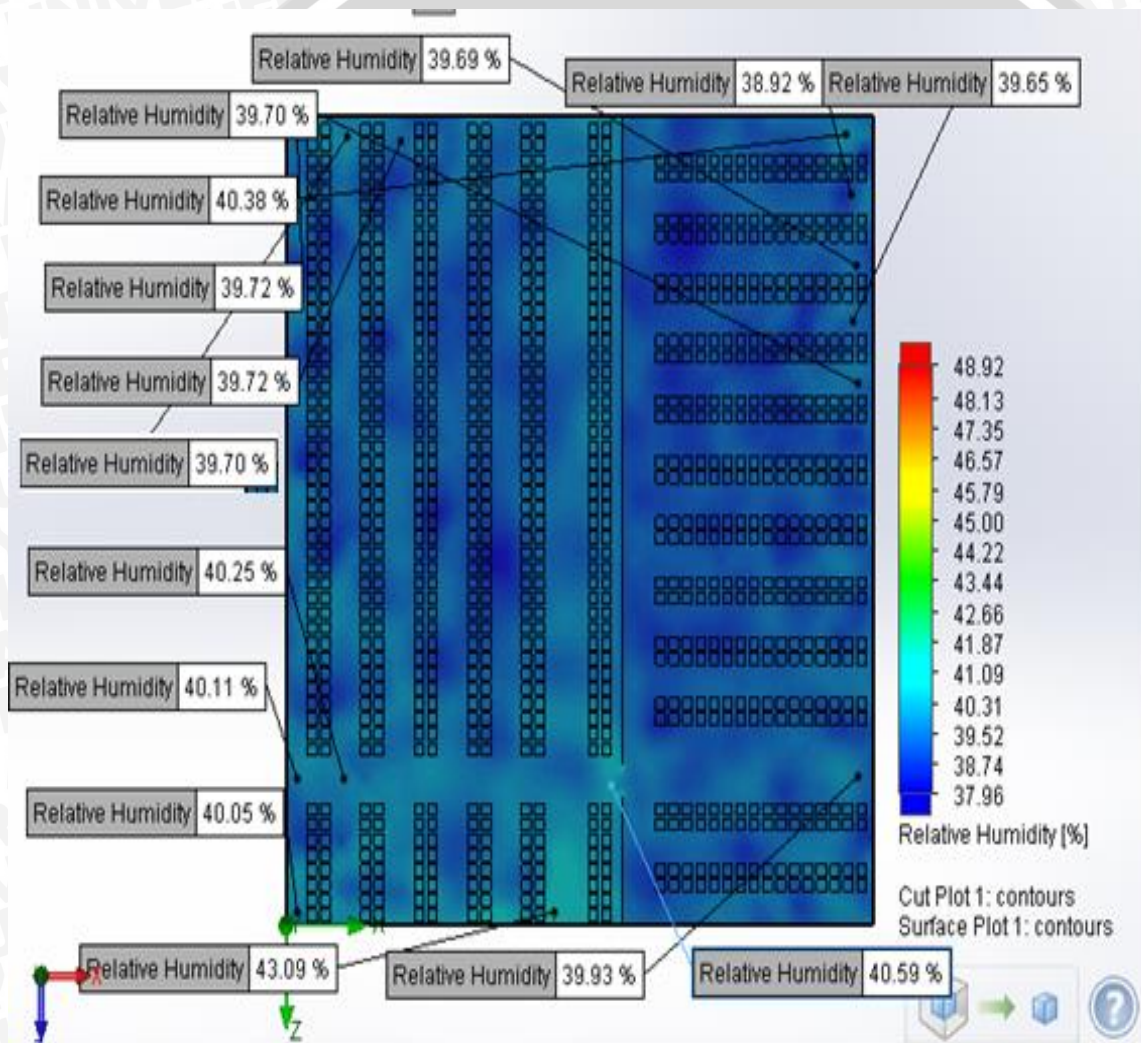
Tahap terakhir pada proses simulasi CFD adalah tahap *post processor*. Setelah tahap *processor* selesai dilakukan, maka dapat dilakukan analisis terhadap hasil tahap tersebut yang berupa kondisi termal *finished goods warehouse*. Tahap *post processor* pada penelitian ini dilakukan dengan menginterpretasikan 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 atau setinggi pengambilan data sesuai yang disarankan oleh ASRHAE 55. Gambar 4.11 hingga 4.13 menunjukkan hasil *post processor* yang menggambarkan sebaran *temperature*, *relative humidity*, dan *air velocity* pada *cut plot* 1,1 meter dari sumbu Y. Sebaran *temperature*, *relative humidity*, dan *air velocity* pada Gambar 4.11 hingga 4.13 digambarkan dalam gradasi warna biru tua hingga warna merah.



Gambar 4.11 Hasil sebaran *temperature* simulasi CFD *existing* pada ketinggian 1,1 meter

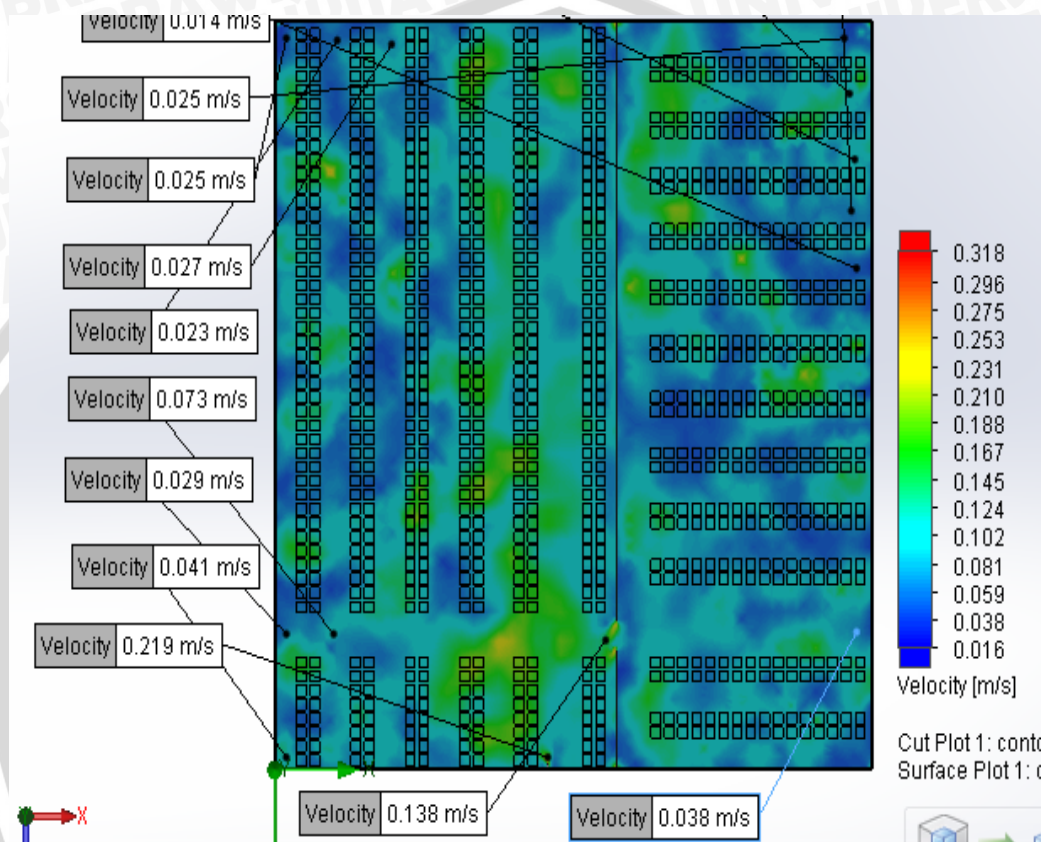
Gambar 4.11 menunjukkan sebaran *temperature* pada ketinggian 1,1 meter dalam *finished goods warehouse*. Sebaran *temperature* yang ditampilkan berada pada rentang warna biru tua untuk *temperature* 29,38°C hingga warna merah untuk *temperature* 33,85 °C. Sebaran *temperature* yang ada pada Gambar 4.11 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 4.12 Hasil sebaran *relative humidity* simulasi CFD existing pada ketinggian 1,1 meter

Gambar 4.12 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 4.12

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 4.12 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 4.13 Hasil sebaran *velocity* simulasi CFD *existing* pada ketinggian 1,1 meter

Gambar 4.13 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 4.13 bervariasi dari warna biru tua hingga warna kuning. Dari Gambar 4.13 dapat diketahui bahwa lokasi pekerja dengan *air velocity* tertinggi ada di dekat pintu keluar sebesar 0,219.

4.3.5.3 Validasi Simulasi *Computational Fluid Dynamic*

Proses validasi simulasi CFD dilakukan untuk mengetahui apakah model yang dibuat telah menggambarkan kondisi yang sebenarnya. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan nilai data lingkungan hasil pengukuran langsung dengan nilai data

lingkungan hasil simulasi CFD. Nilai yang dibandingkan adalah nilai *air temperature*, *air velocity*, dan *relative humidity* pada titik-titik pengambilan data dengan nilai dari hasil existing simulasi. Jika hasil simulasi CFD ini valid maka dapat dilanjutkan untuk melakukan rekomendasi perbaikan agar dapat mengoptimalkan *human comfort* dari pekerja *finished goods warehouse*.

Pada penelitian ini, uji validitas simulasi CFD dilakukan menggunakan bantuan *software SPSS 20*. Model simulasi CFD dikatakan valid apabila nilai data lingkungan hasil pengukuran dan nilai data lingkungan hasil simulasi tidak memiliki perbedaan rata-rata. Berikut ini merupakan hasil dari tes validitas dengan menggunakan *compare means* dengan uji *independent t-test*. *Compare means* dengan uji *independent t-test* dipilih karena seluruh data lingkungan berdistribusi normal.

Tabel 4.11 *Output Uji Validitas*

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Air Temperature	Equal variances assumed	,002	,965	,617	88	,540	,18182	,29463	-,41278	,77641
	Equal variances not assumed			,617	41,518	,541	,18182	,29463	-,41298	,77662
Relative Humidity	Equal variances assumed	1,791	,188	-,272	88	,787	-,17045	,62571	-1,43319	1,09228
	Equal variances not assumed			-,272	38,151	,787	-,17045	,62571	-1,43698	1,09607
Air Velocity	Equal variances assumed	1,457	,234	,336	88	,738	,008955	,026614	-,044755	,062664
	Equal variances not assumed			,336	38,075	,738	,008955	,026614	-,044919	,062828

a. Hipotesis

H_0 = tidak terdapat perbedaan rata-rata antara data hasil pengukuran dengan data hasil simulasi

H_1 = terdapat perbedaan rata-rata antara data hasil pengukuran dengan data hasil simulasi

b. Dengan menggunakan nilai taraf nyata (α) = 0,05, maka kriteria pengujian adalah sebagai berikut.

H_0 diterima apabila nilai *asympt. sig. (2-tailed)* $\geq 0,025$

H_0 ditolak apabila nilai *asympt. sig. (2-tailed)* $< 0,025$

c. Kesimpulan

Berdasarkan *output* pada Tabel 4.10 dapat diketahui bahwa *air temperature*, *air velocity*, dan *relative humidity* memiliki nilai *asympt. sig. (2-tailed)* $\geq 0,025$. Dengan demikian H_0 diterima dan dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata antara data hasil pengukuran dengan data hasil simulasi atau *model* yang dibuat telah valid. Uji perbedaan rata-rata data dilakukan menggunakan *independent sample t-test*. Proses uji validasi dapat dilihat pada Lampiran 2. Dari uji yang dilakukan, dapat diketahui bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata antara *air temperature*, *air velocity*, dan *relative humidity* hasil pengukuran dengan hasil simulasi CFD. Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa model simulasi yang dibuat telah valid atau sudah menggambarkan kondisi yang sebenarnya.

4.3.5.4 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*.

Pembagian *job desk* ini didasarkan pada tingkat ketelitian yang dibutuhkan berdasarkan pendapat dari manajemen *finished goods warehouse*. Pembagian *job desk* yang disarankan terbagi menjadi 3. Tabel 4.12 menunjukkan pembagian *job desk* yang disarankan.

Tabel 4.12 Tabel yang menunjukkan Pembagian *Job Desk* yang disarankan.

No	Tugas	Keterangan
1	Mengendarai <i>Forklift</i>	Mengendarai <i>forklift</i> dan melakukan perpindahan barang
2	Mengangkat atau mengepak	Dilakukan oleh 3 orang
3	Membuat file secara berdiri	Pembacaan kode dan input kondisi produk.

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 4.11 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*.

a. Pembuatan Rekomendasi Perbaikan 1

Pada rekomendasi perbaikan pertama yang akan dilakukan ialah menambahkan ventilasi pada *finished goods warehouse* untuk membuat aliran udara masuk dan keluar pada *finished goods warehouse*. Untuk menentukan kebutuhan ventilasi pada *Finished goods warehouse* dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan yang diberikan oleh Prasasto satwiko (2005).

Menurut Prasasto satwiko (2005), Di dalam penentuan ventilasi udara yang baik, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan diantaranya adalah *volume ruangan* (V) dan *air change rate* (ACH). Perhitungan area untuk ventilasi akan dihitung dengan persamaan 2.9:

$$Q = V \times \text{ACH}$$

$$Q = 26250 \text{ m}^3 \times 4,5 \text{ t/h} = 117,225 \text{ CMH (m}^3/\text{h)}$$

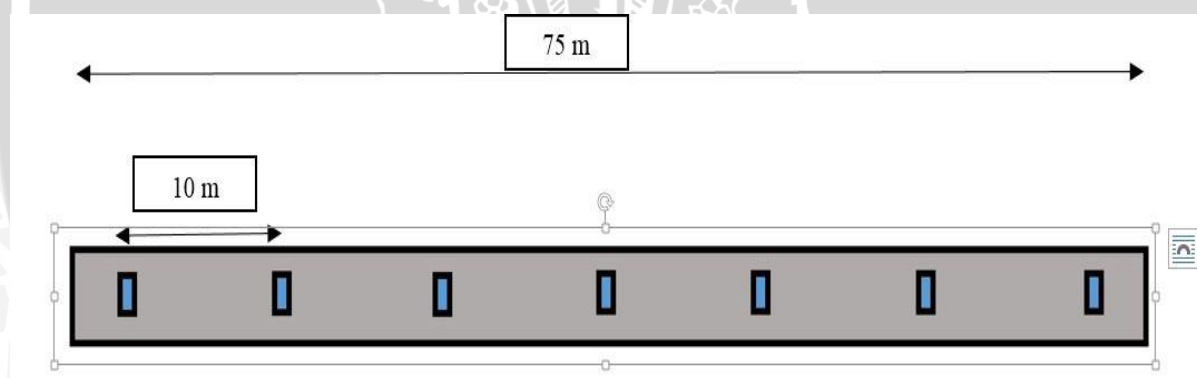
Area ventilasi yang dibutuhkan:

$$A = Q / v$$

$$A = 32,5625 \text{ m}^3/\text{s} / 1,2 \text{ m/s}$$

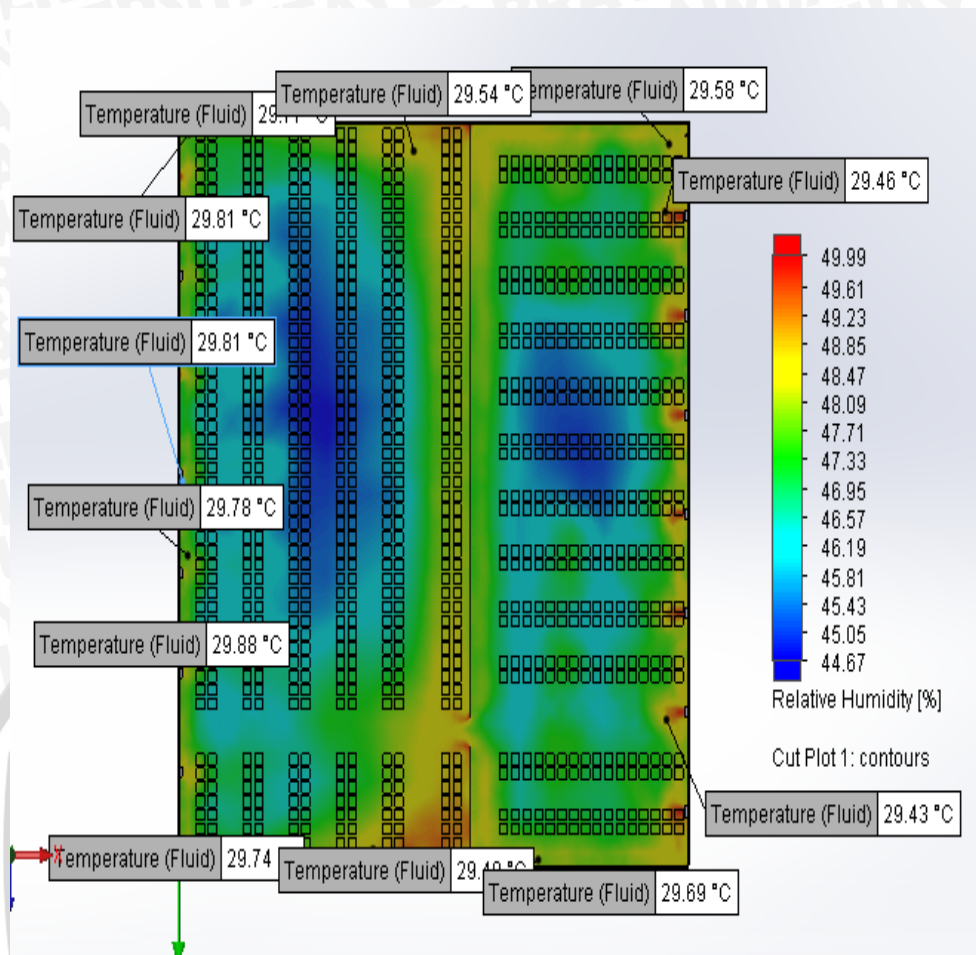
$$= 27,13 \text{ m}^2$$

Maka dengan ukuran ventilasi sebesar 2 m^2 diperlukan 14 buah ventilasi. Ventilasi yang baik adalah ventilasi yang bersebrangan (*cross ventilation*), artinya ventilasi diatur dengan dua arah misalnya selatan dan utara. Penempatan ventilasi ini dipilih dikarenakan nilai kecepatan angin lebih baik yaitu $1,2 \text{ m/s}$. Letak ventilasi akan disesuaikan dengan arah angin pada musim kemarau sehingga kondisi yang didapatkan adalah kondisi yang terbaik. Menurut data BMKG Karangploso arah mata angin pada saat kemarau adalah arah barat ke timur, sedangkan pada saat musim hujan adalah dari timur ke barat. Pintu 1 yang ada *finished goods warehouse* menghadap ke arah Selatan. Oleh karena itu jendela yang berfungsi sebagai ventilasi akan diletakan di sebelah barat dan timur gedung. Gambar 4.14 merupakan gambar penempatan ventilasi yang digunakan dan gambar 4.14 merupakan gambar penempatan ventilasi



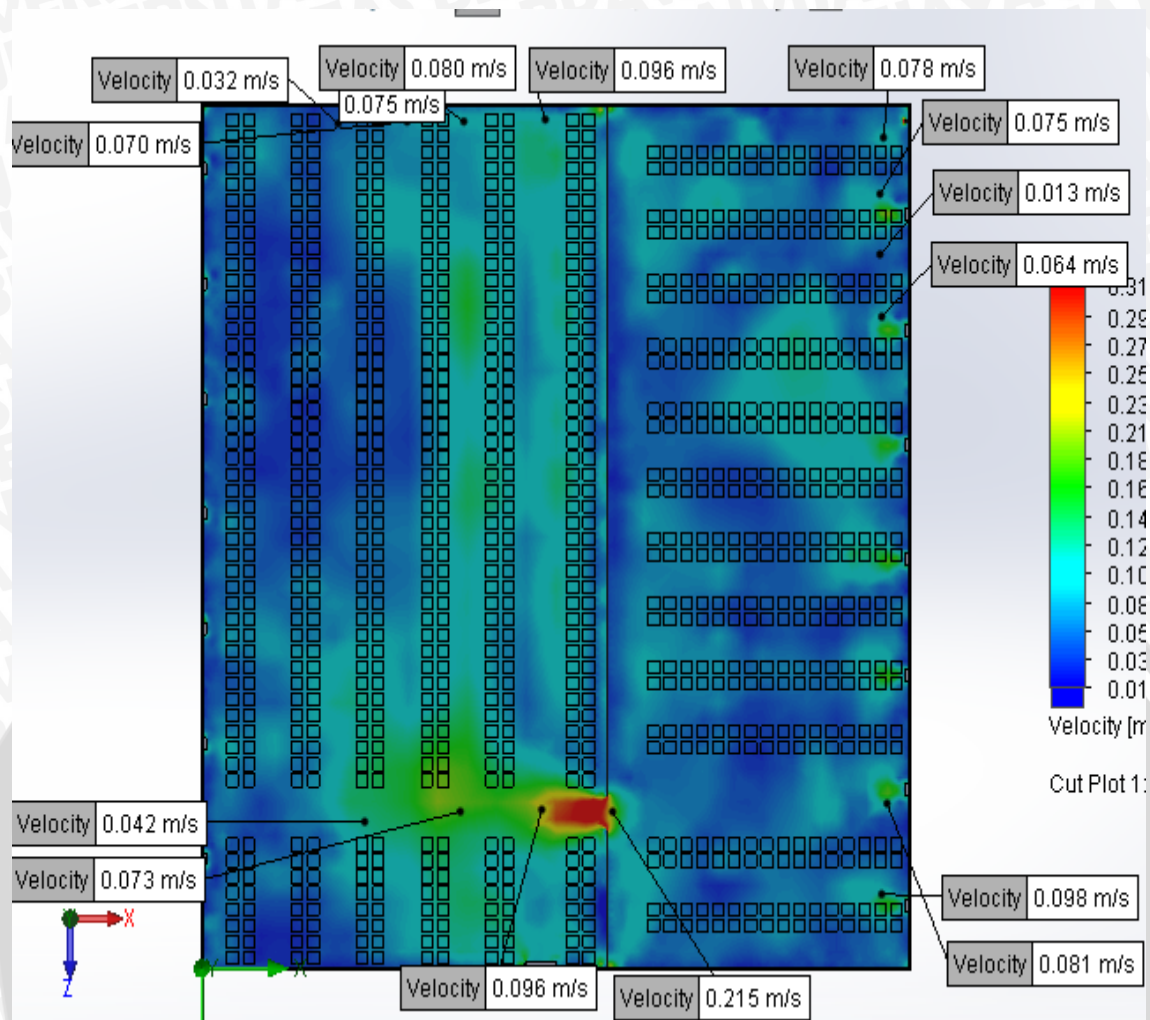
Gambar 4.14 gambar penempatan ventilasi yang digunakan

Gambar 4.14 menunjukkan penempatan ventilasi yang digunakan dalam scenario pertama, scenario ini ditujukan untuk membuat keadaan *thermal* yang ada di *finished goods warehouse* menjadi lebih baik. Ventilasi dipasang dengan ketinggian $4,5 \text{ m}$ dari atap sehingga berada pada posisi tengah dan berada di ketinggian $1,5 \text{ m}$ dari permukaan tanah. Selanjutnya dilakukan simulasi dan didapatkan hasil pada gambar 4.15 hingga gambar 4.17.



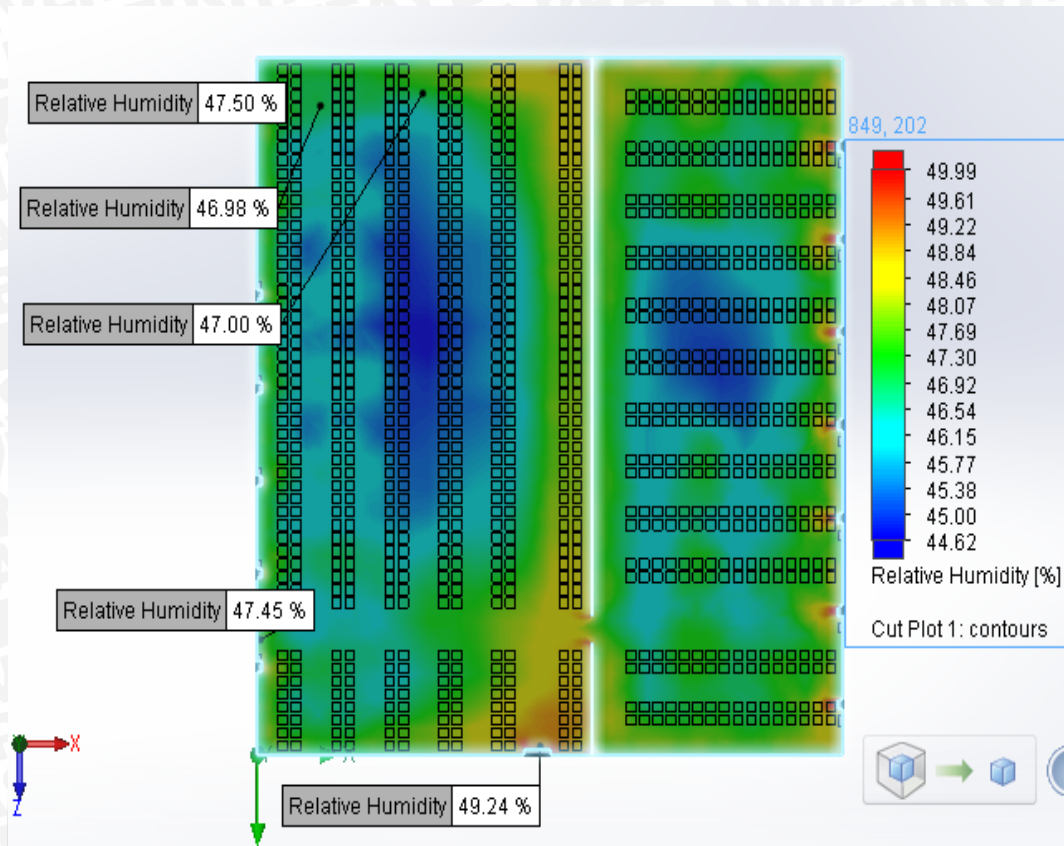
Gambar 4.15 Hasil sebaran *temperature* simulasi CFD rekomendasi pada ketinggian 1,1 meter

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. *Output* simulasi rekomendasi berupa gambar dapat dilihat pada Gambar 4.15 hingga Gambar 4.17. Gambar 4.15 menunjukkan sebaran *temperature* pada ketinggian 1,1 meter setelah menambah sirkulasi udara ditambahkan menjadi 14 dengan ukuran sebesar 2 x 1 meter. Sebaran variasi warna pada Gambar 4.15 berada pada warna biru tua hingga biru muda. Hal tersebut menunjukkan bahwa *temperature* 29,01 °C hingga 29,88 °C.



Gambar 4.16 Hasil sebaran *velocity* simulasi CFD rekomendasi pada ketinggian 1,1 meter

Gambar 4.16 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 4.16 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. Udara akan berpindah dari titik dengan suhu rendah menuju titik dengan suhu yang lebih tinggi (KNMI, 2000).



Gambar 4.17 Hasil sebaran *relative humidity* simulasi CFD rekomendasi pada ketinggian 1,1 meter

Gambar 4.17 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 4.19 dapat diketahui bahwa titik-titik yang ada di *finished goods warehouse* mempunyai nilai *relative humidity* berkisar 44,05%. 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. Tabel 4.13 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.

Tabel 4.13 *Input* dan Hasil Perhitungan Ulang PMV, PPD, dan Tingkat *Heat Stress* Pekerja

Titik	t_a (°C)	MRT (°C)	v_{ar} (m/s)	rh (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	PMV	PPD	Heat Stress Level
1	29,22	29,22	0,073	43,92	0,81	1,2	1,59	55,8	<i>slightly warm</i>
2	29,6	29,6	0,076	46,79	0,81	1,2	1,70	62,0	<i>slightly warm</i>
3	29,22	29,22	0,042	47,09	0,81	1,2	1,64	58,7	<i>slightly warm</i>
4	29,27	29,27	0,073	48,39	0,81	1,2	1,64	58,7	<i>slightly warm</i>
5	28,04	28,04	0,096	48,09	0,81	1,2	1,30	40,4	<i>slightly warm</i>
6	29,23	29,23	0,215	45,11	0,81	1,2	1,48	50,0	<i>slightly warm</i>
7	29,43	29,43	0,038	47,19	0,81	1,2	1,69	61,5	<i>slightly warm</i>
8	28,04	28,04	0,073	43,92	0,81	1,2	1,30	40,4	<i>slightly warm</i>
9	29,23	29,23	0,076	46,79	0,81	1,2	1,61	57,2	<i>slightly warm</i>
10	29,23	29,23	0,075	47,09	0,81	1,2	1,62	57,4	<i>slightly warm</i>
11	29,49	29,49	0,075	48,39	0,81	1,2	1,69	61,5	<i>slightly warm</i>
12	29,43	29,43	0,054	48,09	0,81	1,2	1,70	62,0	<i>slightly warm</i>
13	29,69	29,69	0,065	45,11	0,81	1,2	1,72	63,2	<i>slightly warm</i>
14	29,1	29,1	0,073	47,29	0,81	1,2	1,59	55,9	<i>slightly warm</i>
15	29,02	29,02	0,076	47,09	0,81	1,2	1,56	54,5	<i>slightly warm</i>
16	29,14	29,14	0,075	47,19	0,81	1,2	1,59	56,2	<i>slightly warm</i>
17	29,45	29,45	0,075	47,19	0,81	1,2	1,67	60,4	<i>slightly warm</i>
18	29,46	29,46	0,054	43,92	0,81	1,2	1,67	60,3	<i>slightly warm</i>
19	29,58	29,58	0,078	46,79	0,81	1,2	1,69	61,7	<i>slightly warm</i>
20	29,02	29,02	0,075	47,09	0,81	1,2	1,56	54,6	<i>slightly warm</i>
21	29,07	29,07	0,013	48,39	0,81	1,2	1,61	57,2	<i>slightly warm</i>
22	29,02	29,02	0,064	48,09	0,81	1,2	1,59	55,9	<i>slightly warm</i>
23	29,6	29,6	0,054	45,11	0,81	1,2	1,72	62,8	<i>slightly warm</i>
24	29,74	29,74	0,065	47,29	0,81	1,2	1,75	64,9	<i>slightly warm</i>
25	29,81	29,81	0,038	47,09	0,81	1,2	1,79	66,5	<i>slightly warm</i>
26	29,11	29,11	0,073	47,19	0,81	1,2	1,59	56,0	<i>slightly warm</i>
27	29,07	29,07	0,076	47,19	0,81	1,2	1,58	55,2	<i>slightly warm</i>
28	29,02	29,02	0,075	43,92	0,81	1,2	1,54	53,0	<i>slightly warm</i>
29	29,6	29,6	0,075	46,79	0,81	1,2	1,70	62,1	<i>slightly warm</i>
30	29,54	29,54	0,054	47,09	0,81	1,2	1,72	63,0	<i>slightly warm</i>
31	29,69	29,69	0,029	47,45	0,81	1,2	1,76	65,1	<i>slightly warm</i>
32	29,4	29,4	0,024	49,24	0,81	1,2	1,70	62,1	<i>slightly warm</i>
33	29,07	29,07	0,076	48,09	0,81	1,2	1,58	55,6	<i>slightly warm</i>
34	29,02	29,02	0,075	45,11	0,81	1,2	1,55	53,6	<i>slightly warm</i>
35	29,6	29,6	0,075	47,29	0,81	1,2	1,71	62,4	<i>slightly warm</i>
36	29,74	29,74	0,054	47,09	0,81	1,2	1,77	65,6	<i>slightly warm</i>
37	29,74	29,74	0,065	47	0,81	1,2	1,75	64,7	<i>slightly warm</i>
38	29,11	29,11	0,025	47,5	0,81	1,2	1,61	57,4	<i>slightly warm</i>
39	29,07	29,07	0,023	46,96	0,81	1,2	1,60	56,5	<i>slightly warm</i>
40	29,02	29,02	0,027	48,09	0,81	1,2	1,60	56,4	<i>slightly warm</i>
41	29,6	29,6	0,041	47	0,81	1,2	1,73	63,7	<i>slightly warm</i>
42	29,54	29,54	0,025	48,09	0,81	1,2	1,73	63,5	<i>slightly warm</i>

Tabel 4.13 *Input dan Hasil Perhitungan Ulang PMV, PPD, dan Tingkat Heat Stress Pekerja (Lanjutan)*

Titik	t_a (°C)	MRT (°C)	v_{ar} (m/s)	rh (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	PMV	PPD	Heat Stress Level
43	29,54	29,54	0,025	48,09	0,81	1,2	1,73	63,5	<i>slightly warm</i>
44	29,54	29,54	0,023	48,09	0,81	1,2	1,73	63,5	<i>slightly warm</i>

Tabel 4.13 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%.

b. Pembuatan skenario 2

Nilai PMV pekerja pada *finished goods warehouse* seluruhnya menunjukkan tingkat *strong heat stress*, kecuali pada titik pertama menunjukkan *moderate heat stress*. Hal ini perlu dilakukan perbaikan pada *finished goods warehouse* agar potensi tingkat *heat stress* yang dirasakan pekerja *finished goods warehouse* dapat menjadi lebih nyaman. Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai rekomendasi perbaikan yang akan dilakukan pada *finished goods warehouse*. Hal ini memiliki tujuan untuk menurunkan nilai PMV pada pekerja *Finished goods warehouse* serta menurunkan potensi *heat stress* yang dialami oleh pekerja pada *finished goods warehouse*.

Pada rekomendasi perbaikan kedua ialah menambahkan *exhaust fan* pada *finished goods warehouse* untuk membuat aliran udara masuk dan keluar pada *finished goods warehouse* menjadi lebih kuat dan diharapkan terjadinya penurunan *air temperature*. Untuk menentukan kebutuhan *exhaust fan* pada *finished goods warehouse* dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan yang diberikan oleh Prasasto satwiko (2005) sesuai dengan persamaan 2.9.

Kebutuhan *air volume* = Volume Ruang x *Air Change Rate*

Volume ruang = 26250 m³

Air Change Rate Warehouse = 4,5

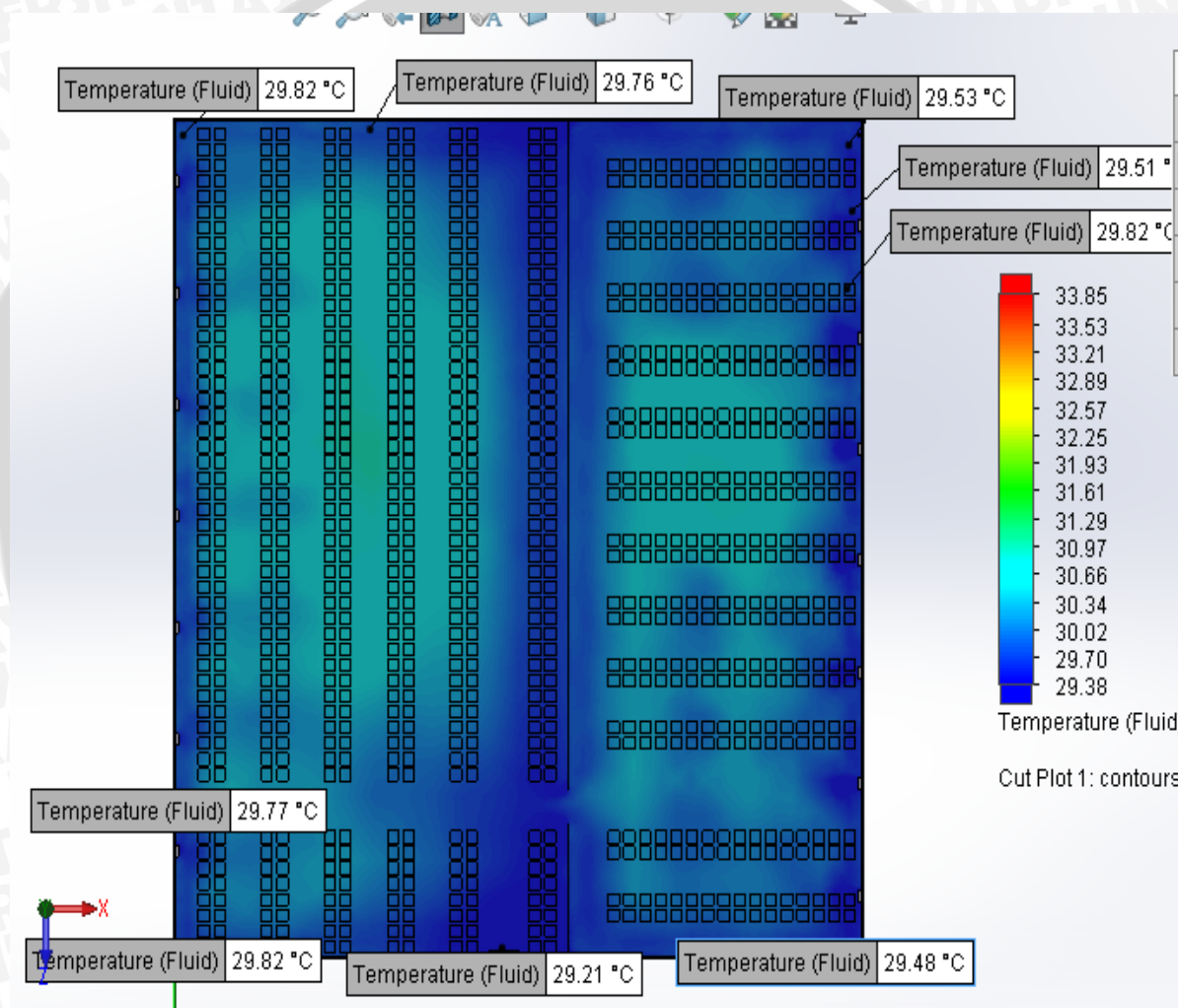
Kebutuhan *air volume* = 26250 m³ x 4,5 t/h
= 117,225 m³/h

Spesifikasi *exhaust fan* dengan merk terbaik dengan kapasitas *air volume* per titik mendekati kebutuhan di *finished goods warehouse* ialah *exhaust fan* dengan merk KDK 40GSC dengan spesifikasi panjang 518 mm, lebar 518 mm, dan *air volume* 3610 m³/h.

Perhitungan *air volume* pada masing-masing titik *exhaust fan* dapat dilihat pada perhitungan berikut.

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan banyaknya exhaust} &= 117.225 \text{ m}^3/\text{h} / 3610 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 32,4\end{aligned}$$

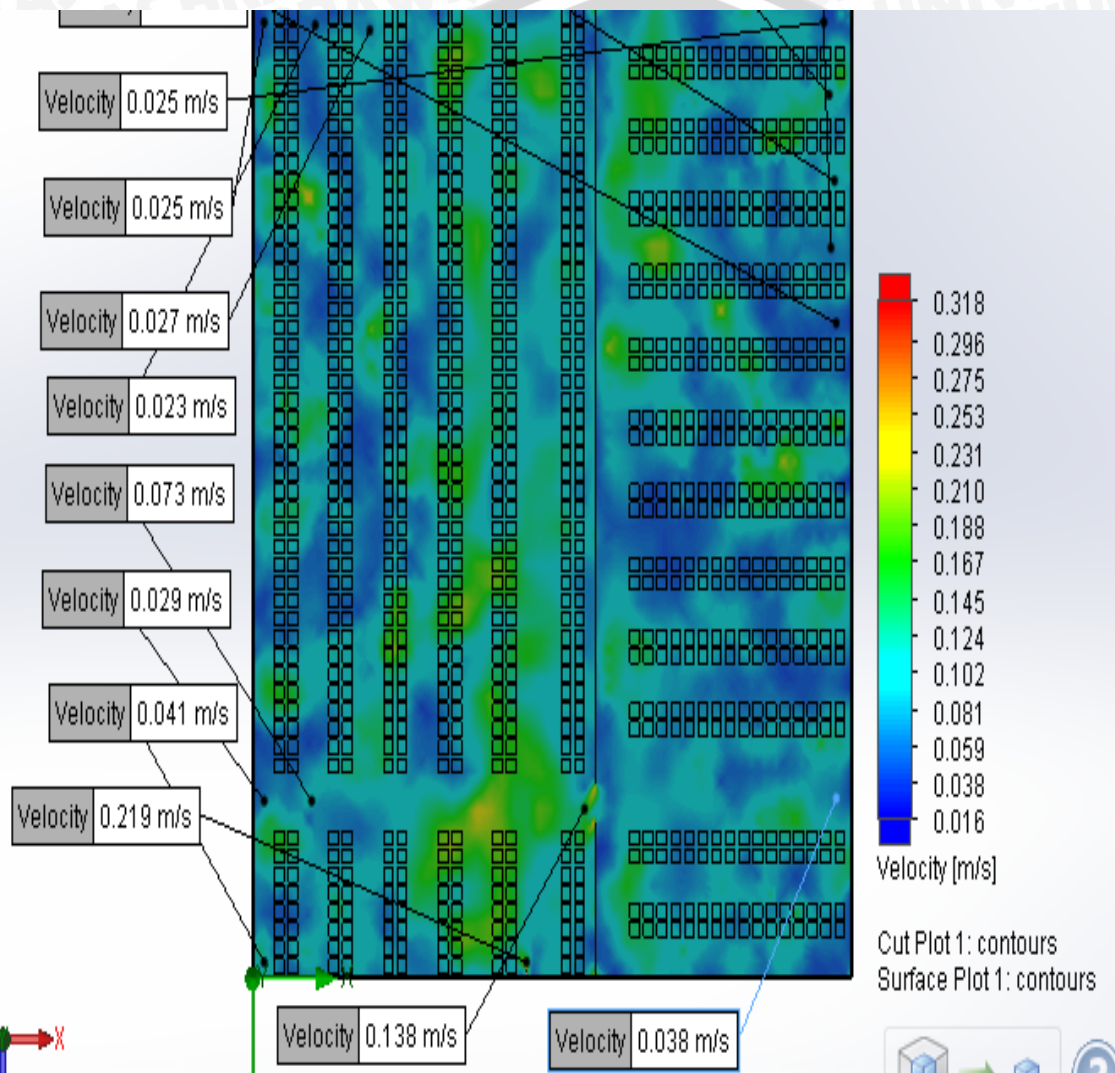
Pemasangan *exhaust fan* dipasang pada 33 titik di atap *Finished goods warehouse* agar seluruh ruangan *finished goods warehouse* terkena hisapan *exhaust fan*. Kemudian dilakukan simulasi rekomendasi perbaikan pertama dan didapatkan hasil beberapa contoh sebaran *air velocity*.



Gambar 4.18 Sebaran *temperature* CFD rekomendasi perbaikan 2

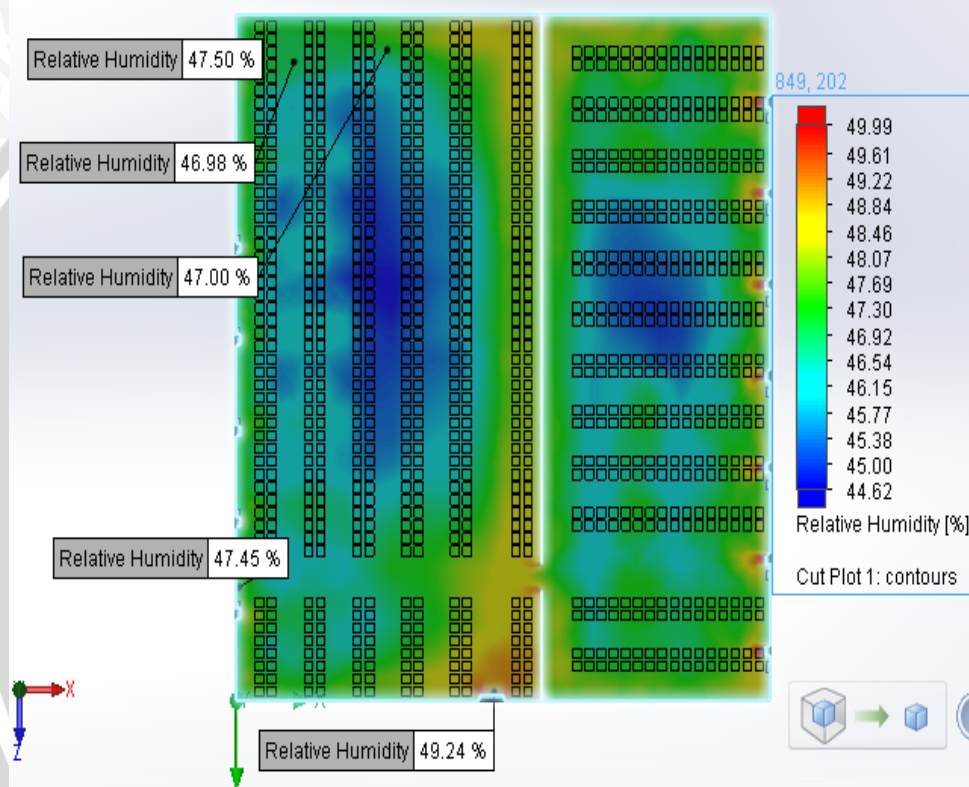
Pada penelitian ini, rekomendasi akan disimulasikan dengan CFD. Simulasi CFD dibuat ulang dengan langkah-langkah yang ada pada sub bab 4.3.5. Pada simulasi perbaikan ini tidak terdapat perubahan nilai *heat sources* 1 dan 2 yaitu panas yang berasal dari lampu dan atap galvalum. *Output* imulasi rekomendasi berupa gambar dapat dilihat pada Gambar 4.18 hingga Gambar 4.20.

Gambar 4.18 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. Pada gambar 4.18 dan 4.19 menunjukkan sebaran nilai *air velocity* dan *air temperature* pada penambahan *exhaust fan* yang ada di *finished goods warehouse*.



Gambar 4.18 Hasil sebaran *velocity* simulasi CFD rekomendasi pada ketinggian 1,1 meter

Gambar 4.18 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 4.18 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. Udara akan berpindah dari titik dengan suhu rendah menuju titik dengan suhu yang lebih tinggi (KNMI, 2000).



Gambar 4.19 Hasil sebaran *relative humidity* simulasi CFD rekomendasi pada ketinggian 1,1 meter

Gambar 4.19 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 4.16 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. Tabel 4.14 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.

Tabel 4.14 *Input* dan Hasil Perhitungan Ulang PMV, PPD, dan Tingkat *Heat Stress* Pekerja

Titik	t_a (°C)	MRT (°C)	v_{ar} (m/s)	R_h (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	PMV	PPD	Heat Stress Level
1	29,77	29,77	0,029	47,45	0,81	1,2	1,78	66,1	<i>slightly warm</i>
2	29,6	29,6	0,073	48,39	0,81	1,2	1,72	63,0	<i>slightly warm</i>
3	29,22	29,22	0,076	48,09	0,81	1,2	1,62	57,7	<i>slightly warm</i>
4	29,27	29,27	0,075	45,11	0,81	1,2	1,61	56,9	<i>slightly warm</i>
5	28,04	28,04	0,075	47,29	0,81	1,2	1,32	41,7	<i>slightly warm</i>
6	29,23	29,23	0,054	47,09	0,81	1,2	1,64	58,8	<i>slightly warm</i>
7	29,49	29,49	0,065	47,19	0,81	1,2	1,69	61,6	<i>slightly warm</i>
8	29,43	29,43	0,038	47,19	0,81	1,2	1,69	61,5	<i>slightly warm</i>
9	29,14	29,14	0,073	43,92	0,81	1,2	1,57	54,8	<i>slightly warm</i>
10	29,45	29,45	0,076	46,79	0,81	1,2	1,67	60,1	<i>slightly warm</i>
11	28,81	28,81	0,075	47,09	0,81	1,2	1,51	51,7	<i>slightly warm</i>
12	29,15	29,15	0,075	47,09	0,81	1,2	1,60	56,3	<i>slightly warm</i>
13	27,85	27,85	0,054	46,99	0,81	1,2	1,29	40,1	<i>slightly warm</i>
14	29,01	29,01	0,065	46,59	0,81	1,2	1,57	55,0	<i>slightly warm</i>
15	27,81	27,81	0,073	46,29	0,81	1,2	1,26	38,5	<i>slightly warm</i>
16	27,85	27,85	0,076	44,65	0,81	1,2	1,25	38,1	<i>slightly warm</i>
17	29,01	29,01	0,075	46,39	0,81	1,2	1,55	54,1	<i>slightly warm</i>
18	29,58	29,58	0,075	46,49	0,81	1,2	1,70	61,7	<i>slightly warm</i>
19	29,46	29,46	0,054	46,59	0,81	1,2	1,69	61,7	<i>slightly warm</i>
20	28,22	28,22	0,065	45,38	0,81	1,2	1,37	44,1	<i>slightly warm</i>
21	29,07	29,07	0,076	46,19	0,81	1,2	1,57	54,7	<i>slightly warm</i>
22	29,02	29,02	0,075	48,39	0,81	1,2	1,58	55,2	<i>slightly warm</i>
23	29,6	29,6	0,075	48,09	0,81	1,2	1,72	62,8	<i>slightly warm</i>
24	29,27	29,27	0,054	45,11	0,81	1,2	1,63	58,4	<i>slightly warm</i>
25	29,93	29,93	0,065	47,29	0,81	1,2	1,80	67,3	<i>slightly warm</i>
26	29,22	29,22	0,038	47,09	0,81	1,2	1,64	58,7	<i>slightly warm</i>
27	29,07	29,07	0,073	47,19	0,81	1,2	1,58	55,4	<i>slightly warm</i>
28	29,02	29,02	0,076	47,19	0,81	1,2	1,56	54,5	<i>slightly warm</i>
29	29,6	29,6	0,075	43,92	0,81	1,2	1,68	60,7	<i>slightly warm</i>
30	29,27	29,27	0,075	46,79	0,81	1,2	1,62	57,8	<i>slightly warm</i>
31	29,04	29,04	0,054	47,09	0,81	1,2	1,59	56,2	<i>slightly warm</i>

Tabel 4.14 *Input dan Hasil Perhitungan Ulang PMV, PPD, dan Tingkat Heat Stress Pekerja (Lanjutan)*

Titik	t_a (°C)	MRT (°C)	v_{ar} (m/s)	rh (%)	I_{cl} (clo)	M (met)	PMV	PPD	Heat Stress Level
32	29,69	29,69	0,073	49,24	0,81	1,2	1,75	64,6	<i>slightly warm</i>
33	29,10	29,10	0,219	49,24	0,81	1,2	1,48	49,9	<i>slightly warm</i>
34	29,02	29,02	0,041	48,39	0,81	1,2	1,60	56,6	<i>slightly warm</i>
35	29,07	29,07	0,025	48,09	0,81	1,2	1,61	57,1	<i>slightly warm</i>
36	29,02	29,02	0,023	45,11	0,81	1,2	1,57	55,0	<i>slightly warm</i>
37	29,6	29,6	0,027	47,29	0,81	1,2	1,74	63,9	<i>slightly warm</i>
38	29,74	29,74	0,041	48,39	0,81	1,2	1,78	66,2	<i>slightly warm</i>
39	29,81	29,81	0,025	47,5	0,81	1,2	1,79	66,7	<i>slightly warm</i>
40	29,11	29,11	0,023	46,96	0,81	1,2	1,61	57,1	<i>slightly warm</i>
41	29,07	29,07	0,027	48,09	0,81	1,2	1,61	57,1	<i>slightly warm</i>
42	29,02	29,02	0,041	47,0	0,81	1,2	1,59	55,9	<i>slightly warm</i>
43	29,6	29,6	0,025	48,09	0,81	1,2	1,74	64,3	<i>slightly warm</i>
44	29,54	29,54	0,023	48,09	0,81	1,2	1,73	63,5	<i>slightly warm</i>

Tabel 4.14 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.

4.3.1 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.

Konsumsi listrik = $33 \times 50 \text{ W} = 1650 \text{ W} = 1,65 \text{ kW}$

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

1 bulan = 22 hari kerja

$$\begin{aligned}
 \text{Konsumsi listrik / bulan} &= \text{Konsumsi listrik Exhaust Fan (kW)} \times \text{Jam kerja shift 1} \\
 &= 1,65 \text{ Kw} \times 8 \text{ jam} \times 22 \text{ hari kerja} \\
 &= 290.4 \text{ kWh / bulan}
 \end{aligned}$$

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*.

$$\begin{aligned}
 \text{Total biaya / bulan} &= \text{Konsumsi listrik / bulan} \times \text{Tarif listrik golongan I-3 / TM} \\
 &= 290.4 \text{ kWh / bulan} \times \text{Rp } 1.115 / \text{kWh} \\
 &= \text{Rp } 323.796 / \text{bulan}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Harga unit} &= \text{Rp } 1.325.000 \\
 \text{Harga instalasi} &= \text{Rp } 100.000 / \text{unit} \\
 \text{Harga total} &= (1.325.000 \times 33) + (100.000 \times 33) \\
 &= (43.725.000) + (3.300.000) \\
 &= \text{Rp } 46.725.000
 \end{aligned}$$

$$\text{Total biaya pengadaan exhaust fan} = \text{Rp } 46.725.000$$

$$\text{Biaya yang dikeluarkan tiap bulan berikutnya} = \text{Rp } 363.729/\text{bulan}$$

Selanjutnya untuk perhitungan rekomendasi perbaikan dengan menambahkan ventilasi dengan ukuran 2 m² sebanyak 14 buah, maka perusahaan akan mengeluarkan biaya, biaya yang dihitung tanpa memperhatikan hal-hal teknis.

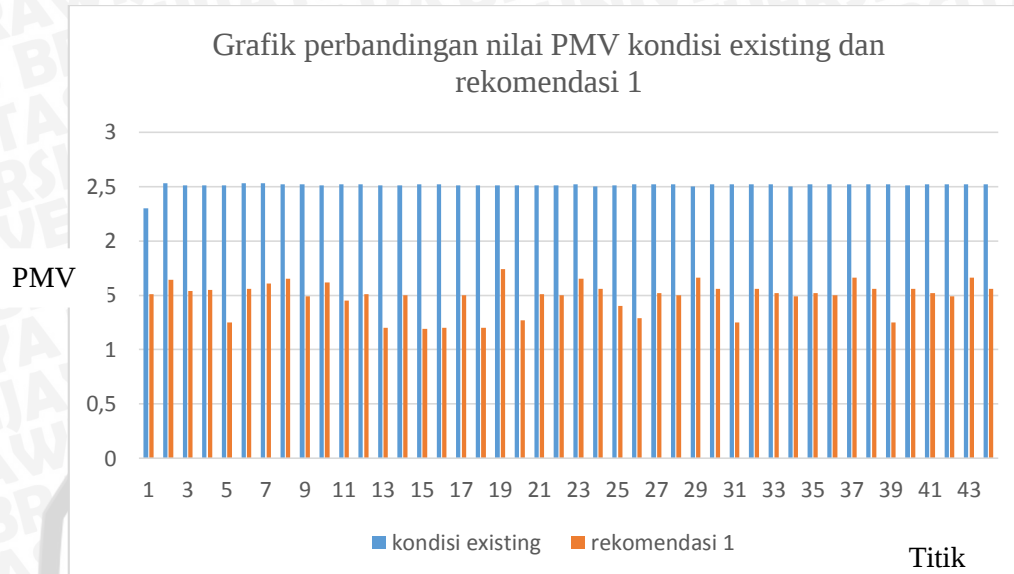
$$\begin{aligned}
 \text{Harga bongkar bangunan} &= 7 \text{ hari} \times \text{Rp } 100.000 = \text{Rp } 700.000 \\
 \text{Harga unit dengan ongkos pemasangan} &= \text{Rp } 750.000 \times 14 = \text{Rp } 10.500.000 \\
 \text{Biaya Bangunan (Semen dsb)} &= \text{Rp } 500.000 \\
 \text{Harga total} &= \text{Rp } 11.700.000 \\
 \text{Total biaya pengadaan ventilasi} &= \text{Rp } 11.700.000
 \end{aligned}$$

4.3.6 Analisis Hasil dan Pembahasan

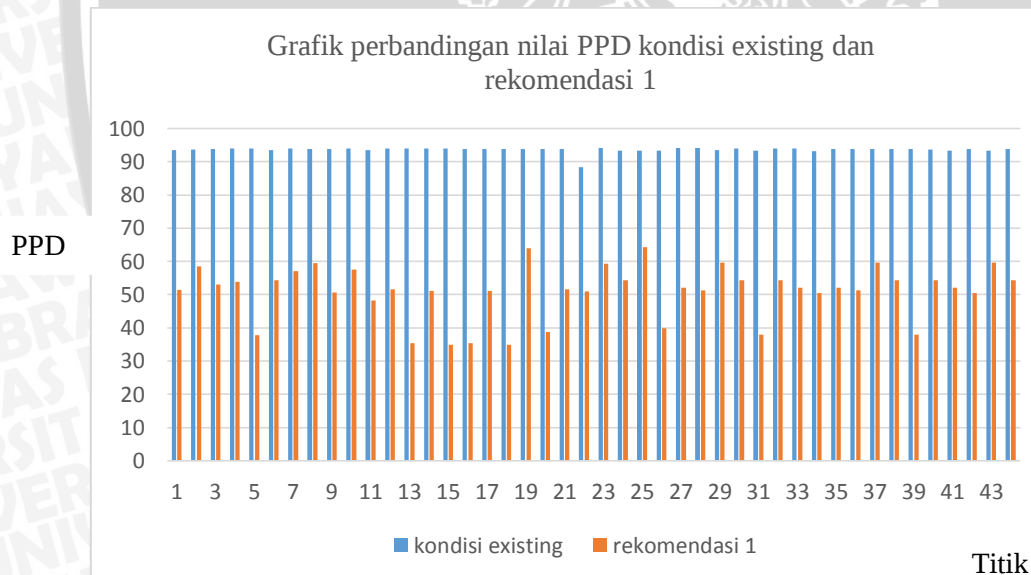
Nilai PMV didapatkan dari beberapa nilai sebagai *input*, yaitu *clothing insulation*, *metabolic rate*, *air velocity*, *relative humidity*, *air temperature*, dan *mean radiant temperature* dari setiap titik *finished goods warehouse*. Dari tahap pengolahan data dapat diketahui bahwa nilai *clothing insulation* seluruh pekerja pada *finished goods warehouse* senilai 0,81 clo. Nilai *metabolic rate* terendah dari seluruh pekerja pada *finished goods warehouse* dapat diketahui sebesar 1,2 met. Nilai *air velocity*, *relative humidity*, dan *air temperature* yang digunakan sebagai *input* perhitungan PMV didapatkan dari hasil pengamatan langsung, sedangkan nilai *mean radiant temperature* diasumsikan memiliki nilai yang sama dengan nilai *air temperature*. Setelah mendapatkan nilai PMV, dilakukan perhitungan nilai PPD dan potensi tingkat *heat stress* yang dirasakan pekerja pada *finished goods warehouse*.

Berdasarkan Gambar 4.18 dan 4.19 dapat diketahui bahwa setelah dilakukan rekomendasi perbaikan, seluruh titik pada *finished goods warehouse* mengalami penurunan baik nilai PMV maupun nilai PPD. 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% dengan nilai rata-rata sebesar 94,41%. Untuk menurunkan nilai PMV dan PPD maka akan dilakukan pembuatan simulasi *Computational Fluid Dynamic (CFD)* untuk beberapa rekomendasi perbaikan. Rekomendasi perbaikan dilakukan dengan pembuatan simulasi CFD dari kondisi *existing finished goods warehouse*. CFD dibuat melalui beberapa tahap yaitu *pre processor*, *processor*, dan *post processor*. Setelah membuat CFD, dilakukan proses validasi untuk memastikan *model* yang telah dibuat dalam CFD sudah mewakili kondisi asli dari *finished goods warehouse*.tersebut. Setelah *model* telah terbukti valid, dilakukan perhitungan PMV, PPD, dan potensi tingkat *heat stress* pekerja *finished goods warehouse*. Kemudian dilakukan pembuatan rekomendasi serta perhitungan ulang nilai PMV, PPD, dan potensi tingkat *heat stress* pekerja pada *finished goods warehouse*. Rekomendasi perbaikan yang diberikan ada dua yakni penambahan *exhaust fan* dan ventilasi. Gambar 4.20 dan 4.21 menunjukkan perbedaan antara kondisi *existing* dan rekomendasi perbaikan 1. Perbandingan nilai PMV pada kondisi *existing* dan rekomendasi perbaikan 1 dalam bentuk grafik batang dapat dilihat pada Gambar 4.20. Sedangkan perbandingan nilai PPD

kondisi *existing* dan rekomendasi perbaikan dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4.20 Perbandingan nilai PMV *existing* dan rekomendasi 1



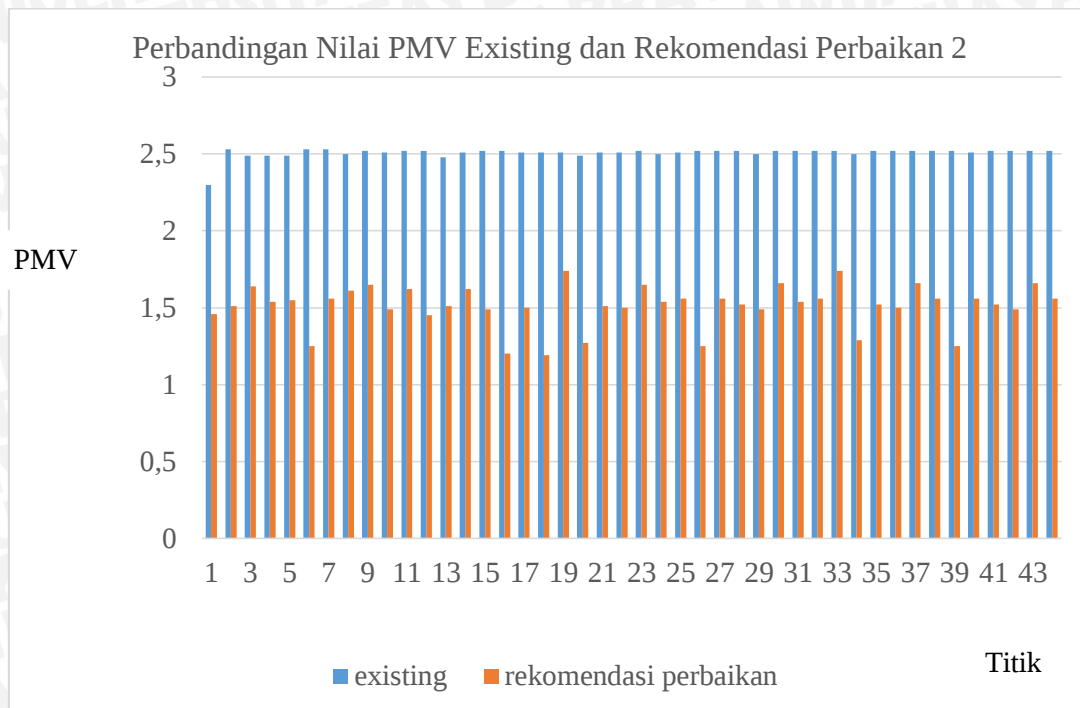
Gambar 4.21 Perbandingan nilai PPD *existing* dan rekomendasi 1

Berdasarkan Gambar 4.20 dan 4.21 dapat diketahui bahwa setelah dilakukan rekomendasi perbaikan, seluruh titik pada *finished goods warehouse* mengalami penurunan baik nilai PMV maupun nilai PPD. Pada kondisi *existing* nilai PMV berada pada rentang +2,4 hingga +2,61, sedangkan nilai PPD berada pada rentang 91,2% hingga 95,4% 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%.

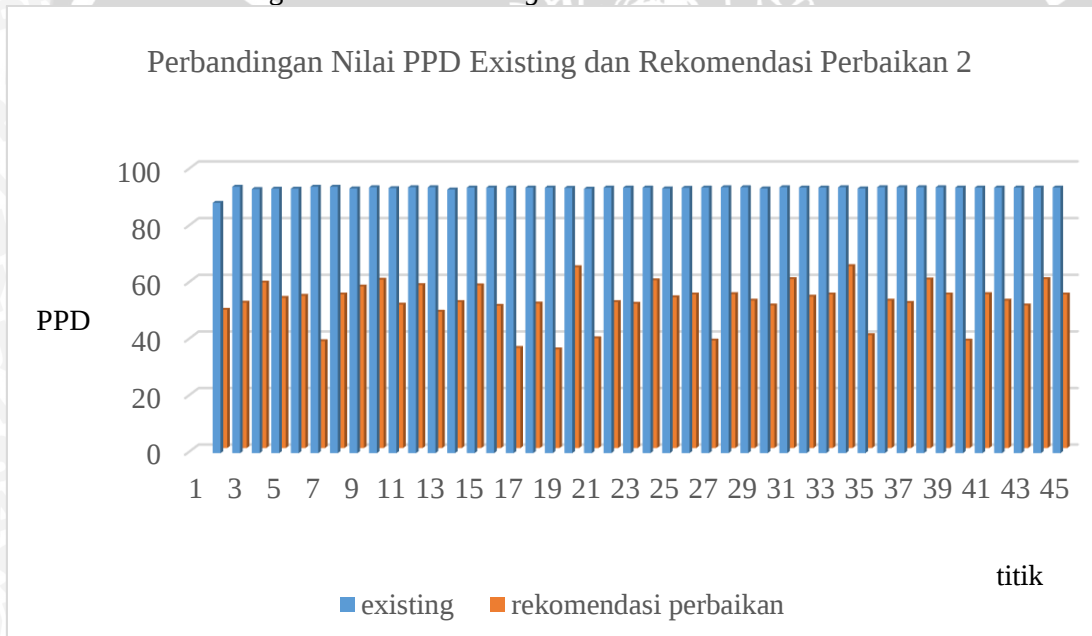
Jika dibandingkan dengan kondisi setelah dilakukan rekomendasi perbaikan dengan menambahkan ventilasi sebanyak 14 dengan ukuran 2 m², nilai PMV dan PPD turun cukup signifikan. Nilai PMV setelah diberikan ventilasi berada pada rentang +1,30 hingga +1,79 dengan rata-rata sebesar 1,63, sedangkan nilai PPD berada pada rentang 40,36% hingga 66,48% dengan nilai rata-rata sebesar 58,58%.

Secara umum jelas terlihat perbedaan yang signifikan dengan nilai PMV dan PPD pada kondisi *existing* dan setelah dilakukan rekomendasi perbaikan dengan menambahkan ventilasi. Hal ini dikarenakan perubahan *air temperature* yang sangat signifikan yang sangat mempengaruhi nilai PMV dan PPD. Karena nilai *air temperature* turun, maka nilai *mean radiant temperature* juga turun karena nilai *air temperature* diasumsikan sama dengan nilai *mean radiant temperature* pada penelitian ini, sedangkan untuk nilai *air velocity* dan *relative humidity* tidak memiliki dampak yang signifikan terhadap penurunan nilai PMV dan PPD. *Metabolic rate* juga bisa menurun jika adanya pembagian *job desc* seperti yang dijelaskan di tabel 4.12 sehingga bisa diketahui nilai masing-masing pekerja sedangkan nilai dari *clothing insulation* ialah nilai yang tetap karena pekerja di *finished goods warehouse* menggunakan pakaian yang tetap. Jika rekomendasi perbaikan baik itu skenario pertama dan skenario kedua diterapkan maka potensi pekerja mengalami *heat stress* menurun dari *moderate* hingga *strong heat stress* menjadi *slight heat stress*.

Rekomendasi perbaikan yang kedua adalah penambahan *exhaust fan*. Gambar 4.22 dan 4.23 menunjukkan perbedaan antara kondisi *existing* dan rekomendasi perbaikan 2. Perbandingan nilai PMV pada kondisi *existing* dan rekomendasi perbaikan 2 dalam bentuk grafik batang dapat dilihat pada Gambar 4.22, sedangkan perbandingan nilai PPD kondisi *existing* dan rekomendasi perbaikan dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.22 Perbandingan nilai PMV *existing* dan rekomendasi 2



Gambar 4.23 Perbandingan nilai PPD *existing* dan rekomendasi 2

Berdasarkan Gambar 4.22 dan 4.23 dapat diketahui bahwa setelah dilakukan rekomendasi perbaikan, seluruh titik pada *finished goods warehouse* mengalami penurunan baik nilai PMV maupun nilai PPD. Pada kondisi *existing* nilai PMV berada pada rentang +2,4 hingga +2,61, sedangkan nilai PPD berada pada rentang 91,2% hingga 95,4% 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%. Jika dibandingkan dengan kondisi setelah dilakukan rekomendasi perbaikan dengan menambahkan *exhaust fan* sebanyak 33 unit

dengan kapasitas 3610 m³/h, nilai PMV dan PPD turun cukup signifikan. Nilai PMV setelah diberikan *exhaust fan* berada pada rentang +1,25 hingga +1,8 dengan nilai rata-rata sebesar 1,60, sedangkan nilai PPD berada pada rentang 38,08% hingga 67,31% dengan nilai rata-rata sebesar 56,88.

Secara umum jelas terlihat perbedaan yang signifikan dengan nilai PMV dan PPD pada kondisi *existing* dan setelah dilakukan rekomendasi perbaikan dengan menambahkan *exhaust fan*. Hal ini dikarenakan perubahan *air temperature* yang sangat signifikan yang sangat mempengaruhi nilai PMV dan PPD. Karena nilai *air temperature* turun, maka nilai *mean radiant temperature* juga turun karena nilai *air temperature* diasumsikan sama dengan nilai *mean radiant temperature* pada penelitian ini, sedangkan untuk nilai *air velocity* dan *relative humidity* tidak memiliki dampak yang signifikan terhadap penurunan nilai PMV dan PPD. *Metabolic rate* juga bisa menurun jika adanya pembagian *job desc* sehingga bisa diketahui nilai masing-masing pekerja sedangkan nilai dari *clothing insulation* ialah nilai yang tetap karena pekerja di *finished goods warehouse* menggunakan pakaian yang tetap. Jika rekomendasi perbaikan diterapkan maka potensi pekerja mengalami *heat stress* menurun dari *moderate* hingga *strong heat stress* menjadi *slight heat stress*.

Biaya yang dikeluarkan untuk perbaikan ini adalah sebesar Rp 46.725.000 untuk pemasangan exhaust fan dan biaya annual tiap bulannya sebesar Rp 363.729. Skenario kedua dengan menambahkan ventilasi dengan ukuran 2m² sebanyak 14 buah, maka perusahaan akan mengeluarkan biaya yaitu Rp 11.700.000.

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*.

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB V PENUTUP

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan menjawab tujuan penelitian yang telah dirumuskan. Kemudian saran ialah masukan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, baik untuk tempat penelitian maupun untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan di *finished goods warehouse* mengenai *heat stress* pekerja berbasis *Predicted Mean Vote* (PMV) dan *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. 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*.
2. 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*.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, berikut merupakan saran yang dapat diberikan untuk *finished goods warehouse* dan untuk penelitian selanjutnya.

1. *Finished goods warehouse* sebaiknya dapat mempertimbangkan rekomendasi perbaikan yang diberikan pada penelitian ini, sehingga potensi tingkat *heat stress* pekerja pada *finished goods warehouse* dapat berkurang. Dengan berkurangnya potensi tingkat *heat stress* pekerja maka efisiensi dan produktivitas pekerja dapat meningkat.
2. Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya nilai *mean radiant temperature* dapat diukur secara langsung, sehingga tidak perlu diasumsikan sama dengan *air temperature*.
3. Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya dapat menghitung beban tiap pekerja.

