



Hak cipta dan penggunaan kembali:

Lisensi ini mengizinkan setiap orang untuk mengubah, memperbaiki, dan membuat ciptaan turunan bukan untuk kepentingan komersial, selama anda mencantumkan nama penulis dan melisensikan ciptaan turunan dengan syarat yang serupa dengan ciptaan asli.

Copyright and reuse:

This license lets you remix, tweak, and build upon work non-commercially, as long as you credit the origin creator and license it on your new creations under the identical terms.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Dasar Teori

2.1.1. Kenyamanan Termal

Untuk merancang kenyamanan termal, empat kondisi lingkungan berikut yang menyebabkan hilangnya panas dari tubuh. Keempat kondisi tersebut yaitu^[3]:

a. Suhu Udara ($^{\circ}\text{C}$)

Suhu udara akan menentukan tingkat hilangnya panas ke udara sekitar, sebagian besar disebabkan oleh konveksi. Ketika suhu di atas 37°C aliran panas akan berbalik dan tubuh akan mendapatkan panas dari udara. Rentang kenyamanan bagi sebagian besar (80%) orang mencakup dari 20°C pada musim panas dan 25°C pada musim dingin.

b. Kelembaban Relatif (RH)

Penguapan dari kelembaban kulit sebagian besar merupakan fungsi dari kelembaban udara. Udara kering dapat dengan mudah menyerap kelembaban dari kulit dan penguapan yang cepat akan menghasilkan pendinginan tubuh secara efektif. Di sisi lain, ketika kelembaban relatif mencapai 100%. Udara menahan semua uap air dan pendinginan dengan penguapan berhenti.

Untuk kenyamanan, RH harus di atas 20% sepanjang tahun, dibawah 60% di musim panas dan dibawah 80% di musim dingin. Batasan-batasan ini hanya berupa aproksimasi. Pada tingkat kelembaban yang sangat rendah akan ada keluhan mengenai keringnya hidung, mulut, mata, kulit dan peningkatan penyakit pernapasan. Kelembaban yang tinggi tidak hanya mengurangi tingkat pendinginan dalam penguapan tetapi juga mendorong pembentukan keringat, yang menyebabkan ketidaknyamanan. Selain itu, pertumbuhan jamur menjadi masalah serius ketika kelembaban tinggi.

c. Gerakan Udara

Gerakan udara biasa disebut dengan angin. Angin mempengaruhi tingkat *heat-loss* oleh konveksi dan penguapan. Sebagai akibatnya, kecepatan angin memiliki efek yang nyata terhadap hilangnya panas. Di musim panas, hal ini adalah keuntungan sedangkan di musim dingin adalah kerugian. Rentan kenyamanan kecepatan angin dari 0,1 sampai 0,3 m/s.

d. *Mean Radiant Temperature* (MRT)

MRT adalah suhu radiasi rata-rata, biasanya disebabkan oleh radiasi sinar matahari. Ketika MRT berbeda jauh dari suhu udara, efeknya perlu dipertimbangkan. Sebagai contoh, ketika kita duduk dekat jendela ketika cuaca cerah di musim dingin, kita akan merasa

hangat, walaupun suhu udara dalam keadaan nyaman. Hal ini disebabkan oleh radiasi matahari yang meningkatkan MRT ke level yang tinggi untuk kenyamanan. Setelah matahari terbenam, kita akan segera merasa dingin walaupun suhu udara tetap. Secara umum, MRT harus di jaga agar mendekati suhu udara lingkungan. Pada bangunan yang terinsulasi dengan baik seperti *facade* dan *shading*, MRT biasanya mendekati suhu udara dalam bangunan. Sejak MRT tidak selalu dekat dengan suhu udara dalam bangunan dan masih memiliki dampak besar terhadap kenyamanan, maka konsep *operative temperature* dikembangkan. *Operative temperature* adalah gabungan dari suhu udara dengan MRT.

Kenyamanan termal terjadi ketika suhu tubuh dipertahankan, kelembaban kulit rendah dan upaya tubuh dalam pengaturan suhu diminimalkan. Kombinasi tertentu dari suhu udara, RH, gerakan udara, dan MRT akan menghasilkan kondisi yang sebagian besar orang menyebutnya sebagai kenyamanan termal. Kombinasi dari suhu udara dan RH yang nyaman dituangkan dalam *Psychrometric Chart*, kombinasi ini menentukan area yang dikenal sebagai zona nyaman. Karena *Psychrometric Chart* berhubungan hanya dengan suhu udara dan RH, maka 2 faktor lainnya konstan. MRT diasumsikan mendekati suhu udara dan gerakan udara diasumsikan rendah. Batasan-batasan yang diberikan oleh zona nyaman tidak mutlak, karena kenyamanan termal bervariasi bergantung pada budaya, waktu,

kesehatan, tingkat kegemukkan, penggunaan pakaian, dan yang terpenting adalah aktivitas fisik. Dari keempat aspek kenyamanan termal di atas, aspek suhu yang akan menjadi fokus utama dalam tugas akhir ini. Aspek suhu adalah aspek yang dapat diamati dan langsung dirasakan oleh pengguna ruangan. Aspek suhu akan dihitung dengan menggunakan perhitungan beban pendinginan.

2.1.2. Beban Pendinginan

Beban pendinginan dihasilkan dari proses perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi melalui selubung bangunan, sumber internal dan komponen sistem. Komponen bangunan yang dapat memengaruhi beban pendinginan meliputi^[5]:

- a. Eksternal : dinding, atap, jendela, *skylight*, pintu, partisi, *ceiling* dan lantai
- b. Internal : lampu, penghuni, perlengkapan dan peralatan
- c. Infiltrasi : kebocoran udara, dan perpindahan kelembaban
- d. Sistem : Udara luar ruangan, *duct leakage*, *reheat*, *fan* dan *pump energy*, dan *energy recovery*

Variabel yang memengaruhi perhitungan beban pendinginan sangat banyak dan saling terkait. Komponen beban pendinginan bervariasi dalam nilai, arah dan selama periode 24 jam. Karena perubahan dalam komponen ini tidak seragam maka komponen harus dianalisis untuk menetapkan beban

pendinginan dari suatu bangunan atau zona. Metode untuk menghitung beban pendinginan dapat diuraikan sebagai berikut:

2.1.2.1. *Transfer Function Method (TFM)*^[6]

Metode TFM memungkinkan untuk memperkirakan beban pendinginan untuk ruang yang dikondisikan berdasarkan *hour-by-hour* dan memperkirakan kondisi yang dihasilkan dalam ruangan untuk berbagai jenis sistem, strategi control dan jadwal operasi. Metode TFM sangat sesuai untuk digunakan dengan komputer. Metode ini menggunakan *Sol-Air Temperature* (persamaan 2.26) dan suhu udara dalam ruangan diasumsikan konstan. Selain itu, koefisien perpindahan panas pada permukaan indoor dan outdoor diasumsikan konstan.

Perolehan panas melalui dinding dan atap sebagai berikut:

$$q_{e,\theta} = A \left[\sum_{n=0} b_n (t_{e,\theta-n\delta}) - \sum_{n=1} d_n \left[(q_{e,\theta-n\delta}) / A \right] - t_{rc} - \sum_{n=0} c_n \right] \quad (2.1)$$

dimana,

$q_{e,\theta}$ = perolehan panas melalui dinding dan atap pada waktu θ

A = luas permukaan dinding atau atap

θ = waktu

δ = selang waktu

n = indeks penjumlahan

$t_{e,\theta-n\delta}$ = sol-air temperature pada $\theta-n\delta$

t_{rc} = nilai konstan suhu ruang dalam

b_n, c_n, d_n = koefisien konduksi fungsi transfer

Perolehan panas melalui kaca sebagai berikut:

$$q = UA (t_o - t_i) \quad (2.2)$$

$$q = A (SC) (SHGF) \quad (2.3)$$

dimana,

U = koefisien perpindahan panas kaca

SC = *Shading Coefficient*

$SHGF$ = *Solar Heat Gain Factor* oleh orientasi, lintang utara, jam dan bulan

t_o = suhu udara luar ruang

t_i = suhu udara dalam ruang

A = luas permukaan kaca

Perolehan panas melalui partisi, *ceiling*, lantai sebagai berikut:

$$q = UA (t_b - t_i) \quad (2.4)$$

dimana,

U = koefisien perpindahan panas material

A = luas permukaan kaca

t_b = suhu udara pada ruang yang berdekatan

t_i = suhu udara pada ruang yang dikondisikan

Perolehan panas melalui penghuni sebagai berikut:

$$Q_{\text{sensible}} = N (\text{SHG}) \quad (2.5)$$

$$Q_{\text{latent}} = N (\text{LHG}) \quad (2.6)$$

dimana,

N = jumlah penghuni dalam ruang

SHG = *Sensible Heat Gain*

LHG = *Latent Heat Gain*

Perolehan panas melalui lampu sebagai berikut:

$$q_{el} = W * F_{ul} * F_{sa} \quad (2.7)$$

dimana,

W = daya yang digunakan

F_{ul} = *Lighting Use Factor*

F_{sa} = *Special Allowance Factor*

Perolehan panas melalui peralatan sebagai berikut:

$$q_{\text{sensible}} = q_{\text{input}} * F_U * F_L \quad (2.8)$$

dimana,

q_{input} = laju energi untuk penggunaan alat

F_U = *Usage Factor*

F_R = *Radiation Factor*

Perolehan panas melalui ventilasi dan infiltrasi udara sebagai berikut:

$$q_{sensible} = 1,23 * Q * (t_o - t_i) \quad (2.9)$$

$$q_{latent} = 3010 * Q * (W_o - W_i) \quad (2.10)$$

$$q_{total} = 1,2 (h_o - h_i) \quad (2.11)$$

dimana,

Q = aliran udara pada ventilasi

t_o, t_i = suhu udara luar, dalam ruangan

W_o, W_i = ratio kelembaban luar, dalam ruangan

h_o, h_i = entalpi luar, dalam ruangan

Beban pendinginan

Sensible

$$Q_{\theta} = Q_{rf} + Q_{sc} \quad (2.12)$$

$$Q_{rf} = \sum_{i=1} (v_0 q_{\theta, i} + v_1 q_{\theta, i-\delta} + v_2 q_{\theta, i-2\delta} + \dots) - (w_1 q_{\theta-\delta} + w_2 q_{\theta-2\delta} + \dots) \quad (2.13)$$

$$Q_{sc} = \sum_{j=1} (q_{c, j}) \quad (2.14)$$

dimana,

Q_{rf} = beban pendinginan *sensible* dari perolehan panas elemen yang berasal dari komponen konveksi dan radiasi
 v dan w = koefisien fungsi transfer ruangan

q_{θ} = setiap elemen i yang memiliki perolehan panas berasal dari komponen radiasi

δ = selang waktu

Q_{sc} = beban pendinginan *sensible* dari perolehan panas elemen yang hanya berasal dari komponen konveksi

q_c = setiap elemen j yang memiliki perolehan panas berasal dari komponen konveksi

Latent

$$Q_l = \sum_{n=1} (q_{c,n}) \quad (2.15)$$

dimana,

q_c = setiap n elemen perolehan panas *latent*

2.1.2.2. *Total Equivalent Temperature Differential (TETD)*^[6]

Metode *Total Equivalent Temperature Differential (TETD)* untuk menghitung beban pendinginan ruang dengan prosedur umum yang sama pada penyatuan data dan pra analisis perhitungan yang berlaku pada TFM. Metode TETD cenderung *over predicts* dalam memperkirakan beban pendinginan^[7]. Faktor-faktor berikut diperlakukan dengan cara sama seperti TFM yang sudah dibahas pada sub sub sub bab sebelumnya;

- Konsep perhitungan *heat gain* pada radiasi matahari

- Total *heat gain* melalui dinding dan atap luar
- *Heat gain* melalui permukaan interior
- *Heat gain* melalui infiltrasi dan ventilasi

Perolehan panas melalui dinding dan atap sebagai berikut:

$$q = UA(\text{TETD}) \quad (2.16)$$

$$\text{TETD} = t_{ea} - t_i + \lambda (t_{e\delta} - t_{ea}) \quad (2.17)$$

dimana,

U = koefisien perpindahan panas untuk atap atau dinding

A = luas area atap dan dinding

TETD = *Total Equivalent Temperature Differential* atap atau dinding

t_i = suhu *dry-blub* interior

λ = faktor pengurangan

$t_{e\delta}$ = *sol-air temperature* pada waktu jeda δ jam

t_{ea} = *sol-air temperature*

Perolehan panas melalui kaca memiliki persamaan seperti persamaan 2.2 dan 2.3.

Perolehan panas melalui partisi, *ceiling*, lantai memiliki persamaan seperti persamaan 2.4.

Perolehan panas melalui penghuni memiliki persamaan seperti persamaan 2.5 dan 2.6.

Perolehan panas melalui lampu memiliki persamaan seperti persamaan 2.7.

Perolehan panas melalui peralatan memiliki persamaan seperti persamaan 2.8.

Perolehan panas melalui ventilasi dan infiltrasi udara memiliki persamaan seperti persamaan 2.9, 2.10 dan 2.11.

Beban pendinginan

Sensible

$$q_{sensible} = q_{cf} + q_{arf} + q_c \quad (2.18)$$

$$q_{cf} = q_{s,1} (1 - rf_1) + q_{s,2} (1 - rf_2) + \dots + rf_n \quad (2.19)$$

$$q_{arf} = \sum_{\gamma=h_{a+1}-\theta}^{\theta} \frac{(q_{s,1} \times rf_1 + q_{s,2} \times rf_2 + \dots + rf_n)}{\theta} \quad (2.20)$$

$$q_c = (q_{sc,1} + q_{sc,2} + q_{sc,\theta}) \quad (2.21)$$

dimana,

q_{cf} = bagian konveksi per-jam untuk beban elemen ke-n

$q_{s,1}$ = *sensible heat gain* per-jam untuk beban elemen 1, ..., n

rf_1 = *fraction radiation* untuk *sensible heat gain* untuk beban elemen 1, ..., n

q_{arf} = rata-rata dari *fraction radiation* untuk *sensible heat gain* untuk beban elemen 1, ..., n

θ = jumlah jam

h_a = waktu saat ini, 1 – 24 jam, untuk beban pendinginan yang dihitung

γ = perhitungan jam dari $h_{a+1-\theta}$ sampai h_a

q_c = konveksi per-jam dari *sensible heat gain* (pada jam tersebut) untuk beban elemen β yang tidak memiliki komponen radiasi

Latent

$$q_{latent} = (q_{l,1} + q_{l,2} + q_{l,\beta}) \quad (2.22)$$

dimana,

q_l = *latent heat gain* per-jamnya (pada jam tersebut) untuk beban elemen β

2.1.2.3. Heat Balance (HB)^[5]

Estimasi beban pendinginan melibatkan perhitungan keseimbangan panas (*heat balance*) konduksi, konveksi dan radiasi untuk setiap permukaan ruangan dan *heat balance* untuk udara ruangan. Metode *heat balance* menyelesaikan masalah secara langsung. Keuntungannya adalah tidak ada parameter yang ditetapkan sewenang-wenang namun beberapa perhitungan membutuhkan penggunaan komputer. Semua prosedur perhitungan melibatkan beberapa jenis model yang memerlukan asumsi untuk penyederhanaan. Asumsi yang paling mendasar adalah udara di ruang yang dikondisikan dapat dimodelkan sebagai “*well mixed*” yang

artinya suhu udara seragam di seluruh ruangan. Asumsi berikutnya adalah permukaan ruangan (dinding, jendela, pintu, dll) dapat diperlakukan sebagai berikut:

- Suhu permukaan seragam
- Iradiasi *long wave* dan *short wave* seragam
- Radiasi pada permukaan tersebar
- Konduksi panas satu dimensi

Terdapat 4 elemen dalam *heat balance*:

- *Outdoor-face heat balance*

Persamaan *heat balance* untuk setiap permukaan luar ruangan

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (2.23)$$

dimana,

q''_{asol} = fluks radiasi matahari yang diserap langsung

q''_{LWR} = pertukaran fluks radiasi gelombang panjang dengan udara dan sekitarnya

q''_{conv} = pertukaran konveksi fluks dengan udara diluar ruangan

q''_{ko} = fluks konduksi pada dinding

- Proses konduksi dinding

Proses konduksi dinding dirumuskan dengan banyak

cara diantaranya

- *Numerical finite difference*

- *Numerical finite element*

- *Transform methods*

- *Time series methods*

- *Indoor-face heat balance*

Indoor-face heat balance untuk setiap permukaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2.24)$$

dimana,

q''_{LWX} = pertukaran fluks radiasi gelombang panjang antara permukaan zona

q''_{SW} = fluks radiasi gelombang pendek ke permukaan dari cahaya

q''_{LWS} = fluks radiasi gelombang panjang dari peralatan di ruangan

q''_{ki} = fluks konduksi pada dinding

q''_{sol} = transmisi fluks radiasi matahari yang diserap dipermukaan

q''_{conv} = fluks konveksi ke udara ruang

Air heat balance

Empat faktor yang berkontribusi pada *air heat balance* antara lain:

$$q_{conv} + q_{CE} + q_{IV} + q_{sys} = 0 \quad (2.25)$$

dimana,

q_{conv} = perpindahan konveksi dari permukaan

q_{CE} = bagian konveksi dari beban internal

q_{IV} = beban *sensible* yang disebabkan oleh infiltrasi dan ventilasi udara

q_{sys} = perpindahan panas ke/dari sistem HVAC

2.1.2.4. *Radiant Time Series (RTS)*^[5]

Metode *Radiant Time Series (RTS)* adalah metode yang disederhanakan untuk melakukan perhitungan desain beban pendinginan yang berasal dari metode *heat balance*. Metode ini dikembangkan untuk memberikan pendekatan yang teliti, namun tidak memerlukan perhitungan berulang dan menghitung kontribusi setiap komponen terhadap total beban pendinginan. Metode RTS sesuai untuk desain perhitungan beban puncak, tetapi tidak boleh digunakan untuk simulasi energi tahunan karena asumsi yang terbatas. Meskipun konsepnya sederhana, RTS melibatkan banyak perhitungan untuk penggunaan praktis sebagai metode manual.

Desain beban pendinginan didasarkan pada asumsi *steady periodic conditions* (contoh; desain cuaca harian, penghuni, dan kondisi *heat gain* identik dengan hari-hari sebelumnya sehingga beban berulang). Dengan demikian, peroleh panas untuk komponen tertentu pada jam tertentu sama dengan 24 jam sebelumnya dan sama dengan 48 jam sebelumnya, demikian seterusnya. Asumsi ini adalah dasar dari RTS. Perhitungan beban pendinginan harus mengatasi dua efek *time delay* terkait pada proses perpindahan panas bangunan:

- Penundaan konduksi *heat gain* melalui dinding, atap atau lantai
- Penundaan konversi dari radiatif *heat gain* ke beban pendinginan.

Dinding dan atap luar menghasilkan panas karena perbedaan suhu antara udara dalam dan luar. Selain itu, energi matahari pada permukaan luar diserap kemudian ditransfer oleh konduksi ke interior bangunan. Karena ada massa dan kapasitas termal dari konstruksi material dinding atau atap, maka ada jeda waktu dalam panas yang masuk pada permukaan luar menjadi *heat gain* pada permukaan dalam.

U N I V E R S I T A S
M U L T I M E D I A
N U S A N T A R A

Heat Gain melalui permukaan luar

Heat gain melalui permukaan eksterior berasal dari radiasi matahari. Sifat konstruksi dinding atau atap mempengaruhi laju perpindahan panas ke permukaan interior.

Sol-Air Temperature

$$t_e = t_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (2.26)$$

dimana,

α = daya serap permukaan terhadap radiasi matahari

E_t = total radiasi matahari pada permukaan

h_o = koefisien konveksi perpindahan panas

t_o = suhu udara di luar ruangan

t_s = suhu permukaan

ε = *hemispherical* yang dipancarkan dari permukaan

ΔR = perbedaan antara radiasi *long-wave* pada permukaan dari langit dan radiasi yang dipancarkan oleh *blackbody* pada suhu udara luar

Dalam metode RTS, konduksi melalui dinding dan atap eksterior dihitung menggunakan nilai *Conduction Time Series* (CTS). Konduksi panas pada eksterior dinding dan atap didefinisikan sebagai berikut:

$$q_{i,\theta-n} = UA(t_{e,\theta-n} - t_{rc}) \quad (2.27)$$

dimana,

$q_{i,\theta-n}$ = masuknya panas pada permukaan pada n jam

yang lalu

U = koefisien perpindahan panas

A = area permukaan

$t_{e,\theta-n}$ = *sol-air temperature* n jam yang lalu

t_{rc} = suhu udara ruangan (konstan)

Heat Gain melalui permukaan dalam

Setiap kali ruang yang dikondisikan berbatasan dengan ruangan yang memiliki suhu berbeda, perpindahan panas secara fisik harus dipertimbangkan.

$$q = UA(t_b - t_i) \quad (2.28)$$

dimana,

q = laju perpindahan panas

U = koefisien perpindahan panas

A = luas bagian yang memisahkan ruang

t_b = suhu rata-rata udara pada ruang yang berdekatan

t_i = suhu udara pada ruang yang dikondisikan

2.1.2.5. *Cooling load Temperature Difference (CLTD) / Solar Cooling Load (SCL) / Cooling Load Factor (CLF)*^[6]

Perhitungan beban pendinginan menggunakan *Cooling Load Temperature Difference (CLTD) / Solar Cooling Load (SCL) /*

Cooling Load Factor (CLF) menggunakan prosedur umum yang relatif sama dengan *Transfer Function Method* (TFM) seperti penyatuan data. Demikian pula, konsep dasar perhitungan *heat gain* dari radiasi matahari, total *heat gain* melalui atap dan dinding luar, *heat gain* melalui permukaan interior, *heat gain* melalui infiltrasi dan ventilasi ditangani dengan cara yang sama. Metode CLTD/SCL/CLF adalah prosedur satu tahap perhitungan manual berdasarkan TFM. Ini digunakan untuk memperkirakan beban pendinginan pada 3 cara yaitu *heat gain* (konduksi melalui permukaan seperti jendela, atap, dan dinding, perolehan panas matahari melalui fenetrasi), dan *heat gain* dari lampu, penghuni, dan peralatan serta beban pendinginan dari infiltrasi dan ventilasi.

Beban pendinginan melalui atap, dinding, pintu dan konduksi kaca

$$Q = U \times A \times CLTD_c \quad (2.29)$$

dimana,

$Q = \text{Cooling Load}$

$U = \text{koefisien perpindahan panas (U-Value)}$

$A = \text{luas permukaan}$

$$CLTD_c = CLTD + (78-TR) + (TM-85) \quad (2.30)$$

dimana,

$78-TR = \text{koreksi desain suhu dalam ruangan}$

TM-85 = koreksi desain suhu luar ruangan

TR = suhu dalam ruangan

TM = rata-rata suhu luar ruangan

$$TM = T_{max} - (Daily\ Range)/2 \quad (2.31)$$

dimana,

T_{max} = suhu maximum luar ruangan

Daily Range = perbedaan suhu rata-rata antara maksimum dan minimum suhu harian.

Beban pendinginan kaca melalui radiasi matahari

$$Q = A \times SC \times SCL \quad (2.32)$$

dimana,

Q = beban pendinginan *Solar Transmission* melewati kaca

A = luas area kaca

SC = *Shading Coefficient*

SCL = *Solar Cooling Load Factor*

Beban pendinginan melalui partisi, *ceiling*, lantai

$$Q = U \times A \times (T_a - T_{rc}) \quad (2.33)$$

dimana,

Q = *Cooling Load*

U = koefisien perpindahan panas (*U-Value*)

A = luas permukaan

Ta = suhu luar ruangan

T_{rc} = desain suhu dalam ruangan yang dikondisikan

Beban pendinginan melalui penghuni

$$q_{\text{sensible}} = N (\text{SHG}) \text{CLF} \quad (2.34)$$

$$q_{\text{latent}} = N (\text{LHG}) \quad (2.35)$$

dimana,

N = jumlah penghuni dalam ruang

CLF = *Cooling Load Factor*

SHG = *Sensible Heat Gain*

LHG = *Latent Heat Gain*

Beban pendinginan melalui lampu

$$Q = W \times F_{\text{UI}} \times F_{\text{SA}} \times \text{CLF} \quad (2.36)$$

dimana,

W = daya lampu

F_{UI} = *Lighting use factor*

F_{SA} = *Special ballast allowance factor*

CLF = *Cooling Load Factor*

Beban pendinginan melalui peralatan

$$q_{\text{sensible}} = q_{\text{input}} * F_{\text{U}} * F_{\text{L}} * \text{CLF} \quad (2.37)$$

dimana,

q_{input} = laju energi untuk penggunaan alat

FU = *Usage Factor*

FR = *Radiation Factor*

CLF = *Cooling Load Factor*

Perolehan panas melalui ventilasi dan infiltrasi udara

$$q_{sensible} = 1,23 * Q * (t_o - t_i) \quad (2.38)$$

$$q_{latent} = 3010 * Q * (W_o - W_i) \quad (2.39)$$

$$q_{total} = 1,2 (h_o - h_i) \quad (2.40)$$

dimana,

Q = aliran udara pada ventilasi

t_o, t_i = suhu udara luar, dalam ruangan

W_o, W_i = ratio kelembaban luar, dalam ruangan

h_o, h_i = entalpi luar, dalam ruangan

Berdasarkan ke lima metode di atas, metode CLTD yang akan digunakan dalam tugas akhir ini. Alasan mengapa dipilihnya metode CLTD sebagai berikut:

a. Keakuratan metode^[5]

Keakuratan perhitungan beban pendinginan dalam praktik tergantung pada ketersediaan informasi mengenai bangunan atau ruangan, penilaian peneliti dalam asumsi yang dibuat ketika

menafsirkan informasi yang tersedia (subyektifitas) dan keluaran apa yang ingin dicapai. *Blue print* (cetak biru) ruangan tersebut tidak ada sehingga ketersediaan informasi mengenai konstruksi ruangan tersebut didapat dari pengurus Vihara yang sudah lama mengabdikan diri di Vihara Padumuttara. Faktor-faktor tersebut memiliki pengaruh yang jauh lebih besar pada keberhasilan suatu penelitian daripada pemilihan metode perhitungan beban pendinginan tertentu. Walaupun akurasi hasil CLTD tidak sebaik hasil metode dinamis, tetapi hasilnya dapat digunakan untuk memperkirakan *peak load* karena efek dari *time delay* dan *time lag* juga diperhitungkan.

b. Perhitungan 1 langkah

Metode CLTD melakukan perhitungan dengan satu tahap perhitungan sedangkan metode HB, RTS, TFM, dan TETD perlu mencari nilai *sol-air temperature* terlebih dahulu^[6]. Untuk mendapatkan nilai beban pendinginan (*cooling load*) metode TFM dan TETD memerlukan konversi dari *heat gain* menjadi *cooling load*^[6].

c. Perhitungan bersifat manual, *acceptable*, murah dan cepat

Metode CLTD dapat dilakukan secara manual karena perhitungannya yang sederhana. Metode CLTD dapat digunakan oleh mahasiswa^[7], peneliti atau insiyur bahkan dapat dilakukan oleh masyarakat awam selama informasi pada bangunan jelas atau sudah

dinyatakan sebelumnya. Perhitungan CLTD dapat dilakukan dengan *Microsoft Excel* atau perangkat lunak lain yang serupa. *Microsoft Excel* atau perangkat lunak lain yang serupa dapat mengeliminasi *human error* dan mengurangi waktu yang dikonsumsi untuk perhitungan, dengan kata lain dapat mempercepat perhitungan tanpa memerlukan usaha yang banyak^[7]. Pengoperasian perangkat lunak tersebut dapat digunakan disegala jenis komputer sehingga tidak memerlukan komputer atau laptop dengan performansi tinggi.

d. Penyederhanaan dari metode lain^[6]

Metode CLTD sudah termasuk efek (1) *time lag* dari perolehan panas melalui permukaan luar dan (2) *time delay* oleh penyimpanan termal dalam mengubah *heat gain* ke beban pendinginan (*cooling load*). Penyederhanaan ini memungkinkan beban pendinginan dihitung secara manual; dengan demikian, ketika data tersedia dan digunakan dengan tepat, hasilnya konsisten dengan metode lain, sehingga membuat metode ini populer untuk pemula. Hal ini dapat ditunjukkan pada bagian sub bab *State of The Art*. Jurnal-jurnal di sub bab ini menunjukkan hasil metode CLTD yang tidak jauh berbeda dengan metode lain atau *software* komputer.

U
N
I
V
E
R
S
I
T
A
S
M
U
L
T
I
M
E
D
I
A
N
U
S
A
N
T
A
R
A

2.1.3. *Cooling Load Temperature Difference (CLTD)*

Metode CLTD yang digunakan pada tugas akhir ini sudah disesuaikan dengan batasan masalah dan keadaan di lapangan. Berikut persamaan yang digunakan pada komponen bangunan. Beban pendinginan melalui atap, dinding dan jendela secara konduksi menggunakan persamaan 2.29, 2.30 dan 2.31. Beban pendinginan kaca jendela secara radiasi menggunakan persamaan 2.32. Beban pendinginan *ceiling* dan lantai menggunakan persamaan 2.33. Pengguna ruangan terdapat 2 komponen beban pendinginan yaitu *sensible* dan *latent* masing-masing menggunakan persamaan 2.34 dan 2.35. Beban pendinginan yang berasal dari laptop, LCD proyektor dan lampu menggunakan persamaan yang diadaptasi, berikut persamaannya:

$$Q = W \times N \times CLF \quad (2.41)$$

dimana,

W = daya lampu

N = Jumlah Peralatan

CLF = *Cooling Load Factor*

2.2. *State Of The Art*

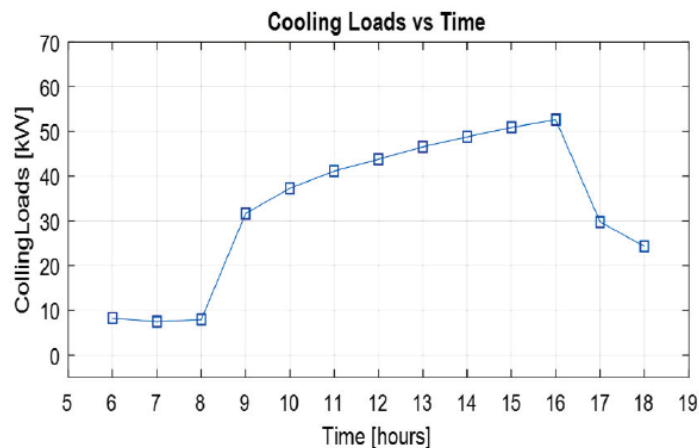
Beberapa peneliti telah melakukan perkiraan beban pendinginan. Antima dan Namrata^[8] membandingkan 3 metode yaitu CLTD/*Glass Load Factor* (GLF), CLTD/CLF/SCL dan *Residential Load Factor* (RLF). Hasil perbandingan tersebut didapatkan bahwa dimetode GLF pada perhitungan *glass load* sudah

termasuk konduksi dan transmisi solar. Pada metode SCL konduksi dan transmisi solar dihitung secara terpisah. Pada metode RLF nilai *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) dan fenetrasi matahari ditentukan sesuai jenis kaca. Pada perhitungan pengguna, metode GLF mengamsumsikan beban pendinginan per orang 67 W sedangkan pada metode SCL dan RLF perhitungan *latent* dan *sensible gain* dihitung secara terpisah demikian juga pada peralatan dalam bangunan. Pada metode CLTD/GLF, perolehan panas tidak bisa dilakukan per jam dan hanya bisa digunakan pada bangunan residential. Pada metode CLTD/CLF/SCL dapat digunakan baik bangunan *residential* maupun *Non-residential* dan perolehan panas dapat dilakukan per jam. Dari studi perbandingan ketiga metode di atas dapat diketahui bahwa metode CLTD/GLF memprediksi perolehan panas pada sisi terendah sedangkan nilai metode CLTD/SCL/CLF mengarah pada nilai tertinggi dan nilai RLF berada diantara kedua metode dan lebih mendekati nilai metode CLTD/SCL/CLF.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Acharya, Yewale, Tendolkar, dan Kulkarni^[7] mengenai estimasi dan analisis beban pendinginan untuk subkontinen India mengungkapkan bahwa metode CLTD berhasil digunakan dalam perhitungan beban sebagian (*part load*). Efek pencahayaan, pengguna dan peralatan dipertimbangkan untuk menyelidiki beban pendinginan setiap jam. Ketika mengestimasi beban pendinginan pada kondisi beban penuh, CLF untuk beban internal perlu dianggap sebagai kesatuan. Hal ini pada akhirnya menghasilkan perhitungan beban penuh yang lebih tinggi daripada beban

pendinginan aktual. Perolehan panas dari pencahayaan, pengguna, dan peralatan secara langsung ditambahkan dalam beban pendinginan pada metode TETD, sedangkan metode CLTD menguraikan dengan pertimbangan terpisah dari beban internal untuk analisis beban pendinginan. Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa metode TETD relatif lebih cepat tetapi menghasilkan prediksi yang kurang akurat, sedangkan metode CLTD menghabiskan lebih banyak waktu dengan hasil yang relatif akurat.

Kemudian pada penelitian yang dilakukan oleh Adref, Elokda, Chikhalsouk, Alebri dan Alhosani^[9], mereka menggunakan metode CLTD/SCL/CLF untuk mengukur bangunan residensial di Abu Dhabi, Dubai. Salah satu grafik hasil penelitian mereka terdapat pada Grafik 2.1.



Grafik 2.1. Beban pendinginan terhadap waktu

Grafik 2.1. menunjukkan beban pendinginan yang terjadi dari pukul 6 sampai 18. Peningkatan signifikan terjadi dari pukul 8 menuju pukul 9. Sebaliknya

penurunan signifikan terjadi pada pukul 16 menuju 17. Peningkatan dan penurunan terjadi akibat matahari yang terbit dan tenggelam pada jam tersebut. Puncak beban pendinginan sebesar 52 kW yang terjadi pada pukul 16 tepat sebelum terjadi penurunan beban pendinginan.

Sen, Rana, dan Punia^[10] melakukan perbandingan estimasi beban pendinginan dengan menggunakan metode CLTD dan *software* komputer. *Software* komputer yang digunakan adalah Elite CHVAC. Hasilnya menunjukkan bahwa ketika menggunakan metode CLTD, total beban pendinginan yang dihasilkan sebesar 2,54 TR. Verifikasi keakuratan perhitungan menggunakan *software* perhitungan beban pendinginan yaitu Elite CHVAC. Berdasarkan hasil perhitungan *software*, beban pendinginan yang dihasilkan sebesar 2,31 TR dan dengan menggunakan metode CLTD ditemukan bahwa total beban yang diperlukan adalah 2,59 TR setelah ditambahkan *safety factor*. Hal yang sama dilakukan pada *software* yaitu menambah *safety factor* sehingga total beban pendinginan menjadi 2,54 TR. Nilai beban pendinginan yang dihitung dengan metode CLTD dan Elite CHVAC hampir sama.

Khakre, Wankhade dan Ali^[11] melakukan penelitian mengenai estimasi beban pendinginan dengan metode CLTD dan simulasi komputer dengan *software Hourly Analysis Program (HAP) 4.5* untuk sistem pendinginan evaporatif. Dalam penelitian ini, investigasi pada perhitungan beban pendinginan *sensible* untuk sistem pendinginan evaporatif telah dilakukan pada bangunan dengan metode

CLTD dan program HAP untuk memverifikasi hasil. Perhitungan manual menunjukkan hasil beban pendinginan untuk lantai dasar, lantai pertama dan lantai kedua sebesar 13,49 kW, 14,36 kW, dan 14,5 kW pada bulan Mei sedangkan hasil pada program HAP sebesar 12,6 kW, 13 kW, dan 13 kW. Hasilnya dibandingkan dengan perhitungan manual dan memperlihatkan adanya perbedaan nilai. Hal ini terjadi karena perhitungan manual mempertimbangkan nilai puncak sedangkan HAP memberikan nilai rata-ratanya.

Ijaola, Bello, dan Babalola^[12] mengevaluasi performansi energi bangunan pada bangunan kantor yang kompleks di Nigeria. Hasil yang dicapai melalui analisis menggunakan pendekatan empiris dan simulasi komputer dengan *software* SAVISCAD. Hasil yang didapat menggunakan perhitungan empiris sebesar 1,61 TR (5765,97 W) sedangkan dengan SAVISCAD sebesar 1,35 TR (4748 W). Perbedaan yang terjadi sebesar 17% terhadap nilai empirisnya. Dalam penelitian ini tidak dijelaskan sebab perbedaan nilai empiris dengan simulasi.

Singh, Mishra, dan Dubey^[13] melakukan estimasi beban pendinginan untuk perpustakaan di Universitas Sharda, India. Tujuan estimasi beban pendinginan untuk memilih ukuran AC yang tepat untuk mencapai energi yang optimal pada suhu, kelembaban dan distribusi udara yang tepat. Berdasarkan perhitungan dengan metode CLTD, total *heat gain* yang diperoleh perpustakaan sebesar 48614,91 W atau sekitar 165880,977 Btu/h. Hasil tersebut sama dengan 13,83 TR.

13,83 TR diperlukan perpustakaan di Universitas Sharda untuk memberikan kenyamanan kepada pengguna sebanyak 30 orang.

2.3. Urgensi Tugas Akhir

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, pengguna ruangan secara berkala melakukan pergerakan berupa mengusap dahi dan atau keringat dan melakukan kipasan tangan pada tubuhnya. Pergerakan yang dilakukan mengindikasikan bahwa pengguna ruangan mengalami ketidaknyamanan termal. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan sebelumnya, suhu yang didapatkan ketika ruangan tersebut kosong mencapai $28,56^{\circ}\text{C}$ dengan kelembaban 80%. Jika dipetakan pada Gambar 1.1., nilai tersebut diluar dari zona kenyamanan termal. Perlu diingat bahwa pengukuran dilakukan pada kondisi ruangan kosong. Pengguna ruangan akan meningkatkan suhu dalam ruangan tersebut dan menghasilkan ketidaknyamanan termal.

Ketidaknyamanan termal yang terjadi dapat mengganggu konsentrasi pengguna ruangan dalam membaca doa, mendengarkan ceramah, bermeditasi dan lain sebagainya. Sebagai hasilnya, pengguna ruangan akan mengantuk selama beribadah dan akan cenderung untuk berbicara sesama pengguna ruangan untuk mengalihkan kondisi ketidaknyamanan yang dirasakan. Pembicaraan antar pengguna ruangan menimbulkan ketidaknyamanan audio bagi pengguna ruangan lain yang sedang beribadah. Atas kondisi inilah, tugas akhir ini perlu dilakukan pada ruangan ini agar pengguna ruangan merasa nyaman saat beribadah dan dapat menjaga konsentrasi selama beribadah.