

**PERAN KECEPATAN ANGIN TERHADAP PENINGKATAN KENYAMANAN  
TERMIS MANUSIA DI LINGKUNGAN BERIKLIM TROPIS LEMBAB  
( *The Role of Wind Velocity on Increasing Human Thermal Comfort in  
Hot and Humid Environment* )**

**Sangkertadi**

Fakultas Teknik Jurusan Arsitektur, Universitas Sam Ratulangi, Manado

**Abstrak**

Faktor utama yang mempengaruhi persepsi kenyamanan termis pada manusia adalah : pakaian, suhu, kelembaban dan kecepatan udara sekitar, serta jenis aktivitasnya. Di daerah beriklim panas dan lembab, rasa tidak nyaman berkaitan erat dengan keluarnya keringat. Angin dengan debit dan kecepatan tertentu dapat difungsikan untuk mendinginkan penghuni bangunan melalui proses evaporasi keringat dan proses perpindahan kalor secara konvektif. Tulisan ini menyajikan pendalaman tentang teknik mengevaluasi tingkat kenyamanan termis manusia di daerah beriklim tropis lembab khususnya dengan menggunakan skala DISC dan PMV. Studi ini difokuskan pada pengaruh kecepatan angin untuk meningkatkan kenyamanan termis manusia. Metode yang dipakai adalah simulasi numerik dengan menggunakan sejumlah persamaan praktis untuk penghitungan kenyamanan termis.

Kata kunci : Indeks kenyamanan termis, iklim tropis lembab, kecepatan angin.

**Abstract**

*The most important factors which influence the condition of thermal comfort are clothing, temperature, humidity, air velocity, and types of activities. In hot and humid climate, feeling of comfort are associated with sweating. Air velocity can cool building occupants by increasing convective and evaporative heat losses.*

*This paper intends to explore the techniques for evaluating of thermal comfort especially with introduction of PMV and DISC scales for the tropical humid environment. The study is focused on the influence of air velocity to the scale number of both DISC and PMV.*

*A simple numerical simulation with some of empirical correlations are used to estimate the index of thermal comfort.*

*Key words : thermal comfort index, tropical humid climate, air velocity, comfort zone.*

**PENDAHULUAN**

Di daerah beriklim tropis dan lembab, temperatur udara dan terutama kelembaban udaranya yang relatif tinggi merupakan penyebab utama situasi tidak nyaman secara termal bagi

manusia. Namun begitu masyarakat yang telah lama hidup di daerah beriklim tropis dan lembab ini, telah menunjukkan keberhasilannya dalam menghadapi tantangan iklim tersebut dari waktu ke waktu, yakni dengan menerapkan suatu tatanan dan rancangan hunian yang mampu

beradaptasi dengan lingkungan klimatis sekitarnya. Rancangan tersebut dikenal sebagai arsitektur tradisional. Bukaan-bukaan lebar yang ditampilkan pada rumah-rumah tradisional memainkan peran yang sangat penting dalam penerapan sistem penghawaan alamiah menuju tercapainya tingkat kenyamanan penghuninya, yakni membantu mekanisme penghawaan secara alamiah didalam ruang, dengan memungkinkan pemenuhan debit ventilasi udara baik untuk kebutuhan pergantian udara segar maupun untuk membantu proses pendinginan struktur bangunan secara konvektif. Selain itu, adanya mekanisme pergerakan udara segar yang langsung menyentuh kulit dapat membantu percepatan proses evaporasi keringat.

Tingkat kenyamanan termal suatu individu, selain dipengaruhi oleh faktor klimatis tersebut, juga dipengaruhi oleh faktor-faktor lain yaitu: jenis pakaian yang dikenakan, tingkat aktivitas, dimensi tubuh, bahkan situasi psikologis pada saat tertentu.

Dibandingkan dengan daerah beriklim dingin dan subtropis, kenyamanan termal di daerah beriklim tropis dan lembab memiliki parameter yang berbeda, yakni adanya faktor keringat. Sehingga tingkat kebasahan kulit karena keringat menjadi salah satu tolok ukur dalam penentuan tingkat kenyamanan termal.

Pentingnya pemahaman mengenai metode untuk menentukan kenyamanan termal ini, sangat dibutuhkan oleh para arsitek sebagai masukan dalam suatu proses perancangan yang menjadi obyeknya, atau sebaliknya menjadi suatu alat untuk mengevaluasi suatu hasil rancangan.

Banyak dan beragamnya faktor yang berpengaruh terhadap tingkat kenyamanan termal, dapat menyulitkan para arsitek dalam menentukan faktor-faktor manakah yang menjadi prioritas dan berhubungan secara langsung dengan komponen rancangan arsitektur.

Kajian ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran mengenai faktor-faktor yang berperan terhadap tingkat kenyamanan

termal didaerah beriklim tropis lembab, khususnya yang berhubungan dengan pengaruh kecepatan angin dalam proses kenyamanan evaporatif. Selanjutnya, dari gambaran tersebut dapat dijadikan masukan berharga bagi arsitek praktisi, terutama dalam perancangan bangunan di daerah beriklim tropis lembab yang memanfaatkan potensi iklim sekitar dan alamiah.

## **TEORI DASAR KENYAMANAN TERMIS**

### **Definisi Umum Kenyamanan Termis**

Fanger (1970) mendefinisikan kenyamanan termis sebagai suatu kondisi atau rasa puas dari seseorang menghadapi lingkungan termisnya. atau dengan kata lain adalah situasi dengan absennya rasa tidak nyaman.

Tolok ukur untuk menentukan rasa nyaman secara fisis adalah perubahan-perubahan yang terjadi pada karakteristik biologis seseorang, yakni sebuah tanggapan sensorial biologis terhadap keadaan atau lingkungan termis di sekitarnya.

Kemampuan dalam hal menjaga keseimbangan termis antara tubuh manusia dengan lingkungan disekitarnya merupakan salah satu prasyarat pemenuhan kesehatan, serta kenyamanan. Organisme manusia secara normal berada pada kondisi seimbang berdasarkan pengaruh dari :

- 1) nilai kuantitas kalor yang diproduksi didalam tubuh manusia, yang bervariasi menurut jenis atau tingkat aktifitasnya
- 2) nilai kuantitas pertukaran kalor dengan lingkungannya.

Untuk menentukan bahwa seseorang merasa nyaman atau tidak didalam suatu lingkungan termofisis, dikenal sebuah skala pengukur tingkat kenyamanan termis. Namun untuk dapat menentukan skala tingkat kenyamanan termis tersebut, terlebih dahulu harus diketahui besaran-besaran termis atau parameter-parameter yang merupakan resultante dari proses pertukaran kalor antara manusia dengan lingkungannya.

**Proses pertukaran kalor antara manusia dengan lingkungannya**

Pertukaran kalor antara tubuh manusia dengan lingkungannya, dimaksudkan sebagai terjadi suatu interaksi fisis antara tubuh dengan udara dan permukaan sekitar, terutama melalui cara-cara konveksi dan radiasi. Cara konduksi dapat juga terjadi bila tubuh manusia menempel pada suatu permukaan yang bersuhu permukaan relatif ekstrem dibanding suhu udara di ambang normal. Pada saat tubuh mendapatkan suatu tekanan termal dari luar, terjadi berbagai perubahan yang menyangkut sejumlah parameter fisiologis. Perubahan-perubahan tersebut meliputi angka-angka dari pada suhu permukaan kulit, suhu tubuh, ritme jantung, dan debit keringat. Perubahan-perubahan tersebut terjadi sebagai reaksi guna menjaga keseimbangan termis tubuh akibat tekanan dari luar.

Khususnya untuk daerah yang beriklim tropis dan lembab, faktor debit keringat dan kebasahan kulit oleh keringat (*skin wettness*), dinyatakan sebagai parameter dominan dalam penentuan tingkat kenyamanan termis.

Pertukaran kalor antara tubuh dengan

lingkungannya dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$M + R + C + E_{resl} + E_{ress} + E_{dif} + E_{vap} = Q_{cp} \dots (1)$$

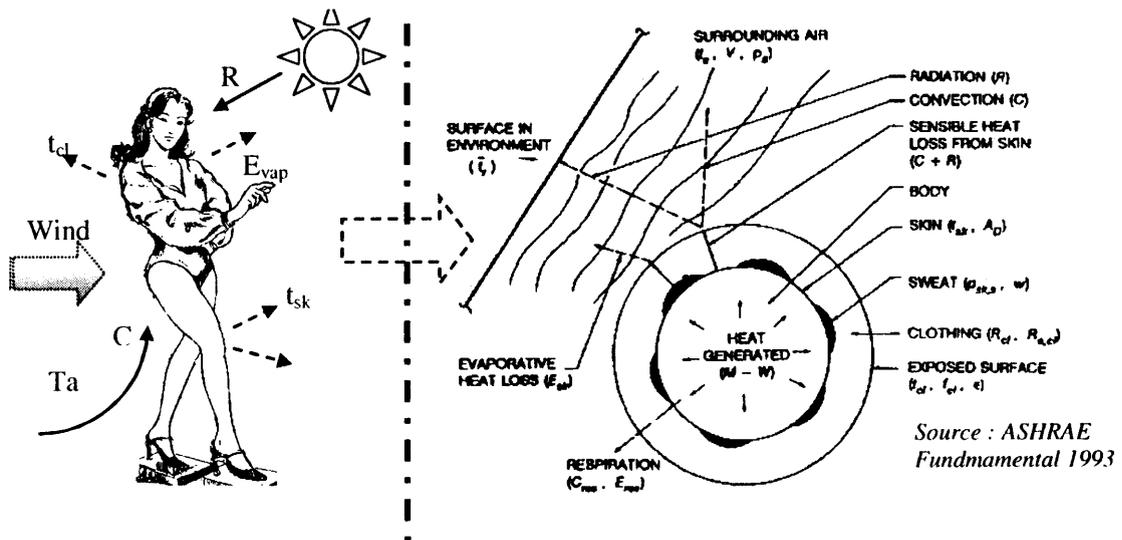
$Q_{cp}$  melambangkan beban kalor yang diterima tubuh, maksudnya adalah hasil beda antara kalor yang diproduksi dengan kalor yang keluar (hilang). Jika  $Q_{cp} = 0$ , maka tubuh secara termis dalam keadaan netral, dimana situasi nyaman dirasakan.

$R, C, E_{ress}, E_{resl}, E_{dif}$  dan  $E_{vap}$ , adalah fungsi-fungsi baik berasal dari faktor lingkungan (suhu, angin, kelembaban udara), maupun berasal dari faktor internal tubuh (suhu permukaan kulit, kelembaban kulit, dll). Sedangkan  $M$  menunjukkan produksi panas metabolisme yang juga merupakan produk kalor karena suatu aktifitas (gambar.1)

Selanjutnya :

Jika  $Q_{cp} < 0$ , maka subyek akan merasakan "dingin"

Jika  $Q_{cp} > 0$ , maka subyek akan merasakan "panas"



**Gambar.1. Ilustrasi proses interaksi pertukaran kalor antara manusia dan lingkungannya menurut ASHRAE Fundamental (1993)**

**Pengaruh Luas Kulit Tubuh.**

Bagi seseorang yang berperawakan gemuk akan merasakan ketidaknyamanan yang berbeda dengan orang yang berperawakan kurus dengan tinggi badan yang sama, apabila berada di suatu lingkungan klimatis yang sama. Demikian kenyataan pengaruh faktor morfologi tubuh terhadap tingkat kenyamanan termis. Selanjutnya dapat ditelusuri, bahwa perbedaan tingkat kenyamanan termis tersebut disebabkan oleh perbedaan luas permukaan kulit tubuh antara yang berbadan gemuk dan yang berbadan kurus. Untuk memudahkan perhitungan-perhitungan, telah dikenal secara luas bahwa untuk mengetahui luas permukaan kulit tubuh, dipakai formulasi Du Bois, yang merupakan korelasi eksponensial dari faktor-faktor : berat dan tinggi badan, atau diformulasikan sebagai berikut :

$$Adu = 0.203 p^{0.425} h^{0.725} m^2 \dots\dots\dots 2)$$

dimana :

- Adu* : luas permukaan kulit, dalam m<sup>2</sup>
- p* : berat badan, dalam kg
- h* : tinggi badan, dalam m

**Perhitungan Aktivitas dan Metabolisme Termis**

Dalam tubuh manusia selalu terjadi proses biologis yang menghasilkan kalor. Proses ini dinamakan metabolisme termis. Proses produksi kalor ini selanjutnya akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan jenis aktivitas yang dilakukan manusia.

Proses ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$M = Mt - w = Mt (1-n) \dots\dots\dots(3)$$

dimana :

- M* : metabolisme termis
- Mt* : metabolisme total
- w* : beban kerja external
- n* : efisiensi kerja

Pengukuran suatu aktivitas dinyatakan dengan satuan “met” (kependekan dari istilah

metabolisme). Nilai “met” dari suatu aktifitas dapat dikonversikan kedalam satuan W/m<sup>2</sup>, setelah diintroduksikan nilai Adu.

$$1 \text{ met} = 58.15 \text{ W/m}^2$$

$$M = 58.15 \cdot \text{Act. Adu} \dots\dots\dots(4)$$

dimana :

- Act* : tingkat/jenis aktivitas, dinyatakan dalam “met”
- M* : Metabolisme termis, dinyatakan dalam satuan Watt

**Perhitungan Suhu Pakaian**

Pakaian membentuk suatu lingkungan perantara (*intermediate environment*) antara manusia dengan lingkungan ambangnya. Proses pertukaran panas antara kulit dengan permukaan luar pakaian merupakan proses yang kompleks. Dalam hal ini harus tercakup fenomena-fenomena berikut ini :

- a) pertukaran panas konvektif dan radiatif antara kulit dengan pakaian, dan
- b) pertukaran panas secara konduktif pada unsur bahan pakaian.

Kompleksitas terjadi terutama dalam hal menentukan karakteristik termis dari bahan pakaian serta efek termis sebagai akibat dari kompleksitas disain pakaian. Karena itu, untuk memudahkan perhitungan-perhitungan diadakan simplifikasi dimana pada setiap jenis pakaian dikenal istilah-istilah sebagai berikut

- a) Resistansi Termis Global (biasanya diberi istilah *Rcl*, yang merupakan kependekan dari *Resistance of Clothing*);
- b) Isolasi termis Global (biasanya diberi istilah *Icl*, yang merupakan kependekan dari *Isolation of clothing*, dengan satuan “clo”, (singkatan dari *clothing*) (lihat Tabel-1);
- c) Faktor termis Global (biasanya diberi istilah *Fcl*, kependekan dari *Factor of clothing*).

Konversi terhadap satuan termisnya adalah sebagai berikut :

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W} \dots\dots\dots (5)$$

selanjutnya :

$$R_{cl} = 0.155 I_{cl} \dots\dots\dots (6)$$

$$h_{cl} = 1/R_{cl}/F_{cl} \dots\dots\dots (7)$$

dimana :

$h_{cl}$  : koefisien transfer konvektif untuk pakaian ( $W/m^2\text{ }^\circ C$ )

Keseimbangan termal pada pakaian terjadi apabila :

$$h_{cl} (t_{sk} - t_{cl}) = h_r (t_{cl} - t_r) + h_c (t_{cl} - t_a) \dots\dots (8)$$

dimana :

- $t_{sk}$  : suhu permukaan kulit, ( $^\circ C$ )
- $t_r$  : suhu radiatif lingkungan, ( $^\circ C$ )
- $t_a$  : suhu udara lingkungan, dalam ( $^\circ C$ )
- $t_{cl}$  : suhu pakaian, dalam ( $^\circ C$ )

Perhitungan suhu pakaian adalah :

$$t_{cl} = (h_{cl} t_{sk} + h_r t_r + h_c t_a) / (h_{cl} + h_c + h_r) \dots\dots(9)$$

$$h_c = 12.1 \sqrt{v} \dots\dots\dots(10)$$

dimana :

- $h_c$  : koefisien konvektif pertukaran kalor antara pakaian dengan udara, ( $W/m^2\text{ }^\circ C$ )
- $v$  : kecepatan udara, (m/s)
- $h_r$  : koefisien transfer kalor radiatif antara pakaian dengan kulit manusia ( $W/m^2\text{ }^\circ C$ )

**Perhitungan Suhu Permukaan Kulit**

Pertukaran panas antara tubuh manusia dengan lingkungannya terjadi melalui perantara kulit. Dalam hal ini terjadi dua fenomena:

- a) pertukaran kalor secara konvektif dan radiatif dengan udara kering;
- b) determinasi kapasitas evaporasi tubuh terhadap lingkungan yang lembab dan berangin.

Fenomena yang kedua merupakan aspek penentu dalam kasus-kasus lingkungan iklim tropis lembab.

Suhu rata-rata permukaan kulit tubuh manusia yang berada di lingkungan beriklim panas, dapat diestimasi sebagai berikut :

- a. dalam keadaan santai :

$$t_{sk} = 34.7 - 0.249 (30 - top) \dots\dots\dots (11)$$

dengan :

$$top = (h_c t_a + h_r t_r) / (h_c + h_r)$$

- b. dalam keadaan melakukan aktivitas ( $act > 1$ ):

- untuk  $top < 28\text{ }^\circ C$  :

$$t_{sk} = 27.5 + 0.166 top + 0.0008 P_{va} \dots\dots (12)$$

- untuk  $28\text{ }^\circ C < top < 36\text{ }^\circ C$  :

$$t_{sk} = 25.2 + 0.249 top + 0.01 (0.1825 - 0.003525) top) P_{va} \dots\dots\dots (13)$$

**Tabel 1. Karakteristik termis global untuk sejumlah tipe pakaian**

Jenis pakaian	I <sub>cl</sub> (clo)	F <sub>cl</sub>
Tidak berpakaian	0	1
Hanya bercelana pendek (short)	0.1	1
Pakaian tropis ringan (celana pendek, baju lengan pendek, sandal)	0.3 - 0.4	1.05
Pakaian tropis untuk bekerja (celana panjang bahan ringan, baju lengan pendek, kaos kaki, sepatu)	0.4 - 0.6	1.1
Pakaian bisnis lengkap (jas, dasi, baju lengan panjang, kaos kaki, sepatu)	1	1.15
Seragam militer	0.8	1.1

dimana :

$t_{op}$  : suhu operatif, (°C);

$t_{sk}$  : suhu permukaan kulit, dalam (°C);

$P_{va}$  : tekanan uap air pada suhu ambang, dalam pascal (Pa);

$h_r$  : koefisien transfer radiatif antara permukaan kulit dan udara sekitarnya (W/m<sup>2</sup>°C);

$h_c$  : koefisien transfer konvektif antara permukaan kulit dan udara sekitarnya (W/m<sup>2</sup>°C).

**Perhitungan Pertukaran Kalor Manusia Dengan Lingkungan Udara Sekitar**

Hal yang dibahas ini adalah proses pertukaran kalor yang terjadi antara tubuh manusia dengan lingkungannya (lingkungan udara) secara radiatif dan konvektif serta faktor respiratif.

a) pertukaran kalor secara radiatif

Proses ini dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$R = hr (t_{cl} - t_r) Adu Fcl \dots\dots\dots (14)$$

dimana :

$R$  : Kuantitas kalor karena proses transfer radiatif, dalam W;

$hr$  : koefisien transfer radiatif, konstan sekitar 4.8 W/m<sup>2</sup> °C;

$t_r$  : suhu radiatif rata-rata dari lingkungan, dalam °C.

b) pertukaran panas secara konvektif

Proses ini dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$C = hc (t_{cl} - t_a) Adu Fcl \dots\dots\dots (15)$$

dimana :

$C$  : kuantitas kalor dari hasil pertukaran panas secara konvektif,

$h_c$  : koefisien transfer convectif (W/m<sup>2</sup>°C)

$t_a$  : suhu udara lingkungan, (°C)

c) pertukaran panas melalui proses respiratif dan difusif

Proses respiratif adalah pertukaran panas yang terjadi sebagai hasil dari proses pernafasan melalui indera dan saluran pernafasan. Disini terjadi proses pertukaran panas yang juga merupakan produk dari adanya perbedaan suhu udara lingkungan dan suhu udara yang dihirup. Proses difusif adalah proses per-tukaran panas antara tubuh dengan lingkungan-nya melalui perantara pori-pori kulit.

Formulasinya adalah sebagai berikut :

1. Pertukaran panas “sensibel” melalui proses respirasi (pernafasan)

$$E_{ress} = 0.0052 M Ca (t_{exp} - t_a) \dots\dots\dots (16)$$

$$t_{exp} = 32.6 + 0.066 t_a + 32 h_s \dots\dots\dots (17)$$

dimana

$E_{ress}$  : produksi panas sensibel melalui proses respirasi, (W)

$Ca$  : panas spesifik dari udara yang dihirup (sekitar 0.28 Wh/kg)

$t_{exp}$  : suhu udara yang dikeluarkan dari pernafasan, (°C)

$t_a$  : suhu udara lingkungan, (°C)

$h_s$  : kelembaban absolut udara lingkungan, kg/kg udara

dengan :

$$h_s = 0.622 \frac{P_{wa}}{101325 - P_{va}} \dots\dots\dots (18)$$

dimana angka 101325 (pascal) adalah tekanan udara standar 1 atm

2. pertukaran panas “laten” melalui proses respirasi (pernafasan)

$$E_{resl} = 0.0052 M Clv (h_{sexp} - h_s) \dots\dots (19)$$

dimana

*Eresl* : produksi panas laten melalui proses respirasi, W

*M* : Metabolisme termal, W

*Clv* : kalor laten dari proses penguapan udara yang dihembus ( sekitar 667 Wh/kg)

*hs exp*: kelembaban absolut dari udara yang dihembus, kg/kg udara kering

*h<sub>s</sub>* : kelembaban absolut dari udara lingkungan, kg/kg udara kering

**Pertukaran panas secara difusif melalui permukaan kulit**

$$Edif = 0.00305 Adu (P_{vsp} - Pva) \dots\dots\dots (20)$$

dimana

*Edif* : produksi panas melalui proses difusi, W

*Adu* : luas permukaan kulit tubuh, m<sup>2</sup>

*P<sub>vsp</sub>* : tekanan jenuh uap air pada suhu permukaan kulit, Pa

*P<sub>va</sub>* : tekanan parsial uap air pada suhu udara, Pa

**Perhitungan Debit Keringat**

Limit fisiologis dari proses evaporasi dapat ditentukan oleh kuantitas debit keringat. Sementara itu tingkat kelembaban udara ambang menjadi penentu secara fisis terhadap limit proses evaporasi bagi seseorang. Faktor kebasahan kulit karena keringat menjadi salah satu variabel utama dan penentu didalam determinasi rasa nyaman di lingkungan beriklim tropis dan lembab. Dibagian awal telah diuraikan bahwa untuk mencapai keseimbangan termal, terjadi suatu mekanisme dimana :

$$M - R - C - Eresl - Eress - Edis - Evap = Qcp$$

$$Qcp = 0$$

maka, pada kondisi sesaat faktor evaporasi diformulasikan sebagai berikut :

$$Evap = M - R - C - Eress - Eresl - Edif\dots (21)$$

Kebasahan kulit karena keringat adalah perbandingan antara luas kulit basah dengan luas kulit secara total, yang biasanya dinyatakan dengan prosentase.

Angka tersebut dapat diperoleh dengan pendekatan perbandingan antara kuantitas Evaporasi pada kondisi sesaat dengan kuantitas Evaporasi pada saat maximum, atau sebagai berikut :

$$Mcut = \frac{Evap}{Ev_{max}} \dots\dots\dots (22)$$

dimana :

*Mcut* : Persentase perbandingan antara luas kulit basah karena keringat terhadap luas kulit total (%)

*Evap* : faktor evaporasi (persamaan 21) (W)

*Ev<sub>max</sub>* : Evaporasi maksimum (persamaan 23) (W)

Apabila *Mcut* < 1 keseimbangan termis pada tubuh manusia dapat terjadi secara teoritis Apabila *Mcut* > 1, keseimbangan termis tidak mungkin tercapai, karena terjadi dehidrasi.

Nilai minimum *Mcut* tidak pernah nol. karena proses evaporasi tetap terjadi sekalipun tidak ada indikasi proses keringat, yakni terjadi karena adanya molekul-molekul udara yang menuju secara konstan kearah permukaan kulit secara difusif melalui pori-pori kulit. Pada umumnya nilai *Mcut* adalah : 0.06 < *Mcut* < 1.

Sedangkan untuk mengestimasi Evaporasi maksimum dapat dipergunakan formulasi :

$$Ev_{max} = Hev Adu (Pvsp - Pva) \dots\dots\dots(23)$$

$$Hev = \frac{0.0167 hcl}{1 + 0.92 hcl Rcl}$$

dimana

*Ev<sub>max</sub>* : Evaporasi maximal, (W)

Selanjutnya untuk mengestimasi volume atau debit keringat, dapat dipakai formulasi sebagai berikut :

$$D_s = \frac{Evap}{E} \frac{1}{0.68} \dots\dots\dots (24)$$

$$E = 1 - 0.42 e^{-6(1 - M_{cut})}$$

dimana

$D_s$  : debit atau volume keringat, (g/h)

**Perhitungan Skala Kenyamanan termis**

Untuk menyeragamkan persepsi tentang tingkat kenyamanan termis yang dirasakan oleh seseorang, diperlukan suatu satuan pengukur, yang dalam hal ini dikenal sebagai angka Indeks Kenyamanan termis. Indeks ini, secara teoritis didapat dari suatu proses formulatif mengenai pertukaran panas antara manusia dengan lingkungannya, atau dengan kata lain merupakan suatu respon yang terukur dari seseorang akibat adanya penetrasi panas dari

lingkungannya. Jadi, indeks ini didasarkan pada kondisi keseimbangan termal yang dirasakan oleh seseorang dan yang terjadi antara yang bersangkutan dengan lingkungan iklimatik sekitarnya.

Secara umum telah dikenal tiga jenis indeks masing-masing :

- a) pola 3 skala oleh Mac Intyre;
- b) pola 7 skala oleh ASHRAE dan Fanger (indeks *PMV=Predicted Mean Vote*)
- c) pola 5 skala oleh Gagge dan Berglund (indeks *DISC=Discomfort Scale*)

Perbedaan dari ketiga pola tersebut ditunjukkan pada tabel 2.

Adapun penerapan indeks DISC (pola 5 skala) hanya berlaku dalam keadaan bila manusia berada di lingkungan panas pada saat telah mengeluarkan keringat yang mulai mengganggu.

**Tabel 2. Definisi tiga pola skala kenyamanan termis.**

Pengusul	Model skala	Definisi
Mac Intyre	skala semantik subyektif (3 skala)	saya ingin : lebih panas tidak perlu perubahan lebih dingin
ASHRAE	skala numeris non dimensional (dikenal sebagai indeks PMV = Predicted Mean Vote)	3 = sangat panas 2 = panas 1 = agak panas
Fanger		0 = netral (nyaman) -1 = agak dingin -2 = dingin -3 = sangat dingin
Gagge	skala numerik non dimensional khusus untuk lingkungan	0 = nyaman 1 = agak tidak nyaman
Berglund	beriklim panas (dikenal dengan indeks DISC=Discomfort Scale)	2 = tidak nyaman 3 = sangat tidak nyaman 4 = tidak dapat ditoleransi

#### a. Indeks DISC

Index DISC didapat dari korelasi dengan variabel-variabel : volume keringat dan luas permukaan kulit yang basah karena keringat. Adapun salah satu korelasi DISC yang diusulkan oleh Sangkertadi (1994) adalah sebagai berikut :

$$DISC = 3.9338 M_{cut} + 0.0158 D_s - 0.3348 \dots (25)$$

Korelasi tersebut didapatkan dari hasil penelusuran dan pengkajian statistik terhadap sejumlah hasil eksperimentasi laboratorium oleh para peneliti di manca negara (Perancis, Hongkong, Thailand, Indonesia, Singapura, Amerika). Korelasi tersebut sangat baik ketelitiannya untuk diterapkan pada manusia yang melakukan aktifitas sedang dan memakai pakaian tipe tropis.

#### b. Indeks PMV

Indeks *PMV* (*Predicted Mean Vote*) pertama kali diusulkan oleh Fanger (1970) yang kemudian diratifikasi oleh dunia internasional dan mendapatkan ISO 7748 (International Standard Organization), yang merupakan standar perhitungan tingkat kenyamanan untuk daerah beriklim sedang (*temperate climate*). Adapun formulasinya adalah sebagai berikut :

$$PMV = ((0.303 e^{-2.1 A_{cr}} + 0.028) Q_{cp}) / A_{du} \dots (26)$$

#### c. Indeks Korelasi ASHRAE (korelasi Y)

Indeks korelasi ASHRAE, adalah persamaan regresi yang menunjukkan pengaruh suhu udara dan tekanan udara terhadap skala kenyamanan manusia dengan pedoman skala tipe PMV (7 skala). Salah satu

korelasinya adalah seperti ditunjukkan pada tabel 3.

### SIMULASI PENGARUH KECEPATAN ANGIN

Dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah diuraikan di atas, dilakukan simulasi komputasi untuk mengetahui besar-kecilnya pengaruh angka kecepatan angin yang menyentuh tubuh manusia terhadap tingkat kenyamanan termis yang dirasakan.

Adapun dalam prosedur simulasi ini sebagai konstanta (parameter tetap) adalah individu (subyek/manusia) dengan ukuran tinggi badan 170 cm dengan berat 60 kg, yang melakukan kegiatan sedang (dengan nilai  $M/A_{du} = 75 \text{ Watt/m}^2$ ), serta mengenakan pakaian ringan tipe tropis (0.5 clo). Sebagai variabel adalah kecepatan angin (antara 0.1 s/d 1.3 m/detik), dipadukan dengan variasi perubahan suhu (antara 27°C s/d 32°C dan kelembaban udara (50%, 70%, dan 90%). Dengan mencermati persamaan-persamaan diatas, nampak bahwa pengaruh kecepatan angin terdapat pada komponen perhitungan yang terpengaruh / terdapat persamaan koefisien konvektif ( $hc$ ), seperti perhitungan suhu pakaian, suhu permukaan kulit dan pertukaran kalor secara konvektif. Secara teoretis besar kecilnya angka kecepatan angin akan berpengaruh pada cepat lambatnya proses evaporasi keringat yang selanjutnya berdampak pada angka skala kenyamanan.

Hasil simulasi ditunjukkan melalui gambar grafik dan matriks berikut ini (Gambar 2.3 dan 4). Hasil-hasil perhitungannya disajikan pada Lampiran 1A, B, C, D, E dan F.

**Tabel 3. Indeks Korelasi**

Waktu di lingkungan iklim (jam)	Persamaan regresi Y (skala kenyamanan termis)
	$Y = 0.245 Ta + 0.248 Pva - 6.475.....(27a)$
	$Y = 0.252 Ta + 0.240 Pva - 6.859.....(27b)$

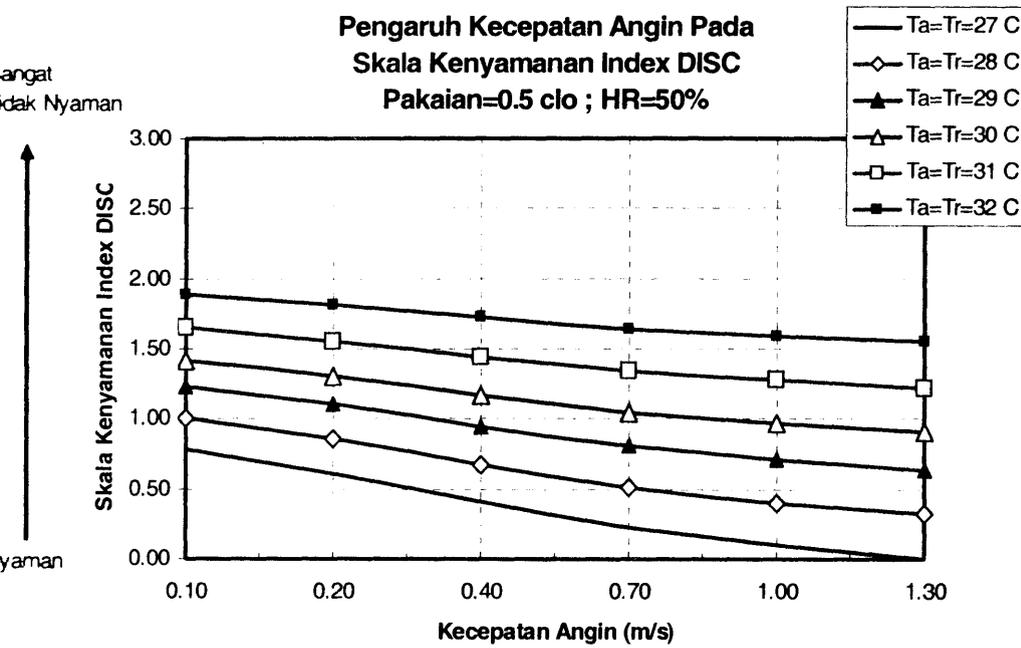
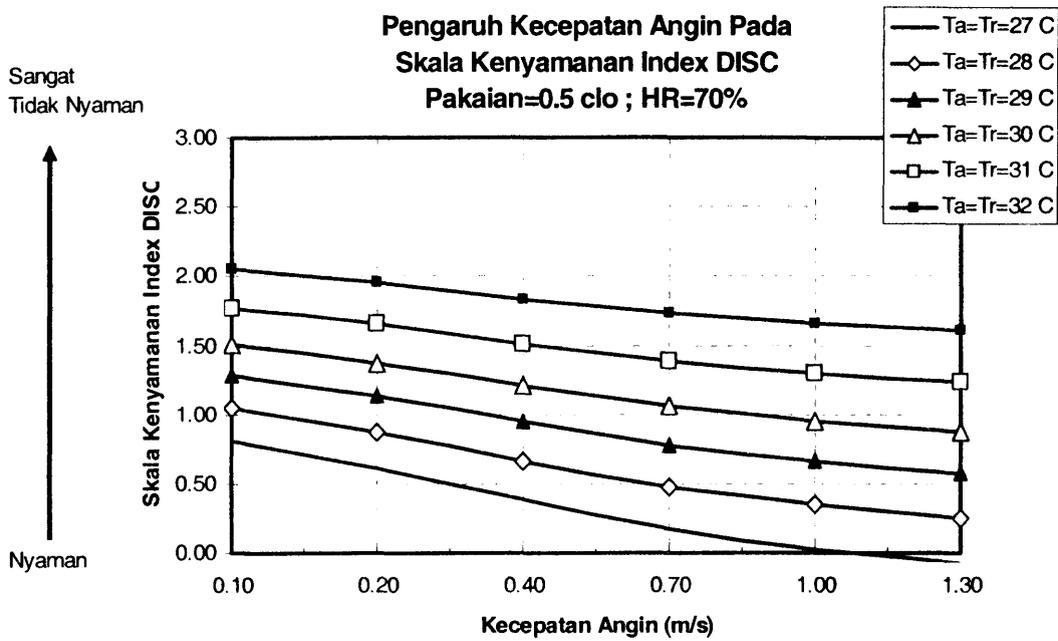
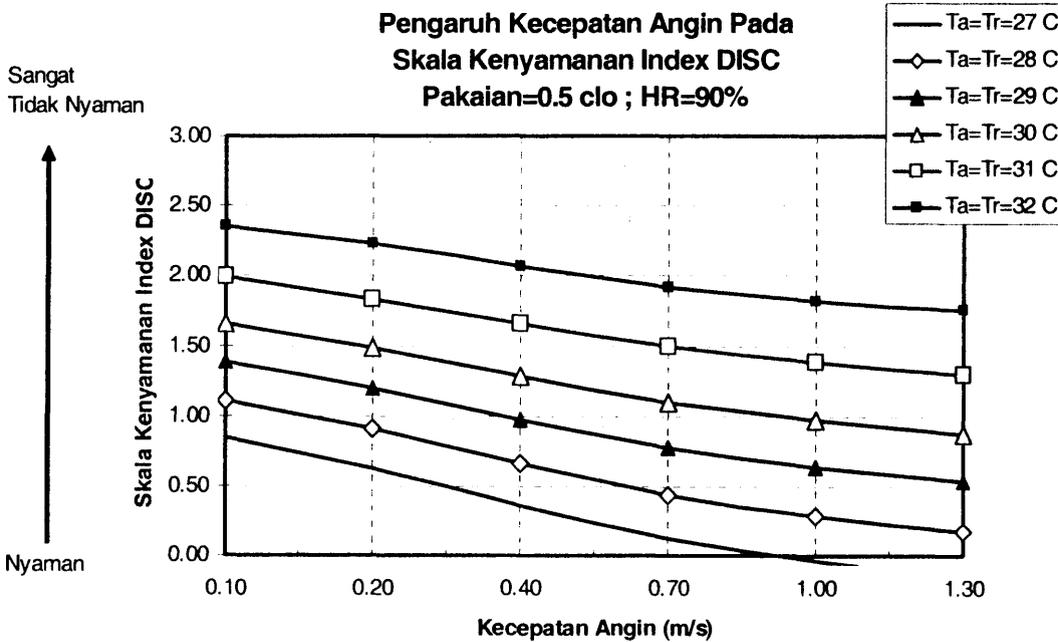


Fig. 2. Pengaruh kecepatan angin terhadap skala DISC pada kondisi kelembaban relatif konstan 50% dengan suhu udara yang bervariasi.



Gambar.3. Pengaruh kecepatan angin terhadap skala DISC pada kondisi kelembaban relatif konstan 70% dengan suhu udara yang bervariasi.

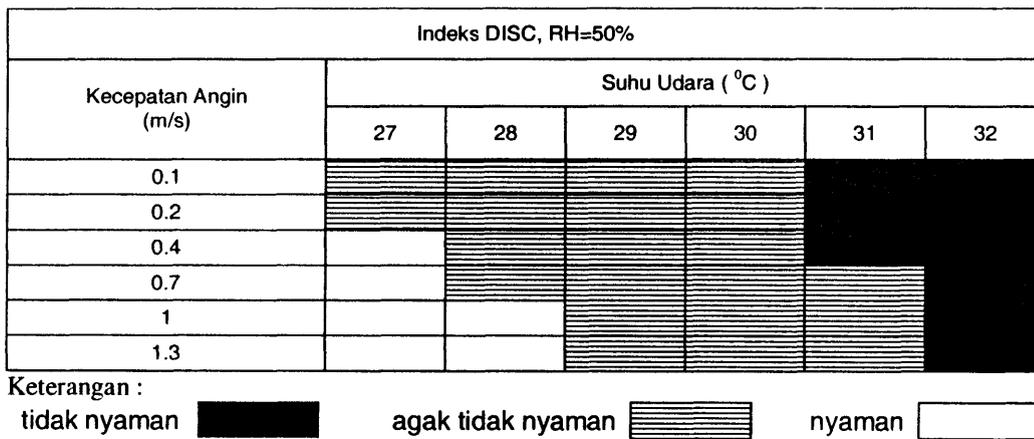


Gambar.4. Pengaruh kecepatan angin terhadap skala DISC pada kondisi kelembaban relatif konstan 90% dengan suhu udara yang bervariasi.

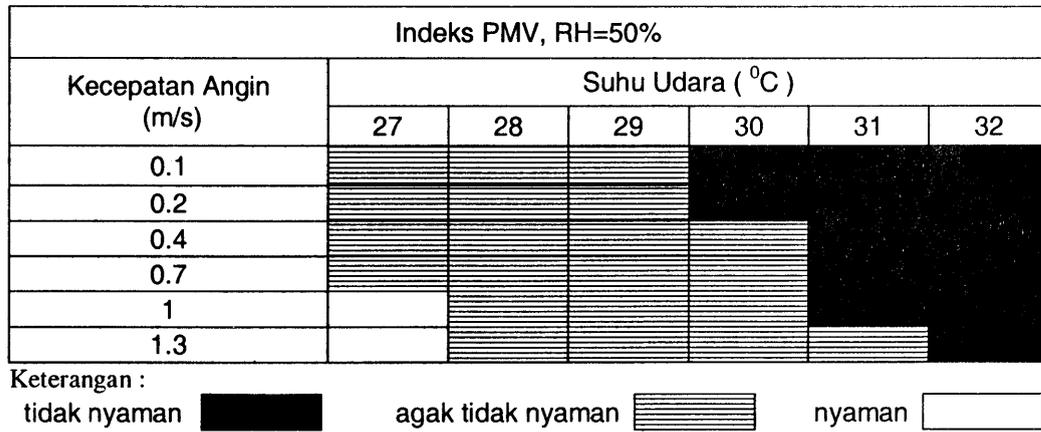
Gambar 2 menunjukkan hasil simulasi untuk kondisi ruangan dengan kelembaban udara 50 %. Nampak bahwa pada suhu udara relatif tinggi (sekitar 30 °C) pengaruh kecepatan angin terhadap skala DISC tidak terlalu besar, sementara pada kondisi suhu udara 28 °C, terdapat pengaruh kecepatan angin untuk menaikkan kenyamanan dari kondisi agak tidak nyaman (skala DISC ± 1.0) menjadi nyaman (skala DISC ± 0.0), yakni dengan menaikkan kecepatan angin dari 0.1 m/s menjadi 0.7 m/s. Pada gambar 3, dimana kelembaban udara diubah menjadi 70%, hanya terjadi perubahan ringan mengenai peranan kecepatan angin dalam menaikkan tingkat kenyamanan. Pada gambar 4, dimana kelembaban udara pada kondisi 90%, nampak terdapat pengaruh kecepatan angin pada kondisi suhu yang bervariasi secara merata. Situasi demikian

adalah logis, dimana saat kelembaban tinggi, terdapat kuantitas uap air yang besar di udara, sangat dibutuhkan arus aliran udara dengan kecepatan dan debit tertentu agar terjadi penguapan-penguapan, termasuk penguapan (evaporasi) keringat manusia.

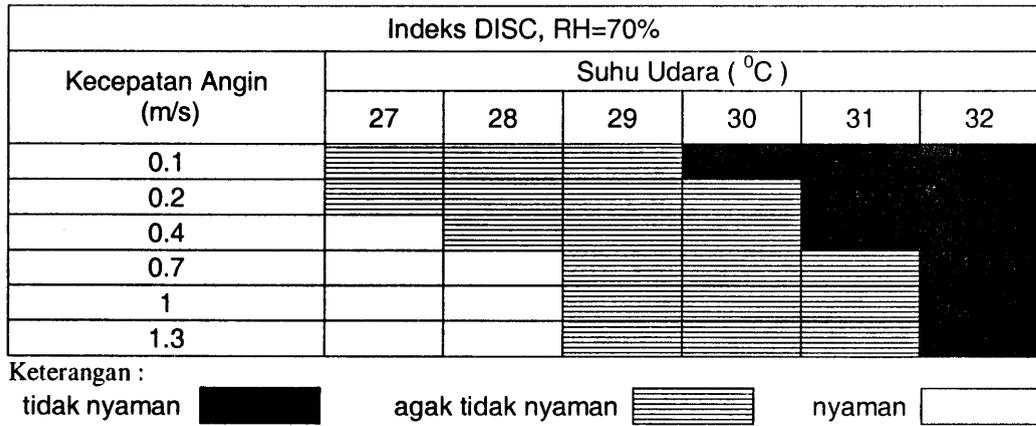
Selanjutnya berdasarkan angka-angka hasil simulasi, dapat dibuat matriks zonasi tingkat kenyamanan yang mengandung tiga variabel, yaitu kecepatan angin, suhu udara dan kelembaban relatif. Pada gambar-gambar 5a s/d 7b, ditunjukkan matriks zonasi tersebut yang sekaligus dapat dibedakan antara hasil simulasi indeks DISC dan PMV. Tampak bahwa terdapat perbedaan tingkat sensitifitas terhadap kecepatan angin diantara dua jenis indeks tersebut. Secara umum dapat dikatakan bahwa angka kecepatan angin lebih sensitif pada indeks DISC daripada indeks PMV.



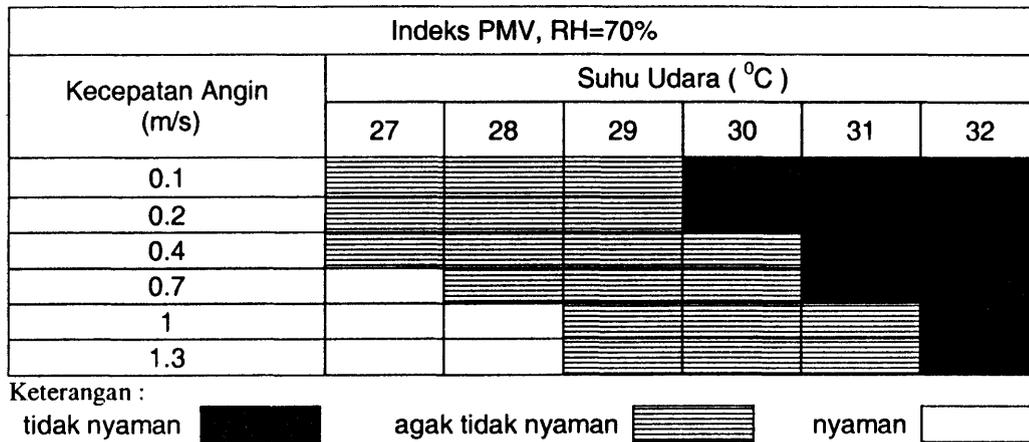
**Gambar.5a. Zona nyaman dan tidak nyaman indeks DISC pada lingkungan iklim dengan suhu udara dan kecepatan angin yang bervariasi namun pada kelembaban udara konstan 50%**



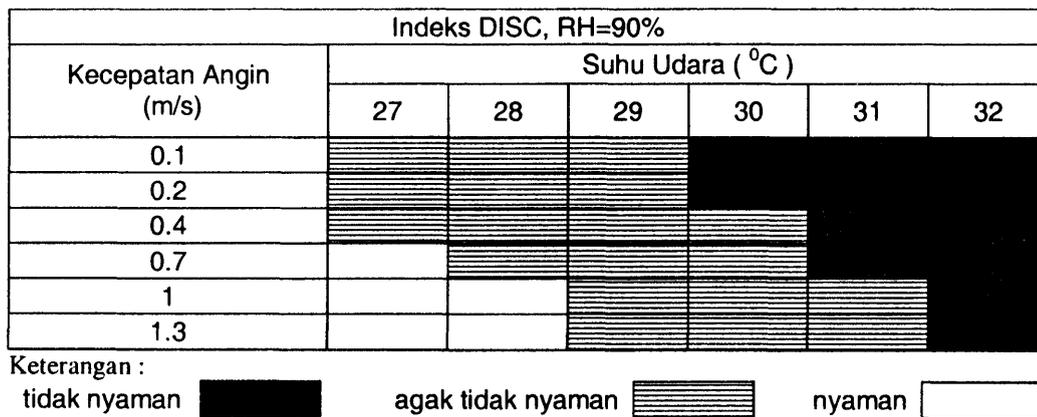
**Gambar.5b. Zona nyaman dan tidak nyaman indeks PMV pada lingkungan iklim dengan suhu udara dan kecepatan angin yang bervariasi namun pada kelembaban**



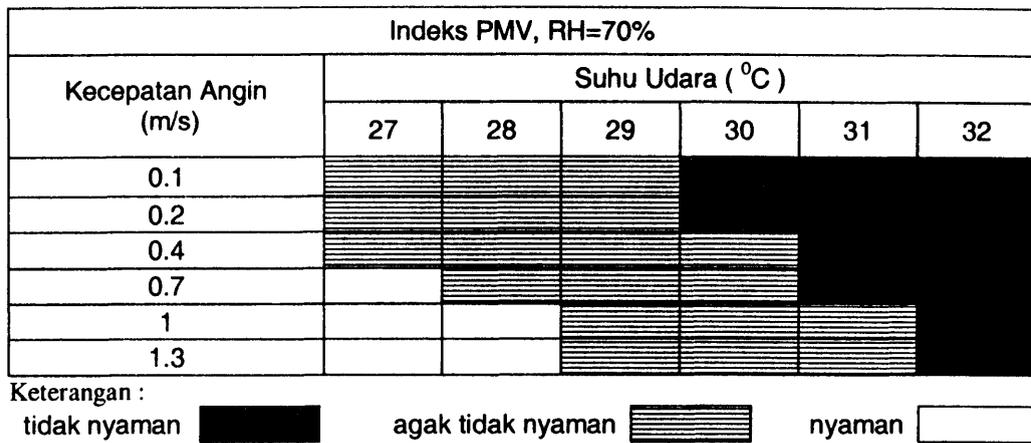
**Gambar.6a. Zona nyaman dan tidak nyaman indeks DISC pada lingkungan iklim dengan suhu udara dan kecepatan angin yang bervariasi namun pada kelembaban udara konstan 70% udara konstan 50%**



**Gambar.6b.** Zona nyaman dan tidak nyaman indeks PMV pada lingkungan iklim dengan suhu udara dan kecepatan angin yang bervariasi namun pada kelembaban udara konstan 70%



**Gambar.7a.** Zona nyaman dan tidak nyaman indeks DISC pada lingkungan iklim dengan suhu udara dan kecepatan angin yang bervariasi namun pada kelembaban udara konstan 90%



**Gambar.7b. Zona nyaman dan tidak nyaman indeks PMV pada lingkungan iklim dengan suhu udara dan kecepatan angin yang bervariasi namun pada kelembaban udara konstan 90%**

**KESIMPULAN**

Tingkat kenyamanan termis manusia yang berada di lingkungan iklim tertentu dapat diukur dengan menggunakan skala-skala numeris maupun semantik. Skala kenyamanan termis baik menggunakan indeks PMV, DISC maupun regresi Y, dihasilkan melalui sejumlah persamaan yang didapatkan melalui suatu eksperimentasi maupun analitis. Tingkat kenyamanan termis seseorang pada dasarnya dipengaruhi oleh faktor internal dirinya sendiri (pakaian, ukuran tubuh, aktifitas) dan faktor external lingkungan klimatis sekitarnya (suhu, kelembaban, kecepatan udara). Di daerah beriklim tropis lembab, terdapat kecenderungan peningkatan kenyamanan termis melalui suatu hembusan angin yang langsung menyentuh kulit tubuh manusia. Melalui hembusan angin tersebut, terjadilah suatu proses evaporasi keringat yang selanjutnya berdampak meningkatkan rasa nyaman termis. Pengaruh kecepatan angin untuk meningkatkan rasa nyaman dapat diketahui secara lebih jelas

khususnya dengan menggunakan indeks DISC. Indeks PMV yang lebih dikhususkan untuk prediksi kenyamanan termis di iklim sedang, nampak tidak terlalu sensitif terhadap perubahan angka kecepatan angin. Sebaliknya indeks DISC tidak dapat digunakan untuk kondisi suhu dingin, karena indeks DISC merupakan fungsi dari tingkat kebasahan keringat dan debit keringat. Oleh karena itu pada suhu rendah dimana manusia tidak berkeringat, maka indeks DISC tidak berlaku.

Melalui simulasi yang dilakukan dengan variasi kecepatan udara, suhu udara dan kelembaban relatif, dapat dibuat suatu tabel-matriks yang menunjukkan zona nyaman bagi manusia yang mengenakan tipe baju tertentu dan melakukan aktifitas tertentu pula. Hasil simulasi yang ditunjukkan dengan grafik dan tabel-tabel dibagian sebelumnya, hanya berlaku bagi manusia laki-laki dewasa pada umumnya (tinggi 170 cm dan berat 60 kg) yang mengenakan tipe pakaian tropis ringan (sekitar 0.5 clo), dan melakukan aktifitas sedang (sekitar 1 met).

## DAFTAR PUSTAKA

1. ————. 1993 *ASHRAE Handbook Fundamentals-1993*, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York.
2. BERGLUND L.G, CUNNINGHAM D J, 1986, .Parameters of Human Discomfort in Warm Environment, *ASHRAE Transaction*, 92 part 2B,
3. BUSCH J F, 1992, A Tale of two populations : thermal comfort in air conditioned and naturally ventilated offices in Thailand, *Energy and Buildings* no 18.
4. DEVAL J C, 1985., *Etude Theorique et experimentale du confort thermique*, These Docteur Ingenieur, ECAM, Paris
5. FANGER, P O 1970, *Thermal comfort*. New York : Mac Graw Hill,
6. SANGKERTADI,1994, *Contribution a l'etude du comportement thermo-aeraulique des batiments en climat tropical humide. Prise en compte de la ventilation naturelle dans l'evaluation du confort*. These Doctorat, INSA de Lyon.

**Lampiran 1. Tabel Hasil perhitungan simulasi kenyamanan termis untuk kondisi iklim yang bervariasi dan menggunakan tiga jenis indeks : DISC, PMV dan Y**

**A**

v (m/s)	$T_a=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , HR=50%					
	Indeks DISC Sangkertadi		korelasi ASHRAE (Y)		PMV	
	skala	keterangan	skala	keterangan	skala	keterangan
0.1	0.78	Agak tidak nyaman	0.58	Agak panas	1.07	Agak panas
0.2	0.61	Agak tidak nyaman	0.58	Agak panas	0.90	Agak panas
0.4	0.41	nyaman			0.71	Agak panas
0.7	0.22	nyaman			0.53	Agak panas
1	0.10	nyaman			0.41	nyaman
1.3	0.00	nyaman			0.32	nyaman

**B**

v (m/s)	$T_a=28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , HR=50%					
	Indeks DISC Sangkertadi		korelasi ASHRAE (Y)		PMV	
	skala	keterangan	skala	keterangan	skala	keterangan
0.1	1.00	Agak tidak nyaman	0.85	Agak panas	1.28	Agak panas
0.2	0.85	Agak tidak nyaman	0.85	Agak panas	1.13	Agak panas
0.4	0.67	Agak tidak nyaman			0.96	Agak panas
0.7	0.51	Agak tidak nyaman			0.81	Agak panas
1	0.40	nyaman			0.70	Agak panas
1.3	0.32	nyaman			0.62	Agak panas

**C**

v (m/s)	$T_a=29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , HR=50%					
	Indeks DISC Sangkertadi		korelasi ASHRAE (Y)		PMV	
	skala	keterangan	skala	keterangan	skala	keterangan
0.1	1.23	Agak tidak nyaman	1.13	Agak panas	1.49	Agak panas
0.2	1.10	Agak tidak nyaman	1.13	Agak panas	1.37	Agak panas
0.4	0.94	Agak tidak nyaman			1.22	Agak panas
0.7	0.80	Agak tidak nyaman			1.08	Agak panas
1	0.71	Agak tidak nyaman			0.99	Agak panas
1.3	0.63	Agak tidak nyaman			0.92	Agak panas

**D**

$T_a=30\text{ }^\circ\text{C}$ , HR=50%						
v (m/s)	Indeks DISC Sangkertadi		korelasi ASHRAE		PMV	
	skala	keterangan	skala	keterangan	skala	keterangan
0.1	1.42	Agak tidak nyaman	1.40	panas	1.67	panas
0.2	1.31	Agak tidak nyaman	1.40	panas	1.56	panas
0.4	1.17	Agak tidak nyaman			1.43	Agak panas
0.7	1.05	Agak tidak nyaman			1.31	Agak panas
1	0.96	Agak tidak nyaman			1.23	Agak panas
1.3	0.90	Agak tidak nyaman			1.17	Agak panas

**E**

$T_a=31\text{ }^\circ\text{C}$ , HR=50%						
v (m/s)	Indeks DISC Sangkertadi		korelasi ASHRAE		PMV	
	skala	keterangan	skala	keterangan	skala	keterangan
0.1	1.65	tidak nyaman	1.68	panas	1.88	panas
0.2	1.55	tidak nyaman	1.68	panas	1.79	panas
0.4	1.44	tidak nyaman			1.68	panas
0.7	1.34	Agak tidak nyaman			1.59	panas
1	1.27	Agak tidak nyaman			1.52	panas
1.3	1.22	Agak tidak nyaman			1.47	Agak panas

**F**

$T_a=32\text{ }^\circ\text{C}$ , HR=50%						
v (m/s)	Indeks DISC Sangkertadi		korelasi ASHRAE		PMV	
	skala	keterangan	skala	keterangan	skala	keterangan
0.1	1.88	tidak nyaman	1.96	panas	2.10	panas
0.2	1.81	tidak nyaman	1.96	panas	2.03	panas
0.4	1.72	tidak nyaman			1.94	panas
0.7	1.64	tidak nyaman			1.87	panas
1	1.59	tidak nyaman			1.81	panas
1.3	1.55	tidak nyaman			1.78	panas

Lampiran 2. Grafik Zona Comfort DISC (korelasi Sangkertadi) dari hasil simulasi untuk tipe individu menggunakan pakaian tropis ringan dan kegiatan sedang), dengan Adu=1.7 m<sup>2</sup>.

