

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

M5-014 Pengaruh pergerakan angin, temperatur, kelembaban relatif dan radiasi lingkungan dan upaya menurunkan laju metabolisme pada tubuh manusia di daerah tropis

I Wayan Bandem Adnyana, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma dan I Gusti Ngurah Nitya Santhiarsa

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Bali, 80361
Tel. +62-361-703321, Fax. +62-361-701806, Email: wijaya.kusuma@me.unud.ac.id

ABSTRAK

Ada empat faktor lingkungan yang mempengaruhi kemampuan tubuh dalam menyalurkan panas, yakni: suhu udara, suhu pemukaan yang ada di sekitar, kelembaban udara dan kecepatan udara. Semakin besar energi yang dihasilkan manusia, maka metabolisme tubuh akan bekerja semakin kuat, sehingga pertukaran kalor haruslah seminimal mungkin agar tubuh mencapai kondisi nyaman dan sehat. Dalam beberapa dasawarsa, belum ada satupun penelitian yang menunjukkan korelasi antara lingkungan sekeliling dengan metabolisme tubuh, tingkat kenyamanan manusia serta kesehatan mereka. Referensi pun masih menggunakan pustaka asing dimana memiliki karakteristik yang berbeda dengan kondisi di Indonesia. Keadaan seperti itu terjadi karena kriteria kenyamanan termal manusia belum dijadikan suatu standar baku yang berpengaruh terhadap kesehatan. Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah, seberapa besar pengaruh dari gerakan aliran udara terhadap tingkat kenyamanan manusia Indonesia yang hidup di daerah tropis, sehingga mampu memberikan informasi yang detail tentang fenomena pergerakan udara di sekitarnya, dan memberikan suatu teknologi dalam perancangan dan pengaturan udara tersebut agar dapat meningkatkan tingkat kenyamanan penghuni. Penelitian tentang pengembangan aspek kenyamanan dan kesehatan manusia dilandasi oleh tiga dasar pemikiran yaitu: (1) normatif-filsafati, (2) empiris, (3) pragmatik. Kajian terhadap laju metabolisme manusia sebagai suatu produk ilmiah, keberadaannya sangatlah mendesak untuk dilakukan mengingat empat alasan prinsip berikut: kondisi udara semakin kotor akibat tingginya pencemaran yang terjadi; lahan yang tersedia sudah semakin berkurang; semakin tidak nyamannya penghuni akan berakibat pada penurunan daya tahan tubuh dan tingkat kesehatannya; pembangunan dan penataan lingkungan tropis yang ada saat ini perlu dirumuskan kembali seiring dengan situasi dan kondisi di Indonesia yang sudah jauh berbeda dimana sumber energi sangat terbatas.

Kata Kunci: Lingkungan, kenyamanan termal, penurunan konsumsi energi

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

1. Latar Belakang

Ada empat faktor lingkungan yang mempengaruhi kemampuan tubuh dalam menyalurkan panas, yakni: suhu udara, suhu pemukaan yang ada di sekitar, kelembaban udara dan kecepatan udara. Semakin besar energi yang dihasilkan manusia, maka metabolisme tubuh akan bekerja semakin kuat, sehingga pertukaran kalor haruslah seminimal mungkin agar tubuh mencapai kondisi nyaman dan sehat.

Dalam beberapa dasawarsa, belum ada satupun penelitian yang menunjukkan korelasi antara lingkungan sekeliling dengan metabolisme tubuh, tingkat kenyamanan manusia serta kesehatan mereka. Referensi yang ada masih menggunakan pustaka asing dimana memiliki karakteristik yang berbeda dengan kondisi di Indonesia dan lingkungan tropis lainnya. Keadaan seperti itu terjadi karena kriteria kenyamanan termal manusia belum dijadikan suatu standar baku yang berpengaruh terhadap kesehatan.

Penelitian ini karenanya diharapkan dapat digunakan sebagai suatu acuan awal dalam upaya untuk mengembangkan sistem perencanaan pengaturan udara lingkungan agar menghasilkan tingkat kenyamanan termal yang baik dengan merangkul beberapa komponen meliputi ekonomi, sosial, budaya, keamanan dan kenyamanan. Tahapan – tahapan penelitian dan pengembangan dilaksanakan menurut (1) aneka perumusan, konsepsi dan konvensi kenyamanan tubuh manusia, aspek psikologis, metabolisme tubuh dan aspek kesehatan dari manusia sebagai akibat adanya pengaruh temperatur, kecepatan angin dan kelembaban udara untuk daerah tropis, (2) metoda pelaksanaan dari mulai awal hingga akhir beserta petunjuk teknis dan teknologi yang dipergunakan serta upaya – upaya yang seharusnya dilakukan.

Tabel 1.1. Sistematika Penelitian

Telaah	Kaji Tindak
Need Assessment	Perumusan, konsepsi dan konvensi kenyamanan tubuh manusia,
Instructional Materials	Pengukuran laju metabolisme manusia dan aneka pengujian terhadap aspek kenyamanan termis, aspek psikologis, metabolisme tubuh dan aspek kesehatan manusia, termasuk tinjauan terhadap OTTV, PMV dan PPD untuk wilayah tropis sebagai akibat adanya pengaruh temperatur, kecepatan angin dan kelembaban udara, baik untuk daerah tropis
Construction, Implementation, Monitoring and Evaluation	Pedoman standar dan baku dan teknologi yang dipergunakan untuk menurunkan laju metabolisme tubuh manusia, meningkatkan kenyamanan termal dan meningkatkan kesehatan penduduk di wilayah tropis

2. Landasan Teori

2.1. Tinjauan Lingkungan

Pengaruh daripada angin dalam tata ruang telah dikenal semenjak dahulu, dimana arah rumah akan menghadap ke arah di mana angin berhembus. Berdasarkan kejadian di atas, maka sirkulasi udara adalah merupakan masalah penting dalam upaya untuk mengurangi pertukaran panas di dalam ruangan, seperti disajikan pada Gambar 2.1 [1].

Menurut filsafat Cina, tata ruang haruslah mampu mengharmoniskan hubungan antara pekerjaan manusia dengan pola – pola alam universal [1]. Aturan dalam tata ruang pun diselaraskan dengan jiwa dan daya yang ada dalam lingkungan tersebut yang dapat dikontrol dengan jalan mengatur aliran masuk dari udara, sehingga angin akan bertiup dari seperempat lingkar gerak matahari. Aspek selanjutnya

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

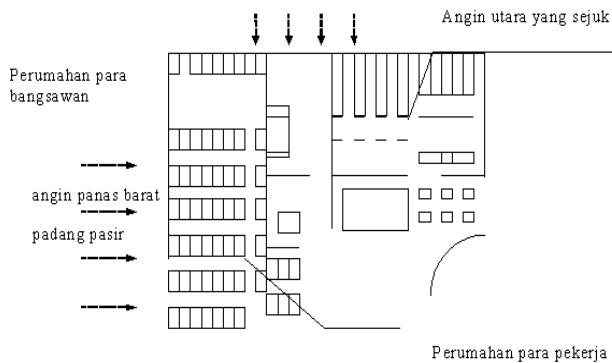
Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

adalah berupaya mengayomi gedung dari angin yang bergerak ke arah utara pada saat musim hujan tiba [1].

Beberapa parameter yang diperlukan adalah meliputi pemilihan areal, orientasi dari alur jalan dan lokasi dan topografi. Dengan prinsip ini, maka pengaturan terhadap lingkungan yang kurang bagus akan dapat diperbaiki lebih awal. Dengan memotong alur angin bukan saja akan menjadikan lebih baiknya sirkulasi udara, tetapi juga akan memotong alur penyebaran partikel kotor yang terjadi [1].

Hyderabad, sebuah kota di India, memiliki ciri karakteristik dimana poros- poros tinggi untuk udara dan kipas angin diproyeksikan. Tungku kotak ini memiliki panel – panel yang lebar untuk menangkap angin yang berhembus. Udara yang bersirkulasi selanjutnya disalurkan keluar [1]. Kenyamanan termis dan kesehatan masyarakat, keduanya berhubungan langsung dengan semua faktor di atas. Sangatlah jelas apabila lingkungan diharapkan memiliki tingkat kenyamanan yang memuaskan, maka pertimbangan yang setara juga harus diperhitungkan sebagai bagian yang tak terpisahkan dari suatu perancangan tata ruang.

Radiasi yang terjadi di lingkungan tropis adalah penuh variasi. Pengaruh konservasi yang memungkinkan kiranya dapat dievaluasi secara kritis dalam hubungannya dengan seluruh sistem termal yang ada. Konservasi radiasi termal ditelusuri dan digunakan untuk mengurangi temperatur *ambient*, mengurangi kelembaban dan juga meningkatkan/mengurangi kondisi udara luar yang ekstrem dengan mengatur distribusi temperatur serta memperhitungkan kecepatan aliran udara menuju pada suatu wilayah, agar radiasi dapat dibuat seminimum mungkin, karena intensitas panas matahari bergerak melalui permukaan.



Gambar 2.1. Sketsa tata letak di kota Kahan, Mesir, sekitar tahun 2000 SM

2.2. Tinjauan terhadap kriteria sehat dan nyaman

Tubuh manusia adalah suatu organisme yang dapat menyesuaikan diri dengan lingkungannya. Meskipun dalam jangka waktu yang panjang, tubuh mampu berfungsi di dalam kondisi lingkungan yang cukup ekstrim variasinya. Keanekaragaman suhu dan kelembaban udara luar seringkali berada pada keadaan yang di luar batas kemampuan adaptasi tubuh, karena itu diperlukan kondisi yang baik agar dapat dipertahankan lingkungan yang sehat dan nyaman tersebut.

Pada lingkungan yang wajar (normal), batas – batas keadaan yang dapat diterima oleh tubuh adalah: temperatur kerja berkisar antara 20^0 C hingga 26^0 C, serta kecepatan udara rata – rata yang mengalir adalah 0,25 m/detik. Radiasi yang terjadi pada suatu permukaan harus memperhitungkan faktor – faktor iklim. Semua faktor tersebut perlu diperhatikan dalam perancangan, sedemikian pula dengan dampak dan interaksinya perlu mendapat kajian yang teliti. Kondisi – kondisi yang perlu diperhatikan untuk

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

perancangan sistem kenyamanan termal manusia yang hidup di daerah tropis adalah temperatur dipertahankan antara 24^0C hingga 26^0C , dengan kelembaban relatif minimum adalah 30 persen pada musim hujan serta 60 persen dalam musim panas.

Infiltrasi udara yang terjadi akibat perubahan cuaca tergantung pada kondisi lingkungan, aktivitas manusia serta lokasi topologi, berkisar antara 20 hingga 50 persen. Untuk menguranginya, maka diperlukan teknologi yang baik, agar tekanan di sekitar manusia selalu bernilai positif bila dibandingkan tekanan udara di luar.

Secara tradisional, besarnya infiltrasi di sekitar pemukiman penduduk mengikuti formula berikut:

$$Q = A + B\Delta T^m + CV^n \quad (2.1)$$

dimana Q adalah laju infiltrasi udara yang dinyatakan dalam perubahan udara per jamnya; ΔT adalah perbedaan temperatur antara udara di pemukiman dan di lingkungan sekitar; V adalah kecepatan angin; A, B dan C adalah koefisien regresi dan m serta n adalah eksponensial empiris. Harga – harga dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa: $m = n = 1$, $A = 0.15$, $B = 0.005$ serta $C = 0.013$, namun V dinyatakan dalam mil per jam (mph) serta ΔT dinyatakan dalam ^0F . Yang perlu dicatat adalah, karena koefisien regresi menyiratkan karakteristik struktur bangunan serta juga tergantung pada sikap dan kebiasaan para penghuni.

Untuk menghitung besarnya infiltrasi udara, sebuah formula yang didapatkan berdasarkan hasil numerik dijabarkan dalam

$$Q = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} \quad (2.2)$$

dimana

$$Q_s = \tilde{L} F_s^* \sqrt{\Delta T} \quad (2.3)$$

$$Q_w = \tilde{L} F_w^* V \quad (2.4)$$

Q adalah infiltrasi udara total, Q_s adalah infiltrasi udara akibat perbedaan temperatur udara antara di luar kawasan pemukiman dan di dalam kawasan pemukiman penduduk, Q_w adalah infiltrasi udara akibat adanya angin, semuanya memiliki satuan m^3/s .

Besarnya infiltrasi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$F_s^* = \frac{1+R^+/2}{3} \left[1 - \frac{(X^+)^2}{(2-R^+)^2} \right]^{3/2} \sqrt{\frac{gH}{\Delta T}} \quad (2.5)$$

$$X^+ = \frac{1}{\tilde{L}} \quad (2.6)$$

$$R^+ = \frac{1}{\tilde{L}} \quad (2.7)$$

dimana ΔT = perbedaan temperatur antara di luar kawasan pemukiman dan di dalam kawasan pemukiman penduduk

H = tinggi pemantauan, m

H' = tinggi dari lokasi pengukuran angin, m

g = konstanta gravitas, 9.8 m/s^2

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

\tilde{L} = luas efektif dari infiltrasi di suatu kawasan, m^2

Infiltrasi udara luar ke dalam kawasan mempengaruhi suhu udara dan tingkat kelembaban di kawasan tersebut. Biasanya, dibedakan antara pengaruh yang menyangkut dampak suhu (*temperatuer effects*) seperti akibat panas sensibel dan dampak kelembaban seperti panas laten. Istilah ini berlaku juga pada beban – beban yang lainnya. Sebagai suatu contoh, beban yang dihantarkan (*transmition*) dan panas matahari (*solar*) adalah beban sensibel karena beban – beban tersebut hanya berpengaruh pada suhu, sementara beban – beban lainnya yang dihasilkan oleh manusia dapat terdiri dari beban sensibel dan laten.

Oleh karena infiltrasi tidak dapat dikontrol, maka dalam perancangan pemukiman yang nyaman, dampak infiltrasi ini harus dapat diminimalkan dengan cara mempertahankan tekanan di dalam kawasan pemukiman tersebut sedikit melebihi tekanan di udara luar. Laju aliran volumetrik dari udara infiltrasi agak sukar untuk ditunjukkan dengan ukuran yang tepat. Besaran tersebut akan bermacam – macam harganya dan tergantung dari kwalitas konstruksi, kecepatan dan arah angin, perbedaan suhu antara di dalam dan di luar kawasan pemukiman serta tekanan udara di dalam kawasan pemukiman tersebut.

Prosedur yang sering kali digunakan dalam penghitungan kenyamanan penghuni adalah dengan memperkirakan dan menghitung infiltrasi tersebut dalam jumlah pergantian udara perjamnya. Satu pergantian udara perjam adalah laju alir volumetrik yang jumlahnya sama dengan volume udara di kawasan tersebut. Jumlah pergantian udara perjam yang lebih kecil tanpa adanya pembangkitan tekanan di dalam kawasan dapat diperkirakan sebagai fungsi dari kecepatan angin dan perbedaan suhu. Untuk kawasan pemukiman, infiltrasi diperhitungkan karena dapat mengakibatkan timbulnya efek kavitasi udara. Koefisien perpindahan panas h_c yang melalui celah – celah ini akan berangsur – angsur berkurang, sehingga secara langsung akan mengurangi pertukaran panas antara permukaan ke udara luar. Perpindahan panas secara konveksi dari permukaan ke arah bawah kurang dipengaruhi oleh kavitasi ini, tetapi dipengaruhi oleh proses konduksi. Sedangkan perpindahan panas secara konveksi ke arah atas sangat dipengaruhi oleh kavitasi ini. Pada radiasi panas secara horisontal maka akan didapatkan harga optimum dimana tahanan termal udara menjadi sangat tinggi.

Koefisien perpindahan panas secara konveksi h_c dalam suatu kavitas pada temperatur selain $50^{\circ}F$ dinyatakan sebagai :

$$h_c = \left[1 - (\overline{T_m} - 50) f_c \right] h_{c,50^{\circ}F} \text{ (Btu / h.ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F)} \quad (2.8)$$

dimana $f_c = -0,001$ jika $(h_c l)_{50} > 0,3$
= 0,00035 jika $0,2 < (h_c l)_{50} \leq 0,3$
= 0,0017 jika $(h_c l)_{50} \leq 0,2$

$\overline{T_m}$ = temperatur rata – rata dari kavitas $^{\circ}F$

Sedangkan koefisien perpindahan panas secara radiasi h_r dinyatakan dalam persamaan berikut yang dapat dipergunakan dalam hubungannya dengan koefisien perpindahan panas secara konveksi h_c

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

$$h_r = 0,00686 \left[\frac{460 + \bar{T}_m}{100} \right]^3 \varepsilon \quad (Btu / h.ft^2.^0F) \quad (2.9)$$

harga yang didapat dari satuan ($Btu / h.ft^2.^0F$) harus dikalikan 5,6785 untuk mendapatkan harga dalam W/m^2K .

dimana

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.10)$$

serta ε_1 dan ε_2 adalah emisivitas dari permukaan yang dipisahkan oleh kavitas udara. Radiasi memang peranan yang penting dalam perpindahan panas di Indonesia karena menerima panas matahari yang sama sepanjang tahun. Secara umum, koefisien perpindahan panas dapat dibagi menjadi dua, yakni di luar kawasan serta di dalam kawasan pemukiman

Koefisien perpindahan panas permukaan di luar kawasan pemukiman. Secara umum, koefisien perpindahan panas di luar kawasan pemukiman dinyatakan sebagai:

$$h_o = aV^2 + bV + c \quad (W/m^2K) \quad (2.11)$$

dimana V adalah kecepatan angin dalam mil per jam (mph) serta a, b , dan c adalah konstanta empiris yang tergantung pada jenis permukaan kawasan pemukiman.

Persamaan di atas adalah gabungan antara koefisien perpindahan panas secara radiasi dan konveksi yang kurang mendukung untuk menyatakan temperatur permukaan yang realistik. Koefisien perpindahan panas secara konveksi ini sangatlah tergantung pada arah angin dan permukaan suatu subyek (apakah di depan ataukah di belakang) serta dinyatakan sebagai:

$$h_{oc} = 18,63V_c^{0,605} \quad (W/m^2K) \quad (2.12)$$

dimana bagi permukaan yang berhadapan langsung dengan arah angin

$$\begin{aligned} V_c &= 0,25 V && \text{jika } V > 2 \text{ m/s} \\ &= 0,50 V && \text{jika } V < 2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

serta $V_c = 0,3 + 0,05 V$ bagi permukaan yang bertolak belakang dengan arah angin.

Perpindahan panas di dalam kawasan pemukiman sangatlah tergantung pada emisivitas permukaan. Pada udara yang tenang, hal ini dinyatakan sebagai:

$$h_i = h_c + 5.72\varepsilon \quad (W/m^2K) \quad (2.13)$$

Harga h_i pada suatu udara yang bergerak adalah sekitar 11,36 (W/m^2K). Sedangkan harga h_c tergantung pada arah aliran panas.

$h_c = 4,04$ untuk aliran ke atas

= 3,87 untuk aliran dengan sudut 45^0 ke atas

= 3,08 untuk aliran horisontal

= 2,28 untuk aliran dengan sudut 45^0 ke bawah

= 0,920 untuk aliran ke bawah

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Tubuh manusia senantiasa menyesuaikan terhadap lingkungan di sekitarnya, melalui suatu perubahan secara fisiologis (memperbesar atau mengurangi laju aliran darah ke kulit). Pelepasan kalor ke lingkungan terjadi secara konveksi, evaporasi dan radiasi.

Evaporasi adalah pelepasan panas dari tubuh melalui proses penguapan air pada kulit. Penguapan yang terjadi ada dua macam, yaitu dengan penguapan dan membasahi kulit. Pelepasan panas metabolisme tubuh sekitar 30% dikeluarkan melalui evaporasi. Laju perpindahan panas evaporasi dirumuskan dengan persamaan [2]:

$$Q = h_{fg} \times A \times C_{diff} \times (P_s - P_a) \text{ (watt)} \quad (2.14)$$

dimana :

h_{fg} = Panas laten air (J/kg)

A = Luasan permukaan tubuh (m^2)

C_{diff} = Koefesien difusi ($kg/Pa.det.m^2$)

P_s = Tekanan uap dari air pada temperatur kulit (Pa)

P_a = Tekanan uap dari uap air di udara sekitar (Pa)

Konveksi adalah suatu perubahan energi akibat adanya pergerakan dari udara. Tergantung pada temperatur permukaan tubuh manusia yang besarnya $31^0 C$ sampai $33^0 C$, temperatur udara, luas permukaan tubuh sekitar $1,5$ sampai $2,5 m^2$, kecepatan udara di sekitar tubuh manusia. Laju perpindahan panas konveksi tubuh dinyatakan sebagai:

$$Q = h_c \times A \times (T_s - T_a) \text{ (watt)} \quad (2.15)$$

dimana :

h_c = Koefesien koveksi permukaan tubuh ($watt/m^{2,0} K$)

= $13,5 V^{0,6}$

V = Kecepatan udara (m/det)

T_s = Temperatur permukaan tubuh ($^0 C$)

T_a = Temperatur udara ($^0 C$)

Radiasi adalah satu proses pertukaran panas secara gelombang elektromagnetik. Luasan permukaan radiasi dari tubuh manusia, lebih kecil dari luas permukaan secara konveksi sekitar 70% dari permukaan tubuh. Emisivitas permukaan tubuh sangat mendekati benda hitam, harganya sekitar 1,0. Konduksi adalah suatu proses pelepasan panas akibat adanya kontak secara fisik. Harganya sangat kecil, sehingga dapat diabaikan.

Selain faktor di atas, jenis kegiatan juga mempengaruhi kenyamanan seseorang. Tubuh manusia memiliki temperatur yang relatif konstan, yakni sebesar $37^0 C$. Beberapa kondisi yang ekstrim dapat menyebabkan kerusakan pada sistem tubuh. Hal ini dapat diterangkan sebagai berikut: Temperatur tubuh yang paling rendah adalah $15,6^0 C$. Pada temperatur tubuh sekitar $22,78^0 C$ rasa dingin masih terasakan. Sekitar temperatur tubuh $26,67^0 C$, latihan diperlukan untuk mengurangi rasa dingin. Pada temperatur tubuh sekitar $29,4^0 C$, daya untuk berbicara sedikit berkurang. Temperatur tubuh sekitar $32,2^0 C$ memerlukan sedikit latihan untuk menyeimbangkan. Temperatur tubuh sekitar $35^0 C$ akan menjadikan tubuh menggigil dan mengeluarkan bau menyengat. Temperatur tubuh sekitar $37^0 C$ adalah temperatur idealnya. Temperatur tubuh sekitar $37,78^0 C$ akan menjadikan tubuh terus berkeringat. Temperatur tubuh

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

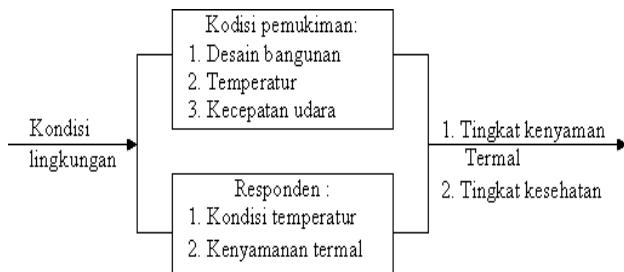
Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

sekitar $43,33^{\circ}\text{C}$ akan menyebabkan kerusakan pada otak. Kondisi ini adalah kondisi *over heating*, sehingga harus dijaga agar jangan sampai tubuh memiliki suhu di atas 40°C .

Temperatur permukaan kulit manusia sewajarnya sekitar $33,33^{\circ}\text{C}$ demi untuk mencapai kondisi nyaman. Tubuh manusia akan melepaskan kalor secara radiasi panas ke lingkungan sekitarnya yang lebih dingin, ataupun akan menerima panas dari lingkungan sekitarnya yang lebih hangat. Oleh sebab itu, temperatur permukaan di dalam kawasan pemukiman memegang peranan yang sangat penting agar kriteria nyaman dapat tercapai.

3. Metoda Penelitian

Metoda pendekatan masalah yang dilakukan adalah dengan menggunakan desain diskriptif, dimana perencanaan dan pelaksanaan penelitian yang dilakukan berupa pengambilan data lapangan dan pengolahan data secara matematis. Desain penelitian diskriptif yang dilakukan menggunakan pembanding semu berupa parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Data awal yang diambil adalah berupa kondisi aktual di luar kawasan pemukiman / bangunan, temperatur dan kecepatan udara untuk mendapatkan suatu perhitungan tingkat kenyamanan termal manusia. Karena penelitian ini berhubungan dengan kondisi yang dirasakan oleh tubuh manusia di dalam bangunan yang diteliti, maka diambil data berupa respon manusia yang berada di dalam kawasan pemukiman sehingga diketahui tingkat kenyamanan termalnya.



Gambar 3.1 Rancangan penelitian awal

3.1. Hipotesa

Kajian komparatif terhadap laju metabolisme pada tubuh manusia di daerah tropis sebagai akibat adanya pergerakan angin, temperatur, kelembaban relatif dan radiasi merupakan satu pola pikir maju yang memiliki keunggulan – keunggulan fungsi dan teknis yang sesuai dengan aturan – aturan masa kini maupun masa yang akan datang, serta dapat menjadi baku mutu pembangunan dan pengembangan serta penataan kawasan di Indonesia.

3.2. Metodologi Penulisan

Metodologi penulisan di sini lebih banyak bertolak pada kajian lapangan, laboratorium dan penelitian fisik. Semua informasi disusun berdasarkan pada penelitian fisik dan kepustakaan, sehingga diharapkan analisis yang dilakukan akan menghasilkan keakuratan data dengan tingkat signifikansi yang tinggi. Laboratorium pengujian dilakukan di Laboratorium Fisiologi Fakultas Kedokteran Universitas Udayana.

3.3. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada berbagai kawasan di Denpasar. Hal ini penting untuk mengetahui apakah pengembangan dan penataan kota - kota serta perbaikan pemukiman mampu memberikan sumbangan yang sangat berarti baik pada peningkatan kenyamanan termal masyarakat, konservasi kawasan dan lingkungan, sehingga semua komponen tersebut dapat dipertahankan dan dilestarikan keberadaannya.

3.4. Metoda Penentuan Data

Metoda yang digunakan adalah dengan cara mengkaji secara langsung seluruh aspek kehidupan yang disampaikan di atas sehingga akan didapatkan korelasi dengan taraf signifikansi yang tinggi. Semua data – data ini dijadikan sebagai suatu pedoman berpijak dalam upaya untuk menyampaikan parameter – parameter baku standar dari pembangunan dan pengembangan di kawasan tropis.

3.6. Metoda Analisis

Secara keseluruhan data yang sifatnya kualitatif maupun kuantitatif serta representatif untuk kawasan Bali akan dianalisis dengan metoda analisa statistik, agar didapatkan data yang bersifat kualitatif dan dapat dipertanggung jawabkan serta hasilnya mampu menjadi suatu baku mutu standar lokal, nasional dan internasional. Waktu untuk pengambilan data temperatur dan kecepatan udara pada beberapa stasiun pengukuran dilakukan mulai jam 06.00 sampai 22.00 yang diambil tiap jamnya.

4. Data dan Pembahasan

Perhitungan beban pendinginan untuk ruangan dalam suatu bangunan ditentukan berdasarkan pada beban pendinginan maksimum yang diukur saat beban puncaknya (*peak*). Besarnya panas yang hilang atau diperoleh pada selubung bangunan dipengaruhi oleh jenis bahan yang digunakan, faktor geometris, sumber-sumber panas dari dalam dan faktor kodisi lingkungan.

Data klimatologi (lokasi Denpasar) :

Lintang : $08^{\circ} 45'$ lintang selatan

Bujur : $115^{\circ} 15'$ bujur timur

⊕ Kondisi udara luar (data meteorologi dan geofisika):

Temperatur bola kering maksimum = 31° C

Temperatur bola kering minimum = 20° C

Kelembaban relatif = 65 – 95 %

Kecepatan angin = 10 – 30 km/jam

Arah angin = timur

Langit = cerah berawan

⊕ Kondisi yang diinginkan didalam bangunan :

- Temperatur bola kering = $25,35^{\circ}$ C = $77,63^{\circ}$ F

- Temperatur bola basah = $19,27^{\circ}$ C = $67,50^{\circ}$ F

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

- Kelembaban relatif = 60 %
- Entalpi = 33 Btu/lb
- *Moisture* = 0.0120 lb/lb udara kering
- ⊕ Kondisi aktual didalam bangunan (pukul 14.00):
 - Temperatur bola kering = $33,20^{\circ}\text{C} = 91,76^{\circ}\text{F}$
 - Temperatur bola basah = $26,00^{\circ}\text{C} = 78,80^{\circ}\text{F}$
 - Kelembaban relatif = 57,5 %
 - Entalpi = 43 Btu/lb
 - *Moisture* = 0.0185 lb/lb udara kering
- ⊕ Kondisi aktual diluar bangunan (pukul 14.00):
 - Temperatur bola kering = $29,40^{\circ}\text{C} = 84,92^{\circ}\text{F}$
 - Temperatur bola basah = $22,60^{\circ}\text{C} = 72,68^{\circ}\text{F}$
 - Kelembaban relatif = 57,5 %
 - Entalpi = 37 Btu/lb
 - *Moisture* = 0.0148 lb/lb udara kering

4.1 Perhitungan Beban Pendinginan

Hambatan termal dan koefisien perpindahan panas di selubung bangunan:

Pada atap

$$\begin{aligned} R_{\text{tot}} &= r1 + r2 + r3 + r4 + r5 \\ &= 1,405 (\text{hr}^0 \text{Fft}^2 / \text{Btu}) \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas pada atap (U)

$$U = 1/R_{\text{tot}} = 0,71 (\text{Btu} / \text{hr}^0 \text{Fft}^2)$$

Pada lapisan lantai

$$\begin{aligned} R_{\text{tot}} &= r1 + r2 + r3 + r4 + r5 \\ &= 14,335 (\text{hr}^0 \text{Fft}^2 / \text{Btu}) \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas pada lantai (U)

$$U = 1/R_{\text{tot}} = 0,069 (\text{Btu} / \text{hr}^0 \text{Fft}^2)$$

Dinding sebelah utara, barat, timur dan selatan

$$\begin{aligned} R_{\text{tot}} &= r1 + r2 + r3 + r4 + r5 \\ &= 14,19 (\text{hr}^0 \text{Fft}^2 / \text{Btu}) \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas pada dinding utara (U)

$$U = 1/R_{\text{tot}} = 0,07 (\text{Btu} / \text{hr}^0 \text{Fft}^2)$$

Beban pendinginan aktual:

Temperatur diluar bangunan pada kondisi puncak pukul 14.00 adalah (T_1) = $29,40^{\circ}\text{C} = 84,92^{\circ}\text{F}$ dan temperatur aktual didalam bangunan (T_0) = $33,20^{\circ}\text{C} = 91,76^{\circ}\text{F}$, sehingga perbedaan temperatur sebesar (ΔT) = $91,76^{\circ} - 84,92^{\circ} = 6,84^{\circ}\text{F}$ Beban pendinginan selanjutnya dinyatakan dalam Tabel 4.1.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Tabel 4.1. Beban Pendinginan

No.	Lokasi peninjauan	Beban pendinginan Aktual (Q), Btu/hr	Beban pendinginan Perancangan (Q), Btu/hr
1	Dinding barat	1195,67	- 1274,34
2	Langit-langit	835303,14	35653,18
3	Lantai	37618,77	- 40093,69
4	Dinding utara	2405,77	- 2564,05
5	Dinding timur	1315,24	- 1401,77
6	Dinding selatan	2587,19	- 2757,39
7	Infiltrasi 1 sensibel	14694,62	- 15661,37
8	Infiltrasi 1 laten	5,00	- 3,79
9	Infiltrasi 2 sensibel	10294,57	439,40
10	Infiltrasi 2 Laten	3,07	0,22
11	Ventilasi Sensibel	1477,44	- 1574,64
12	Ventilasi laten	0,50	- 0,38
13	Manusia Sensibel	3520,00	- 3520,00
14	Manusia laten	3760,00	- 3760,00
15	Peralatan	203658,30	- 203658,30
16	Lampu JUMLAH TOTAL	10057,20 1127896,48 (Btu/hr) 30552,62 (watt)	- 10057,20 - 250234,12 (Btu/hr) - 73336,11 (watt)

Dari hasil perhitungan, beban pendinginan aktual yang terjadi pada bangunan adalah sebesar 1127896,48 *Btu/hr* atau sekitar 330552,52 *watt*. Sedangkan beban pendinginan perancangan sebesar - 250234,12 *Btu/hr* atau sekitar -73338,11 *watt* (tanda negatif menunjukkan aliran panas berlawanan dengan arah yang diasumsikan)

4.2. Perhitungan Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal dari suatu bangunan terpenuhi jika tubuh manusia dapat melepas panas metabolisme tubuh kelingkungan sebagai akibat dari kegiatan yang dilakukan. Ada empat faktor yang mempengaruhi tubuh dalam menyalurkan panas tubuhnya adalah temperatur udara, temperatur permukaan-permukaan yang ada disekitar, kelembaban dan kecepatan udara.

Panas metabolisme pada kondisi normal adalah sama dengan panas yang dikeluarkan tubuh secara konveksi (C), radiasi (R), dan penguapan (*evaporation, E*). Jika panas metabolisme tubuh tidak seimbang dengan panas yang dilepas tubuh, maka terjadi simpangan panas dalam tubuh. Untuk mencapai kesetimbangan panas pada tubuh diperlukan kondisi lingkungan yang sesuai sehingga tercapai kenyamanan termal.

Panas yang dilepas tubuh secara konveksi (C).

$$C = h_c A (T_s - T_a)$$

Dimana :

$$A = \text{Luasan permukaan tubuh} = 2 \text{ m}^2$$

$$T_s = \text{Temperatur permukaan kulit} = 32^\circ\text{C}$$

$$T_a = \text{Temperatur udara rerata} = 31,08^\circ\text{C}$$

$$V = \text{Kecepatan udara rerata di bangunan} = 0,145 \text{ m/det}$$

$$h_c = \text{Koefesien perpindahan panas}, \\ = 13,5 V^{0,6}$$

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

$$\begin{aligned} &= 13,5 (0,145)^{0,6} \\ &= 6,95 \text{ watt/m}^2 {}^0 \text{K} \\ C &= 4,24 \times 2 \times (0,92) = 7,80 \text{ watt} \end{aligned}$$

Panas yang dilepas tubuh secara radiasi (R).

$$R = \sigma A_1 (T_i^4 - T_2^4)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{Konst. Stefan-Boltzmann} = 5,669 \times 10^{-8} \text{ watt/m}^2 {}^0 \text{K} \\ A_1 &= \text{Luasan tubuh yang meradiasikan panas} = 1,4 \text{ m}^2 \\ T_1 &= \text{Temperatur permukaan tubuh} = 32^\circ \text{C} = 305^\circ \text{K} \\ T_2 &= \text{Temperatur rerata udara di bangunan} = 304,08^\circ \text{K} \\ R &= (5,669 \times 10^{-8}) \times 1,4 \times (305^4 - 304,08^4) = 8,25 \text{ watt} \end{aligned}$$

Panas yang dihasilkan tubuh secara evaporasi (E).

$$E = h_{fg} A C_{\text{diff}} (P_s - P_a)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} h_{fg} &= \text{Panas laten air} = 2,43 \times 10^6 \text{ J/kg} \\ A &= \text{Luasan permukaan tubuh} = 2 \text{ m}^2 \\ C_{\text{diff}} &= \text{Koefesien difusi} = 1,2 \times 10^{-9} \text{ kg/Pa det m}^2 \\ P_s &= \text{Tekanan uap dari air pada suhu kulit} = 4750 \text{ Pa} \\ P_a &= \text{Tekanan uap dari uap air di udara} = 1700 \text{ Pa} \\ E &= (2,43 \times 10^6) \times 2 \times (1,2 \times 10^{-9}) \times (4750 - 1700) \\ &= 17,78 \text{ watt} \end{aligned}$$

Jadi panas metabolisme yang dilepas tubuh (M) adalah jumlah panas tubuh yang dilepas secara konveksi (C), radiasi (R) dan evaporasi (E).

$$\begin{aligned} M &= C + R + E \\ &= 7,80 + 8,25 + 17,78 \\ &= 33,83 \text{ watt} \end{aligned}$$

Dari perhitungan pelepasan panas metabolisme tubuh yang dilepas aktual pada bangunan bawah tanah Ramayana Bali Mall sebesar 33,83 watt. Dengan cara yang sama panas metabolisme tubuh yang dilepas pada kondisi temperatur perancangan sebesar 162,57 watt.

4.3. Tingkat Kenyamanan Termal pada Bangunan

Untuk mengetahui tingkat kenyamanan termal dan kondisi temperatur yang dirasakan, maka dilakukan dengan memberikan formulir pertanyaan terhadap 120 responden yang sehat dari pukul 10.00 sampai 21.00 dengan pengambilan responden 10 orang tiap jamnya. Dari 120 responden didapat hasil seperti Tabel 4.2.a Kondisi Temperatur dan Tabel 4.2.b Kenyamanan Termal

Jumlah responden	= 120 orang.
Sampel ekslusi	= 4 orang.
Sampel inklusi	= 116 Orang.
Pria	= 54 orang.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Wanita = 59 orang.

Table 4.2.a Kondisi Temperatur

No	Kriteria	Jumlah	prosentase
-3	Dingin	1 orang	0,86 %
-2	Sejuk	5 orang	4,31 %
-1	Agak sejuk	4 orang	3,45 %
0	Netral	6 orang	5,17%
1	Agak hangat	13 orang	11,31 %
2	Hangat	41 orang	35,34 %
3	Panas	46 orang	39,65 %

Dari data yang diperoleh ternyata kurang dari 10% responden yang menyatakan kondisi agak sejuk, namun lebih dari 10% responden yang menyatakan agak hangat. Kurang dari 10% responden yang menyatakan agak nyaman, namun lebih dari 10% responden yang menyatakan agak tidak nyaman. Ini berarti, Bangunan di Denpasar, secara rerata memiliki kriteria yang panas serta tidak nyaman

4.2.b Kenyamanan Termal

No	Kriteria	Jumlah	Prosentase
-3	Sangat nyaman	2 orang	1,27 %
-2	Nyaman	8 orang	6,90 %
-1	Agak nyaman	7 orang	6,03 %
0	Netral	13 orang	11,21 %
1	Agak tidak nyaman	26 orang	22,41 %
2	Tidak nyaman	31 orang	26,72 %
3	Sangat tidak nyaman	29 orang	25,00%

4.4. Diskusi

Harga *Overall Thermal Temperature Value* (OTTV) untuk wilayah Denpasar adalah sebesar 54 watt. Beban pendinginan aktual bangunan adalah 330552,52 watt bila dibagi luasan permukaan bangunan 16266,16 m² didapat *Overall Thermal Temperature Value* (OTTV) bangunan sebesar 20,32 watt/m². Harga yang didapat menunjukkan bahwa secara mekanis sebenarnya bangunan di kota Denpasar masih memiliki kondisi yang cukup nyaman.

Memperhatikan data yang diperoleh dari responden, sebagian besar menyatakan bahwa bangunan memiliki kondisi yang panas dan kurang nyaman. Kondisi tersebut dikarenakan jarak antar bangunan sangat dekat sehingga menimbulkan efek peningkatan temperatur dan tingkat kenyamanan yang rendah.

Panas metabolisme manusia pada kondisi normal adalah sebesar 120 sampai 440 watt. Dari hasil perhitungan panas metabolisme tubuh yang dilepas baik secara konveksi, radiasi dan penguapan (*evaporasi*) aktual pada bangunan di kota Denpasar adalah sebesar 33,83 watt. Perbedaan panas metabolisme tubuh dan panas yang dilepas menyebabkan terjadi simpangan panas dalam tubuh sehingga tubuh merasa keadaan yang panas. Untuk mendapatkan kenyamanan yang lebih baik perlu diperhatikan adalah sistem pendistribusian dan sistem pembuangan udara dimana udara panas dan kebasahan yang terjebak di dalam ruangan dapat dialirkan keluar dengan cepat sehingga tidak menimbulkan efek rumah kaca dimana panas yang dihasilkan terperangkap dalam selubung bangunan. Satu hal yang perlu dicatat adalah bahwa beban pendinginan yang dihitung di atas semata-mata ditinjau pada kondisi tunak (bukan fungsi waktu). Penelitian lebih intensif tentang hal ini harus dikaji kembali, sehingga didapatkan hasil besarnya fluktuasi energi yang diperlukan untuk menghasilkan kondisi yang nyaman.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

5. Simpulan

Bila ditinjau dari harga *Overall Thermal Temperature Value* (OTTV), maka secara mekanis bangunan di kota Denpasar cukup nyaman untuk aktivitas manusia. Akan tetapi dari data responden diketahui bahwa ruangan di dalam gedung memiliki kondisi yang panas dan kenyamanan yang rendah. Kondisi panas yang dirasakan disebabkan oleh simpangan panas dalam tubuh dimana panas tubuh yang mampu dilepas di dalam bangunan lebih kecil dari panas metabolisme tubuh. Ditinjau dari tingkat kenyamanan, maka beberapa gedung di kota Denpasar memiliki tingkat kenyamanan yang rendah, hal ini disebabkan karena jarak antar bangunan yang sangat dekat sehingga partikel dispersi terjebak di antaranya. Karenanya diperlukan kajian kembali terhadap sistem pendistribusian udara di dalam ruangan (*exhaust system*), agar dicapai kenyamanan termal yang baik.

KEPUSTAKAAN

- [1] Holman, J. P, Alih Bahasa Sasjfi E, *Perpindahan Kalor*, Edisi Keenam, Erlangga, Jakarta, 1991.
- [2] Incropera F.P, Dewit D.P. *Intruduction to Heat Transfer*. Third Edition. School of Mechanical Engineering Purdue University, 1996.
- [3] Potter P. A., Alih Bahasa James Y. P. 1995. *Pengkajian Kesehatan*. edisi ketiga. Penerbit Buku Kedokteran EGC. Jakarta, 1995.