

PMV (PREDICTED MEAN VOTE) SEBAGAI THERMAL INDEX

THERMAL COMFORT

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 mana juga merupakan fungsi aktivitas dan *metabolic rate*.

Terdapat beberapa standart yang menentukan kenyamanan thermal. Dalam ISO STANDARD 7730 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.

DEFINISI PMV

PMV merupakan index yang dikenalkan oleh Professor Fanger 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:

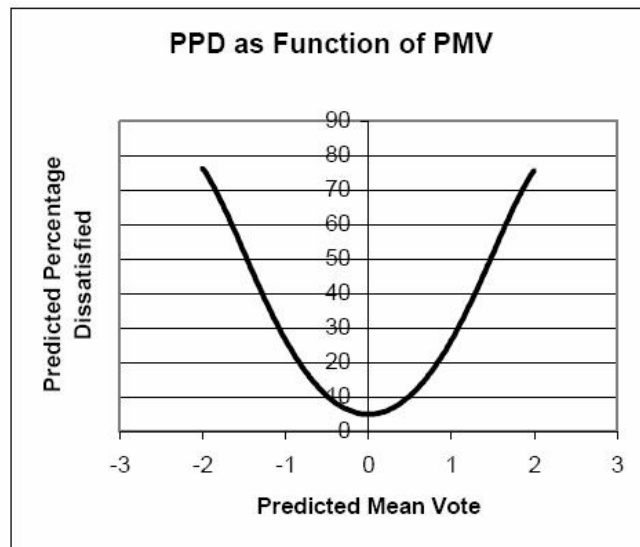
- M = Metabolism (W/m)
- W = External Work, equal to zero from most metabolism
- I_{cl} = Thermal Resistance of clothing (clo)
- F_{cl} = The ratio of the surface of the closed body to the surface area of the nude body (N.D.)
- T_a = Air temperature ($^{\circ}C$.)
- T_r = the mean radiant temperature ($^{\circ}C$.)
- V_{air} = 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 untuk aplikasi yang spesifik untuk manusia (www.patentstorm.us).

Jadi PMV (*Predicted Mean Vote*) merupakan sebuah index yang memperkirakan nilai rata-rata vote kelompok besar manusia pada 7 point skala sensasi thermal:

PMV	Thermal sensation	PPD (%)	P _s
	Hot	100	+3
	Warm	75	+2
	Slightly warm	25	+1
	Neutral	5	0
	Slightly cool	25	-1
	Cool	75	-2
1		100	-3

Tabel 1. hubungan antara PMV, PPD, dan sensasi



Gambar 1. PMV vs PPD

PMV berasal dari fisik transfer panas dikombinasikan dengan kecocokan empiris untuk sensasi. 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 meningkat. Maka diharapkan menjaga PMV dekat dengan 0. persamaan telah dikembangkan untuk menghitung PMV berdasar pada suhu dan RH (Relative Humidity), yang juga diperhitungkan faktor psikologis dan waktu pencahayaan.

ELEMEN YANG BERPENGARUH PADA PMV

PMV memperhitungkan faktor utama yang berhubungan dengan *steady-state* keseimbangan thermal dalam tubuh

- Parameter lingkungan:

Air temperature

Mean radiant temperature

Air velocity

Partial water vapour pressure (or relative humidity)

- 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 MET = 58 W/m² permukaan tubuh). Manusia dewasa normal memiliki permukaan 1,7 m², dan orang dalam kenyamanan 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 (www.innova.dk)

- *Clothing level*

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 m²°C/W juga sering digunakan (1 Clo = 0,155 m²°C/W). Nilai Clo bisa dihitung dengan menambahkan nilai Clo pada setiap pakaian (www.innova.dk).

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*.

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - p_a] \\ & - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) \\ & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned}$$

where:

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

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

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0.078\text{m}^2\text{K} / \text{W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.078\text{m}^2\text{K} / \text{W} \end{cases}$$

di mana:

PMV : Predicted Mean Vote

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

W : kegiatan external, dalam W/m^2 , = 0 untuk kebanyakan aktivitas

I_{cl} : daya tahan thermal pada pakaian, dalam m^2K/W

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

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

\bar{t}_r : mean radiant temperature dalam $^{\circ}C$

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

p_a : partial water vapour pressure, dalam Pa

h_c : convective heat transfer, dalam W/m^2K

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

- 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 m^2K/W (0 sampai 2 clo)
 - t_a : 10 sampai 30 $^{\circ}C$; \bar{t}_r : 10 sampai 40 $^{\circ}C$
 - 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
- Jika kecepatan udara < 0,2 m/s, atau di mana \bar{t}_r berada di dalam 4 $^{\circ}C$ t_a , *operative temperature* (t_0) kira-kira rata-rata dari \bar{t}_r dan t_a .
- di luar kondisi ini, atau untuk ketepatan yang lebih tinggi

$$t_0 = At_a + (1 - A) \bar{t}_r$$

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 1,0 m/s

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

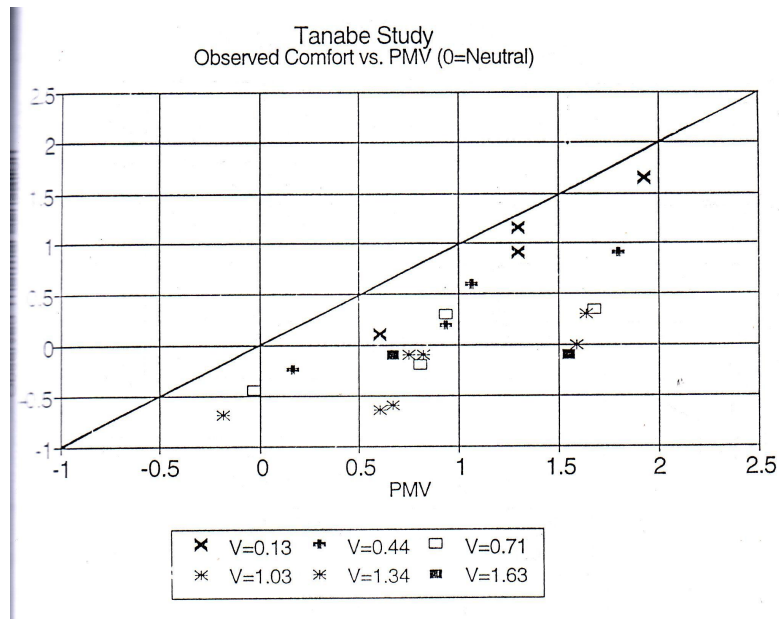
Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) bisa dihasilkan dari PMV dan ini berhubungan dengan *range temperature*. Ketika PMV memberi hasil yang bagus untuk kondisi standart aktivitas yang menetap dan pakaian yang ringan, ini harus divalidasi melalui *range* pakaian dan aktivitas. PMV juga secara efektif merupakan ukuran beban thermal dari sistem *thermoregulatory*, karena itu orang yang nyaman yang meningkatkan nilai metabolismenya 20 W/m² (0,34 met) akan mengalami perubahan yang sama dalam beban thermal apapun insulasi pakaiannya. Tapi nilai Clo yang tinggi meningkatkan suhu kulit dan tubuh lebih besar daripada nilai Clo yang rendah.

Dalam tes percobaan kenyamanan termal dengan persamaan Fanger telah dibuktikan dengan sukses. Semua eksperimen menunjukkan bahwa kenyamanan berhubungan dengan suhu kulit yang merasakan dan bukan dengan variable lingkungan atau pakaian. Eksperimen juga menunjukkan bahwa untuk pekerjaan yang tetap dan pakaian yang ringan mengantar pada suhu yang diinginkan mendekati 25,6⁰C diprediksi oleh persamaan Fanger. Tidak ada efek dari umur, jenis kelamin, ras, dll. Perbedaan dalam suhu yang diinginkan lebih sering mengacu pada perbedaan pakaian.

APLIKASI PMV

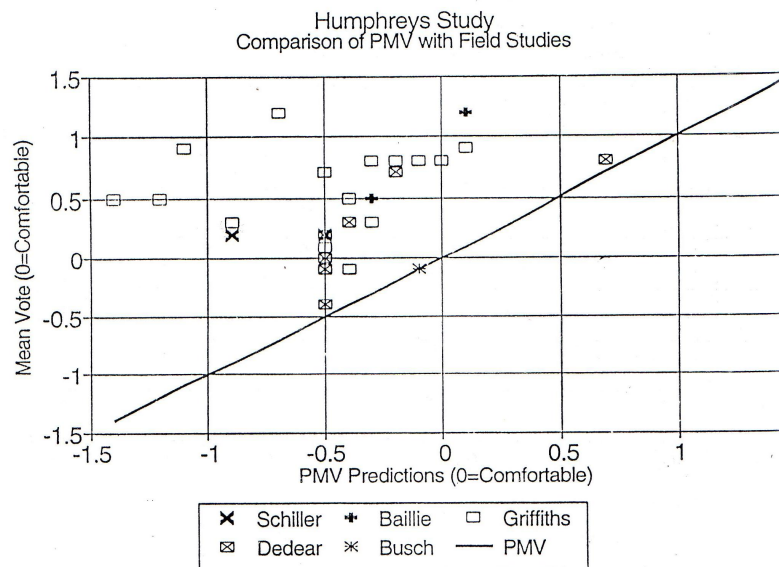
PMV telah banyak digunakan dalam banyak penelitian.

Penelitian Tanabe (1988) tentang sensasi termal di Jepang pada 4 kondisi (kombinasi suhu dan rasio kelembaban). Range suhu antara 26 sampai 31⁰C, 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 dengan kecepatan udara. Hasil ini mengindikasikan bahwa PMV tidak memperhitungkan efek pendinginan kecepatan udara pada suhu tinggi.



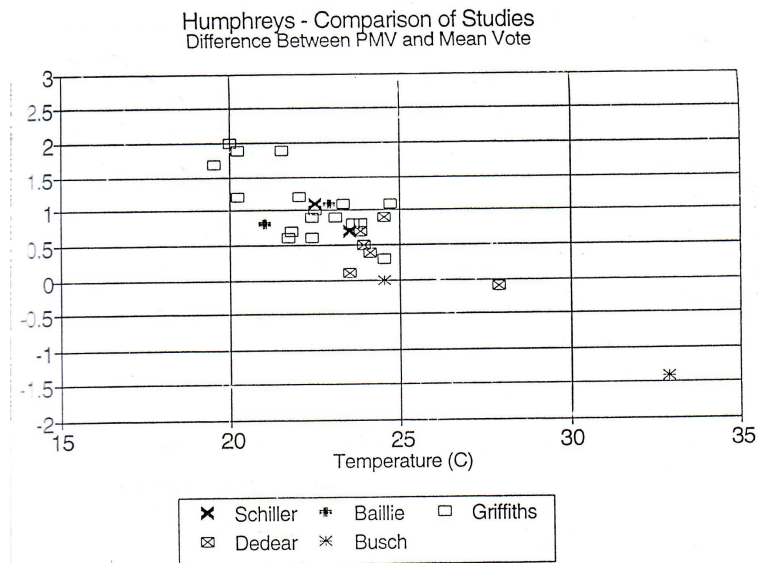
Gambar 2. mean thermal sensation vote (on the Fanger scale) as a function of the predicted Mean Vote (PMV)

Humphreys mencatat 5 studi kenyamanan lapangan (Baillie 1987, Busch 1990, Dedear dan Auliciems 1985, Griffith 1990, dan Schiller 1990). Gambar menunjukkan pengamatan *Mean Vote* di lapangan sebagai fungsi perhitungan PMV. Bisa dilihat bahwa *mean vote* di lapangan di atas prediksi PMV.



Gambar 3. observed mean vote in the field studies summarized by Humphreys as a function of the calculated PMV

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*.

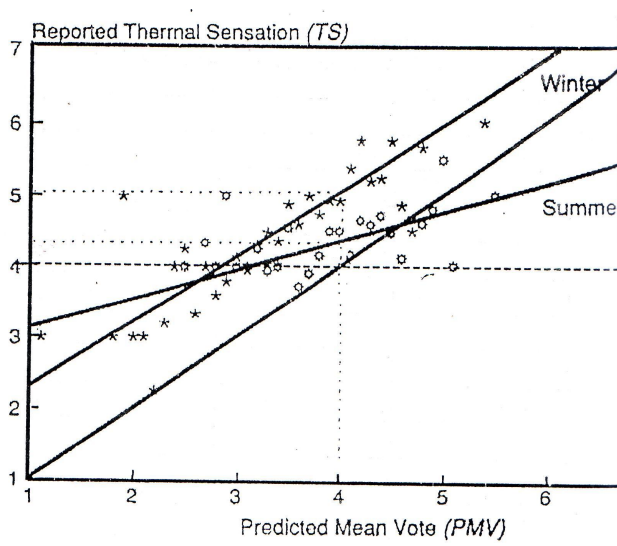


Gambar 4. difference between the observed Mean Vote and the PMV as a function of the mean temperature in each study

Oseland (1994), pada British Research Establishment (BRE) memimpin survey di rumah baru sepanjang musim panas dan dingin untuk menguji pemanasan dan perilaku ventilasi.

Pada pengamatan musim dingin garis hampir paralel dengan garis PMV, tapi dengan perbedaan sekitar 1 satuan skala kenyamanan. Ini berarti bahwa di musim dingin orang di Inggris merasa nyaman pada suhu yang lebih rendah daripada yang diprediksi oleh PMV.

Garis untuk musim panas kurang tajam bila dibandingkan dengan garis PMV, menganggap range kenyamanan di popuasi UK memperpanjang temperatur yang



Gambar 5. reported thermal sensations, for the summer, and the winter season as function of the PMV

Fanger menjaga formulanya 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

BAGAIMANA MENGEVALUASI PMV

KELEBIHAN

The results of the ventilation index calculations are more favorable when baseboard heating is included. The values for the Fanger indices, PMV and PPD, are again very good. In particular, the PPD values for all these cases are below 20%, while the PMV values are all below ± 0.5 . Further, the value for ADPI does not drop below 60 for these cases, even at the lowest flow rates; see, for example, Cases 1 and 2, which consider 2 ACH. The improvement is attributed to better mixing, and so the systems no longer fail on the draft temperature calculation. For example, Figure 16 displays the flow field for Case 16. The plot indicates much more uniform temperatures and better mixing than Figure 15.

KELEMAHAN

Satu masalah dengan persamaan keseimbangan panas milik Fanger adalah bahwa efek kecepatan udara (airspeed) diperhitungkan hanya dalam hal pergantian panas, ketika efeknya pada evaporasi keringat tidak diikutsertakan dalam rumus keseimbangan panas. Konsekuensinya, pada suhu hangat dan kelembaban yang diberikan, ketika pergantian panas kecil, PMV akan memiliki nilai yang hampir sama pada kecepatan angin yang berbeda. Titik ini membatasi kemampuan rumus Fanger untuk menilai efek fisiologis dan sensori kecepatan angin, yang merupakan faktor yang signifikan dalam iklim panas-lembab. Ini bisa jadi merupakan satu alasan ketidaksetujuan prediksi rumus ini, catatan lapangan Humphreys dan penelitian Tanabe.

Teori PMV dimulai dengan panas yang dihasilkan oleh tubuh (metabolic heat) dan bagaimana panas itu hilang pada permukaan tubuh. Jika tubuh tidak terlalu panas atau terlalu dingin, maka panas yang dilepas pada permukaan pasti sama dengan panas yang dihasilkan oleh metabolisme. Ini berarti bahwa kita harus mengetahui seberapa besar

panas metabolisme akan dihasilkan oleh tubuh. Karena ini bervariasi dengan aktivitas berbeda dan antara individu yang berbeda, sulit untuk memprediksi akan seperti apa panas metabolis dari rata-rata pengguna bangunan.

Nilai heat loss pada permukaan tubuh tergantung pada insulasi pakaian yang dipakai oleh orang, kealaman pakaian (ketat atau tidak, misalnya) dan juga posturnya. Jadi untuk memprediksi PMV dalam bangunan kita harus yakin tentang pakaian yang akan dipakai orang. Ini sulit untuk diprediksi.

Harapan orang akan lingkungan dan reaksi mereka padanya dibentuk oleh pengalaman. Tapi faktor yang kritis pada reaksi orang akan lingkungan (membuka jendela, menyalakan kipas angin, mengganti pakaian, atau merubah posisi duduk) merupakan pengalaman mereka pada masa lalu, diset melawan kultural dan pengalaman musiman.

REFERENSI

Givoni, Baruch. 1998. *Climate Consideration in Building and Urban Design*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Nicol, Fergus. 2000. *Climate and Thermal Comfort in India dalam Climate Responsive Architecture, A Design Handbook for Energy Efficient Buildings*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.

MM Gouda BSc MSc, S Danaher BSc PhD CPhys CEng MIEEa and CP Underwood BSc PhD CEng. 2001. Thermal comfort based fuzzy logic controller dalam *Building Serv. Eng. Res. Technol.* 22,4 (2001) pp. 237-253. diakses dari <http://www.sagepublications.com>.

_____. 1995. Method and apparatus for calculating predicted mean thermal sensitivity dalam US Patent Issued on July 25, 1995. diakses dari <http://www.patentstorm.us>

Parsons, Ken. _____. *Thermal Comfort Studies, Standards, and Strategy*.

<http://ergo.human.cornell.edu>

<http://www.innova.dk>