

Kajian Termis pada Beberapa Material Dinding untuk Ruang Bawah Tanah

I G B Wijaya Kusuma¹⁾

Abstrak

Karena terbatasnya lahan yang tersedia di kodya Denpasar, pembangunan ruang bawah tanah khususnya pusat perbelanjaan dan perkantoran dewasa ini telah semakin meluas. Banyak bangunan komersial yang kini telah memiliki ruang bawah tanah, namun karena perencanaan pengkondisian udaranya yang kurang baik, menyebabkan kurang optimalnya penggunaan ruang bawah tanah tersebut untuk aktivitas dan kegiatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan besarnya pertukaran panas pada dinding bangunan di bawah tanah. Pertukaran panas tersebut selanjutnya dipergunakan untuk mengetahui tingkat kenyamanan termis dari penghuni dengan jalan menghitung laju metabolisme tubuh manusia. Material selubung bangunan yang baik adalah material yang mampu mempertukarkan kalor sekecil – kecilnya serta menghasilkan laju metabolisme tubuh yang serendah – rendahnya. Dalam penelitian ini akan diuji beberapa kombinasi material dinding bangunan agar mampu memenuhi kriteria tersebut. Kajian terhadap kombinasi material ini untuk mencari susunan terbaik dari material penyusun selubung bangunan. Ditemukan bahwa kombinasi semen dan pasir, batu bata dan batu palimanan memberikan pertukaran panas terkecil dan kenyamanan termis terbaik bagi metabolisme tubuh.

Kata-kata kunci : Material dinding, ruang bawah tanah, kenyamanan termis.

Abstract

Due to the land limitation in Denpasar area, development of underground especially for shopping malls and offices was growth rapidly. Most commercial buildings have underground area, but the failure on the design of air conditioning system caused the un-optimize of underground area for activity and human living. This research aims to compare the heat transfer rate on the wall of underground buildings. The heat transfer rate is used to understand the thermal comfort level of occupants by taking into account the human metabolic rate. The best material of buildings envelope must be able to transfer the smallest heat between the room to its surrounding and produce the smallest metabolic rate of occupants. This research compares several kinds of material in order to find those criteria. It found that combination of cement, brick and palimanan stone have been able to produce the smallest heat transfer rate and metabolic rate of occupants.

Keywords : Wall material, underground area, thermal comfort.

1. Pendahuluan

Karena terbatasnya lahan yang tersedia di kodya Denpasar, pembangunan ruang bawah tanah khususnya pusat perbelanjaan dan perkantoran dewasa ini telah semakin meluas. Banyak bangunan komersial yang kini telah memiliki ruang bawah tanah, namun karena perencanaan pengkondisian udaranya yang kurang baik, menyebabkan kurang optimalnya penggunaan ruang bawah tanah tersebut untuk aktivitas dan kegiatan manusia.

Beberapa ruang bawah tanah yang ada di kodya

Denpasar sering dirasakan kurang nyaman karena tubuh manusia menerima beban panas ataupun beban dingin yang agak berlebihan. Keadaan seperti itu terjadi karena kriteria kenyamanan termis belum terpenuhi dan sebagai akibatnya maka tubuh merespon secara berlebihan. Untuk mendapat kenyamanan termis dari sebuah bangunan baik di atas maupun di bawah tanah maka diperlukan upaya baru dalam sistem pengkondisian udaranya. Pengkondisian udara yang dimaksud adalah perlakuan terhadap udara untuk mengatur suhu, kelembaban, dan pendistribusian udara agar mencapai kondisi yang nyaman untuk aktivitas hunian di dalamnya.

1) Fakultas Teknik, Universitas Udayana.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 11 Maret 2003 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 7 April 2003 – 2 Juni 2003. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 2 Juni 2003 hingga 19 Juni 2003.

Dalam ruang bawah tanah dimana dinding-dindingnya berbatasan langsung dengan tanah, maka sifat udara di dalam ruangan berbeda dengan bangunan di atas tanah pada umumnya, karena pada bangunan di atas tanah terjadi kontak langsung dengan matahari dan udara luar, sedangkan di bawah tanah akan terus menerus berinteraksi dengan temperatur tanah yang relatif lebih panas daripada udara luar.

Pengkondisian udara dirancang agar mampu menghasilkan kondisi udara yang nyaman. Hal ini dapat diperoleh dengan memperhatikan tiga parameter yakni temperatur, kecepatan udara dan kelembaban di dalam ruangan. Pengaturan kondisi di dalam ruangan dapat dilakukan baik secara aktif maupun pasif. Yang dimaksud dengan pasif adalah suatu usaha untuk menghasilkan kriteria sehat dan nyaman tanpa perlu menggunakan energi tambahan. Sedangkan secara aktif dilakukan dengan menggunakan energi tambahan seperti halnya mesin - mesin pendingin ataupun pemanas. Walaupun pengaturan kondisi ruangan biasanya dilakukan dengan sistem penghangatan aktif, namun perancangan penghangatan, ventilasi dan sistem pengkondisian udara (*heating ventilation and air conditioning, HVAC*) harus dimulai dengan metoda pasif. Metoda ini dapat dilakukan dengan jalan mengetahui sifat-sifat termal dari selubung bangunan (*building envelope*) yang menentukan kapasitas dan energi kerja yang dibutuhkan.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan besarnya pertukaran panas pada dinding bangunan di bawah tanah. Pertukaran panas tersebut selanjutnya dipergunakan untuk mengetahui tingkat kenyamanan termis dari penghuni dengan jalan menghitung laju metabolisme tubuh manusia. Material selubung bangunan yang baik adalah material yang mampu mempertukarkan kalor sekecil - kecilnya serta menghasilkan laju metabolisme tubuh yang serendah - rendahnya. Dalam penelitian ini akan diuji beberapa kombinasi material dinding bangunan agar mampu memenuhi kriteria tersebut. Kajian terhadap kombinasi material ini untuk mencari susunan terbaik dari material penyusun selubung bangunan. Penelitian awal ini hanya mencakup perhitungan beban pendingin berdasarkan data hasil pengukuran, penggunaan material dinding bangunan dengan menggunakan batako, batu bata, batu palimanan, pasir dan kerikil dan perhitungan proses metabolisme agar menghasilkan kenyamanan pada tubuh.

2. Deskripsi Fisik dan Model

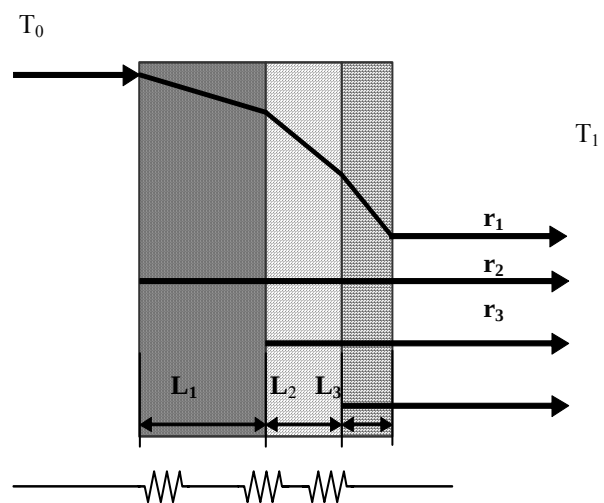
Tubuh manusia adalah suatu organisme yang dapat menyesuaikan diri dengan lingkungannya. Dalam jangka waktu yang panjang, tubuh masih mampu

berfungsi di dalam kondisi lingkungan yang cukup ekstrim variasinya. Keanekaragaman suhu dan kelembaban udara luar seringkali berada pada keadaan diluar batas kemampuan adaptasi tubuh, sehingga diperlukan kondisi yang tepat di dalam ruangan agar tubuh dapat mempertahankan lingkungan yang nyaman tersebut.

Ada empat faktor lingkungan yang mempengaruhi kemampuan tubuh dalam menyalurkan kalor yakni: suhu udara, suhu permukaan sekitar, kelembaban dan kecepatan udara. Jumlah serta tingkat kegiatan penghuni sangat dipengaruhi oleh keempat faktor tersebut. Dalam perancangan suatu sistem pengkondisian udara, pengaturan keempat faktor ini memegang peranan yang penting. Pada lingkungan yang normal, batas-batas keadaan yang dapat diterima oleh tubuh adalah: temperatur kerja berkisar antara 20 hingga 26°C serta kecepatan udara rata - rata yang mengalir di dalam ruangan adalah 0,25 m/detik.

Perpindahan panas melalui suatu permukaan bangunan tergantung pada material bangunan yang digunakan, adanya sumber-sumber panas dari dalam dan faktor - faktor iklim dari luar. Pada perancangan sistem pengkondisian udara, semua faktor tersebut perlu diperhatikan sedemikian pula dengan dampak dan interaksinya perlu mendapat kajian yang teliti. Secara umum perpindahan panas yang terjadi dapat dibedakan menjadi tiga cara, yaitu: konduksi, konveksi dan radiasi.

Susunan hambatan termal pada dinding menggambarkan cara penentuan harga perpindahan panas dari suatu penampang dinding. Luasan permukaan yang digunakan dalam perhitungan transmisi termal disesuaikan dengan permukaan dinding yang akan dihitung.



Gambar 1. Susunan hambatan termal pada dinding

Pertukaran panas yang diterima dan hilang melalui transmisi termal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q = U A (T_0 - T_1) \quad (1.a)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{tot}^*} \quad (1.b)$$

dimana:

$$U A = 1/R_{tot}^* \text{ (Watt/K)}$$

$$R_{tot}^* = \text{Hambatan termal total} = r_1 + r_2 + r_3 \text{ (K/Watt)}$$

$$U = \text{Koefisien perpindahan panas total} \text{ (Watt/m}^2\text{.K)}$$

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

$$T_0 = \text{Temperatur permukaan luar (K)}$$

$$T_1 = \text{Temperatur permukaan dalam (K)}$$

2.1 Pelepasan panas oleh tubuh manusia

Panas yang dilepaskan oleh tubuh dalam mengubah energi yang terdapat dalam makanan menjadi kalor atau kerja disebut dengan proses metabolisme. Proses pelepasan panas ini berlangsung secara terus-menerus, sehingga membutuhkan suatu keseimbangan termal. Energi kalor yang dihasilkan oleh metabolisme sama dengan kalor yang dikeluarkan oleh tubuh secara konveksi, radiasi dan evaporasi (penguapan). Persamaan keseimbangan kalor metabolisme dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_m = Q_c + Q_r + Q_e \quad (2)$$

dimana:

$$Q_m = \text{Perpindahan panas metabolisme} \text{ (Watt)}$$

$$Q_c = \text{Perpindahan panas tubuh secara konveksi} \text{ (Watt)}$$

$$Q_r = \text{Perpindahan panas tubuh secara radiasi} \text{ (Watt)}$$

$$Q_e = \text{Perpindahan panas tubuh secara evaporasi} \text{ (Watt)}$$

Laju pelepasan kalor (*metabolic rate*) yang dilakukan oleh tubuh pada kondisi idealnya berkisar diantara 166 sampai dengan 210 Watt. Tubuh manusia senantiasa menyesuaikan terhadap lingkungan di sekitarnya, melalui suatu perubahan secara fisiologis. Pelepasan panas ke lingkungan terjadi secara konveksi, evaporasi dan radiasi.

- **Evaporasi:** Pelepasan panas dari tubuh melalui proses penguapan air pada kulit. Pelepasan panas metabolisme tubuh sekitar 30% dikeluarkan melalui melalui evaporasi.

Laju perpindahan panas evaporasi dirumuskan dengan persamaan:

$$Q = h_{fg} \times A \times C_{diff} \times (P_s - P_a) \quad (3)$$

dimana:

$$h_{fg} = \text{Panas laten air (J/Kg)}$$

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

$$C_{diff} = \text{Koefisien difusi (Kg/Pa.det.m}^2\text{)}$$

$$P_s = \text{Tekanan uap dari air pada temperatur kulit (Pa)}$$

$$P_a = \text{Tekanan uap dari uap air di udara sekitar (Pa)}$$

- **Konveksi:** Suatu perubahan energi akibat adanya pergerakan dari udara yang mengkonveksikan kalor ke atau dari tubuh. Tergantung pada temperatur permukaan tubuh manusia yang besarnya 31 sampai 33⁰C, temperatur udara, luas permukaan tubuh berkisar antara 1,5 sampai 2,5 m² dan kecepatan udara di sekitar tubuh manusia (Stoecker, 1982).

Laju perpindahan panas konveksi tubuh dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$Q = h_c \times A \times (T_s - T_a) \quad (4)$$

dimana:

$$h_c = \text{Koefisien koveksi permukaan tubuh} \text{ (Watt/m}^2\text{.K)}$$

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

$$v = \text{Kecepatan udara (m/det)}$$

$$T_s = \text{Temperatur permukaan tubuh} \text{ (}^0\text{C)}$$

$$T_a = \text{Temperatur udara (}^0\text{C)}$$

- **Radiasi:** Suatu proses pertukaran panas secara gelombang elektromagnetik. Luasan permukaan radiasi dari tubuh manusia lebih kecil dari luas permukaan secara konveksi yakni sekitar 70 % dari permukaan tubuh. Emisivitas permukaan tubuh sangat mendekati benda hitam. Laju perpindahan panas radiasi tubuh dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$Q_r = \sigma \times A_r \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

dimana:

$$\sigma = \text{Konstanta Stefan-Boltzmann} = 5,669 \times 10^{-8} \text{ Watt/m}^2\text{.K}^4$$

$$A_r = \text{Luas permukaan tubuh yang}$$

meradiasikan panas

$$= 70 \% \times A$$

T_1 = Temperatur permukaan tubuh

T_2 = Temperatur udara rata - rata dalam ruangan

- **Konduksi:** Suatu proses pelepasan panas akibat adanya kontak secara fisik. Harganya sangat kecil, sehingga dapat diabaikan.

2.2 Alat dan bahan penelitian

Untuk mendapatkan data beban pendinginan di dalam ruangan maka digunakan alat berikut:

1. Assman's Aspiration Psychrometer, untuk mengukur temperatur bola basah dan bola kering.
2. Kata Thermometer, untuk mengukur kecepatan udara di dalam ruangan.
3. Blower, untuk menggerakkan udara dalam ruang bawah tanah.

Untuk mendapatkan data konduktivitas termal dari material digunakan alat berikut:

1. Termokopel, untuk mengetahui perbedaan temperatur dari material.
2. *Electrical power*, untuk membangkitkan energi panas.

Bahan-bahan penelitian:

1. Batu bata, batako, batu palimanan, semen, pasir dan kerikil
2. Semua bahan tersebut disusun sedemikian rupa serta kemudian dicari konduktivitas termalnya.

2.3 Mencari harga konduktivitas termal dari material yang belum diketahui

1. Material dinding bangunan yang belum diketahui konduktivitas termalnya dibuat dalam bentuk dadu dengan ukuran 1 cm x 1 cm x 1 cm sebanyak tiga buah sampel.
2. Dibangkitkan energi panas dengan menggunakan electrical power kepada salah satu sisi material yang akan diuji. Setelah diukur perbedaan temperatur antara kedua sisi material yang diberikan energi panas kemudian dihitung harga konduktivitas termalnya.
3. Material yang telah diuji dan diketahui nilai konduktivitas termalnya digunakan sebagai material dinding dengan ukuran model 1 m x 1 m x 1 m. disusun seperti Gambar 2.

4. Percobaan I

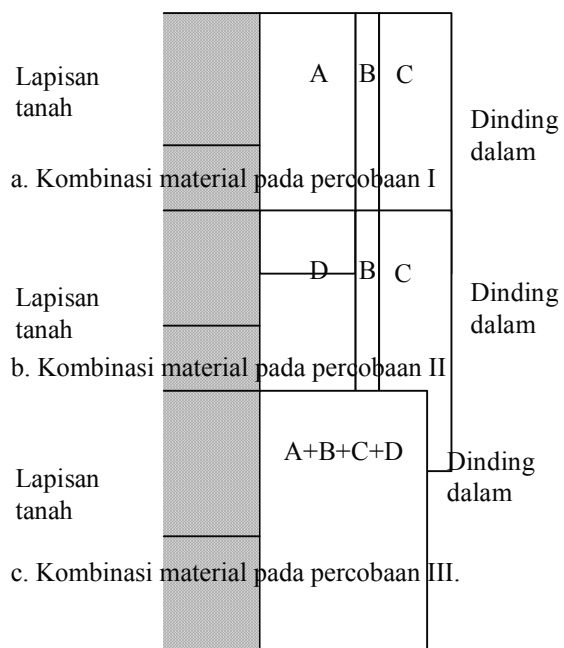
Model ruang bawah tanah untuk percobaan I menggunakan material dinding bangunan berupa: batu batako, campuran pasir semen dan batu palimanan. Untuk bahan lantai dan langit-langit menggunakan campuran pasir, kerikil dan semen (campuran beton). Dinding model pada percobaan I disajikan pada Gambar 2.a.

5. Percobaan II

Model ruang bawah tanah untuk percobaan II menggunakan material dinding bangunan berupa: batu bata, campuran pasir semen dan batu palimanan. Untuk bahan lantai dan langit-langit menggunakan campuran pasir, kerikil dan semen (campuran beton). Dinding model pada percobaan II, seperti pada Gambar 2.b.

6. Percobaan III

Model ruang bawah tanah untuk percobaan III menggunakan material dinding bangunan berupa material campuran dari batu batako, pasir, kerikil, semen dan batu palimanan. Untuk bahan lantai dan langit-langit menggunakan campuran pasir, kerikil dan semen (campuran beton). Dinding model pada percobaan III, disajikan pada Gambar 2.c.



Keterangan:

- A = Batu batako.
- B = Campuran semen dan pasir.
- C = Batu palimanan.
- D = Batu bata.

Gambar 2. Susunan material dari model dinding di ruang bawah tanah

Data yang diambil adalah berupa kondisi aktual di dalam bangunan, seperti desain bangunan, temperatur dan kecepatan udara untuk mendapatkan suatu perhitungan beban pendinginan dalam bangunan. Karena penelitian ini berhubungan dengan kondisi yang dirasakan oleh tubuh manusia di dalam bangunan yang diteliti, maka dihitung juga besarnya pertukaran panas yang dapat dilakukan oleh dinding bangunan, dengan jalan mengembangkan material baru untuk keperluan tersebut. Besarnya kalor yang dipertukarkan di dalam dinding diukur dengan menggunakan prinsip pertukaran panas secara konduksi satu-dimensi, dengan membuat suatu model ruang bawah tanah untuk masing-masing kombinasi bahan bangunan yang ditentukan.

1. Pada masing-masing model didistribusikan temperatur dan kecepatan udara ideal.
2. Pengambilan data untuk temperatur bola kering, temperatur bola basah dan kecepatan udara dilakukan di masing-masing dinding, lantai dan langit-langit dari model.
3. Banyaknya pengukuran dilakukan 10 kali dari pukul 09.00 sampai 18.00 dengan data pengukuran diambil setiap jamnya.

3. Data dan Pembahasan

3.1 Hambatan termal material

Material yang belum diketahui konduktivitas termalnya dalam penelitian ini, seperti batako, batu palimanan dan material campuran (batu batako, batu bata, batu palimanan, pasir, kerikil dan semen) dibuat dalam bentuk kubus dengan ukuran 2 cm x 2 cm x 2 cm sebanyak 3 buah sampel. Dari hasil pengujian maka didapat konduktivitas dan hambatan termal material yang digunakan seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hambatan termal dari beberapa material

No	Nama material	Konduktivitas termal (k) (Watt/m.K)	Hambatan termal (r) (m ² .K / Watt)
1	Batu bata setebal 90 mm	0,719	0,1251
2	Batu palimanan setebal 20 mm	0,554	0,0361
3	Batu Batako setebal 90 mm	2,083	0,0432
4	Material campuran setebal 110 mm	0,601	0,1830
5	Lapisan tanah	0,612	2,2012
6	Lapisan udara luar	-	0,0430
7	Lapisan udara dalam	-	0,1075
8	Plesteran, butiran pasir dan semen 5 mm	0.909	0,0055
9	Beton, butiran pasir dan kerikil 100 mm	6,684	0,0149

3.2 Beban pendinginan pada dinding

Perhitungan beban pendinginan untuk ruangan dalam suatu bangunan ditentukan berdasarkan pada beban pendinginan maksimum yang diukur pada saat beban puncaknya (*peak*). Besarnya kalor yang hilang atau diperoleh pada selubung bangunan dipengaruhi oleh jenis material yang digunakan, faktor geometris, sumber-sumber panas dari dalam dan faktor kondisi lingkungan. Alur perhitungan disajikan dalam contoh berikut:

1. Parameter dalam model ruang bawah tanah (Tabel 1)
 - a. Luas dinding, lantai dan langit-langit = 1m²
 - b. Lapisan udara luar (r₁)
 - c. Lapisan tanah (r₂)
 - d. Batu batako setebal 90 mm (r₃)
 - e. Plesteran, pasir dan semen setebal 5 mm (r₄)
 - f. Batu palimanan setebal 20 mm (r₅)
 - g. Lapisan udara dalam (r₆)
 - h. Lantai beton, pasir kerikil dan semen 100 mm (r₇)
 - i. Langit-langit, pasir kerikil dan semen 100 mm (r₈)
2. Hambatan termal dan koefisien perpindahan panas pada selubung model ruang bawah tanah

- a. Hambatan termal total pada dinding [Arismunandar dan Saito, 1991]

$$R_{\text{tot}} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6$$

$$= 2,4365 \text{ m}^2.\text{K} / \text{Watt}$$

Koefisien perpindahan panas pada dinding [Incropera and Dewit, 1996]

$$U_{\text{din}} = 1/R_{\text{tot}}$$

$$= 0,4104 \text{ Watt/m}^2.\text{K}$$

- b. Hambatan termal total pada Lantai [Arismunandar dan Saito, 1991]

$$R_{\text{tot}} = r_1 + r_6 + r_7$$

$$= 2,3236 \text{ m}^2.\text{K} / \text{Watt}$$

Koefisien perpindahan panas pada lantai [Incropera and Dewit, 1996]

$$U_{\text{lan}} = 1/R_{\text{tot}}$$

$$= 0,4304 \text{ Watt/m}^2.\text{K}$$

- c. Hambatan termal total pada langit-langit/penutup [Arismunandar dan Saito, 1991]

$$\begin{aligned} R_{\text{tot}} &= r_5 + r_6 + r_8 \\ &= 0,1654 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{Watt} \end{aligned}$$

Koefisien perpindahan panas pada langit-langit/penutup [Incropera and Dewit, 1996]

$$\begin{aligned} U_{\text{pen}} &= 1/R_{\text{tot}} \\ &= 6,0459 \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

3. Beban pendinginan aktual

Perhitungan beban pendinginan aktual dalam model ruang bawah tanah ditentukan berdasarkan beban pendinginan maksimum pada kondisi beban temperatur puncak pada masing-masing selubung bangunan.

- a. Beban pendinginan melalui dinding A [Incropera and Dewit, 1996]

$$\begin{aligned} T_0 &= 33,70 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_1 &= 28,10 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 5,60 \text{ K} \\ Q_{\text{din A}} &= U_{\text{din}} \times A \times \Delta T \\ &= 2,2984 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- b. Beban pendinginan melalui dinding B [Incropera and Dewit, 1996]

$$\begin{aligned} T_0 &= 33,70 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_1 &= 28,20 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 5,50 \text{ K} \\ Q_{\text{din B}} &= U_{\text{din}} \times A \times \Delta T \\ &= 2,2572 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- c. Beban pendinginan melalui dinding C [Incropera and Dewit, 1996]

$$\begin{aligned} T_0 &= 33,70 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_1 &= 28,10 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 5,60 \text{ K} \\ Q_{\text{din C}} &= U_{\text{din}} \times A \times \Delta T \\ &= 2,2982 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- d. Beban pendinginan melalui dinding D [Incropera and Dewit, 1996]

$$\begin{aligned} T_0 &= 33,70 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_1 &= 28,00 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 5,70 \text{ K} \\ Q_{\text{din D}} &= U_{\text{din}} \times A \times \Delta T \\ &= 2,3393 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- e. Beban pendinginan melalui lantai

$$\begin{aligned} T_0 &= 33,70 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_1 &= 28,20 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 5,50 \text{ K} \\ Q_{\text{lan}} &= U_{\text{lan}} \times A \times \Delta T \\ &= 2,3672 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- f. Beban pendinginan melalui langit-langit/penutup

$$\begin{aligned} T_0 &= 33,70 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_1 &= 28,90 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 4,80 \text{ K} \\ Q_{\text{pen}} &= U_{\text{pen}} \times A \times \Delta T \\ &= 29,0203 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- g. Beban pendinginan akibat infiltrasi [Stoecker dan Jones, 1987]

Infiltrasi lewat ventilasi blower adalah 10,0 CFM/ft²

Luasan infiltrasi ventilasi blower
= 0,1 m x 0,1 m = 0.033 ft²

T₀ = Temperatur udara di luar ruangan
= 33,70 °C

T₁ = Temperatur udara di dalam ruangan
= 28,90 °C

W₀ = Kelembaban udara di luar ruangan =
0,0184 lb/lb udara kering

W₁ = Kelembaban udara di dalam ruangan =
0,0182 lb/lb udara kering

- Beban pendinginan infiltrasi sensibel

$$Q = 0,9025 \text{ Watt}$$

- Beban pendinginan infiltrasi laten

$$Q = 0,000138 \text{ Watt}$$

Dengan cara yang sama seperti percobaan I, perhitungan beban pendinginan untuk percobaan II dan III disajikan pada Tabel 2.

3.3 Kenyamanan termal pada tubuh

Analisa kenyamanan termal dalam model ruang bawah tanah berdasarkan faktor yang mempengaruhi tubuh manusia dalam menyalurkan panas tubuhnya, antara lain temperatur udara di dalam model ruang bawah tanah, temperatur permukaan-permukaan yang ada disekitarnya, kelembaban dan kecepatan udara.

Dalam ruang bawah tanah, perpindahan panas yang dihasilkan oleh metabolisme, sama dengan panas yang dikeluarkan tubuh secara konveksi, radiasi dan evaporasi/penguapan. Jika laju metabolisme tidak seimbang

Tabel 2. Beban pendinginan aktual pada model ruang bawah tanah

No	Titik pengukuran	Beban pendinginan aktual percobaan I (Watt)	Beban pendinginan aktual percobaan II (Watt)	Beban pendinginan aktual percobaan III (Watt)
1	Dinding A	2,2984	1,9005	2,4707
2	Dinding B	2,2572	1,7024	2,3512
3	Dinding C	2,2982	1,7024	2,3113
4	Dinding D	2,3393	1,9399	2,4309
5	Lantai	2,3672	1,9368	2,4963
6	Langit-langit	29,0203	24,7882	32,6479
7	Infiltrasi sensibel	0,9025	0,7708	1,0153
8	Infiltrasi laten	0,000138	0,000135	0,000179
	Total beban pendinginan	41,4832	34,7411	45,7238

dengan semua panas yang dilepaskan tubuh, maka akan terjadi simpangan panas dalam tubuh. Untuk mencapai keseimbangan panas dalam tubuh diperlukan kondisi lingkungan yang sesuai (metabolisme = 166 – 210 Watt) sehingga tercapai kenyamanan termal manusia. Alur perhitungan perpindahan panas metabolisme tubuh disajikan dalam contoh berikut:

1. Metabolisme secara konveksi (Q_c)

$$Q_c = h_c \times A \times (T_s - T_a)$$

Dimana:

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

$$V = \text{Kecepatan udara rata-rata dalam ruangan} = 1,12 \text{ m/det}$$

$$\begin{aligned} h_c &= \text{Koefisien perpindahan panas} \\ &= 13,5 V^{0,6} \\ &= 14,4499 \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} T_a &= \text{Temperatur udara rata-rata dalam ruangan} = 27,16 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Sehingga:

$$Q_c = 139,8750 \text{ Watt}$$

2. Metabolisme secara radiasi (Q_r) [Potter, 1995]

$$Q_r = \sigma \times A_r \times (T_1^4 - T_2^4)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{Konstanta Stefan-Boltzmann} \\ &= 5,669 \times 10^{-8} \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_r &= \text{Luas permukaan tubuh yang meradiasikan panas} \\ &= 70 \% \times A = 1,4 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$T_1 = \text{Temperatur permukaan tubuh} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} T_2 &= \text{Temperatur udara rata-rata dalam ruangan} = 27,16 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Sehingga:

$$Q_r = 42,5685 \text{ Watt}$$

3. Metabolisme secara evaporasi atau penguapan (Q_e) [Potter, 1995]

$$Q_e = h_{fg} \times A \times C_{diff} \times (P_s - P_a)$$

Dimana:

$$h_{fg} = \text{Panas laten air} = 2,430 \text{ J/Kg}$$

$$A = \text{Luas permukaan kulit} = 2 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} C_{diff} &= \text{Koefisien difusi} \\ &= 1,2 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{det} \cdot \text{Pa} \end{aligned}$$

$$P_s = \text{Tekanan uap dari air pada suhu kulit} = 4.750 \text{ Pa}$$

$$P_a = \text{Tekanan uap dari air di udara dalam ruangan} = 1.700 \text{ Pa}$$

Sehingga:

$$Q_e = 17,7876 \text{ Watt}$$

Jadi perpindahan panas metabolisme yang terjadi dalam model ruang bawah tanah pada percobaan I (Q_m) adalah:

$$\begin{aligned} Q_m &= Q_c + Q_r + Q_e \\ &= 200,2311 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama seperti perhitungan perpindahan panas metabolisme pada percobaan I, dimana harga $V = 1,43 \text{ m/det}$ dan $T_a = T_2 = 27,69 \text{ }^\circ\text{C} = 300,69 \text{ K}$, maka perpindahan panas metabolisme pada percobaan II dan III disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perpindahan panas metabolisme tubuh

No	Perhitungan Perpindahan Panas	Percobaan I (Watt)	Percobaan II (Watt)	Percobaan III (Watt)
1	Konveksi (Q_c)	139,8750	135,2061	144,2255
2	Radiasi (Q_r)	42,5685	44,7976	38,0062
3	Evaporasi (Q_e)	17,7876	17,7876	17,7876
	Metabolisme (Q_m)	200,2311	197,7915	200,0193

4. Pembahasan

Harga *Overall Thermal Temperature Value* (OTTV) untuk wilayah Indonesia umumnya sekitar 45 Watt/m² untuk kondisi yang nyaman. Dari hasil perhitungan beban pendinginan aktual maka didapatkan bahwa percobaan II menghasilkan OTTV yang paling kecil yakni sebesar 34,7411 Watt. Apabila OTTV ini dibagi dengan luas permukaan bangunan yang sebesar 1 m², maka diperoleh harga OTTV sebesar 34,7411 Watt/m². Dari ketiga model percobaan tersebut, model ruang bawah tanah pada percobaan II secara mekanis memiliki kondisi yang lebih nyaman dan tidak lagi memerlukan mesin pendingin untuk kenyamanan termis di dalam bangunan karena nilai OTTV nya di bawah harga ambang batas. Menilik pada persamaan (1) dan (2) dimana nilai Q berbeda untuk setiap percobaan serta faktor ini sangat dipengaruhi oleh tahanan termal material dinding, maka dipastikan bahwa material dinding model percobaan II memberikan tahanan termal yang paling besar. Dengan demikian, pertukaran panas yang dilakukan oleh dinding model percobaan II menjadi sangat rendah serta akan menghasilkan distribusi temperatur dengan lebih stabil dan seragam karena semua panas ditahan oleh material bangunan. Hal ini secara langsung akan menyebabkan rendahnya temperatur di permukaan dinding.

Perpidahan panas metabolisme ideal yang diharapkan untuk kondisi yang nyaman di dalam ruang bawah tanah adalah sebesar 166 – 210 Watt. Dari hasil perhitungan panas metabolisme aktual pada model ruang bawah tanah, didapatkan bahwa percobaan II menghasilkan laju metabolisme tubuh yang paling kecil, yaitu sebesar 197,79 Watt. Dari hasil perhitungan tersebut maka percobaan II mempunyai kondisi yang memenuhi persyaratan untuk tercapainya kenyamanan termal dalam ruang bawah tanah.

Dari dua analisa ini, maka kombinasi material dinding pada percobaan II menghasilkan OTTV yang paling rendah dan dengan laju metabolisme tubuh yang paling minimum.

Model percobaan II menghasilkan suhu permukaan dinding yang paling minimum, serta hal ini merupakan faktor lingkungan yang sangat berpengaruh pada

kemampuan tubuh dalam menyalurkan kalor. Hal ini disebabkan karena suhu permukaan dinding yang rendah akan menyebabkan berkurangnya proses pengkondisian uap air yang secara langsung akan menurunkan kecepatan udara yang mengalir di permukaan tubuh. Karena tekanan dan kecepatan udara berkurang, maka secara langsung akan mengurangi proses radiasi. Secara keseluruhan, penurunan suhu permukaan dinding akan mengurangi laju pertukaran panas dan metabolisme tubuh, yang berdampak pada tercapainya kondisi nyaman bagi penghuni.

5. Kesimpulan

1. Ditinjau dari harga OTTV, secara mekanis material dinding pada percobaan II mempunyai kondisi yang lebih nyaman serta menghasilkan distribusi temperatur yang lebih konstan pada permukaan dinding dibandingkan dengan model lainnya.
2. Laju metabolisme pada model percobaan II lebih memenuhi kriteria nyaman bagi manusia, karena temperatur permukaan dinding yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan model yang lain.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap kombinasi material dinding yang memungkinkan untuk meningkatkan kenyamanan termal manusia di ruang bawah tanah, serta memiliki kekuatan material yang baik untuk menahan beban.

Daftar Pustaka

- Arismunandar, W dan Saito, 1991, “*Penyegaran Udara*”, Penerbit Erlangga, Edisi Keempat, Jakarta.
- Incropera, F.P and Dewit, D.P., 1996, “*Introduction to Heat Transfer*”, School of Mechanical Engineering Purdue University, Third Edition.
- Potter, P.A., Alih Bahasa James Y.P., 1995, “*Pengkajian Kesehatan*”, Penerbit Buku Kedokteran EGC, Edisi Ketiga, Jakarta.
- Stoecker, W.F and Jones, J.W., Alih Bahasa Supratman Hara, 1987, “*Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*”, Penerbit Erlangga, Edisi Kedua, Jakarta.