

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam pelaksanaan penelitian ini terdapat beberapa teori atau referensi yang digunakan untuk menjadi dasar dalam pengerjaan penelitian ini. Pada bab ini akan dijelaskan mengenai beberapa landasan teori yang mendukung pembahasan dan berguna dalam menganalisis dan mengolah data dalam penelitian ini.

2.1 PENELITIAN TERDAHULU

Penelitian terdahulu merupakan penelitian yang telah 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.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Ini

No	Penulis	Metode				Objek Amatan
		PMV	PPD	Kuesioner	CFD	
1.	Alfano, dkk (2013)	✓	✓	✓	-	Ruang Kelas di Italia
2.	Mochidaa, dkk (2005)	✓	-	-	✓	Gedung Universitas Tohoku, Sendai, Jepang
3.	Liping, dkk (2014)	✓	-	-	-	Penerbangan Sipil Cina
4.	Salim, dkk (2015)	✓	-	-	✓	Hot Kitchen PT. Aerofood ACS

- Alfano (2013) melakukan penelitian pada 200 ruang kelas pada beberapa sekolah menengah di Italia. Penelitian tersebut bertujuan untuk membandingkan kesesuaian penilaian kenyamanan termal secara objektif menggunakan metode PMV-PPD dengan persepsi kenyamanan termal pelajar secara subjektif. Hasil dari penelitiannya menyatakan bahwa PMV dan PPD *index* yang digunakan untuk menghitung *Thermal Comfort* juga efektif untuk menghitung kenyamanan *thermal* pada ruang kelas yang berhubungan langsung dengan alam. Hasil yang didapatkan melalui analisis objektif berupa PMV-PPD sesuai dengan analisis subjektif berupa *Thermal Sensation Vote Questionnaire*.
- Mochidaa (2005) melakukan penelitian yang berisi tentang metode untuk mengontrol aliran udara di dalam dan di sekitar bangunan. Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan *thermal comfort* di dalam ruangan. Tahap pertama penelitian ini adalah melakukan pengukuran menggunakan metode *Predicted Mean Vote* (PMV) untuk mengevaluasi kondisi *thermal comfort* pada salah satu

ruangan yang ada di Universitas Tohoku, Sedai, Jepang. Hasil dari pengukuran metode PMV diketahui bahwa nilai PMV pada ruangan tersebut berada di atas batas atas nilai *thermal comfort* ($PMV = 0,5$). Tahap selanjutnya adalah melakukan usaha peningkatkan laju perpindahan udara yang dianalisis menggunakan prediksi *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Hasil dari prediksi CFD menunjukkan bahwa nilai PMV yang berada di atas batas atas nilai *thermal comfort* dapat turun signifikan. Hasil ini didapatkan dengan cara mengubah susunan dari peletakan pohon yang berada di luar ruangan dan pengaturan ulang lokasi jendela pada ruangan tersebut.

3. Liping (2014) melakukan penelitian yang bertujuan untuk memudahkan kru pesawat dalam mengontrol *Environment Control System* (ECS) berkaitan dengan *thermal sensation* penumpang. Dari pengukuran yang dilaksanakan, diketahui bahwa pada beberapa penerbangan terjadi *overheating* atau *undercooling*. Hasil dari penelitian ini yaitu sebuah persamaan yang menghubungkan antara *Outdoor Effective Temperature* dengan *thermal sensation* yang dinyatakan dalam bentuk PMV. Melalui persamaan tersebut dapat diprediksi nilai optimal dari *Cabin Oprative Temperature* yang kemudian akan mempermudah dalam pengaturan ECS.
4. Salim (2015) melakukan penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan *thermal comfort* yang dirasakan oleh karyawan *hot kitchen* PT. Aerofood ACS. *Thermal comfort* diukur menggunakan *PMV Index*. Simulasi CFD digunakan untuk memprediksi aliran udara yang terjadi di dalam ruangan *hot kitchen*. Usaha peningkatan *thermal comfort* dilakukan berdasarkan hasil analisis dari simulasi CFD pada ruang tersebut. Perbaikan kondisi ruangan dilakukan menggunakan simulasi CFD kemudian dihitung kembali perubahan *thermal comfort* karyawan menggunakan persamaan *PMV index*. Hasil dari penelitian ini yaitu berupa nilai *heat stress* karyawan serta rekomendasi perbaikan yang perlu diterapkan oleh perusahaan.

2.2 ERGONOMI

Ergonomi atau *ergonomics* berasal dari dua kata Yunani yaitu *Ergo* dan *Nomos*. *Ergo* memiliki arti kerja dan *Nomos* memiliki arti hukum. Dengan menelaah kedua kata tersebut sehingga membentuk suatu pengertian ergonomi sebagai disiplin keilmuan yang mempelajari manusia dalam kaitannya dengan pekerjaan (Wignjosobroto, 2003).

Di beberapa wilayah negara, ergonomi dikenal pula dengan sebutan *Human Factor*. Sebutan tersebut mengacu pada disiplin ilmu ini yang mempertimbangkan desain berdasarkan keterbatasan manusia. Desain ini melingkupi sistem, proses, peralatan, dan lingkungan kerja. Penyesuaian dilakukan berdasarkan keterbatasan manusia tidak semata-mata dilakukan tanpa tujuan. Tujuan dari penyesuaian tersebut adalah untuk mengoptimalkan kapabilitas manusia tersebut. Menurut Groover (2007) ergonomi terbagi sebagai berikut:

1. *Physical Ergonomics*

Physical Ergonomics umumnya ada pada aktivitas pekerjaan manual. Hal yang dipelajari meliputi bagaimana fungsi tubuh selama melakukan sebuah usaha dan bagaimana dimensi tubuh mempengaruhi kemampuan pekerja. *Physical Ergonomic* terkait dengan dua hal berikut:

- a. *Physiology* adalah cabang dari biologi yang berhubungan dengan sel dan jaringan pada makhluk hidup. Desain dari kebutuhan energi pekerjaan manual perlu memperhatikan batasan kekuatan dan ketahanan dari manusia. Penentuan waktu istirahat juga harus diperhatikan untuk pengembalian energi.
- b. *Anthropometry* adalah cabang dari antropologi yang berhubungan dengan dimensi fisik tubuh seperti tinggi, jangkauan, dan berat. Ilmu ini digunakan untuk keperluan ukuran desain yang bisa disesuaikan dengan kelompok tertentu sesuai kebutuhan.

2. *Cognitive Ergonomics*

Cognitive activities pada sebuah pekerjaan meliputi berpikir, membaca, berbicara, belajar, *problem solving*, dan *decision making*. Ergonomi berfungsi untuk memperhatikan kemampuan dan batasan dari otak dan sistem sensor. *Cognitive processes* terdiri dari komponen berikut:

- a. *Sensory System* atau indra terdiri atas sensor penglihatan, pendengaran, peraba, pencium, dan perasa.
- b. *Perception* adalah tahap dari *cognitive* yang merasakan stimuli kemudian memahami berdasarkan pengalaman dan pengetahuan sebelumnya.
- c. *Memory* yang terdiri atas dua komponen utama yaitu *working memory* yaitu daya ingat yang memiliki kapasitas dan waktu terbatas serta *long term memory* yang menyimpan pengetahuan dan pengalaman.

- d. *Response Selection and Execution* adalah *cognitive process* yang melakukan aksi atau respon yang dibutuhkan setelah menerima sensor atau stimuli dan diproses oleh *working memory* dan *long term memory*.
3. *Physical Work Environment*
Environment atau lingkungan kerja meliputi aspek sosial dan fisik. Lingkungan kerja fisik terbagi sebagai berikut:
 - a. *Visual Environment* adalah sesuatu yang dilihat manusia ketika bekerja melalui stimuli visual. Tugas dari ergonomi adalah untuk menentukan nilai optimum dari faktor penting yang berpengaruh seperti level pencahayaan, kontras pencahayaan, warna, dan iluminasi.
 - b. *Auditory Environment* adalah sesuatu yang didengar oleh manusia ketika bekerja. *Auditory* diterima melalui indra pendengaran yang kualitasnya dipengaruhi oleh intensitas dan durasi. Suara yang tidak diinginkan dan mengganggu pendengaran disebut *noise*.
 - c. *Climate* adalah yang dirasakan oleh manusia ketika bekerja yang dipengaruhi oleh variabel seperti suhu udara, kelembaban, kecepatan udara, dan radiasi.
 4. *Occupational Safety and Health* terbagi sebagai berikut:
 - a. *Occupational Safety* adalah sesuatu yang berhubungan dengan usaha mencegah terjadinya kecelakaan yang dapat menyebabkan cedera. Ergonomi berfungsi untuk menganalisis bagaimana dan mengapa
 - b. *Occupational Health* adalah sesuatu yang berhubungan dengan pengurangan gangguan dan penyakit yang terjadi pada pekerja akibat benda-benda dan kondisi yang berbahaya

2.3 LINGKUNGAN KERJA FISIK

Lingkungan kerja fisik sebagai semua keadaan fisik yang terdapat di sekitar tempat kerja yang dapat mempengaruhi karyawan baik secara langsung maupun secara tidak langsung (Stanton, 2004). Dalam lingkungan kerja fisik, aktivitas dan hasil kerja manusia dipengaruhi faktor lingkungan dimana beberapa faktor tersebut yaitu temperatur, kelembaban, sirkulasi udara, pencahayaan, kebisingan, getaran, bau, dekorasi dan lain sebagainya yang terkait dalam sistem sensorik manusia. Dengan kaitan eratnya terhadap hasil kerja manusia sehingga lingkungan kerja fisik harus dirancang sedemikian rupa untuk dapat mendukung kinerja dari pekerja agar selalu

dalam kondisi yang aman dan nyaman.

2.4 THERMAL COMFORT

Di dalam suatu lingkungan kerja, pekerja akan menghadapi tekanan lingkungan. Temperatur lingkungan kerja merupakan salah satu faktor fisik yang berpotensi untuk menimbulkan gangguan kesehatan atau tekanan bagi pekerja bila berada pada kondisi yang ekstrim. Untuk menghindari gangguan yang ditimbulkan maka terdapat rentang toleransi temperatur kerja untuk para pekerja. Lingkungan yang sangat panas atau sangat dingin akan menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia.

Kenyamanan *thermal* atau *thermal comfort* adalah kondisi pikiran yang mengekspresikan kepuasan dengan lingkungan *thermal* dan dinilai menggunakan evaluasi subjektif (ASHRAE, 2004). Kenyamanan *thermal* bisa diperoleh apabila panas tubuh yang dihasilkan dari metabolisme dapat keluar dari tubuh secara seimbang. Gambar 2.1 menunjukkan skema proses pertukaran panas pada tubuh. Pertukaran panas pada tubuh dibagi menjadi 4 jenis yaitu sebagai berikut:

1. Konduksi panas

Pertukaran panas oleh konduksi bergantung pada konduktivitas obyek dan material yang bersentuhan dengan kulit. Konduktivitas panas sangat penting didalam pemilihan material untuk keperluan perancangan alat dan ruang kerja. Misalnya: lantai, rak, *handle*, dan lain-lain.

2. Konveksi

Pertukaran panas melalui proses konveksi tergantung pada perbedaan temperatur antara kulit dan udara sekeliling tubuh, dan juga pada aliran gerakan udara. Proses ini mempengaruhi 25%-30% dari total proses perpindahan panas dalam tubuh manusia.

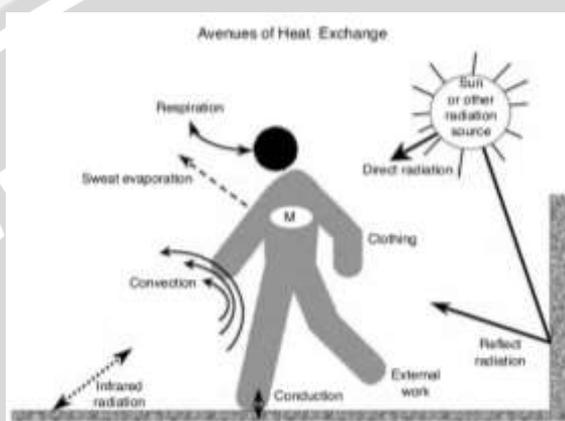
3. Evaporasi Keringat

Hilangnya panas dengan proses keluarnya keringat terjadi karena keringat dibagian kulit tersebut menguap atau evaporasi. Pada kondisi normal setiap orang akan menguapkan sebanyak 1 liter/hari. Berarti akan kehilangan 600 Kcal atau $\pm \frac{1}{4}$ dari total panas yang hilang perharinya. Akan tetapi jika temperatur sekeliling melebihi ambang batas kenyamanan maka kulit akan merefleksikan berupa proses keluarnya keringat yang disertai hilangnya panas.

4. Radiasi Panas

Radiasi adalah pemindahan panas atas dasar gelombang-gelombang elektromagnetik. Misalnya tubuh manusia akan mendapat panas pancaran dari

setiap permukaan dari suhu yang lebih tinggi dan akan kehilangan panas atau memancarkan panas kepada setiap obyek atau permukaan yang memiliki suhu lebih rendah dari tubuh manusia itu. Panas pancaran yang diperoleh atau hilang, tidak dipengaruhi oleh gerakan udara, juga tidak oleh suhu udara antara permukaan-permukaan atau obyek-obyek yang memancar, sehingga radiasi dapat terjadi di ruang hampa. Proses pertukaran panas melalui radiasi terjadi antara tubuh manusia dan sekelilingnya (dinding, benda mati, dan manusia) dalam dua arah sepanjang waktu.



Gambar 2.1 Skema Proses Pertukaran Panas pada Tubuh

Sumber: Stanton (2004)

Ketika tubuh terlalu hangat, maka pembuluh darah meningkatkan aliran darah melalui kulit dan kemudian mulai berkeringat. Jika tubuh terlalu dingin, reaksi pertama pembuluh darah adalah mengurangi aliran darah yang melalui kulit. Reaksi selanjutnya untuk meningkatkan produksi panas internal adalah dengan merangsang otot yang menyebabkan menggigil. Faktor lingkungan yang mempengaruhi kenyamanan *thermal* adalah hal yang menentukan keluar masuknya panas dari dalam tubuh antara lain: *air temperature, mean radiant temperature, operative temperature, relative humidity, air velocity*, metabolisme tubuh, dan *clothing insulation*.

Heat stress adalah gejala akibat tubuh tidak mampu menyesuaikan panas dengan keadaan lingkungan sekitar (Diharja, 2011). Ketika panas bersamaan dengan stres akibat tekanan kerja, kekurangan cairan, dan kondisi medis lainnya, kondisi ini akan menimbulkan penyakit dan dapat mengakibatkan kematian. *Heat stress* dapat dialami saat kondisi panas. *Heat stress* dapat terjadi di banyak lingkungan kerja seperti pembakaran, *kitchen*, dan lain-lain. Untuk lingkungan kerja di luar ruangan, sumber utama panas berasal dari radiasi sinar matahari.

Tekanan panas dapat menyebabkan beban tambahan bagi sirkulasi darah karena

darah harus membawa oksigen ke bagian otot dan harus membawa panas dari dalam tubuh ke permukaan kulit, akibatnya frekuensi denyut nadi akan meningkat. Peningkatan denyut nadi sebagai akibat dari pekerjaan fisik di lingkungan kerja panas dapat menyebabkan kelelahan otot statis, perubahan fungsional pada organ tubuh, dan dapat meningkatkan kecelakaan kerja. Tingginya angka kesalahan dan kecelakaan kerja dapat menimbulkan penurunan efisiensi kerja dan produktivitas kerja. Menurut Diharja (2011) ada beberapa dampak terhadap kesehatan yang ditimbulkan oleh *heat stress*, yaitu sebagai berikut:

1. *Heat rash* (ruam panas)

- a. Ruam panas disebut juga dengan biang keringat yang diakibatkan oleh lingkungan panas. Keringat yang dihasilkan tidak dapat menguap karena udara lembab sehingga menimbulkan ruam panas.
- b. Gejala yang ditimbulkan adalah adanya iritasi di permukaan kulit berupa benjolan merah dan biasanya gatal.
- c. Penanganan yang dapat dilakukan adalah menjaga kebersihan pakaian, dan menghindari panas lingkungan, membas kulit dengan air dingin.
- d. Pencegahan yang dapat dilakukan adalah secara teratur menjaga kulit agar tetap bersih dan kering.

2. *Heatcramps* (kram panas)

- a. Kram panas adalah kram berupa kejang otot (lelah otot). Kram panas disebabkan oleh beban aktivitas yang berat dan mengakibatkan tubuh kehilangan banyak garam maupun air.
- b. Gejala yang ditimbulkan kram otot biasanya pada lengan, kaki, atau perut.
- c. Penanganan yang dapat dilakukan adalah pindah ke tempat yang sejuk, melonggarkan pakaian, lembut pijat dan peregangan.
- d. Pencegahan yang dapat dilakukan adalah mengurangi tingkat aktivitas dan/atau paparan panas, serta minum secara teratur.

3. *Fainting* (pingsan)

- a. Pingsan adalah kehilangan kesadaran yang bersifat sementara dan disebabkan oleh kurangnya aliran darah dan oksigen ke otak.
- b. Gejala pingsan yaitu sebagai berikut kehilangan kesadaran, berkeringat, temperatur tubuh normal, penglihatan menjadi gelap, dan pusing.
- c. Penanganan yang dapat dilakukan adalah berbaring di tempat yang lebih

sejuk, melonggarkan pakaian, jika telah sadar dari pingsan segera berikan seteguk air.

- d. Pencegahan yang dapat dilakukan adalah mengurangi tingkat aktivitas dan paparan terhadap panas, minum secara teratur, dan menghindari berdiri di satu tempat terlalu lama.

4. *Heat exhausting*

- a. *Heat exhausting* adalah masalah kesehatan ketika seseorang yang memiliki banyak aktivitas mengeluarkan banyak keringat dan merasa kelelahan.
- b. Gejala yang ditimbulkan adalah berkeringat, lemah dan merasa lelah, pusing dan mual, kelihatan lebih pucat, kulit berwarna kemerahan.
- c. Penanganan yang dapat dilakukan adalah istirahat di tempat yang lebih sejuk dan meminum larutan.
- d. Pencegahan yang dapat dilakukan adalah mengurangi aktivitas, mengurangi paparan terhadap panas, dan minum cairan secara teratur.

5. *Heat stroke*

- a. *Heat stroke* adalah gangguan medis yang disebabkan oleh kegagalan dalam pengaturan panas tubuh.
- b. Gejala yang ditimbulkan pingsan atau kejang, suhu kulit badan sangat tinggi, kulit berwarna kemerahan dan kebiruan.
- c. Penanganan yang dapat dilakukan adalah penanganan medis.
- d. Pencegahan yang dapat dilakukan adalah mengurangi aktivitas, mengurangi paparan terhadap panas, dan minum cairan secara teratur.

2.5 **PREDICTED MEAN VOTE (PMV)**

Model *Predicted Mean Vote* (PMV) merupakan *index* yang dikenalkan oleh Profesor Fanger dari *University of Denmark*. PMV digunakan untuk mengindikasikan sensasi dingin (*cold*) dan hangat (*warmth*) yang dirasakan oleh manusia (Fanger, 1970). PMV berhubungan dengan 6 parameter dan merupakan nilai rata-rata yang menggambarkan bagaimana sensasi yang dirasakan oleh manusia mengenai panas dan dingin. PMV menyajikan tujuh indeks skala sensasi *thermal* pada skala +3 sampai -3 seperti yang tergambar pada Tabel 1.1.

Sebuah tes dilakukan oleh Fanger di Denmark untuk mengaplikasikan formula PMV pada seluruh tipe bangunan dan dalam seluruh daerah iklim. Kesimpulan dari penelitian tersebut antara lain:

1. Tidak ada perbedaan yang signifikan dalam persepsi kenyamanan berdasar pada letak geografis atau musim (termasuk daerah tropis)
2. Tidak ada perbedaan yang signifikan berdasar pada umur (karena orang yang lebih tua memiliki tingkat metabolisme yang lebih rendah dinetralkan oleh tingkat keringat yang lebih rendah)
3. Tidak ada perbedaan yang signifikan berdasar pada jenis kelamin
4. Tidak ada perbedaan yang signifikan berdasar pada bentuk tubuh
5. Tidak ada perbedaan yang signifikan berdasar pada asal etnis

2.5.1 Elemen yang Mempengaruhi PMV

PMV memperhitungkan faktor yang berhubungan dengan keseimbangan *thermal* dalam tubuh meliputi parameter lingkungan dan tingkat aktivitas. Berikut merupakan elemen yang mempengaruhi nilai PMV:

1. Metabolisme Tubuh

Standar ASHRAE (2004) mendefinisikan tingkat metabolisme tubuh adalah tingkat transformasi energi kimia menjadi panas dan kerja mekanik oleh aktivitas metabolik suatu organisme. Metabolisme tubuh dinyatakan dalam satuan luas permukaan tubuh keseluruhan yaitu met, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2 \text{ (18.4 Btu/h}\cdot\text{ft}^2\text{)} \quad (2-1)$$

Sumber: Fanger (1970)

Energi sebanyak 1 met tersebut sama dengan energi yang dihasilkan per satuan luas permukaan dari orang duduk saat istirahat. Tabel 2.2 menunjukkan laju metabolisme tubuh untuk berbagai aktivitas.

Tabel 2.2 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 file duduk	1,2	Kendaraan Berat	3,2
Berdiri, berbicara	1,2	Pesawat Terbang	1,4
Membuat draft	1,1 – 1,3	Pendaratan	1,8
Pekerjaan kantor lain	1,1 – 1,3	Pesawat Tempur	2,4
Membuat file berdiri	1,4		

Tabel 2.2 Laju Metabolisme Tubuh Berdasarkan Aktivitas (lanjutan)

Aktivitas	Laju Metabolisme (met)	Aktivitas	Laju Metabolisme (met)
Berjalan (permukaan datar)		Aktivitas Senggang	
2 mph (0,89 m/s)	2,0	Memancing	1,2 – 2,0
3 mph (1,34 m/s)	2,6	Golf dan berjalan	1,4 – 2,6
4 mph (1,79 m/s)	3,8	Golf dan menggunakan golf cart	1,4 – 1,8
Pekerjaan Domestik		Berdansa	2,4 – 4,4
Berbelanja	1,4 – 1,8	Kebugaran	3,0 – 4,0
Memasak	1,6 – 2,0	Tenis	3,6 – 4,6
Membersihkan rumah	2,0 – 3,4	Bola dan raket	5,0 – 7,2
Mencuci dan menyetrika	2,0 – 3,6	Basket	5,0 – 7,6
Pekerjaan Kayu		Gulat atau tinju	7,0 – 8,7
Menggergaji dengan mesin	1,8 – 2,2		
Menggergaji dengan tangan	4,0 – 4,8		
Memahat kayu	5,6 – 6,4		

Sumber: ASHRAE (2004) (Terjemahan)

2. Hambatan Pakaian

Clothing insulation atau hambatan pakaian adalah isolasi *thermal* yang diakibatkan oleh pakaian yang dikenakan (ASHRAE, 2004). *Clothing insulation* memiliki pengaruh langsung terhadap kenyamanan *thermal* dan keseimbangan panas yang dirasakan manusia. Hambatan pakaian dinyatakan dalam satuan Clo.

$$1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K} / \text{W} \quad (2-2)$$

Sumber: Fanger (1970)

1 Clo setara dengan jumlah isolasi pakaian yang memungkinkan seseorang menjaga keseimbangan panas saat istirahat pada suhu 21°C dalam ruangan berventilasi normal (*air movement* = 0,1 m/s). Apabila suhu ruangan berada di atas suhu tersebut, maka orang akan merasa berkeringat dan apabila di bawah suhu tersebut, maka orang akan merasa kedinginan. Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk menentukan isolasi pakaian. Menurut standar ASHRAE 2004, ada tiga metode untuk memperkirakan isolasi pakaian antara lain sebagai berikut:

- a. Jika nilai isolasi yang ditunjukkan pada tabel *clothing ensembles* sudah cukup mewakili pakaian yang digunakan, maka nilai tabel ini dapat langsung digunakan. Tabel 2.3 menjelaskan nilai Clo dari *clothing ensemble*.

Tabel 2.3 Nilai Clo dari *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

Tabel 2.3 Nilai Clo dari *Clothing Ensemble* (lanjutan)

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

Sumber: ASHRAE (2004) (Terjemahan)

- b. Jika perlu menambahkan atau mengurangi pakaian yang ada pada tabel *clothing ensembles*, maka dapat digunakan tabel isolasi *garment* sebagai faktor penyesuaian. Tabel 2.4 menjelaskan nilai Clo dari isolasi *garment*.

Tabel 2.4 Nilai Clo Isolasi *Garment*

Deskripsi <i>clothing ensemble</i>	I _{cl} (clo)	Deskripsi <i>clothing ensemble</i>	I _{cl} (clo)
Pakaian dalam		Pakaian dan Rok	
Bra	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 jumper	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		
Alas Kaki		Sweater	
Kaos kaki sepanjang ankle	0,02	Rompi (tipis)	0,13
Stoking	0,02	Rompi (tebal)	0,22
Sandal	0,02	Lengan panjang (tipis)	0,25
Sepatu	0,02	Lengan panjang (tebal)	0,36

Sandal (Tebal)	0,03		
Kaos kaki sebetis	0,03	Jaket jas dan rompi	
Kaos kaki selutut (tebal)	0,06	Rompi (tipis)	0,10
Sepatu bot	0,10	Rompi (tebal)	0,17

Tabel 2.4 Nilai Clo Isolasi Garment (lanjutan)

Deskripsi <i>clothing ensemble</i>	I_{cl} (clo)	Deskripsi <i>clothing ensemble</i>	I_{cl} (clo)
Kaos dan Blus		Jas kancing tunggal (tipis)	0,36
Blus tanpa kerah	0,12	Jas kancing tunggal (tebal)	0,44
Kaos rajut lengan pendek	0,17	Jas kancing double (tipis)	0,42
Kemeja lengan pendek	0,19	Jas kancing double (tebal)	0,48
Kemeja lengan panjang	0,25		
Kemeja flanel lengan panjang	0,34	Pakaian Tidur dan Jubah	
Kaos lengan panjang	0,34	Gaun pendek tanpa lengan (tipis)	0,18
Celana		Gaun panjang tanpa lengan (tipis)	0,20
Celana pendek	0,06	Gaun rumah sakit lengan pendek	0,31
Celana jalan pendek	0,08	Jubah pendek lengan pendek (tipis)	0,34
Celana bahan tipis	0,15	Piyama lengan pendek (tipis)	0,42
Celana bahan tebal	0,24	Gaun panjang lengan panjang (tebal)	0,46
Celana olahraga	0,28	Jubah panjang lengan pendek (tebal)	0,48
<i>Cattlepack</i>	0,30	Piyama lengan panjang (tebal)	0,57
Baju kerja	0,49	Jubah panjang lengan panjang (tebal)	0,69

Sumber: ASHRAE (2004) (Terjemahan)

- c. Jika kombinasi dari pakaian yang dikenakan jauh dari yang tersedia pada Tabel 2.4 maka nilai *clothing insulation* dapat menggunakan nilai masing-masing isolasi pakaian yang ada pada Tabel 2.4.

3. Suhu Udara

Suhu udara atau *air temperature* adalah suhu rata-rata yang berada di sekitar seseorang pada lokasi dan waktu tertentu (ASHRAE, 2004). Suhu diukur menggunakan termometer yang berhubungan langsung dengan udara tetapi tanpa memperhatikan kelembaban dan radiasi. Sehingga suhu udara dapat juga diartikan pula sebagai suhu bola kering (*dry bulb temperature*). Suhu dinyatakan dalam satuan derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$), Kelvin (K), atau Farenheit ($^{\circ}\text{F}$).

4. Mean Radiant Temperature

Mean Radiant Temperature (MRT) berhubungan dengan jumlah radiasi panas yang dikeluarkan dari sebuah permukaan (ASHRAE, 2004). Hal ini bergantung pada kemampuan material dalam menyerap atau memancarkan panas atau disebut *emissivity*. Selain itu MRT juga tergantung pada luas permukaan

dari sebuah objek. Konsep MRT timbul dari kenyataan bahwa perukaran energi radiasi antara dua benda sebanding dengan emisivitasnya.

MRT dapat diukur menggunakan beberapa cara, antara lain *menggunakan two-sphere radiometer, constant-air-temperature sensor, atau black-globe thermometer. Black-globe thermometer* terdiri atas bola hitam dengan sensor temperatur di tengahnya seperti bola termometer raksa dan *thermocople* atau *resistance*. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$MRT = \left[(GT + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times v_a^{0,6}}{\varepsilon \times D^{0,4}} (GT - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (2-3)$$

Sumber: Fanger (1970)

Dimana:

MRT = *mean radiant temperature* (°C)

GT = *globe temperature* (°C)

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

ε = emissivitas bola

D = diameter bola (m)

t_a = *suhu udara* (°C)

Pada penelitian ini *Mean Radiant Temperature* (MRT) diasumsikan sama dengan *air temperature* seperti yang dinyatakan oleh Cigler (2012) yaitu pengukuran yang rumit untuk MRT dapat diasumsikan sama dengan *air temperature* karena pada ruang *indoor* nilai MRT tidak berbeda jauh dengan *air temperature*.

5. *Operative Temperature*

Operative temperature (OT) adalah gabungan dari pengaruh suhu udara dan MRT atau dapat dikatakan sebagai rata-rata *dry-bulb temperature* dan MRT (ASHRAE, 2004). OT juga didefinisikan sebagai efek kombinasi dari perpindahan panas koveksi dan radiasi.

6. Kecepatan Udara

Kecepatan udara didefinisikan sebagai laju pergerakan udara pada suatu titik tanpa memperhatikan arah (ASHRAE, 2004). Menurut standar ASHRAE, kecepatan udara adalah rata-rata dari kecepatan udara yang mengenai tubuh pada suatu lokasi dan waktu. Umumnya kecepatan udara dinyatakan dalam satuan meter per detik.

7. Kelembaban Relatif

Kelembaban relatif atau *relative humidity* (RH) adalah rasio antara jumlah uap air

di udara dengan jumlah uap air di udara yang mampu ditahan pada suhu dan tekanan udara tertentu (ASHRAE, 2004). Cara untuk mengukur jumlah RH di udara adalah menggunakan sistem termometer bola basah dan bola kering. Pada suatu lokasi dengan RH tinggi maka kemampuan tubuh untuk berkeringat (evaporasi) akan berkurang. Dengan berkurangnya kemampuan untuk berkeringat maka kemampuan *heat loss* tubuh juga akan berkurang. Lokasi dengan nilai RH yang rendah atau sangat kering (RH<25%) juga tidak nyaman bagi tubuh karena efeknya pada selaput lendir. Level kelembaban relatif yang disarankan pada ruangan adalah sekitar 30%-70%.

2.5.2 Fungsi PMV

Ada beberapa cara yang bisa digunakan untuk mendapatkan nilai PMV. Cara yang bisa digunakan antara lain: menggunakan pengukuran langsung dengan menggunakan sensor atau menggunakan persamaan dibawah ini, namun memerlukan bantuan program komputer untuk solusi penyelesaian t_{cl} dan h_c . Berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai PMV:

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

Dimana:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 (M - W) - I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} x [(t_{cl} + 273)^4 - (MRT + 273)^4] + f_{cl} h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad (2-5)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 (t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{ketika } 2.38 (t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & \text{ketika } 2.38 (t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (2-6)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 I_{cl} & \text{ketika } I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2\text{K/W} \\ 1.05 + 0.645 I_{cl} & \text{ketika } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2\text{K/W} \end{cases} \quad (2-7)$$

Sumber: Fanger (1970)

Keterangan:

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 *thermal* pada pakaian ($\text{m}^2\text{K/W}$)

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

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

MRT = mean radiant temperature ($^{\circ}C$)

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

p_a = partial water vapour pressure (Pa)

h_c = convective heat transfer (W/m^2K)

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

2.6 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

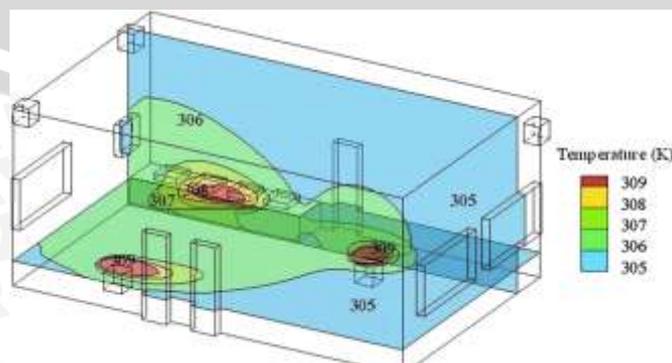
Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah metode perhitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas, dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya (Munson, 2005). Prinsipnya adalah suatu ruang yang berisi fluida yang akan dilakukan penghitungan 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. Kontrol-kontrol penghitungan ini beserta kontrol-kontrol penghitungan lainnya merupakan pembagian ruang yang disebut tadi. 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. Contoh lain penerapan prinsip ini adalah *Finite Element Analysis* (FEA) yang digunakan untuk menghitung tegangan yang terjadi pada benda solid.

Sejarah CFD berawal pada tahun 60-an dan terkenal pada tahun 70-an yang 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 menganalisa *stress* yang terjadi pada desain yang dibuat. Pemakaian CFD secara umum dipakai untuk memprediksi:

1. Aliran dan panas
2. Transfer massa
3. Perubahan fasa seperti pada proses *melting*, pengembunan dan pendidihan
4. Reaksi kimia seperti pembakaran
5. Gerakan mekanis seperti piston dan *fan*
6. Tegangan dan tumpuan pada benda solid
7. Gelembung elektromagnetik

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah perhitungan yang mengkhususkan pada fluida (Munson, 2005). Mulai dari aliran fluida, *heat transfer*, dan reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Perhitungan dengan CFD dapat dilakukan atas dasar prinsip-prinsip mekanika fluida, konservasi energi, momentum, massa, dan spesies. Secara sederhana proses perhitungan yang dilakukan oleh aplikasi CFD adalah dengan kontrol-kontrol perhitungan yang telah dilakukan. Kontrol perhitungan tersebut akan melibatkan dan memanfaatkan persamaan-persamaan yang berkaitan. Persamaan-persamaan ini adalah persamaan yang membangkitkan dengan memasukan parameter apa saja yang terlibat dalam *domain*. Inisialisasi awal dari persamaan adalah *boundary condition*. *Boundary condition* adalah kondisi dimana kontrol-kontrol perhitungan didefinisikan sebagai definisi awal yang akan dilibatkan ke kontrol-kontrol perhitungan yang berdekatan melalui persamaan-persamaan yang terlibat. Secara umum proses perhitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama yaitu *Preprocessor*, *Processor*, dan *Post processor*.

Preprocessor adalah tahap dimana data diinput mulai dari definisi domain serta definisi kondisi batas atau *boundary condition*. Tahap ini juga sebuah benda atau ruangan yang akan dianalisis dibagi dengan jumlah *grid* tertentu atau sering juga disebut dengan *meshing*. Tahap selanjutnya adalah *processor*, pada tahap ini dilakukan proses perhitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Artinya perhitungan dilakukan hingga hasil menujua error terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Perhitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume kontrol dengan proses integrasi persamaan diskrit. Tahap akhir merupakan tahap *post processor* dimana hasil perhitungan diinterpretasikan kedalam gambar, grafik, bahkan animasi dengan polawarna tertentu. Gambar 2.2 merupakan contoh dari hasil tahap *post processor* yang berupa gambar.



Gambar 2.2 Contoh Gambar Hasil Tahap *Post Processor*

Sumber: Saha (2012)

Hal yang paling mendasar mengapak 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.

