

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Definisi Energi dan Keterlibatannya dalam Arsitektur

Energi adalah kemampuan untuk mengerjakan sesuatu. Energi dapat ditemukan dalam beragam bentuk, seperti energi kimia, energi listrik, energi cahaya, energi panas, energi mekanik, dan energi nuklir. Di alam terdapat dua macam tipe energi, yaitu energi potensial (energi tersimpan) dan energi kinetik (energi gerak). Hukum termodinamika pertama menyebutkan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan (kecuali pada proses sub-atomik seperti fisi nuklir dan fusi matahari), energi hanya dapat berubah-ubah bentuk. Sedangkan hukum termodinamika kedua menjelaskan bahwa energi hanya dapat berpindah secara spontan pada satu arah saja, dari substansi yang bersuhu lebih panas ke yang lebih dingin, atau secara umum dari tingkat yang lebih tinggi menuju ke tingkat yang lebih rendah.

Besaran energi adalah *joule* ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{dtk}^2$ atau $\text{Newton}\cdot\text{meter}$) atau *erg* ($\text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{dtk}^2$ atau $\text{dyne}\cdot\text{cm}$). Nama Joule berasal dari nama seorang ilmuwan Inggris James Prescott Joule (1818-1889) yang menemukan bahwa panas adalah suatu bentuk energi. Satu Joule adalah jumlah energi yang diperlukan untuk mengangkat satu pon benda setinggi sembilan inci. Satuan lain adalah Btu (*British thermal unit*). Satu Btu adalah energi panas yang diperlukan untuk memanaskan satu pon air agar suhunya naik satu derajat Fahrenheit pada ketinggian permukaan laut. $1000 \text{ joule} = 1 \text{ Btu}$, 1 Btu kira-kira sama dengan energi panas yang dikeluarkan kepala korek api dapur ketika menyala.

Menurut jenis ketersediaannya, sumber energi dibagi menjadi energi terbarui (*renewable*) dan tak terbarui (*non renewable*). Energi terbarui adalah sumber energi yang relatif tidak akan pernah habis, seperti energi matahari, angin, air, massa bio dan panas bumi. Sedangkan energi tak terbarui adalah sumber energi yang tidak dapat diadakan lagi setelah habis, seperti minyak bumi, batubara dan gas alam.

Energi listrik merupakan salah bentuk energi yang paling luwes karena mudah didapat dengan mengkonversi sumber energi lain untuk diaplikasikan pada sebagian besar peralatan masa kini. Listrik timbul karena adanya aliran elektron yang timbul bila sebuah atom kehilangan muatannya. Hal tersebut terjadi jika keseimbangan gaya elektron dan proton suatu atom terganggu oleh gaya dari luar sehingga mengakibatkan elektron atom bergerak bebas sepanjang konduktor. Pergerakan atau loncatan-loncatan elektron inilah yang kemudian menimbulkan arus listrik.

Bentuk energi yang berhubungan erat dengan perancangan bangunan hemat energi adalah energi panas. Pengetahuan akan proses perpindahan energi panas dalam bangunan yang disebut pula perpindahan kalor atau *heat transfer (Ilmu Fisika Bangunan, Heinz Frick)* perlu dikuasai secara mendalam bagi pemahaman fenomena termal bangunan dan menciptakan lingkungan hunian yang nyaman dihuni secara termal serta hemat energi, baik pada bangunan berteknologi tinggi maupun bangunan sederhana yang alami. Metoda-metoda permodelan energi akan permasalahan aliran udara dan sinar matahari yang merupakan faktor esensial dari permasalahan termal dan energi akan dibahas lebih lanjut pada bab-bab berikutnya.

Dalam dunia arsitektur, energi memegang peranan penting di seluruh tahapannya. Energi selalu dipertimbangkan mulai dari proses perancangan, operasional sampai dengan penghancuran bangunan yang tidak dikendaki lagi, baik dalam bentuk *embodied energy* yang kasat mata dan terkandung dalam bahan maupun *used energy* yang digunakan secara nyata dalam tahapan arsitektural. Secara rinci keterlibatan energi dalam arsitektur dapat dikelompokkan dalam proses-proses berikut:

- survei
- proses perancangan
- pembukaan dan penyiapan lahan
- transportasi material bangunan
- konstruksi (pembangunan)
- operasional
 - penerangan (ruang dalam dan ruang luar)
 - ventilasi (sistem penyejukan udara, fan)
 - penyediaan air (minum, sanitasi, mandi, penyiraman)

- transportasi (lift untuk transportasi lokal, kendaraan untuk mencapai lokasi bangunan)
 - penyimpanan (ruang pendingin)
- perawatan berkala
 - pembersihan
 - penggantian elemen bangunan
 - pengecatan
- renovasi besar (penyesuaian bangunan untuk fungsi baru, *facelift*)
- penghancuran (bangunan tidak layak dipertahankan, lahan akan dipakai untuk fungsi baru)

Pendekatan Perancangan Bangunan Hemat Energi

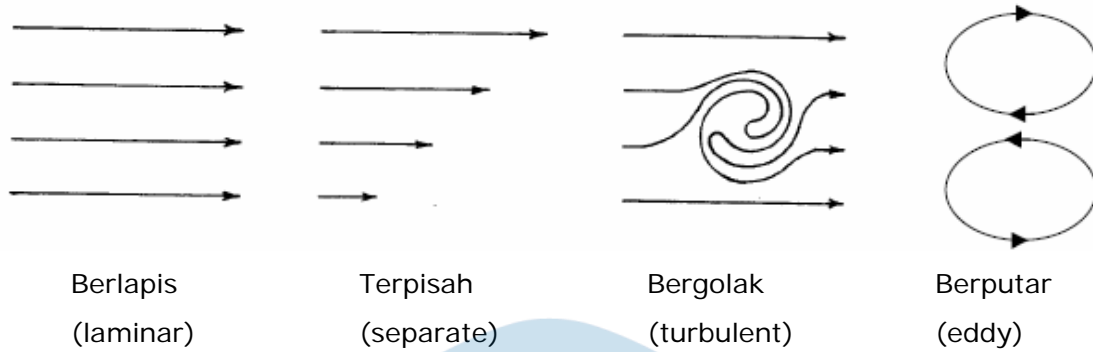
Kualitas Penghawaan (Ventilasi)

Sifat Alami Udara

Ventilasi adalah aliran udara, baik di ruang terbuka maupun tertutup (di dalam ruangan). Ventilasi alami adalah proses pergantian udara ruangan oleh udara segar dari luar ruangan tanpa bantuan peralatan mekanik. Penghawaan (ventilasi) alami perlu selalu diusahakan bilamana udara lingkungan memiliki kualitas yang baik (tidak bau, berdebu, polusi), tidak terlalu panas (dibawah 28 °C) dan lingkungan tidak bising.

Yang perlu diperhatikan dalam sistem penghawaan alami adalah bagaimana mengalirkan udara dengan cepat kedalam ruangan dan membuangnya keluar bangunan. Udara sebagai unsur utama penghawaan akan mengalir baik karena arus konveksi yang natural, yang disebabkan oleh adanya perbedaan suhu atau juga karena adanya perbedaan tekanan.

Ada empat tipe aliran udara sebagai unsur penghawaan; arus berlapis (*laminar*), terpisah (*saparate*), bergolak (*trubulent*) dan berpusar (*eddy*).

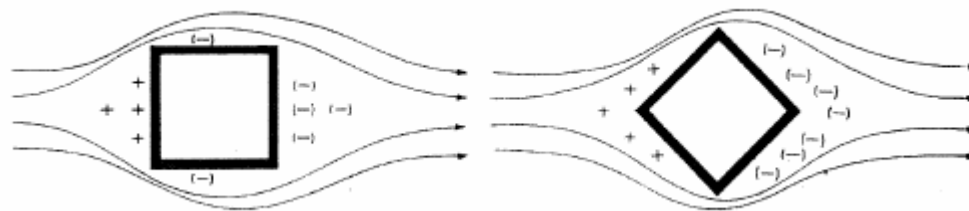


Empat jenis aliran udara

Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling, Lighting*

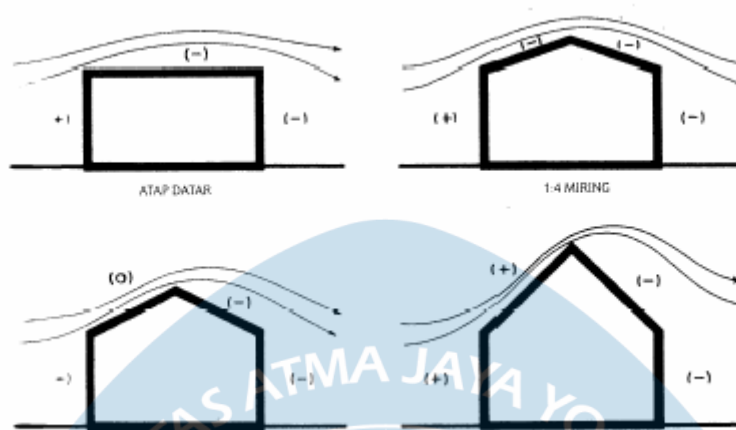
Angin menghasilkan tekanan terbesar ketika bertabrakan tegak lurus 90° terhadap permukaan bangunan, ketika sudutnya miring 45° tekanannya berkurang hingga 50%. Semakin besar tekanan angin, maka semakin cenderung pula udara akan memasuki bangunan baik melalui celah kecil atau bukaan-bukaan yang lain.

Ketika angin menghantam dari sisi suatu bangunan, akan memadatkan dan menciptakan tekanan (+). Pada saat yang sama udara akan terisap dari sisi yang terhindar dari angin, sehingga menciptakan tekanan negatif (-). Udara akan dibelokkan kesekitar bangunan dan juga akan menciptakan tekanan udara negatif (-). Tipe tekanan yang tercipta di bagian atas atap akan bergantung pada faktor landainya atap itu sendiri. Area tekanan di sekitar bangunan akan menentukan bagaimana udara mengalir melalui bangunan tersebut. Hal yang perlu diperhatikan juga adalah area-area yang bertekanan tinggi dan rendah bukan merupakan tempat-tempat yang perlu diredakan, tetapi merupakan aliran udara bergolak (*turbulent*) dan berpusar (*eddy*).

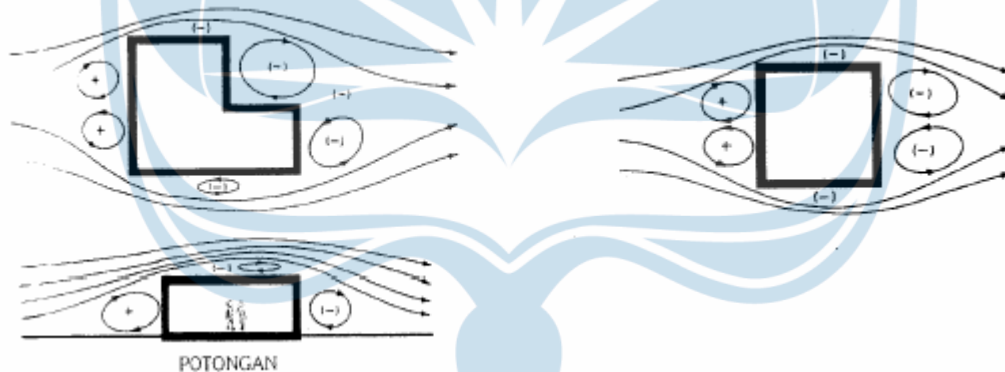


Aliran udara yang menimbulkan tekanan positif dan negatif

Sumber : *Norbert Lechner. Heating, Cooling, Lighting.*



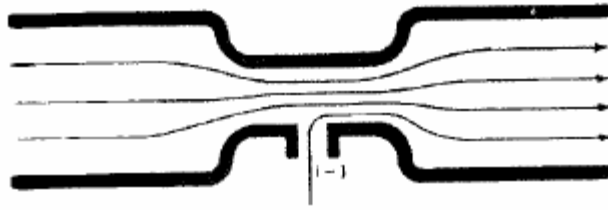
Tekanan angin yang tercipta di bagian atas atap
Sumber : *Norbert Lechner. Heating, Cooling, Lighting.*



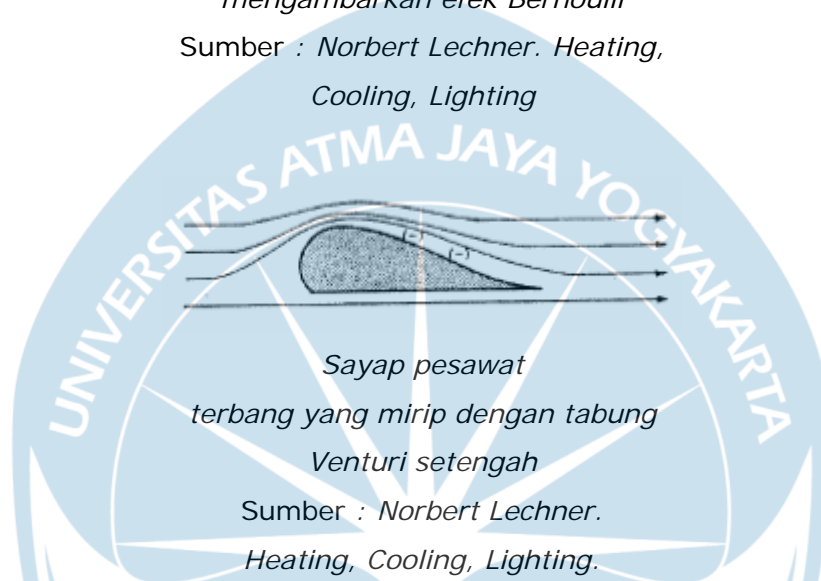
Turbulensi dan arus berputar yang terjadi di area tekanan tinggi dan rendah
Sumber : *Norbert Lechner. Heating, Cooling, Lighting.*

Efek Bernoulli

Efek bernoulli akan menyatakan bahwa peningkatan kecepatan aliran akan menurunkan tekanan statiknya. Karena fenomena ini terdapat suatu tekanan negatif pada pembatasan tabung *venturi*. Bagian silang sayap pesawat merupakan sesuatu yang mirip dengan setengah tabung *Venturi*.

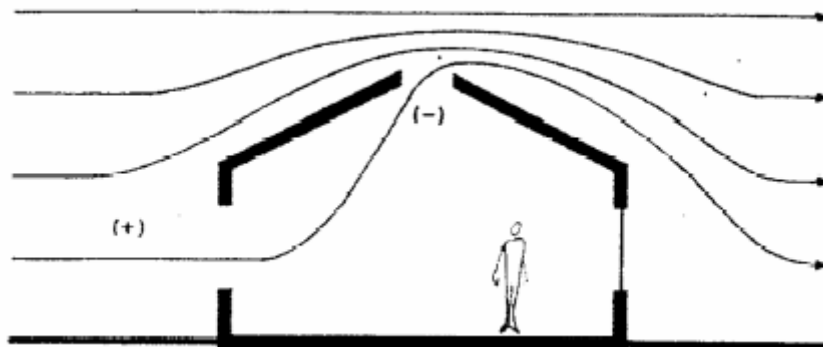


Tabung Venturi yang
menggambarkan efek Bernoulli
Sumber : Norbert Lechner. Heating,
Cooling, Lighting



Sayap pesawat
terbang yang mirip dengan tabung
Venturi setengah
Sumber : Norbert Lechner.
Heating, Cooling, Lighting.

Atap yang berbentuk "gable" juga merupakan setengah dari efek tabung Venturi. Udara akan terisap keluar pada setiap lubang udara yang berdekatan dengan bubungan. Tekanan pada bagian bubungan atap akan lebih rendah dibandingkan dengan tekanan yang ada di jendela bagian dasar. Akibatnya tanpa bantuan factor geometri tabung Venturi efek Bernoulli akan membuang udara melalui lubang angin yang terdapat di bagian atap.



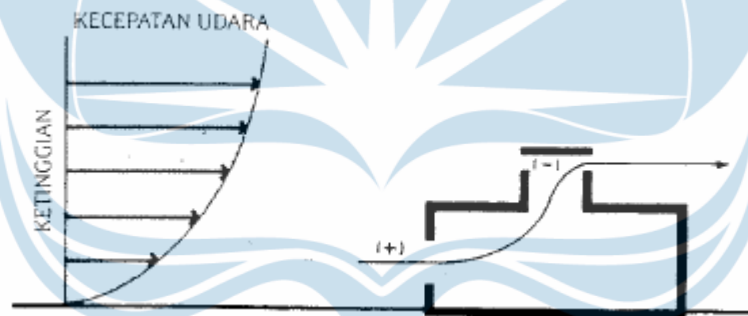
Efek Venturi menyebabkan udara dibuang melalui lubang di atap, dan dekat bubungan.

Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling, Lighting.*



Efek tabung Venturi digunakan sebagai ventilator atap.

Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling, Lighting.*



Kecepatan angin meningkat dengan ketinggian diatas grade, udara memiliki tekanan statik yang kurang di bagian atap bandingkan bagian dasarnya.

Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling, Lighting.*

Perancangan pada Iklim Mikro

Kondisi iklim pada lokasi tertentu berbeda-beda menurut data iklimnya, tergantung pada ketinggian, vegetasi serta fitur-fitur alami dan buatan yang ada diatas lahan. Dalam konteks penghawaan, faktor-faktor tersebut akan mengubah kecepatan dan mengarahkan angin pada kulit bangunan. Untuk itu para perancang bangunan sering mempertimbangkan faktor iklim mikro ini untuk mengurangi beban

konsumsi energi pada karya-karyanya dengan memanipulasi fitur-fitur alami lahan serta penempatan bangunan.

Angin memiliki dampak yang signifikan untuk mengubah suhu. Pada dasarnya angin menyebabkan terjadinya pertukaran kalor konveksi yang dapat menghilangkan atau menambahkan panas pada permukaan bangunan dan penghuninya. Aliran angin disekeliling bangunan, yaitu udara yang tidak dapat memasuki bangunan memiliki peranan yang besar dalam hal desain energi karena dapat mempercepat perpindahan kalor konveksi dari bangunan.

Lansekap dan obyek-obyek diatas lahan yang lain seperti pagar dan tembok dapat mengubah pola angin. Ukuran, bentuk, kepadatan, dan karakteristik barier lansekap yang lain menentukan aliran angin dalam empat metode dasar. Aliran angin dapat seketika dihalangi oleh barisan pepohonan, diarahkan secara bertahap disekeliling dan diatas barier, serta disaring sehingga mampu menurunkan kecepatannya.

Diagram dibawah ini menunjukkan apa yang terjadi ketika angin dihalangi oleh barier padat. Gambar potongan tersebut memperlihatkan pola angin yang dipengaruhi oleh ketinggian barier dengan jarak dua sampai lima kalinya.

Pada pandangan denah, kecepatan angin semakin menurun ketika menjauh dari penghalang. Area persis dibelakang penahan angin memiliki kecepatan lebih tinggi daripada aliran angin mula-mula.

Perubahan aliran udara yang nyata terjadi pada site bangunan sangat sulit untuk diperkirakan. Tidak hanya kecepatan dan arah angin yang selalu berubah tiap waktunya, tetapi demikian juga halnya dengan pepohonan yang selalu berubah bentuk dan kerapatan daunnya. Meskipun demikian, untuk memahami bagaimana karakter fisik barier pada site mempengaruhi aliran angin perlu diketahui lima variabel utama yaitu:

- Tinggi penghalang: semakin tinggi barier, semakin besar area perlindungan.
- Kepadatan: semakin padat suatu penghalang, akan semakin besar turbulensi angin yang terjadi dibelakang penghalang. Barier berpori-pori

kecil akan menurunkan kecepatan angin setelah melaluinya, akan tetapi barier yang berlubang seperti deretan pepohonan yang terbuka bagian bawahnya malah akan meningkatkan kecepatan angin setelah melewatinya.

- Panjang: semakin panjang penghalang, semakin besar kecepatan yang menyapu sisi-sisinya. Robinette menganjurkan rasio tinggi berbanding panjang sebesar 1:11,5 untuk mendapatkan efek terbaik pemecahan angin.
- Bentuk: penghalang tidak beraturan dan kasar seperti pagar tiang atau penghalang dengan campuran berbagai macam ukuran dan spesies tanaman akan lebih efektif untuk memecah angin dibandingkan dengan bentuk seragam.
- Tebal: ketebalan penghalang hanya akan berpengaruh dalam hal daya penetrasi anginnya. Sabuk penghalang yang tebal akan memiliki efek serupa seperti pada yang tipis.

Sejauh ini belum ada teori yang mampu benar-benar memprediksikan variasi-variasi yang mungkin terjadi pada aliran udara. Gambar-gambar berikut ini hanya merupakan gambaran kasar akan konsep aliran udara melalui kawasan kota. Jelas terlihat bahwa penataan konfigurasi dan ketinggian bangunan dapat mengubah pola angin regional yang terjadi.

Pemahaman akan konsep aliran angin akan membantu para perancang dalam menanggapi masalah penempatan bangunan pada site. Kedua pendekatan dibawah ini menjelaskan bahwa penataan kompleks bangunan gambar pertama dimaksudkan untuk meminimalisir pengaruh angin, sedangkan gambar kedua digunakan untuk memaksimalkan aliran angin.

Orientasi dan Bentuk Bangunan

Pola aliran angin disekitar dan didalam bangunan sangat tergantung pada ukuran, bentuk, dan orientasi bangunan. Ketika arus angin dihadang oleh bangunan, angin akan meresponnya dengan mengalir mengitari atau memasuki bangunan dan akhirnya kembali kepada pola aliran awalnya.

Saat ketinggian atap datar bangunan meningkat, banyaknya udara yang mengitari bangunan juga meningkat sedangkan udara yang melewati atap bangunan adalah tetap.

Ketika panjang bentuk bangunan menghalangi jalan angin meningkat, begitu pula dengan kedalaman dan panjang zona *eddy* dibelakang bangunan.

Ilustrasi dibawah ini memperlihatkan pengaruh penambahan kedalaman penghalang angin. Zona *eddy* semakin mengecil sebanding dengan ketinggiannya.

Jika bubungan atap ditinggikan, maka semakin besar pula ketinggian dan kedalaman pusaran angin (*eddy*).

Ilustrasi dibawah menggambarkan pengaruh dari orientasi empat tipe bangunan pada aliran angin disekitarnya.

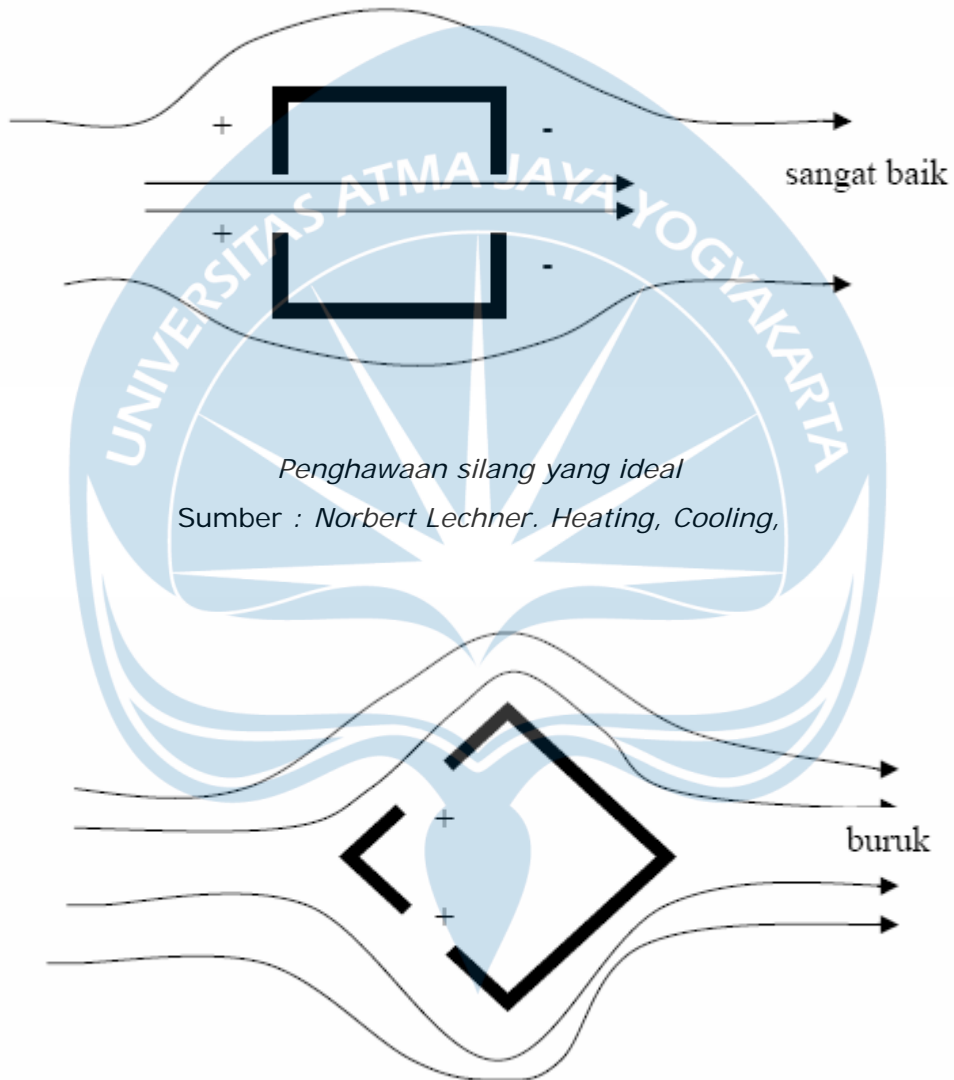
Perancangan dalam Bangunan

Udara bergerak secara alami masuk dan melewati bangunan sebagai akibat dari perbedaan tekanan antara udara dalam dan udara luar serta adanya perbedaan suhu dalam ruangan. Kecenderungan udara adalah berusaha untuk menyeimbangkan tekanannya yang disebabkan oleh aliran angin disekitar bangunan. Perbedaan tekanan tersebut dapat dimanfaatkan untuk ventilasi alami karena angin selalu mengalir dari zona bertekanan tinggi menuju zona bertekanan rendah. Didalam bangunan, perbedaan tekanan dapat pula terjadi karena adanya perbedaan suhu udara. Udara hangat yang lebih ringan naik ke atas bangunan atau ruangan dan menghisap udara dingin untuk mengisi tempatnya di lapisan dasar. Peristiwa ini disebut juga dengan '*stack effect*' atau efek cerobong.

Macam-Macam Penghawaan Alami

Penghawaan Silang (*cross ventilation*)

Penghawaan silang sangat efektif karena udara mengalir dari tekanan positif yang kuat ke area yang bertekanan negatif yang kuat pada dinding di depannya. Ventilasi jendela pada dinding yang berbatasan dapat menjadi faktor yang baik ataupun buruk, tergantung pada distribusi tekanannya yang bervariasi dengan arah angin.

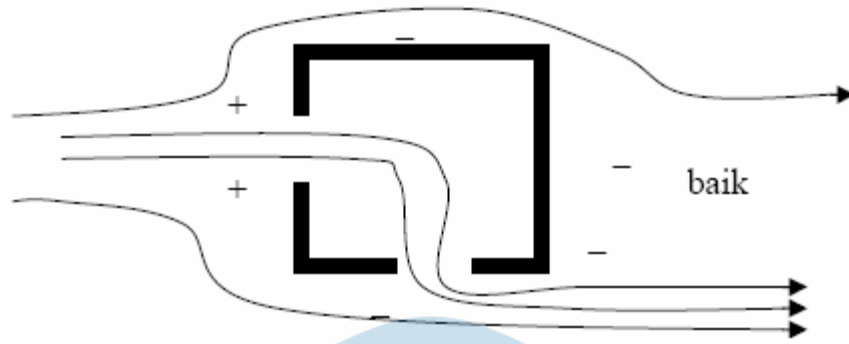


Penghawaan silang yang ideal

Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling,*

Ventilasi silang yang buruk

Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling, Lighting.*

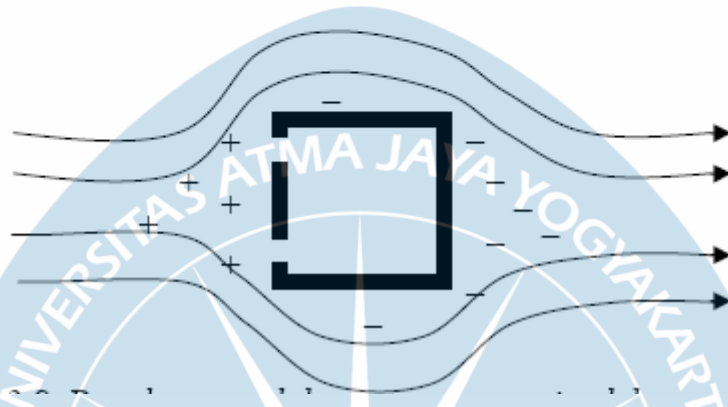
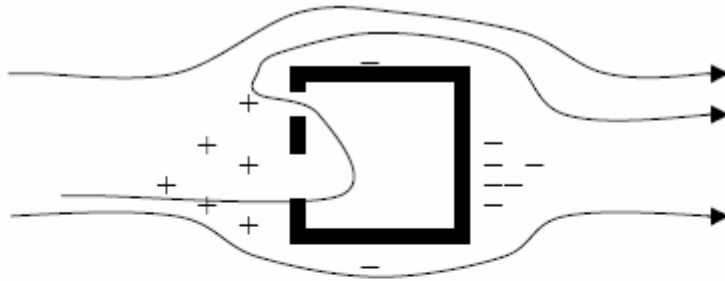


Ventilasi silang yang buruk

Sumber : *Norbert Lechner. Heating, Cooling, Lighting.*

Penghawaan dari letak jendela

Penghawaan yang berasal dari jendela pada sebuah sisi bangunan dapat bervariasi, mulai dari yang baik hingga yang buruk tergantung pada lokasi jendela. Karena tekanan yang lebih besar berada pada pusat dinding yang berada pada arah angin bertiup dibanding di tepi-tepinya, maka akan terdapat perbedaan tekanan akibat penempatan jendela yang tidak simetris, sementara tidak akan terdapat perbedaan tekanan untuk semua skema yang simetris. (Gambar 3.8)

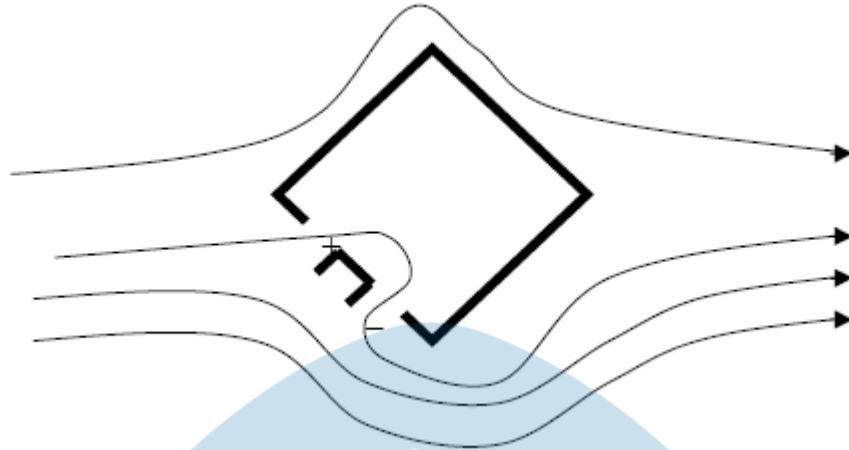


Penghawaan dalam penempatan jendela secara tidak simetris karena tekanan relatifnya lebih besar di bagian tengah dinding

Sumber : Norbert Lechner. Heating, Cooling, Lighting.

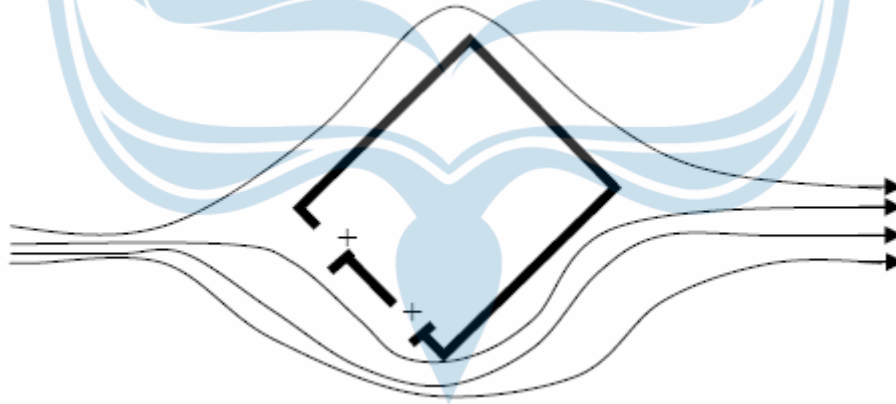
Penghawaan berdasarkan sirip

Sirip dinding (*fin walls*) dapat meningkatkan ventilasi alami melalui jendela yang terpasang pada sisi sama sebuah bangunan dengan cara mengubah distribusi tekanannya (Gambar 3.9.)



Sirip dinding dapat meningkatkan ventilasi alami
 Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling, Lighting*.

Sirip dinding tidak akan bekerja dengan baik bila sirip tersebut diletakan di tempat yang sama (Gambar 3.10). Sirip dinding akan bekerja dengan baik untuk angin yang menghembus ke dinding atau jendela yang bersudut 45 °C.



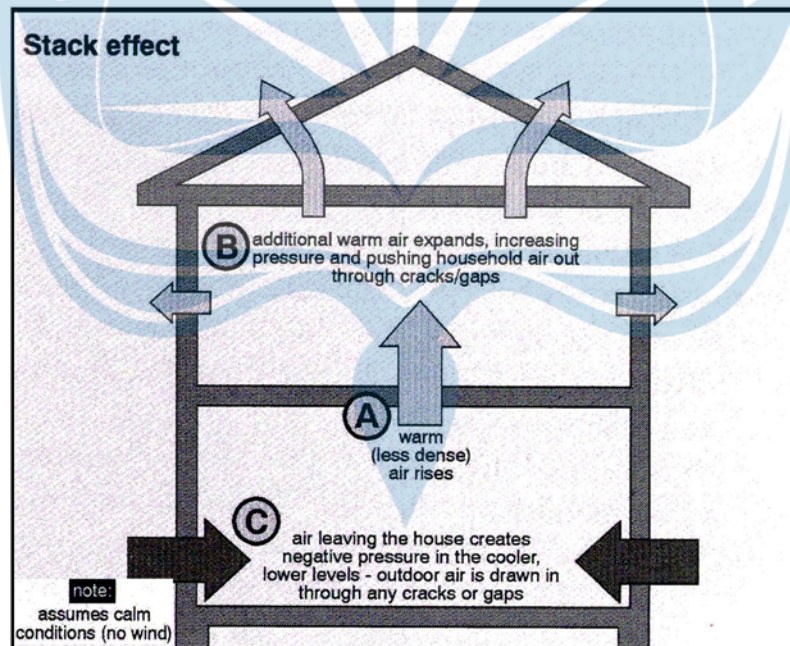
Penghawaan buruk dari penempatan sirip dinding di sisi yang sama
 Sumber : Norbert Lechner. *Heating, Cooling, Lighting*.

Penghawaan dengan Efek Cerobong (*Stack Effect*)

Stack effect adalah pergerakan udara dari luar ke dalam atau dalam keluar yang terjadi akibat adanya perbedaan suhu dan kelembaban. Pergerakan ini cenderung bergerak vertikal diakibatkan hawa panas yang bergerak keatas.

Stack effect akan menyebabkan infiltrasi (penyusupan) udara, pada saat terjadi perbedaan suhu diluar dan didalam ruangan, pergerakan udara dengan arah vertikal dan bergerak sepanjang jalur yang termudah dilewati.

Perbedaan temperatur juga menyebabkan perbedaan berat jenis yang menghasilkan perbedaan tekanan hal ini yang mengendalikan arah pergerakan udara tersebut. Besarnya tekanan yang dihasilkan oleh perbedaan tekanan dalam bangunan sebanding dengan ketinggian dari cerobongnya. Ketinggian dan daya serap bangunan menentukan besarnya efek yang ditimbulkan oleh efek cerobong. Pada bangunan bertingkat rendah, gaya termal yang ada jarang mencukupi untuk mendorong udara panas keatas.



Desain Jendela

Desain jendela dipengaruhi faktor lokasi, penempatan, dimensi dan tipe atau model jendela yang dipilih. Ventilasi silang juga akan lebih maksimal apabila

penempatan secara vertikal ikut diperhitungkan. Jendela yang berfungsi sebagai *inlet* (memasukkan udara) sebaiknya diletakkan pada ketinggian manusia yaitu 60 cm sampai dengan 150 cm (aktivitas duduk maupun berdiri), agar udara dapat mengalir di sekitar manusia tersebut untuk memperoleh rasa nyaman yang diharapkan. Sedangkan jendela yang berfungsi sebagai *outlet* (mengeluarkan udara) diletakkan lebih tinggi, agar udara panas dalam ruang dapat dengan mudah dikeluarkan.

Ventilasi akan lebih lancar bila didukung dengan kecepatan udara yang memadai. Pada kondisi udara hampir tidak bergerak (kecepatan sangat kecil atau 0 m/det), desain jendela harus mampu mendorong terjadinya pergerakan yang lebih cepat atau memperbesar kecepatan udara. Hal ini dapat ditempuh dengan memilih dimensi jendela yang berbeda antara *inlet* dan *outlet* (Gambar 3.11) atau dengan memilih tipe jendela yang berbeda kemampuan mengalirkan udara. (Gambar 3.12)



Dimensi jendela yang berbeda antara inlet dan outlet

Sumber : Christina E. Mediastika, Desain Jendela Bangunan Domestik Untuk Mencapai "Cooling Ventilation"

Untuk mengefektifkan aliran udara, suatu ruangan harus memiliki *inlet* dengan lokasi pada area bertekanan tinggi dan *outlet* pada area bertekanan rendah. Terdapat empat macam aliran yang umum:

- Aliran langsung kedalam bangunan
- Aliran melalui tembok yang berdekatan
- Aliran melalui ruangan dengan inlet dan outlet pada sisi yang sama
- Aliran melalui ruangan menuju ke atap

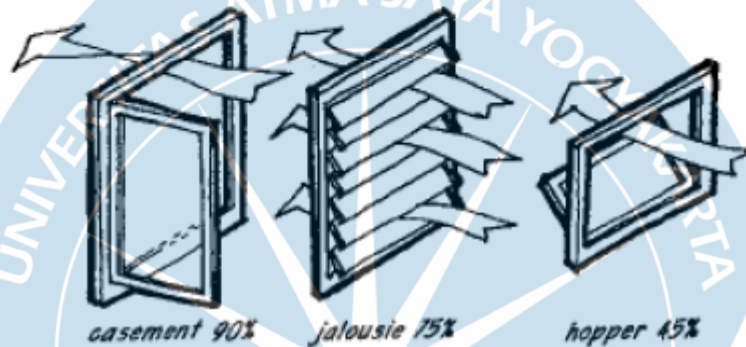
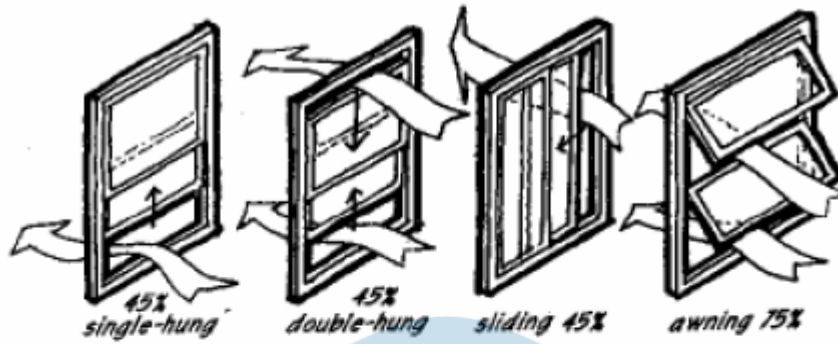
Seluruh tipe diatas membutuhkan area bertekanan tinggi dan rendah pada tempat yang tepat. Mereka juga memerlukan bukaan yang menghadap ke *prevailing wind*. Sudut optimal arah angin bervariasi tergantung tipe masing-masing.

Pada ruangan dengan aliran yang melalui sisi berlawanan, orientasi bukaan optimalnya terbatas pada kemiringan 45° terhadap arah anginnya. Pada bukaan sisi yang bersinggungan dibutuhkan orientasi dengan sudut tegak lurus 90° . Pada ruangan dengan bukaan hanya di satu sisinya memerlukan desain kulit bangunan yang dapat memicu terjadinya zona bertekanan tinggi dan rendah, sedangkan sudut datang angin harus miring terhadap bukaannya. Kemudian pada ruangan dengan *outlet* terletak di atap, sudut datang miring atau tegak lurus dapat memberikan aliran udara yang baik.

Perletakan vertikal untuk *inlet* memiliki efek yang krusial akan arah aliran udara didalam ruangan. Perletakan yang tinggi akan membelokkan angin keatas sehingga mengurangi efek pendinginan. Perletakan *inlet* pada ketinggian beberapa kaki dari permukaan lantai memberikan hasil pola yang ideal. Perletakan *inlet* diatas lantai akan mengakibatkan aliran udara menyapu dasar ruangan. Sedangkan penempatan *outlet* tidak berpengaruh pada pola aliran udara.

Ukuran atau dimensi bukaan pada *outlet* sebaiknya lebih besar daripada *inlet*nya untuk memaksimalkan kecepatan angin dalam ruangan. Semakin luas *outlet* maka semakin besar pula kecepatan angin yang bertiup dalam ruangan.

Tipe jendela untuk *inlet* yang digunakan juga menentukan volume dan distribusi udara dalam ruangan. Jendela harus cenderung mengarahkan aliran angin untuk tetap berada pada arah horisontal atau menaikannya ke atas. Jendela jenis *double-hung*, *single-hung* dan *horizontal sliding* tidak mengarahkan angin keatas tetapi memasukkan angin pada jalur horisontal, untuk itu sebaiknya tipe ini diletakkan pada ketinggian dimana aliran angin dibutuhkan. Jenis *casement*, *folding*, dan *pivot* dapat membelokkan angin kekanan atau kekiri, tidak untuk keatas atau kebawah, sebaiknya tipe ini juga diletakkan pada ketinggian dimana aliran angin dibutuhkan. Jenis *projecting*, *awning*, *basement*, *pivot*, dan *jalousie* akan mengarahkan angin keatas atau kebawah kecuali jendela dibuka penuh 90° , sebaiknya diletakkan diatas atau dibawah permukaan dimana dibutuhkan angin. Perlu diperhatikan bahwa jendela akan berperilaku berbeda pada bangunan bertingkat tinggi karena arah angin akan cenderung naik pada kulit bangunan sebelum memasuki ruangan.



Tipe jendela yang berbeda kemampuan mengalirkan udara.

Sumber : Christina E. Mediastika, *Desain Jendela Bangunan Domestik Untuk Mencapai "Cooling Ventilation"* .

Aksesoris Kontrol Tambahan

Overhang dan teritisan yang biasa digunakan untuk melindungi jendela dari radiasi matahari memiliki pengaruh pula terhadap pola angin. Jika faktor ini diabaikan akan menurunkan kualitas penghawaan dalam ruangan. Penelitian akan teritisan banyak melibatkan efek penempatan dan tipenya (padat atau berongga) pada aliran udara. Secara umum hal yang perlu diperhatikan adalah keseimbangan dari tekanan udara pada *inlet* sehingga angin dapat dipaksa masuk ke bawah ruangan, tidak malah naik.

Overhang atau teritisan dapat juga mengarahkan angin kebawah ruangan serta menangkap angin yang berpotensi hilang.

Perencanaan Interior

Pengaturan layout ruangan, partisi, furnitur, dan peralatan interior mempengaruhi pergerakan udara alami dalam bangunan. Hal berikut menggarisbawahi beberapa pertimbangan penting untuk perencanaan interior yang dibutuhkan bagi penghawaan alami:

- kedalaman ruangan memiliki efek marjinal terhadap arus penghawaan selama terdapat aliran antara inlet dan outletnya.
- Ketinggian plafon memiliki pengaruh kecil terhadap pola aliran udara.
- Bentuk ruangan berperan penting dalam hal penempatan inlet dan outlet dalam ruang untuk mendapatkan penghawaan optimal.

Aliran udara dalam ruang tanpa sekat menghasilkan pergerakan udara hampir merata pada setiap sudut ruang. Sebuah sekat yang menghalangi arus udara dari inlet akan mengurangi aliran udara secara signifikan bahkan dapat menciptakan area mati tanpa pergerakan udara. Penempatan sekat yang sejajar dengan arah angin dapat memecah aliran angin. Semakin dekat sekat pada outlet, umumnya penghawaan yang terjadi akan semakin baik.

Bangunan dengan koridor ganda akan mengalami kesulitan dalam mencapai kualitas penghawaan alami yang baik karena akan kekurangan aliran udara. Koridor tunggal dengan bukaan-bukaan kecil memiliki potensi penghawaan alami lebih baik ketika angin bertiup kencang, tetapi juga tidak efektif saat lemah tiupannya. Sedangkan koridor tengah memberikan penghawaan alami baik pada sisi *windward* tetapi buruk pada sisi *leeward* angin.

Koridor dapat digunakan untuk mengarahkan angin kedalam ruangan. Meskipun demikian, koridor akan lebih efektif dipakai membelokkan udara kedalam ruangan yang berdekatan dengan inlet

Kenyamanan Termal

II. 1. 1. Kuantitas Termal

Panas adalah salah satu bentuk energi dalam bentuk pergerakan molekul pada suatu substansi (bahan) atau radiasi di luar angkasa. Sedangkan dingin adalah suatu kondisi dimana energi panas minim atau tidak ada. Jadi dingin bukanlah bentuk energi seperti halnya panas. Energi panas diukur dalam satuan yang sama seperti halnya bentuk energi yang lain, yaitu joule (J). Satuan lain yang sering digunakan adalah kJ (kilojoule = 1000J) dan MJ (megajoule = 1000000J) yang merupakan kelipatan dari joule.

Temperatur atau suhu adalah suatu gejala keberadaan panas dalam suatu substansi (bahan), merupakan ukuran kondisi termal bahan tersebut. Skala derajat Celcius mengambil titik beku air pada tekanan atmosferik normal sebagai titik awal 0°C dan titik didih air sebagai titik 100°C . Sedangkan skala Kelvin mengambil kondisi ketiadaan total energi panas atau nol derajat mutlak sebagai titik awalnya, dengan skala yang sama dengan Celcius tetapi $0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{K}$.

Kapasitas panas spesifik (*specific heat capacity/Shc*) suatu substansi memberikan hubungan antara panas dan temperatur, yaitu jumlah energi panas yang mengakibatkan unit temperatur meningkat pada satu satuan massa suatu bahan, diukur dengan unit satuan J/kg.K atau Wh/kg.K .

Panas spesifik volumetrik (*volumetric specific heat/Shv*) memiliki pengertian yang mirip dengan kapasitas panas spesifik tetapi diukur dengan menggunakan basis satuan volume (m^3) yang lebih banyak digunakan dalam dunia bangunan dan arsitektur. Satuan yang digunakan adalah $\text{J/m}^3\text{K}$.

Kerapatan bahan (*density/den*) adalah jumlah massa per satuan volume bahan, diukur dengan satuan kg/m^3 . Dengan demikian dapat ditarik kesimpulan bahwa; $\text{Shv} (\text{J/m}^3\text{K}) = \text{Shc} (\text{J/kg.K}) \times \text{den} (\text{kg/m}^3)$. Sedangkan volume spesifik (*Specific volume/Spv*) berbanding terbalik dengan density, yaitu volume dari suatu satuan massa bahan tertentu, dengan ukuran unit m^3/kg .

Kapasitas termal (*thermal capacity/Cap*) dari suatu bahan adalah produk dari massa dan kapasitas panas spesifik material tersebut; $\text{kg} \times \text{J}/\text{kg}\cdot\text{K} = \text{J}/\text{K}$.

Panas laten (*latent heat*) suatu bahan adalah jumlah energi panas yang diserap atau dilepaskan pada proses perubahan wujud bahan (cair ke gas atau padat ke cair) setiap unit massa bahan tanpa terjadi perubahan temperatur. Diukur dalam satuan J/kg .

Nilai kalori (*calorific value*) adalah jumlah panas yang dilepaskan oleh bahan bakar atau makanan dengan pembakaran yang sempurna, diukur untuk satuan massa dengan J/kg atau untuk satuan volume dengan J/m^3 .

Prinsip-Prinsip Hukum Termodinamika

Termodinamika adalah cabang ilmu yang mempelajari aliran panas dan hubungannya dengan kerja mekanikalnya.

Hukum pertama termodinamika merupakan prinsip utama dari konservasi energi yang berbunyi bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan kecuali dalam proses sub-atomik, tetapi hanya dapat diubah dari bentuk yang satu ke bentuk yang lain. Panas dan daya dapat saling diubah satu sama lain. Dalam setiap sistem keluaran energi harus sama dengan masukannya, kecuali terdapat komponen penyimpanan +/- didalamnya.

Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa perpindahan energi (panas) dapat berlangsung spontan hanya pada satu arah saja: dari kondisi panas menuju kondisi yang lebih dingin, atau secara umum dari tingkat yang lebih rendah menuju ke tingkat yang lebih tinggi. Hanya dengan masukan energi eksternal sebuah mesin mampu mengalirkan panas ke arah yang berlawanan.

Perpindahan kalor dari suhu tinggi ke suhu yang lebih rendah terjadi dalam tiga bentuk proses, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Besaran aliran kalor tersebut dapat diukur dengan dua cara;

- a) dengan *heat flow rate* (Q), atau *heat flux*, adalah total perpindahan kalor dalam suatu waktu melalui permukaan bahan atau didalam sistem tertentu, diukur dalam satuan J/s atau watt (W).
- b) Dengan *heat flux density* atau kepadatan dari *heat flow rate*, adalah tingkat perpindahan kalor melalui permukaan bahan atau angkasa, dengan satuan W/m^2 . Satuan kelipatan kW (kilowatt = 1000W) sering juga digunakan untuk kedua metode diatas.

Satuan energi lain yang disepakati dan didapatkan dari satuan *heat flux* adalah *watt-hour* (Wh). Merupakan jumlah energi sebesar 1 watt yang disalurkan jika tingkat perpindahan (*flow rate/flux*) dipertahankan selama satu jam. Sehingga $1 Wh = 3600 J = 3,6 kJ$ (*kilojoule*).

Hantaran Kalor atau Konduksi

Konduksi adalah suatu bentuk perambatan kalor antar benda padat, yang disebabkan oleh persebaran pergerakan molekul dua obyek solid yang bersentuhan. Besaran perpindahan kalor secara konduksi tergantung pada empat faktor sebagai berikut:

- a) Luas permukaan yang bersentuhan (A) dimana kalor dapat mengalir, arah perambatan dianggap tegak lurus dengan permukaan benda (m^2)
- b) Ketebalan, atau lebar benda (b), yang merupakan jalur perpindahan kalor (m)
- c) Perbedaan temperatur antara dua titik yang bersentuhan, $dT = T_2 - T_1$ (K)
- d) Karakteristik material, dikenal dengan konduktivitas bahab (cnd), adalah ukuran tingkat hantaran kalor melalui suatu unit area, dengan perbedaan temperatur antara dua titik yang terpisah dengan jarak tertentu, $W.m/m^2K = W/m.K$.

Angka konduktivitas bahan bervariasi antara 0,03 W/m.K pada bahan insulator yang baik dan 400 W/m.K untuk logam konduktor.

Resistivitas (ketahanan termal) berbanding terbalik dengan konduktivitas bahan: $res = 1/cnd$ (m.K/W). Secara umum istilah akhiran '-itas' merupakan properti suatu bahan, sedang akhiran '-tan' adalah properti suatu benda. Resistan suatu benda adalah hasil dari ketebalannya (searah aliran kalor) dan resistivitas

materialnya: $R = b \times res = b / cnd$ ($m \times m.K/W = m^2K/W$). Untuk elemen berlapis-lapis, angka resisten dapat ditambahkan.

Konduktan benda berbanding terbalik dengan resistannya: $C = 1/R$ (W/m^2K), yaitu kuantitas yang digunakan dengan pengaruh perbedaan suhu permukaan, sehingga menimbulkan tingkat hantaran kalor dari permukaan satu ke permukaan yang lain. Persamaan hantaran kalor konduksi adalah: $Q_c = C \times A \times dT$.

Aliran Kalor atau Konveksi

Pengertian sederhana dari konveksi adalah suatu bentuk aliran kalor yang terjadi dari suatu permukaan benda padat menuju benda cair atau gas, berlaku pula sebaliknya. Besaran tingkat aliran kalor secara konveksi bergantung pada tiga faktor:

- luas permukaan yang bersentuhan (A) antara benda padat dan fluida (m^2)
- perbedaan temperatur (dT) antara permukaan bahan dan fluida (K)
- koefisien konveksi (hc), diukur dengan satuan W/m^2K , bergantung pada kecepatan dan kekentalan fluida juga konfigurasi fisiknya, yang akan menentukan apakah bentuk aliran yang terjadi searah atau bergolak (*turbulent*). Nilai koefisien konveksi antara udara dengan rata-rata permukaan bangunan adalah:

$hc = 3.0 W/m^2K$ untuk permukaan vertikal

$hc = 4.3 W/m^2K$ untuk aliran keatas: udara ke plafon dan lantai ke udara

$hc = 1.5 W/m^2K$ untuk aliran kebawah: udara ke lantai, plafon ke udara

Untuk permukaan terekspos angin:

$Hc = 5.8 + 4.1 v$ (dengan v = kecepatan udara dalam m/s)

Jadi persamaan aliran kalor konveksinya menjadi: $Q_{cv} = hc \times A \times dT$

Dalam pengertian yg lebih luas, konveksi dapat termasuk perpindahan kalor yang terjadi dengan mengangkut fluida dari permukaan padat yang satu menuju permukaan padat lain pada jarak tertentu.

Pancaran Kalor atau Radiasi

Radiasi termal merujuk pada bagian merah infra dari spektrum radiasi elektromagnetik, dengan panjang gelombang antara:

- gelombang pendek merah infra: 700 – 2300 nm
- gelombang panjang merah infra: 2300 – 10000 nm

meskipun panjang gelombang lain juga memiliki efek panas.

Spektrum gelombang radiasi terpengaruh oleh suhu. Bahan-bahan pada suhu normal bumi memancarkan gelombang panjang merah infra, sedangkan matahari memancarkan gelombang pendek merah infra, bersama dengan gelombang cahaya dan radiasi ultraviolet.

Radiasi masuk pada permukaan tak tembus cahaya (*opaque*) sebagian diserap, sebagian dipantulkan, tergantung pada kualitas permukaan: *absorptance* (*abs*) dan *reflectance* (*ref*). Hasil penjumlahan keduanya selalu satu: $abs + ref = 1$. Untuk permukaan tembus cahaya (transparan) sebagian lagi mampu diteruskan, tergantung pada transmitan (*trm*) radiasi bahannya. Hal tersebut menyebabkan kualitas bahan bukan lagi merupakan pertimbangan kualitas permukaan saja, akan tetapi juga bergantung pada ketebalan bahan serta kemampuan transmisi (*transmissivity*) material. Dengan demikian : $abs + ref + trm = 1$. Ketiga variabel tersebut dijabarkan dalam pecahan desimal atau bentuk persentase.

Dalam perpindahan kalor radian, tingkat perpindahan kalor bergantung pada perbedaan suhu antara permukaan yang memancarkan dan permukaan yang menerima radiasi, peristiwa tersebut dijabarkan dalam bentuk kualitas permukaan *emittance* (*emm*) dan *absorptance* (*abs*). Pada suhu normal nilai emitan bervariasi antara 0.9 pada material bangunan umumnya dan 0.05 pada permukaan aluminium mengkilap. Nilai absorptan gelombang elektromagnetik matahari beragam mulai dari 0.9 untuk permukaan sangat gelap sampai 0.2 untuk permukaan logam berkilau atau permukaan berwarna putih.

Untuk keperluan perhitungan praktis, digunakan koefisien radiasi (*hr*) dengan ketentuan:

$$hr = 5.7 \times eme \text{ (pada suhu permukaan } 20^{\circ}\text{C)}$$

$$hr = 4.6 \times eme \text{ (pada } 0^{\circ}\text{C)}$$

Dimana e_{me} adalah nilai emitan efektif, nilai rata-rata dari permukaan-permukaan yang memancarkan dan menerima radiasi. Jadi persamaan tingkat pancaran kalor radiasi menjadi: $Q_{rd} = h_r \times A \times \Delta T$

Diagram Psikrometrik

Atmosfer bumi merupakan campuran udara (oksigen dan nitrogen) dengan uap air. Psikrometrik adalah studi mengenai udara lembab dan perubahan-perubahan kondisinya.

Absolute Humidity (AH) disebut juga kelembaban mutlak adalah banyaknya kandungan uap air dalam udara, dalam satuan g/kg, gram uap air per kilogram udara. Udara pada suhu tertentu mampu mengandung uap air hanya dalam jumlah tertentu, jika mencapai titik jenuh dan tidak mampu lagi mengangkut uap air maka disebut *Saturation Humidity* (SH) atau kelembaban maksimal. Dalam diagram psikrometrik kedua faktor tersebut diplotkan berlawanan dengan temperatur bola kering atau *dry bulb temperature* (DBT).

Vapour pressure (pv) atau tekanan uap, yaitu tekanan parsial yang disebabkan oleh uap air dalam atmosfer dan berhubungan sejajar dengan kelembaban mutlak. Diagram psikrometrik memperlihatkan skala tekanan uap paralel dengan skala kelembaban mutlak, dengan satuan kPa (*kilo-Pascal*). Dengan cara yang sama, kelembaban maksimal dapat disejajarkan dengan *saturation vapour pressure* (pvs).

Relative humidity (RH) atau kelembaban nisbi adalah ukuran kandungan kelembaban dalam kondisi atmosferik tertentu, dinyatakan dalam bentuk persentase kelembaban maksimal pada suhu yang sama:

$$RH = 100 \times AH/SH (\%),$$

Pada fisika bangunan biasanya banyaknya uap air dalam udara tidak dihitung dalam konsentrasi (kelembaban nisbi), melainkan sebagai tekanan, yaitu (dihitung dalam Pa) (Ilmu Fisika Bangunan, Heinz Frick):

$$RH = 100 \times p_v/p_{vs} (\%)$$

Garis-garis kelembaban nisbi telah digambarkan pada diagram psikrometrik dan dapat ditentukan dengan pembagian proporsional ordinat titik DBT.

Wet bulb temperature (WBT) diukur dengan hygrometer. Alat tersebut terdiri dari dua termometer, salah satunya berfungsi untuk mengukur DBT dan yang lain ditutup ujung bola pengukur suhunya dengan kain basah. Termometer dengan kain basah ini kemudian diberikan kontak dengan udara baik melalui kibasan manual atau menggunakan kipas angin *built-in*. Peristiwa tersebut menyebabkan terjadi penguapan dari kain basah tadi dan mendinginkan bola ukur termometer, memberikan efek '*wet bulb depression*' sehingga membaca suhu lebih rendah daripada DBT. Jika udara telah jenuh uap air, maka tidak akan terjadi penguapan sehingga pengukuran DBT dan WBT menjadi identik nilainya. Proses penguapan dan tingkat pendinginan bergantung pada kelembaban udara, kemudian dari kedua hasil pengukuran DBT dan WBT nilai kelembaban dapat diketemukan dengan cara menyilangkan garis vertikal DBT dengan garis miring WBT pada diagram psikrometrik.

Spesifik volume (Spv) atau volume spesifik yang berbanding terbalik dengan *density* (kerapatan) suatu campuran uap air dan udara digambarkan dengan garis miring curam pada diagram psikrometrik. Grafik ini sangat berguna untuk mengkonversi kuantitas aliran udara volumetrik menjadi aliran massa dalam perhitungan pengkondisian udara.

Enthalpy (H) adalah kandungan panas dari suatu unit massa dalam atmosfer, diukur dalam kJ/kg, relatif terhadap kandungan panas udara kering pada suhu 0°C .

Sensible heat (H_s) atau panas sensibel adalah kandungan panas yang mengakibatkan peningkatan pada temperatur bola kering. Pada semua temperatur, kandungan panas sensibel udara kering adalah: $H_s = 1.005 \times T$, dimana 1.005 kJ/kg.K adalah kapasitas panas spesifik udara kering.

Latent heat (H_l) atau panas laten adalah kandungan panas yang timbul karena keberadaan uap air dalam atmosfer. Yaitu banyaknya energi panas yang diperlukan dalam proses penguapan cairan dengan kadar tertentu (panas laten

penguapan). *Entalphy* juga digambarkan dalam diagram psikrometrik. Dibutuhkan garis miring ketiga, mirip tapi tidak persis seperti pada garis bola basah. Untuk menghindari kerancuan, maka tidak digambarkan garis melainkan hanya skala eksternal yang dituliskan pada kedua sisinya.

Thermal comfort atau kenyamanan termal masing-masing individu bergantung pada beberapa faktor, mulai dari sensasi termal personal yang dipengaruhi oleh ekspektasi pribadi dan pengaruh-pengaruh psikologi dan sosial. *Thermal neutrality* (T_n) adalah angka temperatur rata-rata yang diambil ketika orang tidak merasa kedinginan dan kepanasan. *Thermal neutrality* banyak dipengaruhi oleh kondisi iklim setempat dimana manusia telah terbiasa olehnya serta berhubungan dengan temperatur rata-rata ruang luar (T_{av}), dengan demikian:

$$T_n = 17.6 + 0.31 \times T_{av}; \text{ dengan syarat } 18.5 < T_n < 28.5^{\circ}\text{C}$$

Jangkauan zona nyaman (kondisi dimana mayoritas manusia merasa nyaman) diambil dengan deviasi kurang lebih 2 K dari *thermal neutrality* jika T_{av} adalah temperatur rata-rata tahunan (atau kurang lebih 1.75 K jika T_{av} adalah rata-rata bulanan).

Sejak lima puluh tahun yang lalu, indeks-indeks termal banyak disusun untuk mengekspresikan angka tunggal efek-efek kombinasi termal setidaknya beberapa dari empat variabel termal yang diketahui. Indeks terbaru saat ini adalah *standard effective temperature* (SET), yang mengkombinasikan efek DBT dan kelembaban udara, ketika MRT (*mean radiant temperature*) sama dengan DBT dan tidak ada pergerakan udara signifikan terjadi. Dalam diagram psikrometrik sampai 14°C garis SET akan bersinggungan langsung dengan garis vertikal DBT, diatas 14°C bersinggungan dengan DBT pada kurva RH 50%, tetapi garis SET memiliki kemiringan sebesar $0.025 \times (\text{DBT} - 14)$ untuk tiap g/kg jarak vertikal.

Zona nyaman dapat digambarkan pada diagram psikrometrik dengan ketentuan:

- 1) menemukan suhu rata-rata tahunan, T_{av}
- 2) menemukan *thermal neutrality* (T_n) dari persamaan diatas
- 3) menggambarkan T_n pada diagram, pada kurva RH 50%
- 4) tandai batas bawah: $L = T_n - 2$ dan batas atas: $U = T_n + 2$ pada kurva RH 50%
- 5) menggambarkan garis SET yang sesuai sebagai batas zona nyaman

6) tandai tepian atas AH pada angka 12 g/kg dan tepian bawah pada 4 g/kg.

Contoh perhitungan :

Jika $T_{av} = 20.7$

Maka $T_n = 17.6 + 0.31 \times 20.7 = 24$

Sehingga batasannya:

$L = 24 - 2 = 22$

$U = 24 + 2 = 26$

Derajat kemiringannya menjadi:

$0.025 \times (22-14) = 0.2 \text{ K/(g/kg)}$ $0.025 \times (26-14) = 0.3 \text{ K/(g/kg)}$

Dengan melihat diagram psikrometrik:

$AH(L) = 9 \text{ g/kg}$

$AH(U) = 11.2 \text{ g/kg}$

Kemudian garis akhir yang melintasi kedua batas atas dan bawah adalah:

$22 + (9 \times 0.2) = 23.8$

$26 + (11.2 \times 0.3) = 29.36$

Zona nyaman ini akan valid untuk orang berpakaian ringan yang sedang bersantai. Bagi aktivitas lebih berat, nilai T_n harus disesuaikan terlebih dahulu:

Untuk aktivitas ringan	(210W): -2 K
Untuk aktivitas sedang	(300W): -4.5 K
Untuk aktivitas berat	(400W): -7 K

Ilmu Matahari

Bumi berputar mengelilingi matahari tidak dalam jarak yang konstan sepanjang tahun oleh karena orbitnya yang berbentuk elips. Jarak terjauh bumi dengan matahari pada lintasannya (*perihelion*) adalah 152 juta kilometer, sedangkan jarak terdekatnya (*aphelion*) adalah 147 juta kilometer. Sumbu kutub bumi tidak tegak lurus terhadap lintasan orbit bumi – matahari, tetapi sedikit miring sejauh $23,5^\circ$. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pergeseran daerah ekuator bumi karena penyimpangan garis edar matahari sepanjang tahun. Sudut ini disebut dengan declination angle atau sudut deklinasi dengan titik balik utara pada 22 Juli, titik tengah katulistiwa pada 21 Maret dan 23 September serta titik balik selatan pada 22 Desember.

Untuk mempermudah pemahaman sistem pergerakan matahari pada bangunan, prinsip Aristoteles yang menganggap bahwa mataharilah yang mengelilingi bumi (*lococentric*) lebih cocok diterapkan. Pada sistem ini letak pengamat dianggap berada di tengah-tengah belahan bumi dan posisi matahari dapat digambarkan dengan cara menentukan sudut:

- *altitude* (ALT): sudut ketinggian matahari berdasarkan bidang datar horisontal (permukaan bumi) dengan titik puncak 90° ,
- *azimuth* (AZI): ukuran sudut pada bidang datar horisontal yang mengindikasikan arah utara (0°), timur (90°), selatan (180°), barat (270°), sampai utara kembali (360°) searah jarum jam.

Alat terapan untuk menggambarkan pergerakan matahari disebut diagram jalur matahari (*sun path diagram / solar chart*). Belahan permukaan bumi diilustrasikan dengan sebuah lingkaran utama dan dianggap sebagai kaki langit. Angka-angka sudut azimuth dituliskan di sepanjang tepian lingkaran sedangkan altitud digambarkan dengan rangkaian lingkaran-lingkaran konsentris dengan angka 90° sebagai pusatnya.

Terdapat beberapa metode untuk menggambarkan diagram matahari. Metode proyeksi paralel atau *orthographic* adalah yang paling sederhana, tetapi diagram ini menggambarkan lingkaran altitud yang terlalu berdekatan pada kaki langit. Metode equidistant digunakan secara umum di Amerika, tetapi diagram ini tidak menggambarkan proyeksi geometrik yang sesungguhnya. Metode yang paling banyak digunakan adalah proyeksi stereografik (*stereographic projection*), yaitu proyeksi radial dengan pusatnya yang persis berada vertikal di bawah titik pengamat, pada jarak yang sesuai dengan jari-jari lingkaran kaki langit (titik terendah).

Garis-garis jalur matahari digambarkan seturut garis lintang, titik-titik balik, titik katulistiwa dan tanggal-tanggal diantaranya. Pada daerah ekuator bentuk diagram akan simetris, sedangkan pada posisi garis lintang yang lebih tinggi garis matahari akan bergeser menjauh dari ekuator. Pada daerah kutub, jalur matahari akan berbentuk lingkaran konsentris (atau spiral naik turun) untuk setengah tahun pertama dan titik baliknya terdapat pada titik terendah lingkaran, sedangkan pada setengah tahun berikutnya garis edar matahari berada dibawah kaki langit. Garis-

garis penanggalan dipotongkan dengan garis-garis jam. Garis vertikal pada pusat mengindikasikan siang hari. Perlu diperhatikan bahwa pada tanggal *equinox* (lama waktu siang dan malam hari sama) matahari terbit pada pukul 6.00 dan tenggelam pada pukul 18.00.

Radiasi Matahari

Permukaan matahari memiliki suhu sekitar 6000°C dengan puncak spektrum emisi radiant pada panjang gelombang sekitar 550 nm, tetapi kemudian tersebar pada 200 nm sampai 3000 nm. Menurut persepsi manusia, radiasi matahari dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- a) radiasi ungu ultra, 200 - 380 nm, menyebabkan photochemical effects seperti *bleaching* dan *sunburn*,
- b) cahaya, atau *visible radiation*, 380 (ungu) -700 nm (merah),
- c) radiasi merah infra gelombang pendek, 700 – 3000 nm, disebut juga radiasi termal yang membawa panas yang juga menyebabkan relatif sedikit *photochemical effects*.

Kuantitas radiasi matahari dapat diukur dengan dua cara:

- a) *irradiance*, dalam satuan W/m^2 (istilah lama menggunakan '*intensity*'), yaitu *instantaneous flux* atau kepadatan aliran energi (*energy flow density* atau *power density*).
- b) *Irradiation*, dalam J/m^2 , atau Wh/m^2 , pernyataan dari kuantitas energi dalam suatu waktu tertentu (jam, hari, bulan atau tahun).

Di luar angkasa, nilai rata-rata tahunan irradiance matahari adalah $1353 \text{ W}/\text{m}^2$ yang disebut *solar constant*, diukur pada sudut datang tegak lurus arah radiasi matahari (normal incidence). Besaran radiasi ini dapat berubah-ubah tergantung pada kuat pancaran matahari dan perubahan jarak bumi – matahari. Jari-jari bumi sepanjang 6300 km dan luas permukaannya $124 \times 10^{12} \text{ m}^2$ mendapatkan energi radiasi sebanyak $169 \times 10^{15} \text{ W}$ secara terus menerus. Sekitar 25% dipantulkan dan 25% yang lain diserap oleh atmosfer, sehingga tersisa 50% energi radiasi yang mencapai permukaan bumi. Pada akhirnya seluruh energi dipancarkan kembali oleh permukaan bumi untuk mencapai kondisi kesetimbangan (*equilibrium*).

Perbedaan tingkat irradiation antar lokasi di muka bumi terjadi karena adanya keragaman yang berbeda-beda dalam tiga hal:

- a) *angle of incidence* (sudut jatuh pada bidang datar): menurut aturan kosinus, besar radiasi yang diterima oleh suatu permukaan adalah hasil perkalian antara besar radiasi tegak lurus dengan nilai kosinus sudut datangnya,
- b) *atmospheric depletion* (faktor atmosfer lokal), faktor pengali dengan nilai bervariasi antara 0,2 dan 0,7, disebabkan karena ketika ketinggian matahari (*altitude*) rendah energi radiasi harus menempuh jarak yang lebih jauh dalam atmosfer untuk mencapai permukaan bumi, terutama jika melalui lapisan yang berpolusi tinggi, tebal dan lebih rendah. Peristiwa ini juga dipengaruhi oleh perbedaan lingkup awan dan polusi udara,
- c) *duration of sunshine* (lama matahari bersinar), panjangnya waktu siang hari (dari matahari terbit sampai tenggelamnya), yang bergantung pada lintang geografis dan lokal topografinya.

Energi radiasi tertinggi yang diterima permukaan bumi adalah sekitar 1000 W/m² dan total radiasi tahunan berbeda-beda tiap lokasinya, sekitar 400 kWh/m².tahun didekat kutub sampai lebih dari 2500 kWh/m².tahun di Gurun Sahara atau daratan barat laut Australia.

Daerah katulistiwa menerima energi radiasi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan daerah kutub. Perbedaan tersebut merupakan faktor penyebab utama fenomena atmosfer bumi (angin, formasi awan, dan perpindahan-perpindahan yang lain), yang membuat terjadinya mekanisme pertukaran panas dari katulistiwa ke kutub. Tanpa adanya sistem tersebut, suhu rata-rata kutub utara akan lebih dingin 23^oC dan katulistiwa akan lebih panas 6^oC dibandingkan saat ini.

Global irradiance (G) yang jatuh pada permukaan tertentu terdiri dari dua komponen:

G_b = *beam*, atau komponen langsung, jatuh pada permukaan bumi segaris lurus dengan matahari (merupakan kuantitas vektorial dan terpengaruh oleh besar sudut datangnya).

G_d = komponen tersebar, yaitu radiasi yang disebarkan oleh atmosfer dan jatuh ke permukaan dari kubah langit (bergantung pada seberapa jauh kubah langit terlihat secara langsung oleh permukaan tersebut).

Selain itu, komponen lain yang dapat diperhitungkan adalah

G_r = komponen terpantul, pada permukaan bukan horisontal, contohnya radiasi terpantul oleh tanah atau permukaan lain yang berdekatan.

Iklm

Cuaca adalah rangkaian peristiwa atmosferik yang terjadi pada waktu dan tempat tertentu. Iklim dapat didefinisikan sebagai hasil integrasi dari kondisi cuaca jangka waktu, dan karakteristik dari lokasi geografis tertentu. Dalam skala global, iklim terbentuk oleh perbedaan masukan panas matahari dan pancaran panas yang hampir seragam pada permukaan bumi. Pergerakan massa udara dan awan yang membawa uap air di atmosfer bumi terjadi karena perbedaan suhu serta dipengaruhi oleh gaya Coriolis.

Elemen-elemen iklim yang utama dan diukur secara reguler oleh stasiun-stasiun meteorologi adalah:

- 1) Suhu udara (DBT), diukur dibawah bayangan dan biasanya diletakkan dalam kotak berventilasi, disebut *Stevenson screen*, pada ketinggian 1,2 – 1,8 m diatas permukaan tanah.
- 2) Kelembaban udara, dapat didapatkan melalui pengukuran RH, AH, WBT atau suhu titik embun udara.
- 3) Pergerakan udara atau angin, umumnya diukur pada ketinggian 10 m dari permukaan tanah di kawasan terbuka, lebih tinggi di kawasan terbangun untuk menghindari halangan. Elemen yang diukur adalah kecepatan dan arah angin.
- 4) Curah hujan, adalah banyaknya hujan, es, salju dan embun, diukur dalam satuan mm per unit waktu (hari, bulan, tahun).
- 5) Lapisan awan (*cloud cover*), didapatkan dari pengamatan visual dan digambarkan sebagai pecahan bola bumi yang tertutup awan.
- 6) Lama matahari bersinar, adalah periode dimana matahari bersinar cerah (ketika terjadi bayangan dengan jelas), diukur dengan

perekam sinar matahari yang membakar secarik kertas, diekspresikan dalam jam per hari atau bulan.

- 7) Radiasi matahari, diukur dengan *pyranometer (solarimeter)* pada permukaan horisontal yang tidak terhalang bayangan dan direkam baik dalam perubahan menerus *irradiance* (W/m^2), atau menggunakan integrator elektronik sebagai *irradiance* selama unit waktu tertentu (Wh/m^2).

Terdapat empat unsur pokok iklim yang langsung berhubungan dengan kenyamanan termal pada perancangan bangunan, yaitu suhu udara, kelembaban, radiasi dan pergerakan udara.

Klasifikasi Iklim.

Terdapat banyak variasi akan sistem klasifikasi iklim yang digunakan untuk bermacam-macam keperluan. Khusus pada lingkup perancangan bangunan, klasifikasi iklim disederhanakan menjadi empat tipe. Tipe-tipe tersebut dibedakan berdasarkan sifat-sifat alamnya akan permasalahan termal pada lokasi tertentu.

1. Iklim dingin, dengan permasalahan utamanya yaitu minimnya panas (*underheating*) atau pemusnahan energi panas pada seluruh bagian bangunan sepanjang tahun.
2. Iklim sedang, terdapat variasi musiman antara kelebihan dan kekurangan panas tetapi tidak berlebihan.
3. Iklim panas kering, dimana permasalahan utama adalah kelebihan panas (*overheating*), tetapi udara kering menyebabkan pendinginan evaporasi dapat dimanfaatkan secara maksimal. Umumnya terdapat perbedaan suhu udara yang ekstrim antara siang dan malam hari.
4. Iklim panas lembab, dimana panas tidak terlalu tinggi seperti pada iklim panas kering, tetapi iklim ini memiliki tingkat kelembaban yang tinggi sehingga menghambat potensi pendinginan evaporasi. Perbedaan suhu udara siang dan malam hari kecil.

Data Klimatik

Kebutuhan minimum untuk data iklim yang mencukupi bagi keperluan analisis performa termal umumnya adalah:

- Suhu udara : rata-rata suhu maksimal harian per bulan ($^{\circ}\text{C}$)
 rata-rata suhu minimal harian per bulan ($^{\circ}\text{C}$)
 distribusi simpangan standar
- Kelembaban : kelembaban relatif pagi hari (dalam %)
 kelembaban relatif sore hari (dalam %)
- Curah hujan : total bulanan (mm)
- Radiasi matahari : total rata-rata harian per bulan (Wh/m^2)

Degree days adalah konsep klimatik yang memiliki arti akumulasi defisit atau kelebihan suhu udara dibawah atau suhu batas kenyamanan. Merupakan hasil perkalian antara defisit atau kelebihan suhu dengan lama waktu kejadiannya. Pengertian tersebut dapat lebih jelas digambarkan dalam grafik suhu menerus, dengan luasan kurva dibawah atau diatas garis batas nyaman yang telah ditentukan. Konsep ini sangat berguna untuk memperkirakan kebutuhan pemanasan atau pendinginan per bulan atau tahunnya.

Perilaku Termal pada Bangunan

Pendekatan Steady-state

Sebuah bangunan dapat dianggap sebagai suatu sistem termal, dengan rangkaian masukan dan keluaran panas sebagai berikut:

- Q_i – *internal heat gain*
- Q_c – *conduction heat gain or loss*
- Q_s – *solar heat gain*
- Q_v – *ventilation heat gain or loss*
- Q_e – *evaporative heat loss*

Keseimbangan termal tercapai ketika seluruh hasil akumulasi aliran panas adalah nol:

$$Q_i + Q_c + Q_s + Q_v + Q_e = 0$$

Jika hasil persamaan tersebut lebih dari nol, maka suhu ruangan naik. Sebaliknya jika hasilnya kurang dari nol, maka suhu ruangan turun.

Internal gains timbul dari panas tubuh penghuni, perabot elektronik dan lampu. Panas tubuh manusia bervariasi tergantung pada jenis aktivitas yang dilakukannya. Lampu dan alat elektronik memproduksi panas yang berasal dari daya konsumsi totalnya (W) selama kurun waktu penggunaan (Wh).

Hantaran kalor resistan dari suatu lapisan bahan adalah $R = b/\text{cond}$, yaitu ketebalan bahan dibagi angka konduktivitas. Bagi elemen bangunan berlapis, angka resistan seluruh lapisan harus dijumlahkan. Hasil perbandingan terbalik dari penjumlahan tersebut merupakan angka konduktan (C) elemen, akan tetapi permukaan bahan memiliki tahanan (udara menuju permukaan bahan dan permukaan bahan menuju udara) tersendiri yang harus ditambahkan dalam penjumlahan. Perbandingan terbalik dari tahanan permukaan tersebut adalah konduktan permukaan (h) yang merupakan hasil penjumlahan komponen konvektif (h_c) dan radiatifnya (h_r). Pada masing-masing kasus, tahanan permukaan adalah:

$$R_s = 1/h = 1/(h_c + h_r) \quad (\text{dalam } m^2K/W)$$

Kemudian tahanan udara luar – udara dalam suatu elemen menjadi

$$R_{aa} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{so}$$

Kebalikan dari persamaan diatas adalah transmittan termal udara luar – udara dalam, umum dikenal sebagai *U-value* (W/m^2K).

Hantaran kalor melalui suatu elemen adalah hasil dari nilai *U-value* dan luasannya. Dalam seluruh elemen jika keduanya dijumlahkan akan didapatkan *specific conduction heat flow rate* bangunan:

$$q_c = \text{Sum } [A \times U] \quad (m^2 \times W/m^2K = W/K)$$

Persamaan tersebut merupakan tingkat hantaran kalor konduksi yang melalui seluruh kulit bangunan dengan perbedaan suhu $dT = 1 K$ antara ruang dalam dan ruang luar.

Tingkat hantaran kalor konduksi total sesungguhnya pada bangunan menjadi:

$$Q_c = q_c \times dT \text{ atau } \text{Sum } [A \times U] \times dT \quad (W/K \times K = W)$$

Dengan $dT = T_o - T_i$, yaitu perbedaan suhu antara ruang luar dan ruang dalam. Q_c akan negatif jika terjadi kehilangan panas, dan positif jika mendapatkan panas.

Solar heat gain pada permukaan-permukaan tembus dan kedap cahaya diperlakukan berbeda. Jatuhnya *global irradiance* (W/m^2) pada permukaan bahan harus diketahui terlebih dahulu.

Pada bahan tembus cahaya (jendela), *solar gain* adalah hasil dari radiasi global, luas jendela dan *solar gain factor* (sgf). Hasilnya merupakan pecahan desimal memperlihatkan bagian radiasi yang mencapai ruang dalam. Dalam bahan kaca, beberapa bagian dari radiasi matahari diteruskan (*transmitted*) melalui kaca, bagian lain dipantulkan (*reflected*), dan sisanya diserap (*absorbed*) dalam badan kaca. Peristiwa tersebut akan memanaskan kaca, sehingga kaca memancarkan kembali sebagian panas itu keluar dan ke dalam ruangan melalui proses radiasi kembali dan konveksi. *Solar gain factor* (sgf) adalah jumlah dari transmisi radiasi langsung dan hasil pemanasan kaca ke dalam bangunan.

Dengan demikian persamaan solar gain melalui jendela adalah : $Q_s = A \times G \times \text{sgf}$

Untuk bahan tak tembus cahaya (opaque), solar heat input dihitung dengan konsep suhu *sol-air* dengan penjelasan sebagai berikut:

Input kalor radiasi pada suatu permukaan bergantung pada daya serapnya (*absorptance*);

$$Q_{in} = G \times A \times \text{abs}$$

Input kalor tersebut akan menaikkan suhu permukaan (T_s) yang menyebarkan panas ke lingkungannya. Kehilangan panas ini dipengaruhi oleh konduktan permukaan (h)

$$Q_{loss} = A \times h \times (T_s - T_o)$$

Ketika suhu permukaan naik, kondisi kesetimbangan akan tercapai ketika

$$Q_{in} = Q_{loss}$$

$$G \times A \times \text{abs} = A \times h \times (T_s - T_o) \text{ dan kemudian suhu akan stabil}$$

Kemudian T_s dapat didapatkan dengan

$$\begin{aligned} T_s &= T_o + G \times \text{abs} / h && \text{atau} \\ &= T_o + G \times \text{abs} \times R_{so} && (\text{dengan } 1/h = R_{so}) \end{aligned}$$

Persamaan tersebut mengabaikan aliran kalor dari permukaan menuju badan bahan, menunjukkan bahwa itu bukan suhu permukaan sesungguhnya; ini

adalah imajinasi suhu *sol-air* yang merupakan gaya utama penyebab terjadinya aliran kalor.

Untuk permukaan yang terekspos langit (atap), faktor emisi pancaran radiasi harus dimasukkan dalam persamaan suhu *sol-air*:

$$T_s = T_o + (G \times \text{abs} - E)/h \text{ atau } T_o + (G \times \text{abs} - E) \times R_{so}$$

Emisi pancaran umumnya diambil sebagai $E = 90 \text{ W/m}^2$ untuk kondisi langit cerah dan 20 W/m^2 ketika langit berawan. Pada dinding, faktor emisi demikian tidak diperlukan karena berhadapan langsung dengan permukaan lain bersuhu mirip.

Akan lebih tepat dilakukan pemisahan istilah suhu *sol-air* menjadi suhu udara dan suhu berlebih *sol-air* (dT_e , dalam K), merupakan suhu ekuivalen dari solar heat input yang berada diatas efek suhu udara. Efek suhu udara dievaluasi dengan persamaan konduksi (Q_c), menggunakan $dT = T_o - T_i$ seperti di atas kemudian aliran kalor tambahan disebabkan oleh radiasi matahari menjadi

$$Q_s = q_c \times dT_e$$

$$\begin{array}{ll} \text{dengan} & dT_e = (G \times \text{abs} - E) \times R_{so} \quad \text{untuk atap} \\ \text{dan} & dT_e = G \times \text{abs} \times R_{so} \quad \text{untuk dinding} \end{array}$$

Terdapat kemungkinan bahwa Q_c yang melalui suatu bahan bernilai negatif, sedangkan Q_s positif.

Aliran Kalor Ventilasi

Penghawaan bangunan dan infiltrasi udara mengakibatkan perpindahan kalor, contohnya dalam bangunan yang panas udara hangat digantikan dengan udara luar yang dingin. Jika tingkat penghawaan (*volume flow rate*, v_{fr}) diketahui, maka *specific ventilation heat flow rate* bangunan dapat didapatkan dengan :

$$q_v = 1200 \times v_{fr}$$

dimana $1200 \text{ J/m}^2\text{K}$ adalah angka kapasitas kalor volumetrik udara lembab.

Dalam praktiknya seringkali hanya diketahui jumlah pertukaran udara dalam ruangan tiap jamnya (*Air Change Rate per Hour*, N), untuk itu dapat diketahui tingkat penghawaannya dengan persamaan:

$$v_{fr} = N \times V / 3600 \quad (\text{m/s}^2)$$

dimana V adalah volume ruangan dalam bangunan (m^3)

dengan:

$$q_v = 0,33 \times N \times V$$

dimana 0,33 adalah $1200/3600$

Infiltrasi udara pada rumah terbangun yang kurang baik dapat memiliki angka $N = 3$ kali pertukaran udara per jam, sedangkan pada pembangunan yang baik dapat berkurang menjadi $N = 0,5$. Agar didapatkan udara segar dibutuhkan tingkat penghawaan dengan $N = 1$ untuk ruangan berpenghuni, $N = 10$ untuk dapur (ketika digunakan) serta lebih dari $N = 30$ untuk industri atau dapur restoran.

Tingkat aliran kalor penghawaan sendiri akan menjadi

$$Q_v = q_v \times dT \quad \text{dimana } dT = T_o - T_i$$

Pada praktiknya q_c dan q_v sering ditambahkan untuk mendapatkan tingkat aliran kalor spesifik bangunan

$$q = q_c + q_v$$

kemudian dikalikan dengan dT untuk mendapatkan tingkat aliran kalor keseluruhan

$$Q = q \times dT$$

Evaporation heat loss adalah pendinginan evaporatif dan dapat dianggap sebagai bagian dari sistem pasif, contohnya dengan menggunakan kolam air pada atap atau pada courtyard, atau penyemprotan air di permukaan genting atau permukaan lain. Saat penguapan air terjadi dalam ruang tertutup, terjadilah penurunan suhu udara (DBT) seiring dengan bertambahnya kelembaban dan konten panas latennya, dengan kata lain penguapan tersebut mengubah panas sensibel menjadi panas laten dalam ruangan. Sedangkan konten panas total sistem tersebut tidak berubah, disebut dengan '*adiabatic*'.

Secara tidak langsung, evaporation loss terjadi ketika terdapat proses penguapan dalam suatu ruangan yang adiabatik, kemudian kelembaban yang timbul dibuang keluar oleh sistem penghawaan. Proses ini dikenal sebagai 'transfer massa' dan harus dipertimbangkan dalam perhitungan pengkondisian udara.

Jika tingkat penguapan (evr , dalam kg/h) diketahui, heat loss yang terjadi adalah

$$Q_e = (2400/3600) \times evr = 666 \times evr \text{ (kW)}$$

Dimana 2400 kJ/kg adalah panas laten dari penguapan air.

Envelope load. Ketiga macam kuantitas aliran kalor diatas: Q_c , Q_s , dan Q_v sering dimasukkan dalam istilah yang lebih umum yaitu *envelope load* (beban kulit bangunan) karena dipengaruhi oleh kulit bangunan, elemen pelingkup luar bangunan.

Pengaruh lingkungan terbesar yang mengakibatkan aliran kalor adalah suhu udara dan radiasi matahari. Pada seluruh elemen termasuk jendela, hantaran kalor konduksi oleh perbedaan suhu udara diungkapkan dalam satu persamaan. Pengaruh radiasi matahari dipisahkan untuk jendela dan elemen tak tembus cahaya. Dengan demikian rangkuman seluruh persamaan matematis yang digunakan dalam perhitungan aliran kalor steady state adalah:

	SUHU UDARA		RADIASI MATAHARI
ventilasi	seluruh elemen	elemen opaque	jendela
$Q_v = q_v \times dT$	$Q_c = q_c \times dT$	$Q_{so} = q_c \times dT_e$	$Q_{sw} = A \times G \times sgf$
$q_v = 1200 \times vfr$	$q_c = \text{Sum [AxU]}$	$q_c = \text{Sum [AxU]}$	
$= 0,33 \times V \times N$	$dT = T_o - T_i$	$dT_e = G \times abs \times R_{so}$	
		atau $(G \times abs - E) \times R_{so}$	
	$Q = (q_c + q_v) \times dT + Q_{so} + Q_{sw}$		

Periodic Heat Flow

Seperti yang telah diungkapkan sebelumnya, aliran kalor melalui suatu bahan ditentukan oleh *air-to-air transmittance* atau U-value nya. Merupakan perbandingan terbalik dari air-to-air resistance, yang adalah hasil penjumlahan dari lapisan-lapisan permukaan dan bahan. Angka resistan (R) yang besar menandakan bahan insulator yang baik. Terdapat tiga jenis insulasi, yaitu:

- a) Insulasi reflektif, digunakan jika jenis perpindahan kalor yang terjadi sebagian besar berupa pancaran (radiasi) seperti pada rongga bahan

atau ruang loteng. Alumunium foil yang berkilauan memiliki angka emitan dan absorptan yang rendah sehingga merupakan insulator reflektif yang baik. Permukaan reflektif yang bersentuhan langsung dengan bahan lain akan tidak berfungsi karena aliran kalor berubah jenis menjadi konduksi.

- b) Insulasi resistif (tahan), dari semua jenis material yang ada, udara memiliki konduktansi termal yang paling rendah: $0,025 \text{ W/m.K}$ selama diam tidak bergerak. Jika terjadi pergerakan, maka aliran kalor konveksi akan terjadi. Inti dari insulasi tahan adalah menjaga agar udara tidak berpindah, memecah-mecahnya dalam sel-sel kecil dengan bahan yang minimal. Bahan seperti ini sering disebut sebagai 'bulk insulation'. Bahan terbaik memiliki struktur busa yang terdiri dari sel-sel udara tertutup dipisahkan oleh banyak gelembung atau membran yang sangat tipis, dapat juga terdiri dari bahan berserat dengan udara terkurung antar serat-seratnya.
- c) Insulasi kapasitif, Kedua jenis insulasi sebelumnya (reflektif dan resistif) langsung bereaksi pada perubahan suhu. Saat terjadi input panas pada suatu permukaan seketika itu juga output panas pada permukaan sebaliknya terjadi, walaupun dalam tingkat tertentu. Hal tersebut tidak berlaku pada jenis insulasi kapasitif.

Kapasitas termal bahan adalah hasil dari massa dan kapasitas panas spesifik bahan. Untuk kondisi steady state ketika suhu ruang dan luar ruang tetap, tidak terjadi pengaruh pada aliran kalornya, faktor yang menentukan hanyalah nilai U-value. Contohnya sebuah tembok bata setebal 22 cm akan menghantarkan panas sama sebesar plat polystyrene 1 cm. Akan tetapi pada kenyataannya, meski suhu udara dalam ruangan dapat dianggap konstan, suhu luar selalu berubah-ubah sesuai siklus 24 jam seharinya. Oleh karena siklus harian ini selalu berulang dengan intensitas yang hampir sama, maka peristiwa tersebut dinamakan aliran kalor periodik. Pada kondisi tertentu tembok bata 22 cm akan memiliki sifat hantaran kalor berbeda dengan polystyrene 1 cm.

Ketika panas mulai masuk melalui salah satu sisi tembok tebal, partikel lapisan pertama menyerap sedikit panas sebelum panas yang

ada berpindah ke lapisan berikutnya. Peristiwa ini menyebabkan efek tunda aliran kalor dan sejumlah panas akan disimpan dalam tembok. Simpanan panas ini kemudian akan dilepaskan keluar dalam waktu tunda tertentu setelah tidak ada panas yang diterima lagi. Fenomena tersebut dikenal sebagai efek massa.

Pada aliran kalor periodik, dikenal dua macam tambahan sifat pada tembok tebal yaitu:

1. *time lag* (tlg), yaitu penundaan waktu puncak aliran kalor pada konstruksi tertentu diluar waktu pucak penerimaan panas pada tembok dengan massa termal nol, diukur dengan satuan jam.
2. *decrement factor* (dcr), atau pengurangan amplitudo, yaitu rasio deviasi puncak keluaran panas dari rerata aliran kalor dengan yang terjadi pada massa termal nol.

Aliran kalor periodik dapat diukur pada setiap waktu (t) sehari dalam dua bagian:

1. aliran rerata harian: mQ_c
2. deviasi dari perbedaan rerata aliran pada jam ini: sQ_{c_t}

$$mQ_c = q_c \times mdT$$

dimana mdT adalah rerata perbedaan suhu: $mT_s - T_i$, yaitu rerata suhu sol-air dalam periode 24 jam, tanpa memperhitungkan suhu dalam ruang yang dianggap konstan.

$$sQ_{c_t} = q_c \times dcr \times (T_{s_{t-tlg}} - mT_s)$$

dimana $T_{s_{t-tlg}}$ = jam waktu tunda suhu sol-air sebelum waktu t diperhitungkan, contohnya jika perhitungan dilakukan untuk jam 14.00 dengan waktu tunda = 5 jam, maka T_s diambil dari jam 9.00.

Maka tingkat aliran kalor pada waktu t menjadi:

$$Q_{c_t} = mQ_c + sQ_{c_t}$$

Keuntungan dari insulasi kapasitif (efek massa) akan maksimal pada iklim dengan variasi suhu diurnal yang besar.

Overall Thermal Transfer Value (OTTV)

OTTV (*Overall Thermal Transfer Value*, Harga Perpindahan Termal Menyeluruh) adalah angka yang menunjukkan perolehan panas akibat radiasi matahari yang melewati per meter persegi luas selubung bangunan. OTTV diperlukan sebagai pedoman perancangan agar diperoleh desain yang hemat energi. Semakin kecil OTTV, semakin kecil panas matahari yang masuk ke dalam bangunan dan menjadi beban penyejukan (*cooling loads*) sehingga kerja AC semakin ringan. Hal ini berarti energi yang diperlukan untuk menyejukkan bangunan menjadi semakin kecil. Setiap negara mempunyai standar sendiri. Untuk atap, terdapat istilah RTTV (*Roof Thermal Transfer Value*). Di Indonesia, OTTV untuk dinding luar bangunan tidak boleh lebih dari 45 W/m^2 .

Predicted Mean Votes (PMV)

Simulasi PMV

PMV merupakan index yang dikenalkan oleh *Professor Fanger* dari *University of Denmark* yang mengindikasikan sensasi dingin (*cold*) dan hangat (*warmth*) yang dirasakan oleh manusia pada skala +3 sampai -3. PMV berhubungan dengan 6 parameter dan merupakan nilai rata-rata yang menggambarkan bagaimana yang dirasakan oleh orang banyak mengenai *cold* dan *warmth*. Perbedaan individual dihubungkan dengan hubungan antara PMV dan PPD (*Predicted Percentage of Discomfort*)

Profesor Fanger bekerja dengan lebih dari 1300 orang dari dua jenis kelamin, ras dan usia yang bervariasi, serta dari berbagai bagian di dunia. Fanger mengumpulkan data dari tiap individu dengan menjalani test di laboratorium lingkungan dengan 6 parameter yang berbeda. Pada waktu yang sama, dia melihat mekanisme keseimbangan panas pada tubuh manusia dan memastikan bahwa ada 7 cara untuk tubuh kehilangan energi panas setelah tubuh dibangkitkan dari makanan yang diambil: $M = \text{Metabolism (W/m)}$, $W = \text{External Work, equal to zero from most}$

metabolism, I_{cl} = Thermal Resistance of clothing (*clo*), F_{cl} = The ratio of the surface of the closed body to the surface area of the nude body (*N.D.*) , T_a = Air temperature ($^{\circ}C.$) , T_r = the mean radiant temperature ($^{\circ}C.$) dan V_{air} = Relative air velocity (*m/s*)

Hasil dari sudi tersebut, *Prof. Fanger* merumuskan persamaan PMV dan menentukan konstanta yang digunakan dalam persamaan dari kumpulan data melalui eksperimen yang melibatkan banyak orang. Persamaan PMV didesain untuk aplikasi yang spesifik untuk manusia. Jadi PMV (*Predicted Mean Vote*) merupakan sebuah index yang memperkirakan nilai rata-rata vote kelompok besar manusia pada 7 point skala termal. Jika PMV bergerak dari 0 ke arah yang lain, maka PPD meningkat. Maka diharapkan menjaga PMV dekat dengan 0. Persamaan telah dikembangkan untuk menghitung PMV berdasar pada suhu dan RH (*Relative Humidity*), yang juga diperhitungkan faktor psikologis dan waktu pencahayaan.

Elemen Yang Berpengaruh Pada PMV

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

1. Parameter lingkungan:

Parameter yang digunakan dalam pengukuran dengan *PMV* adalah : *air temperature, mean radiant temperature, air velocity dan partial water vapour pressure (relative humidity)*.

2. Tingkat Aktivitas, mempengaruhi nilai metabolis

Metabolisme adalah energi yang dikeluarkan pada proses oksidasi dalam tubuh manusia yang tergantung pada aktivitas otot. Normalnya, seluruh aktivitas otot diubah menjadi panas dalam tubuh, tapi sepanjang pekerjaan fisik yang keras pendistribusian ini bisa jatuh sampai 75%. Misalnya ketika berjalan ke atas bukit, energi disimpan di dalam tubuh pada energi potensial.

Metabolisme diukur dalam MET (1 MET = 58 W/m² permukaan tubuh). Manusia dewasa normal memiliki permukaan 1,7 m², dan orang dalam

keyamanan termal dengan tingkat aktivitas 1 MET akan memiliki *heat loss* kira-kira 100 W. Dalam menilai tingkat metabolisme, penting untuk menggunakan rata-rata aktivitas manusia yang telah ditunjukkan dalam 1 jam terakhir .

3. *Clothing level*

Pakaian mengurangi pelepasan panas tubuh. Karena itu, pakaian diklasifikasikan berdasarkan pada nilai insulasinya. Satuan yang biasa digunakan untuk pengukuran insulasi pakaian adalah satuan Clo. Satuan yang lebih teknis adalah $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ juga sering digunakan ($1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$). Nilai Clo bisa dihitung dengan menambahkan nilai Clo pada setiap pakaian (www.innova.dk).

Mekanisme PMV

Persamaan PMV untuk *thermal comfort* merupakan *steady-state model*. Ini erupakan persamaan empiris untuk memperkirakan *mean vote* pada urutan kategori skala *thermal comfort* dari populasi manusia. Persamaannya menggunakan *steady-state heat balance* untuk tubuh manusia dan mendalilkan hubungan antara deviasi dari beban minimum pada mekanisme penerimaan *heat balance* dan *thermal comfort vote*. Semakin besar bebannya, maka semakin menyimpang *comfort vote* dari 0.

Persamaan PMV mengandung istilah yang berhubungan dengan:

- Fungsi pakaian
- Fungsi aktivitas
- Variabel lingkungan; *air temperature, mean radiant temperature, relative air speed, vapor pressure of water vapor*.

Kelebihan penggunaan PMV

Indeks PMV memiliki parameter yang paling lengkap. Dia mempertimbangkan 6 parameter dan memiliki indeks pembanding ketidaknyamanan, yaitu PPD. Jadi sudah dipertimbangkan akan adanya berapa persen orang yang tidak merasa sesuai

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

Dalam percobaan kenyamanan termal dengan persamaan *Fanger* telah dibuktikan dengan sukses. Semua eksperimen menunjukkan bahwa kenyamanan berhubungan dengan suhu kulit yang merasakan dan bukan dengan variable lingkungan atau pakaian. Eksperimen juga menunjukkan bahwa untuk pekerjaan yang tetap dan pakaian yang ringan mengantar pada suhu yang diinginkan mendekati 25,6 °C diprediksi oleh persamaan *Fanger*. Tidak ada efek dari umur, jenis kelamin, ras, dan lain-lain. Perbedaan dalam suhu yang diinginkan lebih sering mengacu pada perbedaan pakaian.

Kelemahan Penggunaan PMV

Terdapat masalah pada persamaan keseimbangan panas milik Fanger, yaitu bahwa efek kecepatan udara (*airspeed*) diperhitungkan hanya dalam hal pergantian panas, sedangkan efeknya pada evaporasi keringat tidak diikutsertakan dalam rumus keseimbangan panas. Konsekuensinya, pada suhu hangat dan kelembaban yang diberikan, ketika pergantian panas kecil, PMV akan memiliki nilai yang hampir sama pada kecepatan angin yang berbeda. Titik ini membatasi kemampuan rumus Fanger untuk menilai efek fisiologis dan sensori kecepatan angin, yang merupakan faktor yang signifikan dalam iklim panas-lembab. Ini bisa jadi merupakan satu alasan ketidaksetujuan prediksi rumus ini, terdapat dalam catatan lapangan *Humphreys* dan penelitian *Tanabe* (*Givoni*, 1998).

Teori PMV dimulai dengan panas yang dihasilkan oleh tubuh (*metabolic heat*) dan bagaimana panas itu hilang pada permukaan tubuh. Jika tubuh tidak terlalu

panas atau terlalu dingin, maka panas yang dilepas pada permukaan pasti sama dengan panas yang dihasilkan oleh metabolisme. Ini berarti bahwa kita harus mengetahui seberapa besar panas metabolisme yang akan dihasilkan oleh tubuh. Karena ini bervariasi pada aktivitas yang berbeda dan antara individu yang berbeda, sulit untuk memprediksi akan seperti apa panas metabolis dari rata-rata pengguna bangunan (Nicol, 2000).

Nilai *heat loss* pada permukaan tubuh tergantung pada *insulasi* pakaian yang dipakai oleh orang, kealaman pakaian (ketat atau tidak, misalnya) dan juga posturnya. Jadi untuk memprediksi PMV dalam bangunan kita harus yakin tentang pakaian yang akan dipakai orang. Ini sulit untuk diprediksi (Nicol, 2000)

Daikin Psychrometric Chart

Psychrometric chart adalah diagram yang menunjukkan hubungan antara suhu, tekanan dan kandungan uap air di udara. *Psychrometric Diagram Viewer* buatan Daikin adalah versi digital diagram psikrometrik. Diagram ini umum dipakai di kalangan peminat HVAC (*Heating Ventilating and Air Conditioning*) karena sangat membantu untuk memahami sifat udara pada suatu kondisi.

Program Daikin berguna untuk:

1. Mengetahui properti fisik udara.
2. Memandu pengguna AC dalam memahami proses penyejukan.

Kelebihannya adalah:

1. Software mudah dijalankan untuk mendapatkan analisis.
2. Tampilan grafis yang memudahkan pengguna dalam memahami hasil analisis.
3. Dapat dijalankan online dengan internet.

Kekurangannya adalah:

1. Program ini kurang membantu pemakai baru, apalagi tidak dilengkapi dengan manual.
2. Banyak menggunakan istilah yang kurang dimengerti masyarakat umum.

RETScreen International

RETScreen International adalah program yang disiapkan untuk membantu dalam pengambilan keputusan perancangan bangunan yang peduli pada penggunaan energi terbarui. Inti dari program ini adalah software penganalisis proyek energi terbarui yang terpadu, berstandar dan dapat digunakan di seluruh dunia. Software ini dapat digunakan untuk menganalisis produksi energi, biaya operasional dan pengurangan emisi gas rumah kaca sesuai dengan beragam tipe teknologi sumber energi terbarui yang tersedia.

RETScreen International digunakan untuk menganalisis atau menghitung biaya yang diperlukan untuk mendesain energi sebuah bangunan (model) sesuai dengan piranti energi yang dipergunakan, yaitu energi angin, hidro kecil, photovoltaic, pemanasan massa bio, pemanasan udara dengan surya, pemanasan air dengan surya, dan pemanasan alami dengan surya. Hasil dari analisa adalah sebuah grafik yang dilengkapi dengan perhitungan biaya yang harus dikeluarkan untuk sebuah desain bangunan (model).

Fitur program:

1. Setiap model teknologi terbarui RETScreen (misalnya photovoltaic dan angin) dibuat dalam MS Excel terpisah. Setiap model mempunyai rupa yang sama. Semua subprogram dalam program RETScreen International dapat dijalankan dengan mudah dan mempunyai langkah-langkah yang sama untuk menjalankannya. Hanya ada sedikit perbedaan pada tabel-tabelnya karena disesuaikan dengan subprogram masing-masing.
2. RETScreen dapat langsung mengakses website supplier produk di seluruh dunia, sehingga memudahkan pemilihan produk, termasuk untuk melihat data-data penawaran para supplier, spesifikasi teknologi, harga, penerapan produk yang akan digunakan dan sekaligus dapat langsung mengirimkan email pemesanan barang kepada supplier.
3. Dapat langsung mengakses data cuaca untuk seluruh bagian dunia.
4. Manual online.
5. Studi kasus proyek.
6. Website RETScreen yang selalu di-update dan memuat informasi energi terbarui paling baru.

Kenyamanan Termal di Indonesia

Pelopop penelitian akan kenyamanan termal di daerah tropis dilakukan pada tahun 1953 oleh Ellis. Beliau meneliti respon termal dari 34 orang-orang Eropa dan 100 orang-orang Asia yang tinggal di Singapura dan menyimpulkan bahwa kenyamanan termal tidak dipengaruhi oleh perbedaan ras, umur maupun jenis kelamin manusia.

Sebelumnya telah digarisbawahi dalam beberapa penelitian kenyamanan termal bahwa tidaklah tepat menerapkan standar kenyamanan termal untuk bangunan berpendingin buatan (AC) pada bangunan berpendingin alami. Ketidaktepatan ini terjadi karena perbedaan kontrol lingkungan untuk menjaga kenyamanan termal antara bangunan ber AC dengan bangunan berventilasi alami. Kondisi serupa kontrol suhu ambien tinggi dan kelembaban nisbi antara ruang luar dan ruang dalam tidak mungkin dilakukan hanya dengan strategi pendinginan pasif. Perbedaan latar belakang sosial dan kondisi iklim turut mengakibatkan ketidaksesuaian standar tersebut. Hal tersebut penting dipahami dalam konteks negara-negara tropis yang hanya sedikit bangunannya dilengkapi AC. Manusia yang tinggal di daerah ini telah beradaptasi secara fisiologis dan psikologis akan kondisi tropis.

Manusia yang tinggal di daerah tropis panas lembab memiliki latar belakang keinginan untuk hidup di lingkungan yang lebih dingin, mereka memilih lingkungan hidup dingin pada suhu yang sangat jarang terjadi di lingkungannya. Terdapat beberapa bentuk adaptasi akan lingkungan termal dan kenyamanan tersebut terjadi pada bagian-bagian tertentu badan manusia (suhu kulit, keringat, dan sebagainya) serta pada penyesuaian-penyesuaian lingkungan spesifik (kecepatan angin yang ditingkatkan, nilai pakaian yang direndahkan, dan sebagainya). Secara umum pada iklim panas lembab, kondisi berkeringat yang ringan dianggap wajar dan dimasukkan dalam kategori nyaman.

Kenyamanan termal dapat didefinisikan sebagai suatu kondisi dimana manusia tidak menginginkan kondisi yang lebih panas dan lebih dingin lagi. Di

Indonesia, manusia yang menginginkan kondisi lebih panas jauh lebih sedikit daripada kondisi yang lebih dingin (Gambar). Menariknya, disini terdapat kecenderungan kuat bahwa manusia ingin berada pada kondisi yang lebih dingin lagi meskipun mereka menilai kondisi saat ini adalah 0 (netral) dan -1 (sedikit dingin). Hasil diatas membuktikan bahwa manusia tropis mungkin saja menilai dalam cara yang khas antara sensasi termal (yang dirasakan saat ini) dan pemilihan termal (kondisi yang diinginkan). Hal ini menentang asumsi logis umum dari standar kenyamanan termal yang selalu berasumsi bahwa pada kondisi netral manusia seharusnya memilih untuk tidak lebih dingin dan lebih panas lagi.

Penemuan diatas mencerminkan hasil penelitian oleh McIntyre yang menyampaikan bahwa suhu yang paling diinginkan manusia dapat berhubungan dengan nilai sensasi diatas atau dibawah kategori 4 (netral) dalam skala hangat. Beliau menemukan bahwa pada musim panas manusia lebih memilih kondisi yang lebih dingin daripada kondisi netral (meskipun tidak se ekstrim penemuan di Indonesia), tetapi pada musim dingin manusia memilih kondisi yang lebih hangat daripada kondisi netral.

Perilaku adaptif manusia iklim tropis

Tindakan adaptif berikut adalah perilaku yang umum dilakukan dalam rumah dan persentase jumlah orang yang memilih untuk menjalankannya. Kontrol lingkungan dengan membuka jendela adalah tindakan yang paling sering dilakukan penghuni dengan persentase 78%. Aksi adaptif lain yang difavoritkan adalah meminum lebih banyak air dan mengganti pakaian dengan persentase 70% dan 60%. Penggunaan kipas angin dalam rumah hanya memberikan persentase 56%. Mandi lebih sering dan pergi ke tempat yang lebih dingin mendapatkan 29%. Tindakan yang jarang dipilih adalah menyalakan AC dengan persentase hanya 3%. Hal ini disebabkan karena sebagian besar rumah yang diteliti tidak memiliki perangkat AC. Meskipun memiliki AC, seringkali orang segan menyalakannya karena biaya listriknya yang mahal.

Secara umum, dapat dikatakan bahwa penghuni rumah memilih untuk menggunakan strategi kontrol lingkungan (jendela) sebelum mereka melangkah ke

penyesuaian personal yang melibatkan semacam respon termoregulator tubuh mereka.

Kecenderungan memilih untuk menggunakan jendela hidup dan kipas angin di Indonesia mencerminkan bahwa adanya angin atau pergerakan udara didalam rumah sangatlah diharapkan. Pada rumah panas lembab, efek pendinginan dapat diusahakan dengan menambahkan kecepatan angin. Kecenderungan tersebut mengindikasikan bahwa kontrol lingkungan diatas lebih dari cukup untuk meningkatkan kepuasan akan kenyamanan termal mereka.

Untuk itu dapat ditarik kesimpulan bahwa kenyamanan termal dapat dicapai dengan memberikan kesempatan penghuni untuk melakukan kontrol efektif seluas-luasnya. Dengan demikian manusia dapat menyesuaikan lingkungannya demi memuaskan harapannya. Secara khusus, hal tersebut dapat dicapai dalam bangunan berventilasi alami dengan menyediakan kontrol lingkungan berupa membuka atau menutup jendela dan menyalakan kipas angin.

Temuan-temuan diatas sangat penting untuk menurunkan konsumsi energi di Indonesia. Saat ini, secara agresif produsen AC menawarkan konsep-konsepnya mengenai tinggal secara nyaman dalam rumah berpendinginaan buatan tanpa mempedulikan dampaknya terhadap beban energi yang harus dibayar konsumen. Untuk mencapai tujuan komersilnya, para produsen AC mendasarkan argumennya pada standar kenyamanan termal universal yang tidak realistis dan hanya dapat dicapai dengan bantuan peralatan mekanikal. Pada kenyataannya, manusia dapat tinggal nyaman dalam bangunan berpendinginaan alami dengan syarat mereka dibebaskan untuk memiliki kontrol lebih atas lingkungannya

Kesimpulan

Berdasarkan skala *ASHRAE* dan *Bedford*, penghuni rumah berventilasi alami menunjukkan tingkat kenyamanan termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan prediksi PMV. Pada lingkup luas kenyamanan termal dipengaruhi pula oleh faktor-faktor non fisik diluar dari enam faktor yang diperhitungkan dalam model PMV. Perilaku adaptif dipercaya berperan serta dalam mempengaruhi tingkat kenyamanan

termal yang lebih tinggi. Yaitu saat penghuni memiliki kebebasan untuk memodifikasi lingkungannya dan melakukan penyesuaian-penyesuaian untuk mengkompensasi kondisi termal yang kurang nyaman.

Penghuni daerah tropis berkecenderungan untuk mencapai kenyamanan pada lingkungan yang panas dan lembab dengan memanfaatkan pergerakan udara yang tinggi (menyalakan kipas, membuka jendela). Penyesuaian adaptif seperti minum air lebih banyak, mengganti baju, dan mandi lebih banyak dilakukan dibandingkan dengan menyalakan AC.

Pada iklim tropis lembab, manusia lebih memilih kondisi lingkungan yang lebih dingin (sekitar 26°C OT), lebih rendah daripada tingkat suhu netralnya (29.2°C OT). Penemuan tersebut mengindikasikan bahwa suhu netral diinterpretasikan oleh manusia tropis sebagai suhu yang dapat diterima meskipun mereka harus melakukan usaha-usaha adaptif (seperti menggunakan kipas, membuka jendela, mengganti baju, dan sebagainya) untuk membuat mereka lebih nyaman secara termal. Perilaku adaptif ini telah menjadi bagian keseharian mereka dan secara tidak langsung mempengaruhi ekspektasi kenyamanan termalnya dalam bangunan berpenghawaan alami. Suhu yang ingin dipilih adalah suhu lingkungan yang lebih rendah dimana mereka tidak perlu melakukan penyesuaian apapun pada badan dan lingkungannya.

Penghawaan Buatan

Ventilasi buatan atau penghawaan buatan (*Artificial ventilation / Forced ventilation / Mechanical ventilation*) adalah penghawaan yang melibatkan peralatan mekanik. Penghawaan buatan sering juga disebut pengondisian udara (*air conditioning*), yaitu proses perlakuan terhadap udara di dalam bangunan yang meliputi suhu, kelembaban, kecepatan dan arah angin, kebersihan, bau, serta distribusinya untuk menciptakan kenyamanan bagi penghuninya.

Indonesia yang memiliki iklim panas lembab sesungguhnya memiliki masalah pelik untuk mengusahakan kenyamanan secara termal dalam bangunan. Banyak

penelitian mengatakan bahwa ventilasi alami sulit diusahakan di iklim ini. Kenyataan suhu udara tidak pernah setinggi di daerah beriklim panas tidak berarti menandakan bahwa iklim kita nyaman. Kelembaban yang tinggi (60%-95%) dan kecepatan angin yang sangat rendah menjadi persoalan utama. Harus diakui bahwa iklim Indonesia bukanlah lingkungan yang secara termal nyaman. Perasaan mudah lelah, gerah, tidak nyaman adalah nyata. Mengusahakan lingkungan menjadi lebih nyaman secara termal diperlukan agar manusia dapat bekerja lebih produktif. Salah satu cara adalah dengan memakai mesin penyejuk udara, atau yang dikenal dengan *Air Conditioner (AC)*.

Penghawaan buatan dengan AC, jika dirancang dengan benar mempunyai banyak keuntungan, terutama bila udara alami di sekitar bangunan berkualitas buruk. Beberapa keuntungan pemakaian AC adalah sebagai berikut:

- Suhu udara lebih mudah diatur.
- Kecepatan dan arah angin mudah diatur.
- Kelembaban mudah diatur.
- Kebersihan udara dapat dijaga.
- Kenyamanan akustik dan ketenangan terjaga.
- Mencegah serangga terbang.
- Membunuh bakteri, jamur, mengikat biang bau dan memberikan efek segar pada ruangan.
- Bau didalam ruang lebih mudah diatur dan dipertahankan, misalnya wewangian.

Sedangkan kekurangan AC yang utama terletak pada penggunaan energi yang boros. Pada bangunan ber-AC, energi listrik yang dipergunakan untuk AC dapat mencapai 60% dari total energi. Namun saat ini mesin AC keluaran terbaru semakin hemat energi.

Ada banyak tipe mesin AC, namun secara garis besar dapat dibagi menjadi sebagai berikut:

- AC Unit
 - o Tipe paket tunggal, dikenal sebagai tipe jendela (*windows type*). Pada tipe ini seluruh bagian AC ada dalam satu wadah. AC tipe ini

dipasang dengan meletakkan mesin langsung menembus dinding. Karena seluruh komponen menjadi satu, AC ini sedikit bising.

- o Tipe paket terpisah, dikenal sebagai tipe split (*split type*). AC ini mempunyai dua bagian terpisah, yaitu indoor unit dan outdoor unit. Tipe terpisah ini dapat berupa tipe split tunggal (*single split*) yaitu satu unit luar ruang melayani satu unit dalam ruang dan tipe split ganda (*multi split*), satu unit luar ruang melayani beberapa unit dalam ruang. Berdasarkan pemasangannya, tipe terpisah ini masih dapat dibagi lagi menjadi:
 - i. Tipe langit-langit/dinding (*ceiling/wall type*), yaitu indoor unit dipasang di dinding bagian atas.
 - ii. Tipe lantai (*floor type*), yaitu indoor unit diletakkan di lantai. Ada yang berbentuk seperti almari, ada yang sebenarnya sama dengan tipe langit-langit tetapi dipasang di lantai.
 - iii. Tipe kaset (*cassette type*), yaitu indoor unit dipasang di langit-langit, menghadap ke bawah.

- AC Terpusat (*central AC*), AC tipe besar yang dikendalikan secara terpusat untuk melayani satu gedung besar. AC sentral melibatkan sistem jaringan distribusi udara (*ducting*) untuk mencatu udara sejuk ke dalam ruang dan mengambil kembali untuk diolah. Lubang tempat udara dari sistem AC masuk ke dalam ruangan disebut difuser (*diffuser*) sedang lubang tempat udara kembali dari dalam ruangan ke jaringan disebut gril (*grill*).

Perancangan Tata Udara Buatan Hemat Energi

Pengaturan sistem tata udara (AC) hemat energi dapat dilakukan dalam berbagai cara:

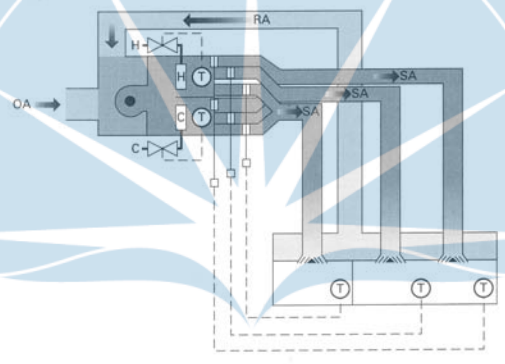
1. Peralatan
 1. Sistem zona kontrol pendinginannya
 2. Metoda kerja pendinginan (kompresor dan chiller)
 3. Pengaturan titik termostat
2. Operasional
 1. Mengatur pemakaian AC

2. Mengatur beban pemanasan (heat gain)

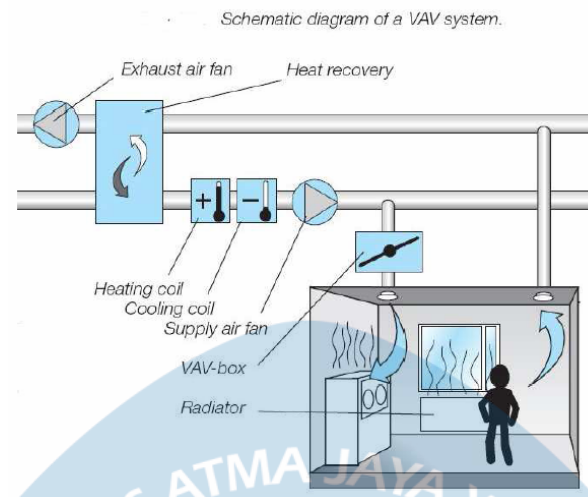
Secara umum kontrol zona pengkondisian udara dapat dibagi 3 :

1. CAV (Constant Air Volume)
2. VAV (Variable Air Volume)
3. VRV (Variable Refrigerant Volume)

CAV (Constant Air Volume) adalah sistem pengkondisian udara yang diatur dengan kerja coil pendinginan. Pada sistem ini, suhu udara yang disuplai ke bangunan dapat berbeda-beda, tetapi kecepatan aliran udara yang dihasilkan adalah tetap. Kompresor merupakan variabel yang kinerjanya menyesuaikan diri dengan suhu lingkungan yang ada.



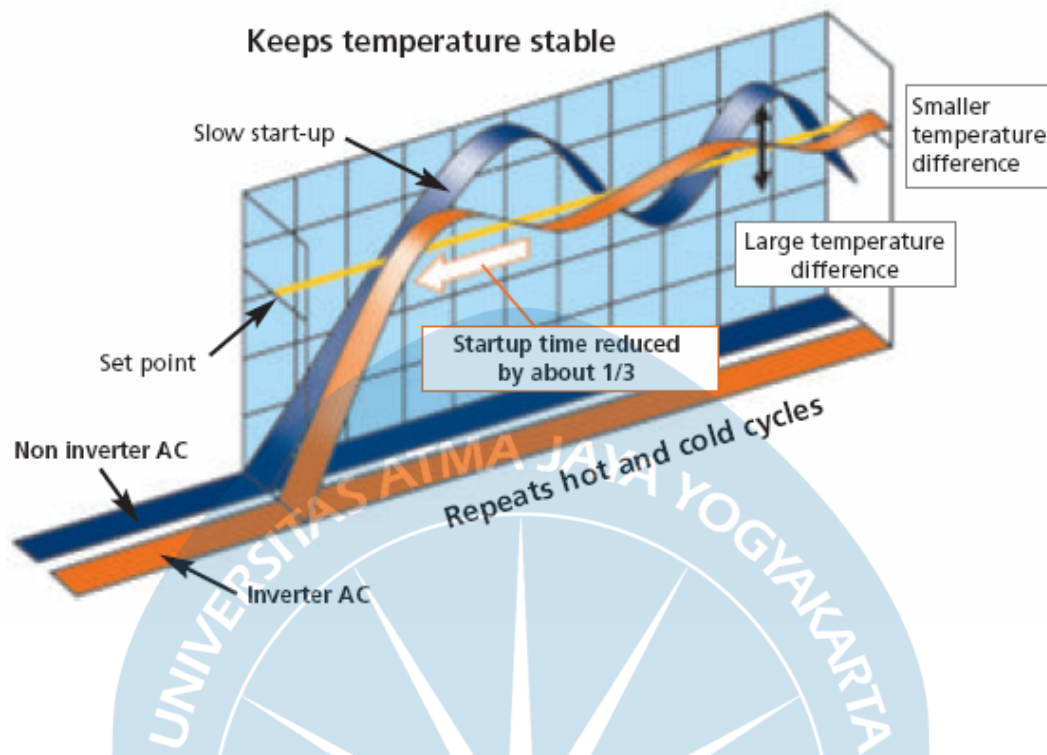
VAV (Variable Air Volume) adalah sistem pengkondisian udara yang diatur dengan jumlah udara dingin yang dimasukkan ke dalam zona. Kecepatan aliran angin yang disalurkan ke masing-masing ruang bervariasi sesuai kebutuhan, tetapi mempertahankan suplai suhu dengan konstan. Suhu udara tidak berubah walaupun beban pendinginannya berubah. Kecepatan aliran udara berubah menjadi maksimum pada kondisi lingkungan panas dan turun menjadi 20%nya ketika kondisi dingin.



VRV (*Variable Refrigerant Volume*) adalah sistem pengkondisian udara yang diatur dengan jumlah refrigerant yang dialirkan dalam coil pendingin. Sistem teknologi baru milik Daikin ini memiliki banyak keuntungan antara lain:

1. Meningkatkan kenyamanan lebih tinggi
2. Efisien energi
3. Reliabel / dapat diandalkan
4. Ramah lingkungan
5. Mudah dipasang dan fleksibel

Inverter technology



Pencahayaan Alami (Daylighting)

Cahaya terlihat (*visible light*) adalah gelombang elektromagnet yang terlihat oleh mata manusia dan mempunyai panjang gelombang antara 380 sampai 720 nm (nanometer, $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$), dengan urutan warna: (ungu-ultra), ungu, nila, biru, hijau, kuning, jingga, merah, (merah-infra). Sedangkan sinar adalah berkas cahaya yang mengarah ke suatu tujuan.

Cahaya matahari (*sunlight, daylight*) mempunyai panjang gelombang antara 290 sampai 2300 nm dan mempunyai spektrum lengkap dari ungu-ultra sampai dengan merah-infra.

Cahaya langit (*sky light*) adalah cahaya bola langit. Cahaya inilah yang dipakai untuk penerangan alami ruangan, bukan sinar matahari langsung. Sinar matahari langsung akan sangat menyilaukan dan membawa panas, sehingga tidak dipakai untuk menerangi ruangan.

Kuantitatif Cahaya

Arus cahaya (*luminous flux, flow*; diukur dengan lumen) adalah banyak cahaya yang dipancarkan ke segala arah oleh sebuah sumber cahaya per satuan waktu.

Intensitas sumber cahaya (*light intensity; luminous intensity*; diukur dengan candela) adalah kuat cahaya yang dikeluarkan oleh sebuah sumber cahaya ke arah tertentu. Sebuah sumber cahaya berintensitas 1 candela (1 lilin) mengeluarkan cahaya total ke segala arah sebanyak 12,57 lumen.

Illuminan (*Illuminance*; diukur dengan lux, lumen/m²) adalah banyak arus cahaya yang datang pada satu unit bidang. Iluminasi (*Illumination*) adalah datangnya cahaya ke suatu objek.

Luminan (*Luminance*; diukur dengan candela/m²) adalah intensitas cahaya yang dipancarkan, dipantulkan, atau diteruskan oleh satu unit bidang yang diterangi. Sering juga digunakan satuan footLambert (fL).

Faktor cahaya siang hari (*Daylight Factor, DF*) adalah perbandingan antara iluminan di satu titik di dalam ruangan dengan titik di luar ruangan. Harga DF tetap, bila cahaya diluar meredup maka cahaya di dalam ruangan pun ikut meredup.

Langit rancangan (*Design Sky light*), luminan langit yang dipergunakan sebagai patokan perancangan, yaitu kondisi langit yang terjadi sebanyak 90%. Di Indonesia dipakai 10.000 lux.

Korelasi Pencahayaan Alami dengan Perancangan Hemat Energi

Perkembangan teknologi AC saat ini yang semakin hemat energi mulai memperlihatkan sektor konsumsi energi lain yang signifikan, yaitu pencahayaan dalam bangunan. Dewasa ini timbul kebijakan desain bangunan yang mengharuskan optimalisasi pencahayaan alami (daylight). Alasannya adalah pencahayaan merupakan salah satu sektor terbesar yang membebani biaya listrik, selain itu para penghuni cenderung lebih nyaman dalam suasana pencahayaan alami apalagi

beberapa bentuk pencahayaan buatan saat ini memberikan permasalahan pada kesehatan manusia.

Bangunan hemat energi sudah seharusnya memanfaatkan pencahayaan alami semaksimal mungkin. Pencahayaan alami memiliki peran penting akan kesehatan psikologis manusia. Beberapa kelebihan penggunaan pencahayaan alami adalah sebagai berikut:

- Memanfaatkan sumber daya alam yang sangat melimpah.
 - o Ramah lingkungan (*Green Construction, LEED*).
 - o Mengurangi pemakaian energi berbahan bakae fosil.
 - o Mengurangi beban puncak listrik
 - o Mengurangi tagihan listrik
- Menghubungkan ruang dalam dengan ruang luar.
- Meningkatkan kesehatan penghuni.
- Meningkatkan kepuasan penghuni atas lingkungan ruangnya.
- Meningkatkan produktivitas.

Sedangkan beberapa kelemahan pencahayaan alami adalah sebagai berikut:

- Pada bangunan berlantai banyak dan gemuk (berdenah rumit) sulit untuk memanfaatkan cahaya alami matahari.
- Intensitasnya tidak mudah diatur, dapat sangat menyilaukan atau sangat redup.
- Pada malam hari tidak tersedia.
- Sering membawa panas masuk ke dalam ruangan.
- Dapat memudarkan warna.

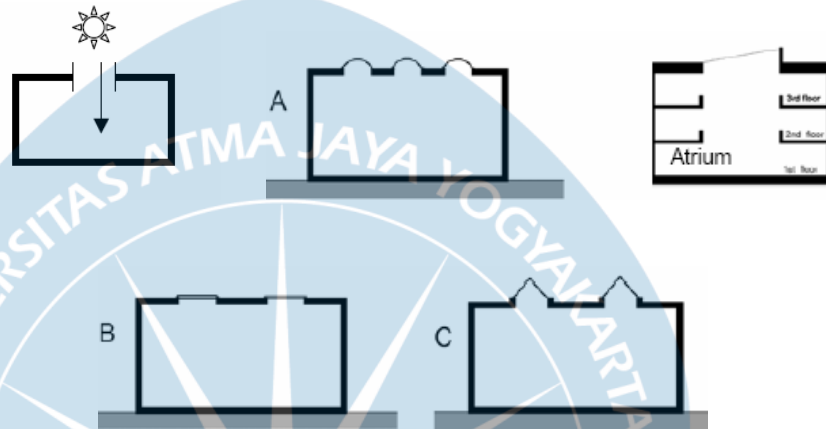
Secara umum, perancangan pencahayaan alami dalam bangunan bertujuan untuk menyediakan pencahayaan ruangan dengan kualitas dan kuantitas yang cukup pada workplane tanpa mengesampingkan efisiensinya, menciptakan suasana nyaman dan lingkungan yang seimbang, serta menyediakan kontrol terpercaya bagi sistem pencahayaan buatan didalamnya.

Terdapat beberapa metode untuk mendistribusikan pencahayaan alami masuk ke dalam bangunan, diantaranya adalah:

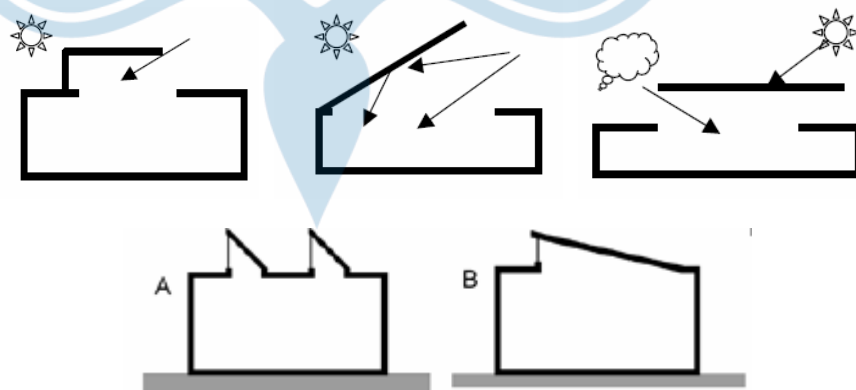
- *Toplighting*, banyak digunakan karena pengaruh sekat, potensi kesilauan, pembayangan, dan efisiensi distribusinya. Sebagai contoh, skylight dan

berbagai jenis clerestory. Top lighting memiliki kesamaan sifat dengan pencahayaan buatan umumnya, yaitu memancarkan cahaya kebawah. Metode ini tidak terpengaruh oleh orientasi lahan dan bangunan sekitarnya.

- o *Skylight*, memasukkan cahaya langsung dari atas ruangan. Akan lebih baik jika menggunakan kaca prismatic atau diffuse untuk mencegah sinar matahari langsung dan menyebabkan kesilauan.



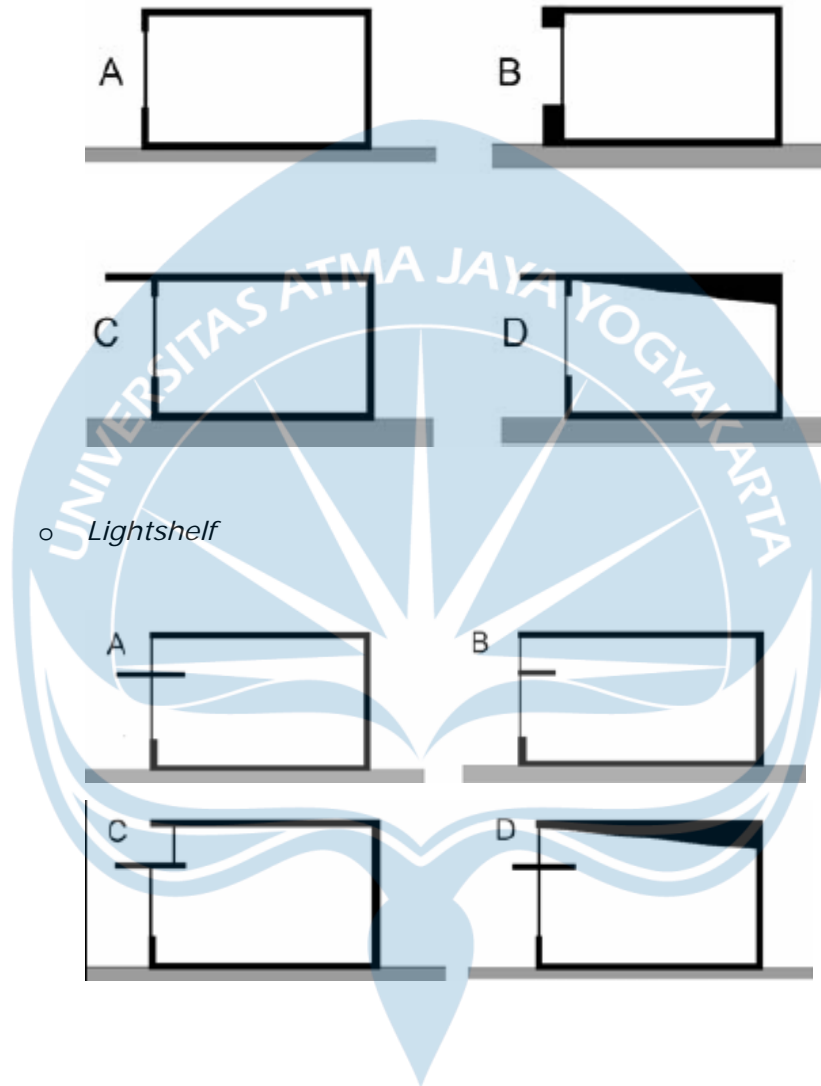
- o *Clerestory*, penggunaan jendela tinggi diatas plafon. Terdapat beberapa jenis clerestory seperti toplight, sawtooth, dan monitor atau double clerestory.



- *Sidelighting*, dengan ketentuan bahwa cahaya hanya dapat masuk pada workplane dengan jarak sejauh 1,5 – 2 kali tinggi bukaan (jendela). Side lighting memakai bukaan vertikal (umumnya jendela) untuk memasukkan cahaya alami. Tidak seperti top lighting, side lighting cenderung

memasukkan cahaya terlalu terang relatif terhadap permukaan ruangan dan menyebabkan silau. Meskipun demikian, pemandangan luar dari jendela merupakan keuntungan tersendiri dari jenis ini.

- o Jendela dan teritisan



Pencahayaan Buatan dan Konteksnya dalam Energy Saving

Pencahayaan buatan adalah faktor utama yang menentukan kualitas lingkungan dalam ruang bangunan. Merupakan kontributor emisi CO₂ yang serius di Amerika, sampai dengan lebih dari 30% total pemakaian listrik. Oleh sebab itu jika

membicarakan bangunan hemat energi, kita tidak dapat lepas dari sistem pencahayaan buatan yang dipakai.

Banyak penelitian yang menyarankan bahwa dengan memaksimalkan pencahayaan alami kita dapat menghemat energi besar-besaran, terutama jika dihubungkan dengan kendali otomatis. Penelitian lain mengklaim bahwa pencahayaan yang terkendali dengan baik dan efisien akan mengurangi emisi CO₂ dan konsumsi energi lebih dari yang dibayangkan.

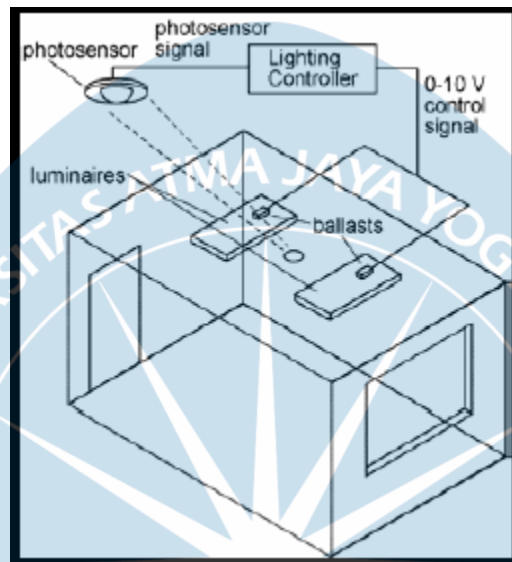
Walaupun bangunan dirancang memiliki cahaya alami penuh, sistem pencahayaan listrik tetap dibutuhkan pada cuaca buruk dan malam hari. Bangunan dengan cahaya alami dapat menghemat secara signifikan jumlah energi dan kebutuhan listrik hanya jika listrik dimatikan ketika cukup tersedia cahaya alami. Konsekuensinya kendali otomatis diperlukan saat pencahayaan alami digunakan untuk menghemat listrik.

Integrasi pencahayaan buatan dengan pencahayaan alami membutuhkan penyesuaian-penyesuaian sebagai berikut:

- Jenis distribusi pencahayaan buatan untuk menggabungkan diri dengan pencahayaan alami sebaiknya menggunakan tipe tidak langsung (indirect) atau langsung – tidak langsung untuk menyamakan pola sebaran cahaya matahari yang masuk ke ruangan.
- Temperatur warna sinar matahari yang sangat dingin pada siang hari sebaiknya diimbangi dengan pemakaian lampu yang memiliki temperatur warna sangat dingin pula (>5000K), 4100K dan 3500K dapat pula digunakan.
- Fitur kendali yang diperlukan untuk keperluan hemat energi.
 - o *Switching*, baik digunakan pada ruang umum dengan photosensor atau timer.
 - o *Dimming*, baik dipakai pada ruang kerja dengan lampu fluorescent dan menggunakan kontrol photosensor atau pendeteksi penghuni (occupant-controlled).

Kendali otomatis terdiri dari sebuah photocell yang ditempatkan di plafon area kerja dan panel kendalinya dapat dinyala-matikan atau diredupkan. Untuk

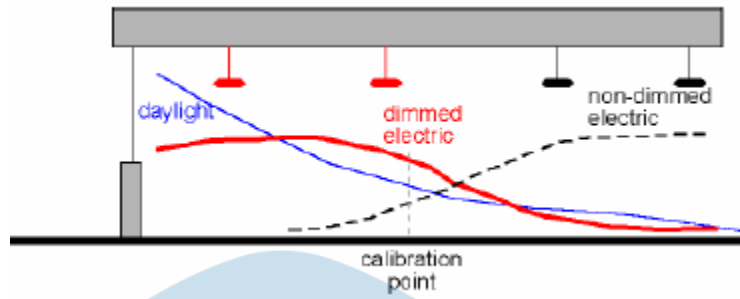
mendapatkan keuntungan dari kendali otomatis ini fixture cahaya harus melengkapi ketersediaan cahaya alami. Gambar () mengilustrasikan bagaimana gradasi cahaya pencahayaan buatan dapat menggantikan gradasi pencahayaan alami. Gambar () mengilustrasikan bagaimana fixture ini diatur dalam deretan paralel terhadap jendela sehingga deret manapun dapat dinyala-matikan seperlunya.



Sistem kendali photosensor pada umumnya

Sensor pemakaian cahaya menggunakan radiasi inframerah atau getaran ultrasonik untuk mendeteksi kehadiran manusia. Merupakan kombinasi sensitivitas pemakaian dan ketersediaan cahaya untuk ruang dengan cahaya alami. Photosensor memiliki beberapa variasi seperti:

- *Field of View*, sudut pandangnya (lebar/sempit, simetris/asimetris)
- Jangkauan operasional (maksimum kepekaan cahaya)
- Menurut algoritma yang digunakan, secara garis besar dibedakan menjadi:
 - o *Closed Loop*, yaitu sensor menerima cahaya alami dan buatan sekaligus. Disarankan untuk menghindari sinar langsung dari jendela dan lampu (lebih baik untuk mendeteksi cahaya pantul).
 - o *Open Loop*, photosensor hanya mendeteksi cahaya matahari kemudian mengatur lampu sesuai dengan tingkat cahaya alami yang diterima.



layout sistem kendali pencahayaan buatan



DAFTAR PUSTAKA

- Ali Malkawi and Godfried Augenbroe, 2004, *Advanced Building Simulation*, Spon Press New York and London.
- Peter Burberry, 1978, *Building for Energy Conservation*, Architectural Press Ltd, London.
- Walter F. Wagner, Jr., AIA, *Energy Efficient Buildings*, Architectural Record Magazine, New York.
- C.P. Underwood and F.W.H. Yik, 2004, *Modelling Methods for Energy in Buildings*, Blackwell Science.
- Dubin, F., 1997. *Energy and Buildings*, Energy Conservation Studies, 1(1): 31-42.
- International Energy Agency, 2008, *World Energy Outlook 2008*
- A.I.A. Research Corp., 1978. *Energy Inform Designing for Energy Conservation*, U.S. Department of Energy.
- Prasasto Satwiko, 2005, *Arsitektur Sadar Energi*, Andi Offset, Yogyakarta.
- Jimmy Priatman, *"Energy Consciuous Design" Konsepsi dan Strategi Perancangan Bangunan di Indonesia*, Jurnal Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- SNI ICS 91.040.01, *Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Indonesia.
- Wahyu Sujatmiko, 2008, *Penyempurnaan Standar Audit Energi pada Bangunan Gedung*, Jurnal Prosiding PPIS, Bandung.

www.wikipedia.org/wiki/Energy_conservation

www.wikipedia.org/wiki/Energy_audit

www.wikipedia.org/wiki/Computer_simulation

