

TESIS

ANALISIS KENYAMANAN TERMAL RUANG PERKANTORAN GEDUNG TOWER BUPATI BARRU

*Thermal Comfort Analysis of Office Spaces
In The Barru Regency Tower Building*

SHAPARDI KAHIR

D042221011



PROGRAM STUDI MAGISTER ARSITEKTUR
DEPARTEMEN ARSITEKTUR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024



PENGAJUAN TESIS

ANALISIS KENYAMANAN TERMAL RUANG PERKANTORAN GEDUNG TOWER BUPATI BARRU

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Arsitektur

Disusun dan Diajukan Oleh

SHAPARDI KAHIR

D042221011

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2024



TESIS

ANALISIS KENYAMANAN TERMAL RUANG PERKANTORAN GEDUNG TOWER BUPATI BARRU

SHAPARDI KAHIR

D042221011

Telah dipertahankan di hadapan panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Arsitektur Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 23 Januari 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Ir. Rosadv Mulyadi, ST., MT

NIP. 19700810 199802 1 001

Pembimbing Pendamping



Prof. Ir. Baharuddin, ST., M.Arch., Ph.D

NIP. 19690308 199512 1 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Muhammad Isran Ramli, ST., MT

19730926 200012 1002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Arsitektur



Dr. Eng. Ir. Hj. Asniawaty, ST., MT

NIP. 19710925 199903 2001



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Shapardi Kahir

Nomor mahasiswa : D042221011

Program studi : Arsitektur

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Analisis kenyamanan termal ruang perkantoran gedung tower Bupati Barru” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Nama Lengkap dan gelar Pembimbing Utama dan Nama Lengkap dan gelar sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding (ISVS e-journal, Volume 10, Halaman 205-220, dan DOI “<https://doi.org/10.61275/ISVSej-2023-10-12-14>”) sebagai artikel dengan judul “*Room gap analysis of thermal comfort in office spaces : The case of office space in the Barru regent tower building, Indonesia*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 12-Februari-2024

Yang menyatakan



Shapardi Kahir



KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah Subhanahu wa Ta'ala karena atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tesis penelitian ini.

Gagasan yang melatari tajuk permasalahan ini timbul dari hasil pengamatan penulis terhadap gedung tower Bupati Barru yang memiliki persoalan terhadap kenyamanan termal pegawai. Penulis bermaksud menganalisis serta mengidentifikasi kenyamanan termal lingkungan pada gedung tower Bupati Barru dan berfokus pada faktor celah ruangan dan beban pendingin AC (*Air Conditioner*) sehingga dengan penelitian ini diharapkan bisa menjawab dan memberikan solusi atas masalah yang ditemukan.

Tidak sedikit kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan tesis penelitian ini, yang hanya berkat bantuan berbagai pihak, maka proposal penelitian ini dapat selesai pada waktunya, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Dr. Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT sebagai Ketua Komisi Penasehat dan Prof. Ir. Baharuddin Hamzah, ST., M. Arch., Ph.D sebagai Anggota Komisi Penasehat atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan.
2. Ibu Dr. Ir. Nurul Jamala B, MT, Ibu Dr. Eng. Ir. Hj. Asniawaty. ST., MT. dan bapak Dr. Ir. Samsuddin Amin, MT. sebagai tim penguji dalam seminar proposal dan seminar hasil.
3. Kepada Ummul Khairi S.Kep.,Ns. Istri tercinta yang telah memberi motivasi, semangat dan dukungan kepada penulis.

Terimakasih juga penulis sampaikan kepada Ibu dan Ayah, adik-adik tersayang serta teman-teman yang telah memberikan semangat dan motivasi dalam menyelesaikan hasil penelitian ini.

Makassar, 2024

Shapardi Kahir



ABSTRAK

SHAPARDI KAHIR. Analisis Kenyamanan Termal Ruang Perkantoran Gedung Tower Bupati Barru. (dibimbing oleh **Dr. Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT** dan **Prof. Ir. Baharuddin Hamzah, M. Arch., Ph.D**)

Kenyamanan termal harus dipenuhi oleh ruangan kantor untuk meningkatkan produktivitas kerja. Sistem HVAC harus bekerja pada ruangan tertutup agar distribusi udara dingin bekerja maksimal. Pada ruang kantor gedung Menara Bupati Barru, ditemukan adanya celah pada bagian samping ruangan yang mungkin menyebabkan distribusi udara dingin menjadi terbuang dan tidak bekerja maksimal sehingga berdampak pada kondisi ketidaknyamanan termal pengguna. Tujuan penelitian adalah menganalisis kondisi kenyamanan termal dan pengaruh faktor gap terhadap kondisi termal ruangan kantor. Penelitian mengenai kenyamanan termal ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Penelitian kenyamanan termal ini meliputi data obyektif (profil suhu ruangan, kecepatan angin, kelembaban dan rata-rata suhu radiasi) dan data subyektif (aktivitas dan pakaian). Analisis obyektif diperoleh dari nilai *Predicted Mean Vote* (PMV) dan *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) melalui software Thermal Comfort Tool oleh *Center for Built Environment* (CBE) dan analisis subyektif diperoleh dari kuesioner. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ruangan kantor belum memenuhi standar kenyamanan ASHRAE-55, namun hasil kuisisioner menyatakan 74% merasa nyaman dan setelah ditutup celah ruangan meningkat 77%. Beberapa faktor yang menyebabkan belum memenuhi standar ASHRAE-55 adalah distribusi udara dingin yang kurang optimal dan pengaruh celah pada sisi-sisi ruangan. Hasil penelitian ketika seluruh celah pada sisi ruangan ditutup menunjukkan suhu mengalami penurunan sekitar 0,5 °C.

Kata Kunci : Temperatur udara, kenyamanan termal, PPD, PMV, CBE



ABSTRACT

SHAPARDI KAHIR. Room Gaps Analysis of Thermal Comfort In Office Spaces. (supervised by Dr. Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT dan Prof. Ir. Baharuddin Hamzah, M. Arch., Ph.D

Thermal comfort must be fulfilled by the office room to increase work productivity. The HVAC sistem must work in a closed room so that cold air distribution works optimally. In the office room of Barru Regent's Tower building, gaps were found in the side of the room that might cause the cold air distribution to be wasted and not work optimally affecting the user's thermal discomfort conditions. The research purpose is to analyze thermal comfort conditions and influence of gap factors on the thermal conditions of office room. This research on thermal comfort uses a quantitative approach. This thermal comfort research includes objective data (room temperature profile, wind speed, humidity and mean radiant temperature) and subjective data (activities and clothing). Objective analysis was obtained from the Predicted Mean Vote (PMV) and Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) values through the Thermal Comfort Tool software by Center for Built Environment (CBE) and subjective analysis was obtained from questionnaires. The research results show that the office room does not comply with ASHRAE-55 comfort standards, but the results of the questionnaire stated that 74% felt comfortable and after the room gap was closed increased 77%. Several factors that cause it not to comply with ASHRAE-55 standards are less than optimal distribution of cold air and the influence of gaps on the sides of the room. The results of the research when all gaps on the sides of the room were closed showed that the temperature decreased by around 0.5 °C.

Keywords: Air Temperature, Thermal Comfort, PPD, PMV,CBE.



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH DAN SIMBOL.....	xvii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Ruang Lingkup Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Kenyamanan Termal.....	7
2.1.1. Kenyamanan dalam ruang.....	7
2.1.2. Faktor kenyamanan dalam ruang	7



2.2. Batas Kenyamanan Termal	11
2.3. Temperatur operative dan temperature globe	16
2.4. Perpindahan panas secara Konveksi	18
2.5. Indeks kenyamanan termal PMV (Predicted Mean Vote) dan PPD (Predicted Persentage Dissatified).	19
2.3.1. Definisi PMV (<i>Predicted Mean Vote</i>)	20
2.3.2. Elemen yang berpengaruh pada PMV	22
2.3.3. Mekanisme PMV	23
2.3.4. Aplikasi PMV	25
2.6. Metode Keseimbangan Termal	28
2.7. Kerangka Pikir	31
BAB III	32
METODOLOGI PENELITIAN	32
3.1. Metode Penelitian	32
3.2. Lokasi Penelitian.....	32
3.3. Waktu dan Objek Penelitian.....	33
3.4. Teknik Pengumpulan Data	33
3.5. Pengukuran Faktor Lingkungan.....	37
3.6. Perhitungan Faktor Manusia	37
3.7. Teknik Analisis Data.....	40
3.8. Alat dan Bahan Penelitian	41
3.9. Definisi Operasional.	44
3.10. Alur Penelitian	47
3.11. Penelitian Terdahulu	48
AB IV	51
ASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	51
4.1. Gambaran Umum.....	51



4.2. Pemetaan Titik Pengambilan Data	51
4.3. Pengukuran lngkungan termal eksisting ruang kantor	52
4.3.1. Performa termal ruangan Setiap titik	53
4.3.2. Pengukuran profil temperature & kelembapan ruangan	55
4.3.3. Pengukuran kecepatan angin	59
4.3.4. Pengukuran Temperatur Globe	60
4.3.5. Pengukuran insulasi pakaian dan metabolisme	61
4.3.6. Nilai PMV dan PPD ruang kantor eksisting	62
4.3.7. Simulasi lingkungan termal ruang kantor	64
4.4. Persepsi kenyamanan termal ruang kantor	68
4.5. Pengukuran lingkungan termal rekayasa ruang dengan menutup celah ruangan	71
4.5.1. Performa termal ruangan setiap titik setelah celah di tutup.	71
4.5.2. Pengukuran profil temperature dan kelembapan setelah celah di tutup	72
4.5.3. Pengukuran kecepatan angin setelah celah di tutup.	76
4.5.4. Pengukuran Temperatur Globe setelah celah di tutup	77
4.5.5. Nilai PMV dan PPD rekayasa ruang kantor	78
4.6. Uji Tingkat Signifikansi Temperatur ruangan sebelum dan setelah celah ruangan di tutup	80
4.7. Persepsi kenyamanan termal rekayasa ruang kantor	81
4.8. Grafik perbandingan profil temperatur, temperatur globe eksisting dan rekayasa ruang.	84
4.9. Grafik PMV dan PPD sebelum dan setelah celah ruangan di tutup dengan styrofoam	85
4.10. Pergerakan udara yang terjadi pada celah ruangan kantor	87
4.11. Analisis metode keseimbangan termal	88
4.12. Alternatif solusi meningkatkan kenyamanan termal	92
AB V	93



KESIMPULAN DAN SARAN	93
5.1. Kesimpulan	93
5.2. Saran	94
DAFTAR PUSTAKA	95
DAFTAR LAMPIRAN	98



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Batas kenyamanan termal pada rentang suhu dan kelembapan yang berbeda (S. V. Szokolay, 1980)	9
Tabel 2. Pergerakan udara dan pengaruh pada sensasi (Szokolay, 1980).....	9
Tabel 3. Nilai insulasi pakaian (ASHRAE Standard, 2010).....	10
Tabel 4. Perbandingan Aktivitas dan Energi panas yang dikeluarkan (Szokolay, 1980).	11
Tabel 5. Perbandingan Faktor Penentu Suhu Nyaman. (Talarosha, 2005).....	12
Tabel 6. Batas-batas Kenyamanan Termal. (Lippsmeier, 1994)	15
Tabel 7. Hubungan antara PMV, PPD, dan sensasi termal (Ole Fanger and Toftum, 2002)	21
Tabel 8. Definisi Operasional	44
Tabel 9. Penelitian Terdahulu.....	48
Tabel 10. Hasil pengambilan data 4 titik pengukuran data awal ruang kantor.....	53
Tabel 11. Hasil pengambilan data profil temperatur dan kelembapan eksisting ruang kantor.	56
Tabel 12. Hasil pengambilan data kecepatan angin ruang eksisting.	59
Tabel 13. Hasil pengambilan data temperatur globe.....	60
Tabel 14. Nilai metabolisme berdasarkan standar ASHRAE55 (ASHRAE Standard, 2020)	61
Tabel 15. Nilai insulasi pakaian berdasarkan standar ASHRAE-55.(ASHRAE Standard, 2020)	61
Tabel 16. Nilai PMV dan PPD ruang kantor.	62
Tabel 17. Hasil pengambilan data 4 titik pengukuran data awal ruang kantor.....	72
Tabel 18. Hasil pengambilan data profil temperatur dan kelembapan rekayasa ruang menutup celah.	73
Tabel 19. Hasil pengambilan data kecepatan angin rekayasa ruang.	76
Tabel 20. Nilai PMV dan PPD setelah celah di tutup	78
Tabel 21. Pergerakan udara yang melewati celah ruangan.	87
Tabel 22. Data hasil pengukuran ruang kantor.....	89
Tabel 23. Data material transmission Value dan Absorption Value.....	89
Tabel 24. Data Luasan Area yang terkena sinar matahari langsung	89



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Temperatur Operativ dan Temperatur Globe untuk suhu udara konstan: (a) 308 K, (b) 288K dan selisih rata-rata radiasi dan suhu udara kurang dari 10 K (AMS, 2007)	17
Gambar 2. Perpindahan panas secara konveksi (Ratini, 2015).....	18
Gambar 3. Grafik hubungan antara PMV vs PPD (Ole Fanger and Toftum, 2002).	21
Gambar 4. Sensasi termal rata-rata (pada skala Fanger) sebagai fungsi dari prediksi Mean Vote (PMV).(Givoni, 1998)	25
Gambar 5. Rata-rata hasil yang diamati dalam studi lapangan sebagai fungsi dari PMV yang dihitung(Nicol and Humphreys, 2002).....	26
Gambar 6. Perbedaan antara Mean Vote yang diamati dan PMV sebagai fungsi dari suhu rata-rata di setiap penelitian. (Nicol and Humphreys, 2002).	26
Gambar 7. Sensasi termal, untuk musim panas, dan musim dingin sebagai fungsi PMV. (Givoni, 1998)	27
Gambar 8. Kerangka Pikir	31
Gambar 9. Lokasi penelitian (kiri) dan Gedung Perkantoran Tower Bupati Barru (kanan).....	32
Gambar 10. Lokasi Ruangan DPMPSTPTK dan DISDUKCAPIL Kab. Barru ..	33
Gambar 11. Denah Ruangan kantor gedung tower Bupati Barru	35
Gambar 12. Isometri Ruangan kantor gedung tower Bupati Barru	36
Gambar 13. PMV Calculator CBE Thermal Comfort(University of California Berkeley (USA), 2020)	39
Gambar 14. Hubungan PMV dan PPD(Aniza <i>et al.</i> , 2007).....	39
Gambar 15. Rool Meter (30 meter).....	41
Gambar 16. Thermo hygro HTC-2.....	42
Gambar 17. Hobo data logger (Hobo UX100) atas dan (Hobo U12) bawah.	42
Gambar 18. LSI LASTEM Multiloggger	42
Gambar 19. Pemetaan titik pengambilan data	52
Gambar 20. Pengukuran lingkungan termal ruang kantor.....	53
Gambar 21. Grafik pengambilan data suhu 4 titik pengukuran.	54
Gambar 22. Pengukuran temperatur pengambilan data 1 tanggal 4-09-23	56
Gambar 23. Pengukuran temperatur pengambilan data 1 tanggal 5-09-23	57
Gambar 24. Pengukuran temperatur pengambilan data 1 tanggal 6-09-23	57
Gambar 25. Pengukuran temperatur pengambilan data 1 tanggal 7-09-23	57
Gambar 26. Pengukuran temperatur pengambilan data 1 tanggal 8-09-23	58
27. Grafik rata-rata profil temperatur ruang eksisting.	58
28. Grafik rata-rata kecepatan angin ruang eksisting.....	59
29. Grafik rata-rata Temperatur Globe	60
30. Grafik rata-rata variabel Ta, Tg, MRT, Top dan RH.	63



Gambar 31. Psikometrik PMV dan PPD standar ASHRAE55-2020	64
Gambar 32. <i>General settings</i> dan <i>thermal properties</i> simulasi lingkungan termal	65
Gambar 33. Schedule pegawai kantor simulasi lingkungan termal	65
Gambar 34. Modelling simulasi ruangan kantor pada aplikasi Ecotect	66
Gambar 35. Input material data simulasi ruangan kantor pada aplikasi Ecotect ..	66
Gambar 36. Mean Radiant Temperature simulasi ruangan kantor pada aplikasi Ecotect	67
Gambar 37. Nilai PMV simulasi ruangan kantor pada aplikasi Ecotect.	67
Gambar 38. Grafik sensasi termal pengguna ruang kantor.....	68
Gambar 39. Grafik kenyamanan termal pengguna ruang kantor.	68
Gambar 40. Grafik ekspestasi pengguna terhadap perubahan suhu ruang kantor.	69
Gambar 41. Grafik persepsi kecepatan udara ruang kantor.....	69
Gambar 42. Grafik durasi bekerja pengguna di ruang kantor.....	70
Gambar 43. Grafik penerimaan termal pengguna di ruang kantor.	70
Gambar 44. Rekayasa ruang dengan menutup celah ruangan menggunakan gabus strofoam.....	71
Gambar 45. Grafik pengambilan data suhu 4 titik pengukuran setelah celah ruang di tutup.....	72
Gambar 46. Pengukuran temperatur pengambilan data 2 tanggal 11-09-23	73
Gambar 47. Pengukuran temperatur pengambilan data 2 tanggal 12-09-23	74
Gambar 48. Pengukuran temperatur pengambilan data 2 tanggal 13-09-23	74
Gambar 49. Pengukuran temperatur pengambilan data 2 tanggal 14-09-23	74
Gambar 50. Pengukuran temperatur pengambilan data 2 tanggal 15-09-23	75
Gambar 51. Grafik rata-rata profil temperatur celah tertutup.....	75
Gambar 52. Grafik rata-rata kecepatan angin celah tertutup.	76
Gambar 53. Grafik rata-rata temperatur globe celah tertutup.....	77
Gambar 54. Grafik rata-rata variabel Ta, Tg, MRT, Top dan RH setelah celah di tutup.....	79
Gambar 55. Psikometrik PMV dan PPD standar ASHRAE55-2020 celah tertutup.	79
Gambar 56. Uji T-Test paired sampel IMB SPSS 26	80
Gambar 57. Grafik sensasi termal pengguna ruang kantor setelah celah di tutup.	81
Gambar 58. Grafik kenyamanan termal pengguna setelah celah di tutup.	82
Gambar 59. Grafik ekspestasi pengguna terhadap perubahan suhu setelah celah di tutup.....	82
60. Grafik kecepatan udara setelah celah di tutup.	82
61. Grafik penerimaan termal pengguna setelah celah di tutup.	83
62. Grafik perbandingan profil temperatur ruangan eksiting awal dan setelah celah di tutup.....	84



Gambar 63. Grafik perbandingan temperatur globe ruangan eksiting awal dan setelah celah di tutup.....	85
Gambar 64. Grafik PMV ruangan eksiting awal dan setelah celah di tutup.	86
Gambar 65. Grafik PPD ruangan eksiting awal dan setelah celah di tutup.....	86
Gambar 66. Grafik pergerakan udara yang melewati celah ruangan.	87
Gambar 67. Denah posisi peletakan AC (Air Conditioner) ruangan.	88
Gambar 68. Gambar material insulasi curtain wall (jamiekwon.com).....	92



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat balasan izin penelitian dari dinas DPMTSPST	98
Lampiran 2. Surat permohonan izin penelitian kepada Bupati Barru.....	99
Lampiran 3. Surat permohonan izin penelitian kepada Kepala Dinas DPMPTSP	100
Lampiran 4. Disposisi surat peminjaman alat penelitian	101
Lampiran 5. Kartu Asistensi Seminar Hasil	102
Lampiran 6. Foto-foto dokumentasi penelitian	103
Lampiran 7. Kuesioner penelitian.....	107



DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH DAN SIMBOL

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
$^{\circ}\text{C}$	= Derajat Celcius
RH	= Kelembapan [%]
Met	= Metabolisme
Clo	= <i>Clothing insulation</i>
α_c	= koefisien perpindahan panas secara konveksi [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$]
α_r	= koefisien radiasi pada permukaan benda [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$]
T_a	= Profil temperature ruangan [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	= Temperatur Globe [$^{\circ}\text{C}$]
T_r	= <i>The mean radiant temperature</i> [$^{\circ}\text{C}$.]
T_o	= Temperatur Operative [$^{\circ}\text{C}$]
α_{cg}	= koefisien perpindahan panas konveksi antara termometer udara dan globe thermometer
PMV	= <i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	= <i>Predicted Percentage of Discomfort</i> [%]
M	= <i>Metabolism</i> [W/m]
W	= <i>External Work, equal to zero from most metabolism</i>
f_{cl}	= Rasio area permukaan orang ketika berpakaian, dengan area permukaan ketikadidak berpakaian.
V_{ar}	= kecepatan relatif udara (relatif terhadap tubuh manusia) dalam m/sp_a <i>partial water vapour pressure</i> .
	= <i>convective heat transfer</i> , dalam [$\text{W/m}^2\text{K}$]



t_{cl}	= permukaan temperature pakaian, dalam [$^{\circ}\text{C}$]
Q_i	= <i>internal heat gain</i> (panas dari sumber di dalam ruangan), [W]
Q_s	= <i>solar heat flow</i> (panas matahari yang menembus kaca atau melalui jendela), [W]
Q_c	= <i>conduction heat flow</i> (panas dari ruang luar yang menembus dinding), [W]
Q_v	= <i>convection heat flow</i> (panas dari udara luar), [W]
Q_m	= <i>mechanical cooling</i> (panas yang harus diangkut oleh mesin penyejuk udara), [W]
Q_e	= <i>evaporation</i> (pengurangan panas karena penguapan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.

Pada saat ini, banyak kegiatan manusia dihabiskan di dalam ruangan, kita sebagai pengguna membutuhkan suatu kenyamanan ketika berada dalam suatu ruangan sehingga kita dapat melakukan aktivitas dengan nyaman dan tenang. Berdasarkan pendapat Shang bahwa pengguna pada umumnya menghabiskan waktunya berada dalam ruangan lebih dari 90%. Sehingga ketika kita beraktivitas membutuhkan sirkulasi dan penghawaan udara yang baik yang sangat bermanfaat bagi pengguna (Shan *et al.*, 2019).

Salah satu sasaran dalam karya arsitektur adalah kenyamanan. Pengertian dari kenyamanan adalah suatu interaksi manusia dan lingkungan yang bebas dari rasa negatif dan bersifat subjektif. Menurut Sugini kenyamanan terdiri dari kenyamanan spasial, visual dan auditorial dimana istilah istilah dari kenyamanan termal yaitu mulai gerah, nyaman, panas, sejuk dan pengap (Sugini, 2004).

Indonesia merupakan bagian negara yang beriklim tropis, sama dengan negara Malaysia dan Singapura yang berada di posisi antara 1-11° Lintang Utara. Suhu rata-rata tahunan mencapai 26-27°C dan suhu siang hari tertinggi mencapai 34°C dan kelembapan relatif antara 70-90 % (Shaari and Ahmad, 2016). Menurut Szokolay menjelaskan bahwa Indonesia sebagai negara yang memiliki iklim tropis dan lembab sangat sulit ditangani untuk mendapatkan tingkat responsibilitas yang maksimal. Tanpa pengkondisian udara yang jelas, sulit untuk mencapai kondisi internal yang nyaman untuk dihuni. Akan tetapi di satu sisi pengkondisian udara buatan merupakan pengkomsumsi energi listrik terbesar dalam suatu bangunan, sehingga menyebabkan adanya pemborosan energi (Szokolay, 1977).

Saat ini ada dua pendekatan yang dikembangkan terkait kenyamanan termal yaitu pendekatan statik dan pendekatan adaptif. Pendekatan statik adalah pendekatan kenyamanan termal yang dihitung berdasarkan indeks yang an. Beberapa penemuan terkait standar internasional kenyamanan termal O 7730 (ISO 7730, 2005), standar ASHRAE 55 (ASHRAE Standard, an CEN Standard (Comite'Europe'en de Normalisation, 2007). Standar



ASHRAE 55 merupakan standar yang paling banyak digunakan menggunakan indeks PMV (*Predicted mean vote*) model yang disusun oleh Fanger (Fanger, 1970). Pendekatan yang kedua yaitu pendekatan adaptif. Pendekatan adaptif menggunakan responden pengguna yang disesuaikan dengan kondisi iklim, penelitian ini merupakan suatu upaya untuk mengetahui netralitas termal dan penerimaan kondisi termal. Pendekatan adaptif dikembangkan oleh Nicol (Nicol and Humphreys, 2010) dan oleh Dear dan Brager (De Dear *et al.*, 1998)

Dalam kaitannya dengan bangunan, manusia dikatakan nyaman secara termal ketika ia tidak dapat mengatakan apakah ia menghendaki adanya perubahan suhu udara yang lebih panas atau yang lebih dingin dalam ruangan tersebut (Karyono, 2000). Kenyaman termal dipengaruhi oleh dua faktor yaitu faktor alam dan faktor manusia. Faktor alam yang secara dominan mempengaruhi kenyamanan termal adalah suhu udara (T_a), kelembapan udara (R_h), kecepatan angin (v), dan radiasi matahari (R_a). Sedangkan untuk faktor manusia yang mempengaruhi kenyamanan termal adalah aktivitas (met) dan jenis pakaian (Clo). Faktor lain yang mempengaruhi kenyamanan termal adalah lorong angin (pergerakan/sirkulasi), keberadaan dan penataan vegetasi, pemilihan jenis material perkerasan, albedo lingkungan dan penataan massa bangunan di dalam Kawasan (Tursilowati *et al.*, 2012).

Berdasarkan faktor tersebut dilakukan observasi awal pada gedung perkantoran tower bupati Barru dimana gedung tersebut terdiri dari 7 lantai (30 m) diresmikan tahun 2019 dan satu-satunya gedung berlantai banyak di kabupaten Barru. Gedung tower bupati tersebut merupakan gabungan kedinasan sehingga pelayanan masyarakat lebih efektif. Layout ruangan kantor berukuran 12 x 30 m dengan luasan 360 m². Hasil observasi awal menunjukkan beberapa pegawai (ASN dan Non ASN) yang membawa kipas angin portabel, terdapat beberapa barang elektronik yang memungkinkan dapat menghasilkan panas seperti komputer dan printer. Observasi awal juga menemukan AC 1 PK (9.000 BTU) dengan jumlah 3 unit bagian utara, 3 unit bagian selatan dan 2 unit di

engah. Aktivitas yang dilakukan pada ruangan tersebut masuk dalam sedentary (kantor). Terdapat celah antar lantai yang terbuka di bagian gan sehingga distribusi udara dingin kurang optimal. Pada tipe ruangan



HVAC membiarkan pintu dan jendela terbuka akan mengurangi tingkat efisiensi dan melemahkan kemampuan sistem AC (Lee, 2019). Disamping itu posisi kaca berada di bagian timur, utara dan selatan. Pengamatan awal jendela atau bukaan tersebut merupakan kaca mati. Berdasarkan pendapat Karyono menyimpulkan orientasi bukaan jendela yang tidak terlindungi dan menghadap ke timur cenderung berpotensi menyebabkan konsumsi energi yang lebih tinggi dan memiliki kenyamanan termal yang rendah (Karyono, 2000). Bukaan kaca tersebut berpotensi masuknya radiasi matahari ke dalam ruangan dan hasil ketidaknyamanan dapat menurunkan produktifitas dalam bekerja (Wagner *et al.*, 2007). Oleh karena itu objek penelitian di gedung perkantoran ini sangat penting untuk dilakukan untuk melihat kenyamanan termal pegawai.

Sistem penghawaan alami maupun buatan adalah sistem yang tak terpisahkan dalam perencanaan arsitektur. Aktivitas, peralatan elektronik, dan radiasi matahari adalah sumber panas dalam ruangan yang harus dikeluarkan dengan sistem penghawaan, baik itu penghawaan alami maupun penghawaan buatan (HVAC) serta sistem penghawaan mekanis kipas angin sebagai penggerak udara (Bedford, 1936). Menurut Leaman jika sistem penghawaan tidak mampu bekerja dengan baik maka akan menyebabkan menurunnya produktivitas dan konsentrasi kerja sehingga berdampak pada ketidaknyamanan termal. Kualitas udara yang baik dapat berpengaruh pada kesehatan, kenyamanan pengguna dan produktivitas dalam bekerja (Leaman and Bill Bordass., 2006). Salah satu cara meningkatkan kenyamanan termal adalah dengan meningkatkan kualitas udara pada ruang dengan menggunakan sistem HVAC. Penggunaan AC harus efektif dan seefisien mungkin, terutama dalam hal beban penyejukan (*cooling load*). Menurut Syahrizal, dkk (2013) menyebutkan bahwa sekitar 60 % konsumsi energi listrik hotel di Jakarta digunakan untuk memasok mesin AC (Syahrizal and Panjaitan, 2013). Panas yang harus dibuang dari dalam ruang menuju keluar ruangan agar suhu ruangan tidak naik ataupun tidak turun dalam batas nyaman termal (Balaras et al.,



berdasarkan pembahasan tersebut terkhusus pada fokus penelitian yakni 3 gedung tower bupati Barru merupakan ruangan tertutup dengan tipe

ruangan sistem HVAC dan terdapat celah antar lantai. Sistem distribusi udara dingin AC akan efektif apabila berada di dalam ruangan yang benar – benar tertutup rapat. Jadi dipastikan tidak ada celah atau lubang pada ruangan yang membuat udara dingin AC terbang. Banyak faktor yang menjadi penyebab udara dingin dalam ruangan kurang optimal seperti volume ruangan, letak AC dan ketercukupan udara dingin. Udara dingin yang terbang bisa jadi merupakan salah faktor distribusi udara dingin dalam suatu ruangan tidak maksimal yang berdampak pada ketidak nyamanan pengguna. Observasi awal juga menunjukkan beberapa pegawai menghendaki perubahan suhu agak dingin dan sensasi kenyamanan termal dalam ruangan yang agak panas. Dalam penelitian ini akan menganalisis pengaruh celah terhadap distribusi udara dingin pada ruangan kantor tersebut.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dikemukakan di atas, maka pokok permasalahan yang dapat dirumuskan adalah :

1. Bagaimana tingkat kenyamanan termal pegawai pada gedung perkantoran tower Bupati Barru berdasarkan standar ASHRAE 55?
2. Bagaimana pengaruh celah dan beban pendingin terhadap terhadap kondisi termal ruang kantor di gedung tower Bupati Barru?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian berdasarkan rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis sensasi kenyamanan termal pegawai dalam kaitannya dengan standar ASHRAE 55 pada gedung perkantoran tower bupati Barru
2. Menganalisis pengaruh faktor celah dan beban pendingin terhadap kondisi termal ruang kantor di gedung tower Bupati Barru.



Manfaat Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang dikemukakan di atas, maka manfaat penelitian adalah sebagai berikut:

1. Bagi ranah ilmu arsitektur : dapat menambah pengetahuan dan wawasan tentang kenyamanan termal, serta pengaruh celah dan beban pendingin terhadap kondisi termal ruangan kantor.
2. Bagi peneliti selanjutnya : dapat dijadikan referensi di bidang sains arsitektur khususnya menambah referensi tentang studi kenyamanan termal dan keseimbangan termal.
3. Bagi pemerintah : Dengan penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi pemerintah terhadap acuan kenyamanan termal ruangan kantor.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian.

Batasan lingkup penelitian adalah gedung tower bupati Barru di Kabupaten Barru pada bagian ruang perkantoran lantai 3 (+7,5) m. Bagian ruang kantor lantai 3 adalah dinas penanaman modal pelayanan terpadu (DPMPT) dan dinas pencatatan penduduk sipil (DUKCAPIL).

1.6. Sistematika Penulisan

1. BAB I: Pendahuluan.

Berisikan tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian atau lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

2. BAB II: Tinjauan Pustaka.

Berisi tentang tinjauan umum objek penelitian dan teori-teori mengenai kenyamanan termal, standar kenyamanan ASHRAE 55, kajian distribusi beban pendingin, teori perpindahan energi secara konveksi dan metode keseimbangan termal.

3. BAB III: Metode Penelitian.

Berisi tentang metode penelitian yang digunakan, lokasi penelitian, sampel penelitian, populasi, teknik pengumpulan data, Teknik analisis data, populasi dan sampel, dan keabsahan data.

IV: Hasil dan Pembahasan.

Berisi tentang gambaran umum penelitian, titik pengambilan data, it dari alat ukur dalam bentuk grafik yang menampilkan data profil



temperatur ruangan, temperatur globe, kelembapan, kecepatan angin dan persepsi pengguna. Menampilkan beberapa analisis perbandingan pengaruh celah terhadap kenyamanan termal dan beban pendingin. Bab ini juga menampilkan analisis dengan menggunakan metode keseimbangan termal secara hitungan matematis.

5. BAB V: Kesimpulan dan saran.

Berisi tentang kesimpulan hasil penelitian dan jawaban terhadap rumusan masalah dan juga keterkaitan dengan teori kenyamanan termal. Saran-saran dalam penelitian juga dipaparkan dalam bab ini terkait hambatan dan solusi efektif untuk keberlangsungan penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kenyamanan Termal

2.1.1. Kenyamanan dalam ruang

Kenyamanan termal menurut Szokolay (1973) pada '*Manual of Tropical Housing and Building*' merupakan proses yang melibatkan kondisi fisik fisiologis dan psikologis (Szokolay and Koenigsberger, 1973). Kenyamanan termal adalah hasil pemikiran seseorang yang mengekspresikan mengenai kepuasan dirinya terhadap lingkungan termalnya. ASHRAE (*American Society of Heating Refrigerating Air Conditioning Engineer*) mendefinisikan kenyamanan termal sebagai suatu kondisi dimana ada kepuasan terhadap keadaan termal di sekitarnya (ASHRAE Standard, 2010). Sedangkan kenyamanan termal menurut De dear (1998) merupakan keadaan lingkungan/alam yang dapat mempengaruhi manusia (De Dear *et al.*, 1998). Dari pernyataan tersebut dapat dinyatakan bahwa kenyamanan termal merupakan rumusan empirik yang merupakan sebuah pengalaman terhadap rasa dimana kondisi yang dirasakan dapat berbeda antara satu orang dengan yang lainnya. Dalam menentukan kenyamanan sebuah zona / area, dapat dinyatakan dengan melihat persepsi dominan yang dirasakan oleh sekelompok sampel pada area tersebut.

2.1.2. Faktor kenyamanan dalam ruang

Menurut Fanger kondisi kenyamanan termal juga dipengaruhi oleh faktor iklim dan faktor individu (Fanger, 1970). Faktor iklim yang mempengaruhi kondisi termal terdiri dari: suhu udara, suhu radiasi rata-rata, dan udara relatif, dan kecepatan angin serta pergerakan udara di ruang. Sedangkan faktor individu yang menentukan keadaan suhu adalah jenis aktivitas serta jenis pakaian yang digunakan.



a. Temperatur udara

Temperatur udara antara suatu daerah dengan daerah lainnya sangat berbeda. Perbedaan ini disebabkan adanya beberapa faktor, seperti sudut datang sinar matahari, ketinggian suatu tempat, arah angin, arus laut, awan, dan lamanya penyinaran. Satuan yang umumnya digunakan untuk temperatur udara adalah Celcius, Fahrenheit, Reamur dan Kelvin.

Adapun batas-batas kenyamanan akibat faktor temperatur udara untuk daerah khatulistiwa adalah 19°C TE (batas bawah) - 26°C TE (batas atas) (Lippsmeier, 1994). Pada temperatur 26°C TE umumnya manusia sudah mulai berkeringat. Pada temperatur $26^{\circ}\text{C TE} - 30^{\circ}\text{C TE}$ daya tahan dan kemampuan kerja manusia mulai menurun. Temperatur lingkungan mulai cukup sulit diterima dirasakan pada suhu $33,5^{\circ}\text{C TE} - 35,5^{\circ}\text{C TE}$, dan pada suhu $35^{\circ}\text{C TE} - 36^{\circ}\text{C TE}$ kondisi lingkungan tidak dapat ditolerir lagi. Kondisi udara yang tidak nyaman cenderung akan menurunkan tingkat produktifitas seperti halnya terlalu dingin atau terlalu panas, sedangkan produktifitas kerja manusia dapat meningkat pada kondisi suhu (termis) yang nyaman (Talarosha, 2005)

b. Kelembaban udara dan kelembaban relatif

Kelembaban udara adalah kandungan uap air yang ada di udara. Kelembaban udara menjadi faktor penting dalam kenyamanan termal pada saat suhu udara mendekati atau melampaui ambang batas kenyamanan dan kelembapan udara lebih dari 70% serta kurang dari 40%. Pada kondisi di dalam ruang, kelembaban udara ini mempengaruhi pelepasan kalor dari tubuh manusia. Kelembaban udara yang tinggi akan menyebabkan kalor di dalam tubuh manusia sulit dilepaskan, sehingga kondisi ini akan menciptakan rasa tidak nyaman. Untuk mengimbangi kondisi kelembaban yang tinggi ini dibutuhkan kecepatan angin yang cukup di dalam ruang, sedangkan kelembaban relatif adalah rasio antara jumlah uap air di udara dengan jumlah



um uap air dapat ditampung di udara pada temperatur tertentu. faktor-faktor yang mempengaruhi kelembaban udara, yakni radiasi , tekanan udara, ketinggian tempat, angin, kerapatan udara, serta suhu.

Tabel 1. Batas kenyamanan termal pada rentang suhu dan kelembapan yang berbeda (S. V. Szokolay, 1980)

Rentang Suhu Nyaman (°C DBT)			
Kelembapan RH	Suhu Rata - rata Tahunan		
Tahunan	> 20 °C	15 - 20 °C	< 15 °C
< 30%	26 °C	23 °C	21 °C
30 - 50%	25 °C	22 °C	20 °C
50 - 70%	23 °C	21 °C	19 °C
> 70%	22 °C	20 °C	18 °C

c. Kecepatan angin

Kecepatan angin umumnya terjadi pada siang hari atau pada musim pergantian. Peranan udara yang bergerak ini sangat membantu mempercepat pelepasan kalor pada permukaan kulit. Angin membantu mengangkat uap-uap air yang menghambat pelepasan kalor. Akan tetapi jika angin ini terlalu kencang maka kalor yang dilepaskan tubuh menjadi berlebih sehingga akan timbul kondisi kedinginan yang mengurangi kenyamanan termal.

Tabel 2. Pergerakan udara dan pengaruh pada sensasi (Szokolay, 1980)

Kecepatan Angin (m/det)	Sensasi
Kurang dari 0,25	Tidak terasa
0,25 - 0,50	Menyenangkan
0,50 - 1,00	Terasa Angin
1,00 - 1,50	Hembusan Angin
Lebih dari 1,50	Angin yang mengganggu

d. Insulasi pakaian

Faktor lain yang mempengaruhi kenyamanan termal adalah jenis dan bahan pakaian yang digunakan. Salah satu cara manusia untuk beradaptasi keadaan termal di lingkungan sekitarnya adalah dengan cara berpakaian. Misalnya, mengenakan pakaian tipis di musim panas dan pakaian tebal di musim dingin. Pakaian juga dapat mengurangi pelepasan panas tubuh.



Pada penelitian Feriadi dan Wong mengenai '*Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia*' disebutkan bahwa penghuni ruang dapat beradaptasi terhadap kondisi termal dengan menyesuaikan jenis pakaian dengan kondisi iklim yang ada (Feriadi and Wong, 2004) Adapun nilai data insulasi pakaian juga diadopsi dari penelitian Al-Ajmi (Al-ajmi *et al.*, 2008) .

Tabel 3. Nilai insulasi pakaian (ASHRAE Standard, 2010)

Insulasi	Clo
<i>Walking shorts, short-sleeve shirt</i>	0,36
<i>Typical summer indoor clothing</i>	0,50
<i>Knee-length, skirt, short-sleeve, shirt, sandals, underwear</i>	0,54
<i>Trousers, Short sleeve shirt, socks, shoes, underwear</i>	0,57
<i>Trousers, Long-sleeve shirt</i>	0,61
<i>Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip</i>	0,67
<i>Sweat pants, long-sleeve, sweatshirt</i>	0,74
<i>Jacket, trousers, long-sleeve shirt</i>	0,96
<i>Typical winter indoor clothing</i>	1,00

e. Aktivitas

Aktivitas yang dilakukan manusia akan meningkatkan proses metabolisme tubuhnya. Semakin tinggi intensitas aktivitas yang dilakukan, maka semakin besar peningkatan metabolisme yang terjadi di dalam tubuh, sehingga jumlah energi panas yang dikeluarkan semakin besar adalah sama. Aktivitas dalam kaiannya dengan kenyamanan termal memiliki dampak terhadap sensasi kenyamanan termal, semakin tinggi nilai metabolisme aktifitasnya maka tubuh juga membutuhkan suhu yang dingin menyeimbangkan kondisi tubuh sehingga perbedaan aktifitas atau metabolisme juga memberikan dampak terhadap penerimaan suhu ruangan man. (Van Der Linden *et al.*, 2002)



Tabel 4. Perbandingan Aktivitas dan Energi panas yang dikeluarkan (Szokolay, 1980).

Aktivitas	Total	Basal	Muscular	Tenaga yang dikeluarkan	Panas yang dikeluarkan
Tidur nyenyak	70	70	-	-	70
Berbaring	88	88	-	-	88
Duduk santai	115	92	23	-	115
Kerja ringan	150	92	58	18	132
Jalan santai	160	92	68	22	138
Kerja duduk	235	93	142	40	195
Kerja sedang	265	93	172	50	215
Kerja berat (8 jam)	440	94	346	88	352
Kerja berat (30 min)	1500	94	1404	340	1160

2.2. Batas Kenyamanan Termal

Teori Fanger standar Amerika (ASHRAE Standard, 2010) dan standar internasional untuk kenyamanan termal ISO 7730 (ISO 7730, 2005) juga menyatakan hal yang sama bahwa kenyamanan termal yang dapat dirasakan manusia merupakan fungsi dari faktor iklim (Temperatur udara, kelembapan, kecepatan udara dan *Mean radiant temperature*) serta dua faktor individu yaitu jenis aktifitas yang berkaitan dengan tingkat metabolisme (met) tubuh serta jenis pakaian yang digunakan (insulasi pakaian). Menurut teori ini, kenyamanan suhu tidak secara nyata dipengaruhi oleh perbedaan jenis kelamin, tingkat kegemukan, faktor usia, suku bangsa, tempat tinggal geografis, adaptasi, faktor kepadatan.



Tabel 5. Pembandingan Faktor Penentu Suhu Nyaman. (Talarosha, 2005)

Pembandingan Faktor Penentu Suhu Nyaman, (Szokolay and Koenigsberger, 1973)	Fanger, Standar Amerika (ASHRAE Standard, 2010) Standar Internasional (ISO 7730, 2005)	Humpherys dan Nicol (Nicol and Humphreys, 2010)
❖ Iklim • Matahari (besarnya radiasi) • Suhu Udara • Angin (kecepatan udara) • Kelembaban Udara Luar ❖ Faktor Individu • Pakaian • Aklimatisasi • Usia dan Jenis kelamin • Tingkat kegemukan • Tingkat kesehatan • Jenis makanan dan minuman yang dikonsumsi • Warna kulit (suku bangsa)	❖ Iklim • Matahari (besarnya radiasi) • Suhu Udara • Angin (kecepatan udara) • Kelembaban Udara Luar ❖ Faktor Individu • Aktifitas • Pakaian	❖ Iklim • Matahari (besarnya radiasi) • Suhu Udara • Angin (kecepatan udara) • Kelembaban Udara Luar) ❖ Faktor Individu • Aktifitas • Pakaian • Adaptasi Individu



nusia adalah makhluk dengan temperatur konstan, dengan temperatur 7 °C untuk kondisi normal (Egan, 1975), meskipun sesungguhnya

temperatur dalam mempunyai rentang antara 35–40 °C (Szokolay ,1977). Temperatur permukaan kulit harus lebih rendah dari pada temperatur dalam ruangan, dan temperatur lingkungan harus lebih rendah dari temperatur kulit, dalam kondisi yang demikian tubuh dapat mengalami proses pendinginan (pelepasan panas) (Szokolay, 1977). Ada suatu rentang tertentu dari temperatur lingkungan yang memungkinkan pelepasan panas yang dinilai nyaman yang disebut sebagai *comfort zone* (zonanyaman).

Temperatur udara merupakan faktor utama dalam terciptanya kenyamanan termal, tetapi bukan satu-satunya. Terciptanya kenyamanan termal akan dipengaruhi oleh empat faktor menurut Lippsmeier (Lippsmeier, 1994), yaitu:

1. Temperatur udara
2. Kelembaban udara
3. Pergerakan udara (angin)
4. Radiasi (matahari)

Sedangkan standar kenyamanan termal pada ruang tertutup yang menggunakan sistem HVAC dipengaruhi oleh:

1. Temperatur udara
2. Kelembaban udara
3. Temperatur radiasi rata-rata dari atap dan dinding
4. Kecepatan gerakan udara
5. Tingkat pencahayaan dan distribusi cahaya pada dinding pandang



Pada kenyataannya, data temperatur kering yang terbaca pada alat ukur temperatur udara bukanlah kondisi temperatur yang dirasakan oleh tubuh. Kondisi temperatur yang dirasakan oleh tubuh merupakan korelasi dari temperatur udara (temperatur kering), kelembaban relatif (RH), pergerakan udara (angin), dan radiasi. Temperatur yang dirasakan tubuh sebagai perasaan panas dan dingin (Yao, Li and Liu, 2009) dirumuskan sebagai temperatur efektif, merupakan hubungan antara temperatur, kelembaban, dan pergerakan udara. Untuk mengetahui temperatur efektif pada suatu saat tertentu, dapat diukur dengan menggunakan *effective temperature nomogram* (diagram temperatur efektif). Satu data lainnya yang harus diketahui dalam diagram temperatur efektif adalah data temperatur khusus (seperti ASMAN dan *Sling thermometer*), bila tidak dapat diukur dengan menggunakan termometer basah, data temperatur lembab dapat dicari dengan menggunakan diagram psikometri, dengan syarat temperatur kering dan kelembaban relatif diketahui.

Untuk mengetahui apakah kondisi lingkungan memberikan kenyamanan termal digunakan suatu tabel yang disebut *bioclimatic chart* (tabel bioklimatik atau diagram *comfort zone*). Pada tabel tersebut dijelaskan hubungan antara temperatur kering, kelembaban relatif, dan pergerakan angin. Dimana pada kondisi yang tertentu akan menyebabkan terciptanya kenyamanan termal. Namun pengukuran yang harus dilakukan untuk mendapatkan iklim ruangan yang baik, terutama tanpa peralatan teknis, belum dapat ditentukan dengan metode-metode ini (Victor Olgyay: “*Design with Climate*” Princeton University Press, Princeton New Jersey USA). Sedikit perubahan dilakukan pada batas-batas daerah kenyamanan. Daerah ini ditetapkan pada diagram yang sesuai dengan kondisi kenyamanan di daerah khatulistiwa.

Sejalan dengan teori Humphreys dan Nicol, Lipsmeier (1994) menunjukkan beberapa penelitian yang membuktikan batas kenyamanan temperatur Efektif/TE) berbeda-beda tergantung kepada lokasi ; dan subyek manusia (suku bangsa) yang diteliti (Lippsmeier, 1994).



Tabel 6. Batas-batas Kenyamanan Termal. (Lippsmeier, 1994)

Pengarang	Tempat	Kelompok Manusia	Batas Kenyamanan
ASHRAE	USA Selatan (30°	Peneliti	20,5°C – 24,5°C TE
Rao	LU) Calcutta (22°	India	20,5°C – 24,5°C TE
Webb	LU) Singapura	Malaysia	25°C – 27°C TE
	Khatulistiwa	Cina	
Mom	Jakarta (6° LS)	Indonesia	20°C – 26°C TE
Ellis	Singapura	Eropa	22°C – 27°C TE
	Khatulistiwa		

Menurut Webb dalam (Suryantara, Suryabrata and Suryandono, 2019), Zona kenyamanan termal orang Indonesia:

- 1) Sejuk 20,5° C (TE) sampai 22,8° C (TE)
- 2) Termal nyaman – optimal 22,8° C (TE)
- 3) Kenyamanan optimal 26,2° C (TE)
- 4) Hangat 26° C – 27,1° C (TE)

Mom dan Wiesebronn dalam (Soegijanto, 1999) membagi zona kenyamanan termal bagi orang Indonesia atas tiga zona sebagai berikut:

- 1) Sejuk nyaman, 20,5° C - 22,8° C (TE)
- 2) Nyaman-optimal 22,8° C – 25,8° C (TE)
- 3) Panas-nyaman 25,8° C – 27,1° C (TE)

Standar kenyamanan termal Indonesia SNI T-14-1993-03 ada tiga:

- 1) Sejuk nyaman, 20,5 ° C – 22,8° C, kelembaban relatif 50%-80%
- 2) Nyaman optimal 22,8° C – 25,8° C, kelembaban relatif 70%-80%
- 3) Hampir nyaman 25,8° C – 27,1° C, kelembaban relatif 60%-70%

Berdasarkan batas-batas kenyamanan termal, penulis mengambil standar ASHRAE sebagai standar atau acuan untuk mengetahui lingkungan ruangan dikarenakan standar ini sudah cukup banyak digunakan di negara.



2.3. Temperatur operative dan temperature globe

2.3.1. Operative Temperature

Temperatur operative (T_o) didefinisikan sebagai temperatur seragam pada ruangan berpendar hitam dimana penghuni akan menukar jumlah panas yang sama melalui radiasi dan konveksi seperti pada lingkungan sebenarnya yang tidak seragam. Menurut $\sim$ CSN EN ISO 773 (ISO 7730, 2005)

$$t_o = t_a + (1 - A)(t_r - t_a) \text{ or } T_o = T_a + (1 - A)(T_r - T_a) \dots \dots \dots (1)$$

$$A = \alpha_c / \alpha_c + \alpha_r \dots \dots \dots (2)$$

Dimana : α_c , α_r [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$] masing-masing adalah koefisien perpindahan panas secara konveksi dan radiasi pada permukaan benda; t_a , t_r [$^{\circ}\text{C}$] masing-masing adalah suhu udara dan suhu radiasi rata-rata.

Kecepatan udara suatu lingkungan mempengaruhi koefisien perpindahan panas; bila kecepatan udara bertambah maka koefisien perpindahan panas secara konveksi α_c bertambah, dan perubahan koefisien perpindahan panas secara radiasi α_r dapat diabaikan, maka koefisien A hanya bergantung pada kecepatan udara.

$$T_g = T_o \dots \dots \dots (3)$$

Dimana : T_g adalah suhu bumi dalam satuan [K], T_o adalah suhu operasi dalam satuan [K].

Di sisi lain, menurut referensi (AMS, 2007). Untuk kecepatan udara rendah $w < 0.2 \text{ ms}^{-1}$ dan perbedaan suhu yang kecil $|T_a - T_r|$, temperatur operative dapat dinilai sebagai rata-rata temperature udara dan suhu radiasi rata-rata.

$$T_o = \frac{1}{2} (T_a + T_r) \dots \dots \dots (4)$$



2.3.2. Globe Temperature

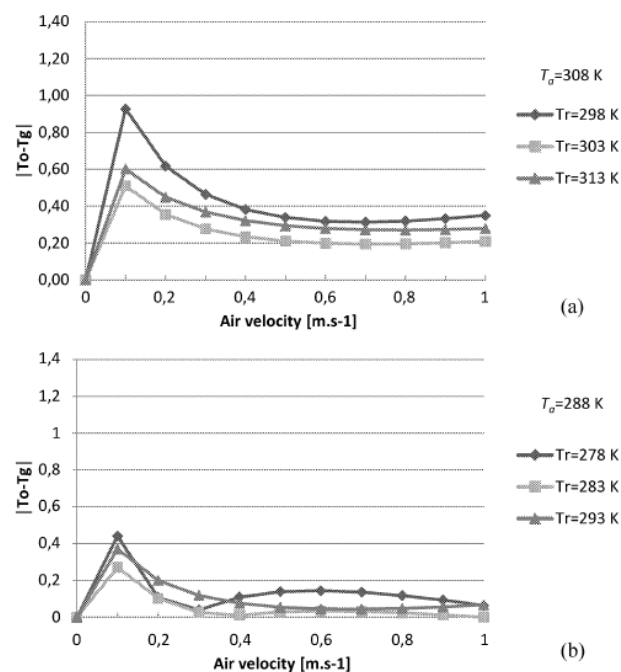
Suhu bumi (T_g) adalah besaran yang diukur secara langsung dengan termometer globe. Termometer globe adalah salah satu alat pengukuran suhu

radiasi yang paling umum, diperkenalkan oleh Vernon (1930). Terdiri dari bola tembaga berongga berdiameter 150 mm atau 100 mm, dilapisi dengan cat hitam matt dan berisi termometer biasa dengan bohlam dipasang di tengah bola, tanpa sumber panas (AMS, 2007).

Dalam keadaan stabil, fluks panas radiasi dari lingkungan ke dalam bola seimbang dengan fluks panas konvektif dari permukaan bola ke lingkungan. Termometer globe mencapai kesetimbangan termal ketika panas yang diperoleh secara radiasi sama dengan panas yang hilang secara konveksi.

$$q_c = \alpha_{cg} (T_g - T_a) \dots \dots \dots (5)$$

T_a adalah suhu udara [K]; α_{cg} adalah koefisien perpindahan panas konveksi antara termometer udara dan globe termometer [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$].



Gambar 1. Temperatur Operativ dan Temperatur Globe untuk suhu udara konstan: (a) 308 K, (b) 288K dan selisih rata-rata radiasi dan suhu udara kurang dari 10 K (AMS, 2007)

Temperature operative dan temperature globe bergantung pada kecepatan udara dan selanjutnya pada perbedaan antara radiasi rata-rata dan suhu udara, ntu kecepatan udara lebih dari 0,2ms⁻¹ dan perbedaan $|T_r - T_a| < 10\text{K}$, bedaan antara suhu pengoperasian dan suhu globe kurang dari 0,6K.

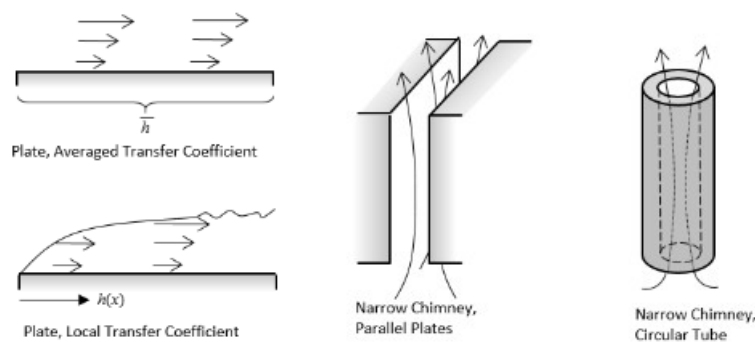


2.4. Perpindahan panas secara Konveksi

Panas yang dipindahkan pada peristiwa konveksi dapat berupa panas laten dan panas sensibel. Panas laten adalah panas yang menyertai proses perubahan fasa, sedang panas sensibel adalah panas yang berkaitan dengan kenaikan atau penurunan temperature tanpa perubahan fasa. Konveksi tidak selalu dapat diselesaikan dengan cara analitik, dan kita sering terpaksa menggunakan cara eksperimental untuk mendapatkan data perencanaan, serta untuk mendapatkan data-data eksperimental yang biasanya dinyatakan dalam bentuk persamaan empiric (Ratini, 2015).

Konveksi dibedakan menjadi dua, yakni:

- Konveksi paksa: terjadinya perpindahan panas karena adanya sistem sirkulasi lain.
- Konveksi alamiah: terjadinya perpindahan panas karena fluida yang berubah densitasnya karena proses pemanasan, bergerak naik.



Gambar 2. Perpindahan panas secara konveksi (Ratini, 2015)

Konveksi paksa atau kadang-kadang disebut sebagai konveksi terbatas adalah jenis perpindahan panas konveksi di mana pergerakan molekul dihasilkan oleh pemanfaatan titik panas luar untuk pertukaran panas, misalnya kipas angin atau kipas atap.

Konveksi terbatas mencakup pengangkutan fluida dengan teknik selain teknik yang dihasilkan dari variasi densitas terhadap suhu. Perkembangan udara melalui gin atau perkembangan air melalui siphon adalah contoh konveksi



2.5. Indeks kenyamanan termal PMV (Predicted Mean Vote) dan PPD (Predicted Percentage Dissatisfied).

Professor Fanger dari Technical University of Denmark beranggapan bahwa *thermal comfort* didefinisikan sebagai istilah keadaan fisik tubuh yang lebih baik daripada keadaan fisik lingkungan, apa yang benar-benar kita rasakan adalah suhu kulit dan bukan suhu udara. Untuk kenyamanan termal dibutuhkan:

- *Thermal balance*, yaitu nilai *heat loss* = nilai *heat gain*.

Hal ini penting tapi bukan kondisi yang cukup untuk kenyamanan, misalnya berkeringat bisa membawa kepada keseimbangan termal tapi bisa jadi tidak nyaman.

- *Mean skin temperature*, harus berada pada level yang tepat untuk kenyamanan (temperatur kulit untuk kenyamanan berkurang dengan bertambahnya aktivitas).
- *Sweating*, kenyamanan adalah fungsi dari nilai *sweating* yang disukai, yang manajuga merupakan fungsi aktivitas dan *metabolic rate*.

Terdapat beberapa standart yang menentukan kenyamanan thermal. Dalam ISO Standard 7730 (ISO 7730, 2005) disebutkan bahwa standart kenyamanan termal adalah sebagai berikut:

- Pada standard ini, kenyamanan thermal didefinisikan sebagai kondisi pikiran yang mengekspresikan kepuasan thermal terhadap lingkungan thermal.
- Standard menghadirkan metode untuk memperkirakan sensasi thermal dan derajat ketidakpuasan thermal (*thermal dissatisfaction*) manusia.
- Menetapkan kondisi lingkungan yang bisa diterima untuk kenyamanan
- Menggunakan lingkungan *indoor* di mana tujuannya adalah untuk mencapai kenyamanan thermal, atau lingkungan indoor di mana terjadi penyimpangan kenyamanan.



2.3.1. Definisi PMV (*Predicted Mean Vote*)

PMV (*Predicted Mean Vote*) merupakan index yang dikenalkan oleh Professor Fanger (Fanger, 1970) dari University of Denmark yang mengindikasikan sensasi dingin (*cold*) dan hangat (*warmth*) yang dirasakan oleh manusia pada skala +3 sampai -3. PMV berhubungan dengan 6 parameter dan merupakan nilai rata-rata yang menggambarkan bagaimana yang dirasakan oleh orang banyak mengenai *cold* dan *warmth*. Perbedaan individual dihubungkan dengan hubungan antara PMV dan PPD (*Predicted Percentage of Discomfort*).

Profesor Fanger bekerja dengan lebih dari 1300 orang dari dua jenis kelamin, ras dan usia yang bervariasi, serta dari berbagai bagian di dunia. Fanger mengumpulkan data dari tiap individu dengan menjalani test di laboratorium lingkungan dengan 6 parameter yang berbeda. Pada waktu yang sama, dia melihat mekanisme keseimbangan panas pada tubuh manusia dan memastikan bahwa ada 7 cara untuk tubuh kehilangan energi panas setelah tubuh dibangkitkan dari makanan yang diambil:

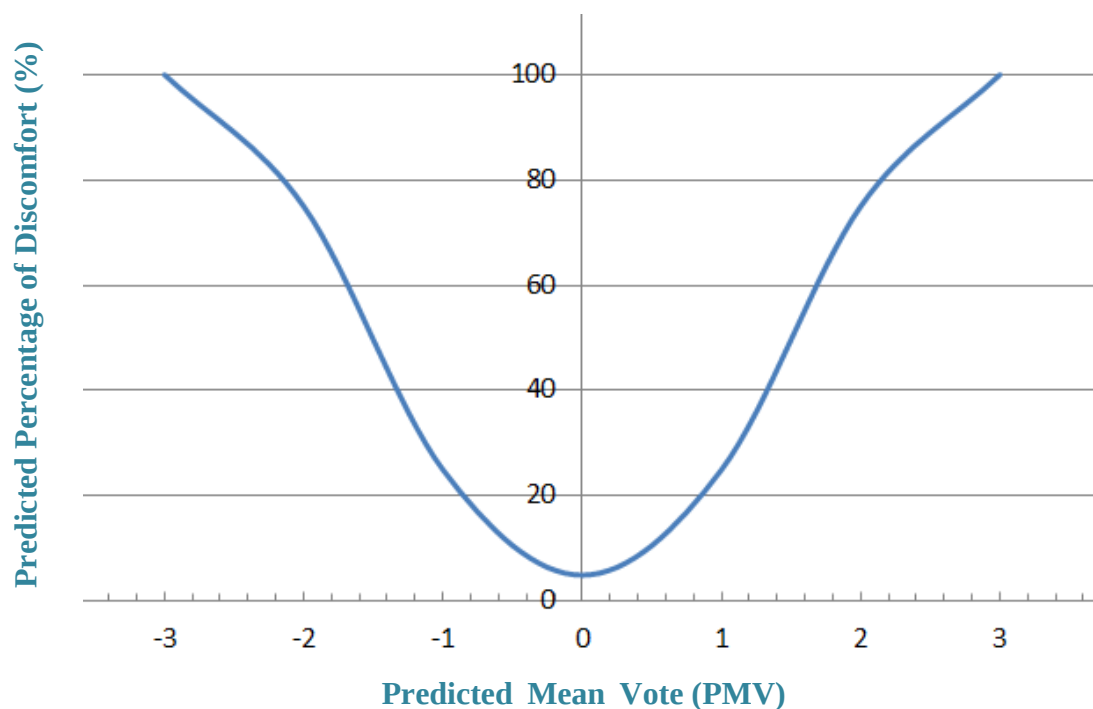
- $M = \text{Metabolism (W/m)}$
- $W = \text{External Work, equal to zero from most metabolism}$
- $I_{cl} = \text{Thermal Resistance of clothing (clo)}$
- $F_{cl} = \text{The ratio of the surface of the closed body to the surface area of the nudebody (N.D.)}$
- $T_a = \text{Air temperature (}^{\circ}\text{C.)}$
- $T_r = \text{the mean radiant temperature (}^{\circ}\text{C.)}$
- $V_{air} = \text{Relative air velocity (m/s)}$

Hasil dari sudi tersebut, Prof. Fanger merumuskan persamaan PMV dan menentukan konstanta yang digunakan dalam persamaan dari kumpulan data melalui eksperimen yang melibatkan banyak orang. Persamaan PMV didesain aplikasi yang spesifik untuk manusia (www.patentstorm.us). Jadi PMV (*Predicted Mean Vote*) merupakan sebuah index yang memperkirakan nilai vote kelompok besar manusia pada 7 point skala sensasi thermal:



Tabel 7. Hubungan antara PMV, PPD, dan sensasi termal (Ole Fanger and Toftum, 2002)

PMV	Thermal Sensation	PPD (%)
3	Hot	100
2	Warm	75
1	Slightly Warm	25
0	Neutral	5
-1	Slightly Cool	25
-2	Cool	75
-3	Cold	100



Gambar 3. Grafik hubungan antara PMV vs PPD (Ole Fanger and Toftum, 2002).

PMV berasal dari fisik transfer panas lingkungan termal dikombinasikan dengan kecocokan pengalaman empiris untuk sensasi kenyamanan. PMV menetapkan ketegangan termal berdasar pada *steady-state heat transfer* antara tubuh dan lingkungan serta menempatkan vote kenyamanan pada jumlah tegangan tersebut. Jika PMV bergerak dari 0 ke arah yang lain, maka PPD akan meningkat. Maka diharapkan menjaga PMV dekat dengan 0. persamaan telah digunakan untuk menghitung PMV berdasar pada suhu dan RH (Relative Humidity), yang juga diperhitungkan faktor psikologis dan waktu pencahayaan.



2.3.2. Elemen yang berpengaruh pada PMV

PMV memperhitungkan faktor utama yang berhubungan dengan *steady-state* keseimbangan thermal dalam tubuh. Berikut elemen-elemen yang mempengaruhi nilai PMV (*Predicted Mean Vote*) (Ole Fanger and Toftum, 2002)

1) Parameter lingkungan:

- *Air temperature*
- *Mean radiant temperature*
- *Air velocity*
- *Partial water vapour pressure (or relative humidity)*

2) Parameter Individu :

- Tingkat aktivitas.
- Tingkat metabolisme.
- Clothing level.

Tingkat aktivitas, mempengaruhi nilai metabolis. Metabolisme adalah energi yang dikeluarkan pada proses oksidasi dalam tubuh manusia yang tergantung pada aktivitas otot. Normalnya, seluruh aktivitas otot diubah menjadi panas dalam tubuh, tapi sepanjang pekerjaan fisik yang keras pendistribusian ini bisa jatuh sampai 75%. Misalnya ketika berjalan ke atas bukit, di mana energi disimpan di dalam tubuh pada energi potensial.

Metablisme diukur dalam MET ($1 \text{ MET} = 58 \text{ W/m}^2$ permukaan tubuh). Manusia dewasa normal memiliki permukaan $1,7 \text{ m}^2$, dan orang dalam keyamanan termal dengan tingkat aktivitas 1 MET akan memiliki *heat loss* kira-kira 100 W. Dalam menilai tingkat metabolisme, penting untuk menggunakan rata-rata aktivitas manusia yang telah ditunjukkan dalam 1 jam terakhir

Clothing level yaitu pakaian mengurangi pelepasan panas tubuh. Karena itu, pakaian diklasifikasikan berdasarkan pada nilai insulasinya. Satuan yang biasa digunakan untuk pengukuran insulasi pakaian adalah satuan Clo. Satuan yang lebih teknis adalah $\text{m}^2\text{C/W}$ juga sering digunakan ($1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{C/W}$). Nilai dihitung dengan menambahkan nilai Clo pada setiap pakaian.



2.3.3. Mekanisme PMV

Persamaan PMV untuk *thermal comfort* merupakan *steady-state model*. Ini merupakan persamaan empiris untuk memperkirakan *mean vote* pada urutan kategori skala *thermal comfort* dari populasi manusia. Persamaannya menggunakan *steady-state heat balance* untuk tubuh manusia dan mendalilkan hubungan antara deviasi dari beban minimum pada mekanisme penerimaan *heat balance* dan *thermal comfort vote*. Semakin besar bebannya, maka semakin menyimpang *comfort vote* dari 0.

Persamaan PMV mengandung istilah yang berhubungan dengan:

- Fungsi pakaian
- Fungsi aktivitas
- Variabel lingkungan; *air temperature, mean radiant temperature, relative air speed, vapor pressure of water vapor*.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 699(M - W) - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \}$$

where:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{sr}} \\ 12.1\sqrt{v_{sr}} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{sr}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{ W} \end{cases}$$

Dimana:

PMV : Predicted Mean Vote



nilai metabolisme, dalam W/m^2 dari area permukaan tubuh

kegiatan external, dalam W/m^2 , = 0 untuk kebanyakan aktivitas I_{cl}

daya tahan thermal pada pakaian, dalam $\text{m}^2 \text{ K} / \text{ W}$

f_{cl} : Rasio area permukaan orang ketika berpakaian, dengan area permukaan ketika tidak berpakaian

t_a : temperature udara dalam $^{\circ}\text{C}$

t_r : mean radiant temperature dalam $^{\circ}\text{C}$

v_{ar} : kecepatan relatif udara (relatif terhadap tubuh manusia) dalam m/sp_a

: *partial water vapour pressure*, dalam Pa

h_c : *convective heat transfer*, dalam $\text{W/m}^2\text{K}$

t_{cl} : permukaan temperature pakaian, dalam $^{\circ}\text{C}$

Ini dihitung untuk kondisi ketika tubuh manusia berada pada keseimbangan thermal – *heat loss* lingkungan diseimbangkan oleh produksi metabolisme panas. Index PMV seharusnya hanya digunakan untuk PMV antara -2 dan 2. Direkomendasikan hanya untuk penggunaan pada range kondisi sebagai berikut: M : 46 sampai 232 W/m^2 (0,8 sampai 4 met).

I_{cl} : 0 sampai 0,310 $\text{m}^2\text{K/W}$ (0 sampai 2 clo) t_a : 10 sampai 30 $^{\circ}\text{C}$; t_r : 10 sampai 40 $^{\circ}\text{C}$

v_{ar} : 0 sampai 1 m/s (atau lebih rendah jika aliran udara penting)

p_a : 0 sampai 2700 Pa (termasuk relative humidity harus antara 30 sampai 70%)

PMV bisa dihasilkan oleh:

- Persamaan di atas (membutuhkan program komputer karena kebutuhan untuk solusi penyelesaian h_c dan t_{cl})
- Pengukuran langsung, menggunakan sensor
- Dari tabel PMV untuk kombinasi aktivitas yang berbeda, *clothing level*, *operative temperature* dan kecepatan udara relatif



kecepatan udara < 0,2 m/s, atau di mana t_r berada di dalam 4 $^{\circ}\text{C}$ *operative temperature* (t_0) kira-kira rata-rata dari t_r dan t_a .

ar kondisi ini, atau untuk ketepatan yang lebih tinggi

$$t_0 = At_a + (1 - A) t_r$$

di mana

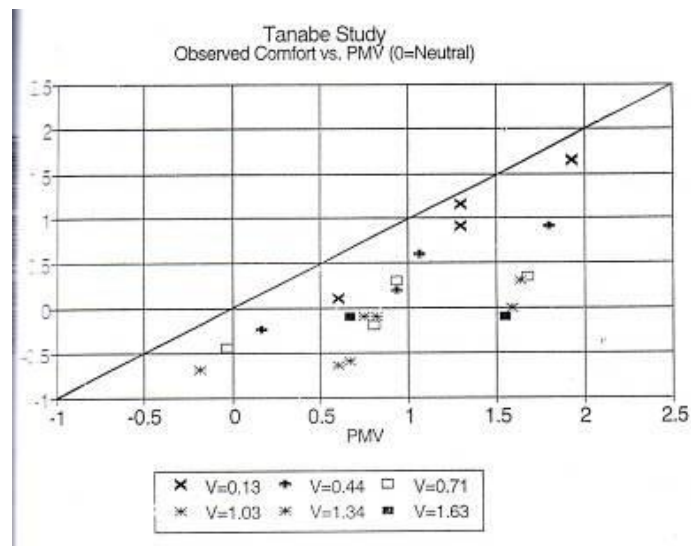
$A = 0,5$ untuk $v_{ar} < 0,2$ m/s

$A = 0,6$ untuk v_{ar} antara 0,2 dan 0,6 m/s $A = 0,7$ untuk v_{ar} antara 0,6 dan 1,0 m/s

- pengaruh kelembaban adalah kecil pada temperature rata-rata mendekati kenyamanan netral dan 50% diasumsikan dalam table.

2.3.4. Aplikasi PMV

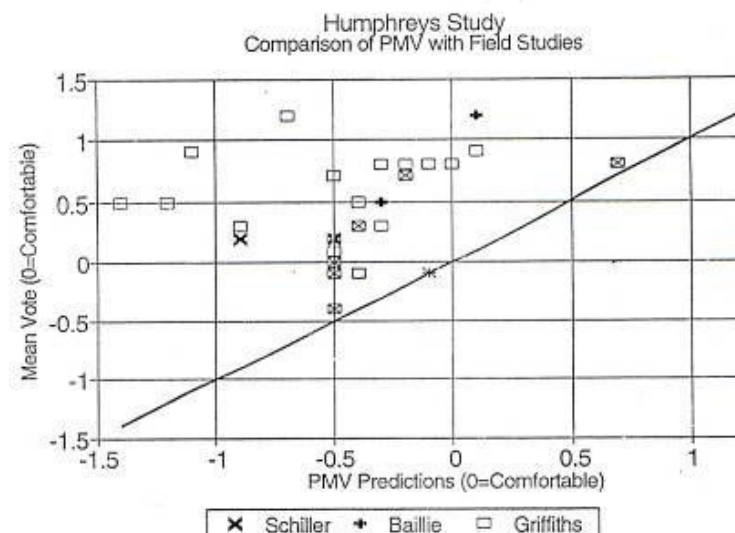
PMV telah banyak digunakan dalam banyak penelitian. Penelitian Tanabe (1988) tentang sensasi termal di Jepang pada 4 kondisi (kombinasi suhu dan rasio kelembaban). *Range* suhu antara 26 sampai 31°C, dengan 6 kecepatan udara antara 0,13 sampai 1,63 m/s. Pada tabel bisa dilihat bahwa semua *votes* berada di bawah garis perkiraan PMV. Hal ini berarti bahwa PMV terasa terlalu hangat (di atas 0,5). Ketidaksesuaian meningkat tajam seiring dengan kecepatan udara. Hasil ini mengindikasikan bahwa PMV tidak memperhitungkan efek pendinginan kecepatan udara pada suhu tinggi (Givoni, 1998)



bar 4. Sensasi termal rata-rata (pada skala Fanger) sebagai fungsi dari prediksi Mean Vote (PMV).(Givoni, 1998)

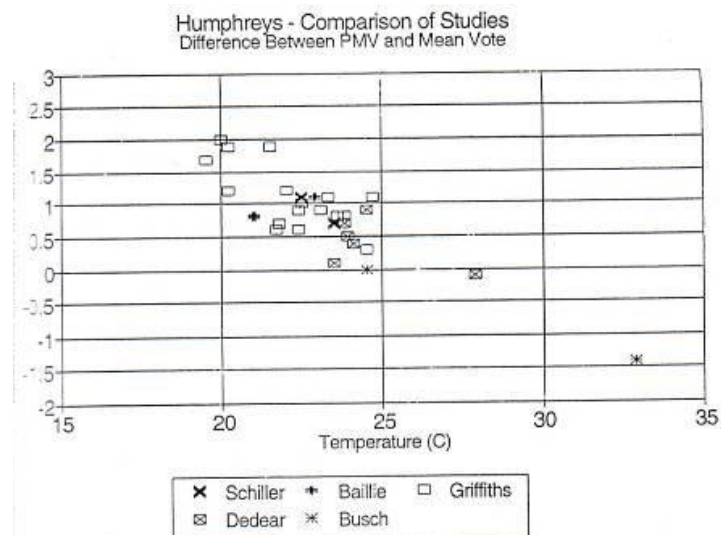
umphreys mencatat 5 studi kenyamanan lapangan (Baille 1987, 1990, De dear dan Auliciems 1985, Griffith 1990, dan Schiller 1990).

Gambar di bawah ini menunjukkan pengamatan *Mean Vote* di lapangan sebagai fungsi perhitungan PMV. Bisa dilihat bahwa *mean vote* di lapangan di atas prediksi PMV (Givoni, 1998)



Gambar 5. Rata-rata hasil yang diamati dalam studi lapangan sebagai fungsi dari PMV yang dihitung (Nicol and Humphreys, 2002)

Gambar berikut menunjukkan perbedaan antara pengamatan *Mean Vote* dan PMV sebagai fungsi suhu rata-rata di setiap studi. Bisa dilihat bahwa perbedaan meningkat seiring dengan merendahnya *ambient temperature*.

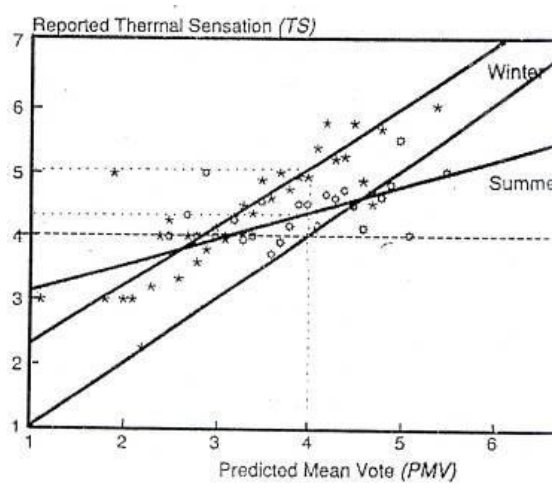


Gambar 6. Perbedaan antara *Mean Vote* yang diamati dan PMV sebagai fungsi suhu rata-rata di setiap penelitian. (Nicol and Humphreys, 2002).

Pada pengamatan musim dingin garis hampir paralel dengan garis PMV, dengan perbedaan sekitar 1 satuan skala kenyamanan. Ini berarti bahwa pada



musim dingin orang di Inggris merasa nyaman pada suhu yang lebih rendah daripada yang diprediksi oleh PMV. Penelitian Linden juga untuk menguji indeks termal PMV pada tiga tipe ruangan yaitu Ventilasi alami, mekanikal dan sistem HVAC .(Van Der Linden *et al.*, 2002)



Gambar 7. Sensasi termal, untuk musim panas, dan musim dingin sebagai fungsi PMV. (Givoni, 1998)

Garis untuk musim panas kurang tajam bila dibandingkan dengan garis PMV, menunjukkan bahwa *range* kenyamanan pada populasi UK memperpanjang temperatur yang dipertimbangkan terlalu hangat oleh PMV (Givoni, 1998). Fanger menjaga supaya formulanya dapat diaplikasikan pada seluruh tipe bangunan dan dalam seluruh daerah iklim. Test dilakukan oleh Fanger di Denmark. Kesimpulan Fanger:

- Tidak ada perbedaan yang signifikan dalam persepsi kenyamanan berdasar pada letak geografis atau musim (termasuk daerah tropis)
- 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)
- Tidak ada perbedaan yang signifikan berdasar pada jenis kelamin
- Tidak ada perbedaan yang signifikan berdasar pada bentuk tubuh
- Tidak ada perbedaan yang signifikan berdasar pada asal etnis.



2.6. Metode Keseimbangan Termal

Dalam sistem termal yang melibatkan objek termal dalam kontak termal panas mengalir dari benda yang lebih hangat yang terisi banyak energi termal ke benda dingin yang berisi sedikit energi termal. Oleh karena itu, benda- benda dan sistem baik mendapatkan atau kehilangan panas. Maka secara teknis tidak bisa mendapatkan atau kehilangan dingin, meskipun karena tidak ada yang terpisah “energi dingin”. Dalam sistem termal benda hangat kehilangan energi panas ke benda dingin sampai keseimbangan tercapai. Konsep keseimbangan termal yang paling sering digunakan dan dipelajari di bidang kimia, khususnya dalam studi termodinamika.

Keseimbangan termal di dalam bangunan dapat diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$Q_i + Q_s + Q_c + Q_v + Q_m - Q_e = 0 \dots\dots\dots(6)$$

Di mana :

Q_i = *internal heat gain* (panas dari sumber di dalam ruangan), W

Q_s = *solar heat flow* (panas matahari yang menembus kaca atau melalui jendela), W

Q_c = *conduction heat flow* (panas dari ruang luar yang menembus dinding), W

Q_v = *convection heat flow* (panas dari udara luar), W

Q_m = *mechanical cooling* (panas yang harus diangkut oleh mesin penyejuk udara), W

Q_e = *evaporation* (pengurangan panas karena penguapan), W

Bila hasilnya + (positif) berarti ruangan akan menjadi panas, bila – (negative) berarti akan mendingin.

Untuk daerah tropis, keseimbangan termal menjadi:



$$Q_i + Q_s + Q_c + Q_v - Q_m = 0$$

Memperkirakan beban penyejuk udara, rumusnya adalah:

$$Q_m = Q_i + Q_s + Q_c + Q_v$$

Dimana:

$Q_i = \Sigma$ panas internal (manusia, peralatan rumah tangga)

$Q_s = A \cdot I \cdot \theta$ dimana A = luas jendela, m^2

I = intensitas radiasi matahari, W/m^2

θ = *solar gain factor* bahan kaca

$Q_c = A \cdot U \cdot \Delta T$ dimana A = luas dinding, m^2

U = nilai transmittan, $W/m^2 \text{degC}$

ΔT = selisih suhu, degC

$Q_v = 1300 \cdot V \cdot \Delta T$ dimana 1300 = panas jenis udara, $J/m^3 \text{degC}$

V = kecepatan ventilasi, m^3/s

ΔT = selisih suhu, degC

Untuk menghitung luas permukaan material dengan menggunakan rumus :

$$T_s = T_o + (I \cdot \cos \beta \cdot \alpha / f_o) \dots \dots \dots (7)$$

Dimana

T_s = suhu permukaan yang terkena matahari langsung, degC

T_o = suhu ruang luar, degC

I = intensitas radiasi matahari, w/m^2

A = bilangan serap permukaan dinding

β = sudut datang radiasi matahari, sudut antara garis normal bidang dan garis ke matahari

f_o = konduktan permukaan luar yang terkena radiasi matahari, $W/m^2 \text{degC}$.

Penggunaan AC menjadi suatu hal yang umum pada dewasa ini. Karena kelebihanannya dibandingkan dengan sistem ventilasi lainnya. Namun hal yang perlu diperhatikan adalah agar penggunaan dan pemasangan AC harus seefisien dan seefektif mungkin, terutama dari segi perencanaan kapasitas penyejukan

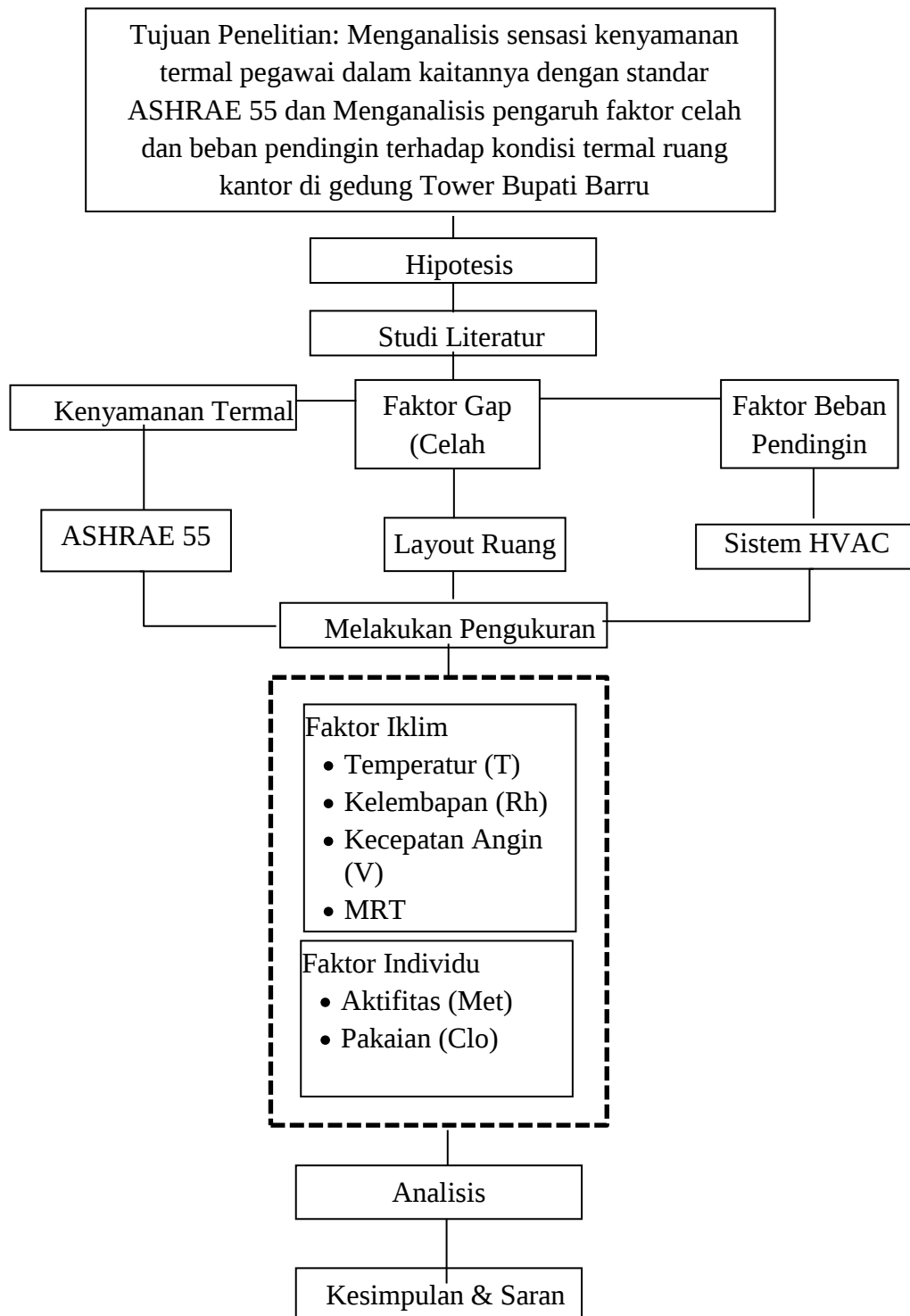
load). Hal ini akan berdampak pada daya listrik yang dibutuhkan. besar daya atau konsumsi listrik, semakin besar biaya yang dikeluarkan. dalam Syahrizal, dkk (2013) menyebutkan sekitar 60% konsumsi listrik



hotel di Jakarta digunakan untuk memasok energi mesin AC (Syahrizal and Panjaitan, 2013). Beban penyejukan (*cooling load*) adalah panas yang harus dibuang oleh AC dari dalam ruang keluar agar suhu udara didalam ruang tidak naik dan tetap dalam batas kenyamanan termal (Arismunandar, 1995; Satwiko, 2009; Budhyowati, dkk. 2016). Semakin banyak panas yang dibuang maka semakin berat tugas AC, sehingga jika diinginkan efisiensi energi, maka harus diusahakan agar penambahan panas kedalam ruangan harus sekecil kecilnya. Penambahan panas dalam ruangan dapat diperoleh dari *external cooling load* yaitu panas yang berasal dari selubung bangunan yang terkena radiasi matahari langsung dan juga radiasi yang masuk langsung kedalam bangunan lewat bukaan dan *internal cooling load* (Panas yang berasal dari tubuh manusia, makhluk hidup lain yang bersuhu hangat dan dari peralatan elektronik dalam ruangan).



2.7. Kerangka Pikir



Gambar 8. Kerangka Pikir

