

KINERJA VENTILASI PADA HUNIAN RUMAH SUSUN DUPAK BANGUNREJO SURABAYA

Hedy C. Indrani

Jurusan Desain Interior, Fakultas Seni dan Desain
Universitas Kristen Petra - Surabaya
e-mail: cornelli@peter.petra.ac.id

ABSTRAK

Keberadaan ventilasi alam pada hunian lingkungan tropis lembab sangat penting bagi kesehatan. Persyaratan ventilasi alam dinyatakan dalam bentuk *air change rate* (ACH) berupa ketersediaan udara segar, sirkulasi udara yang baik, pengeluaran panas, dan gas yang tidak diinginkan di dalam ruang. Kecepatan angin bermanfaat mempercepat proses *evaporative cooling*, sehingga sangat berperan dalam menciptakan kenyamanan termal ruang dalam. Kondisi angin setempat mempengaruhi lingkungan penghawaan suatu bangunan, sehingga mungkin timbul permasalahan dalam memprediksi kondisi ventilasi alam dan kenyamanan termal pada hunian rumah susun, utamanya luasan dan orientasi bukaan yang tidak tegak lurus aliran angin. Parameter ventilasi yang akan diamati yaitu *air flow rate* dan *air change* (ACH) yang didapatkan dari simulasi dengan menggunakan perangkat lunak AILOS. Hasil menunjukkan bahwa jika orientasi bukaan berada pada wilayah *wind shadow* maka ruang dalam tidak menerima angin, yang terjadi justru mendapat tekanan hisapan. Desain bukaan perlu memperhatikan luasan *inlet* dan *outlet* karena apabila ACH tidak mengalami kenaikan berarti, maka kecepatan angin *internal* menjadi rendah dan kenyamanan termal tidak terpenuhi.

Kata kunci: bukaan, ventilasi alam, kenyamanan termal, rusun di lingkungan tropis lembab.

ABSTRACT

Natural ventilation for dwellings in tropical wet regions is very important for health. The requirement for natural ventilation is measured in air change rate (ACH) constituting of the availability of fresh air, quality of air circulation, heat losses, and unwanted gasses in the room. Wind speed is useful for accelerating evaporative cooling process and thus plays an important role for thermal comfort in the interior room. Local wind conditions affects the ventilation of a building and therefore might cause problems in predicting the natural ventilation and thermal comfort in a high-rise building, especially in the area and orientation of an opening that is not perpendicular to the wind direction. Ventilation parameters that are to be observed are the air flow rate and air change (ACH) that are gained from a simulation using the AILOS software. The results show that if the opening orientation is at the wind shadow zone, the interior space will not receive wind, it obtains sucking pressure instead. The design of an opening should focus on the area of inlet and outlet because when ACH does not increase, consequently internal wind speed becomes low and thermal comfort will not be met.

Keywords: openings, natural ventilation, thermal comfort, high-rises in the tropical wet region.

PENDAHULUAN

Bagi pengguna bangunan, suplai udara segar dari ruang luar yang memadai akan berguna untuk memelihara kualitas udara di dalam ruangan dan menjadi suatu persyaratan dalam peraturan bangunan (Aynsley, 1999:47).

Ventilasi diartikan sebagai pertukaran udara di dalam bangunan dengan udara di luar bangunan. Untuk mencapai proses pergantian yang dikehendaki maka bangunan harus memiliki lubang-lubang ventilasi yang memadai dalam artian dimensi mencukupi, terletak pada posisi angin datang (*windward*), dan bentuk atau desainnya tepat. Bila suatu bangunan mendapat posisi bukaan pada arah

angin datang (*leeward*) maka faktor elemen tambahan pada jendela yang memungkinkan pembelokan arah angin perlu diperhatikan (Givoni, 1976:56).

Menurut Prianto dan Depecker (2001:19), pada hunian di lingkungan beriklim tropis terutama dengan kelembaban tinggi, kenyamanan penghuni tidak hanya tergantung pada banyaknya suplai udara segar ke dalam ruangan, tetapi juga tergantung pada kecepatan angin. Kelembaban tinggi dapat menghambat penguapan keringat sehingga tubuh terasa tidak nyaman. Aliran angin akan membantu menguapkan keringat dan memberi rasa sejuk, sehingga harus mampu melintasi penghuni di dalam ruang agar dapat mempercepat pendinginan secara evaporasi (*evaporative cooling*). Selain itu, aliran

angin juga penting dalam segi kesehatan untuk ketersediaan udara segar, sirkulasi udara yang baik, pengeluaran panas dan gas yang tidak diinginkan.

Kesehatan dan kenyamanan penghuni pada bangunan di lingkungan tropis lembab utamanya bangunan yang dioperasikan secara pasif (tanpa sistem pengkondisian udara) sangat tergantung pada terpenuhinya *rate* (debit) ventilasi yang memadai (Prianto dan Depecker, 2001:21). Kecepatan angin dalam ruangan dipengaruhi oleh *Air Change Rate per Hour* (ACH). Semakin tinggi nilai ACH, maka semakin tinggi pula kecepatan angin di dalam ruang. Volume juga ikut mempengaruhi, semakin besar volume maka semakin banyak udara yang tersimpan dalam ruang dan kecepatan udara akan semakin besar. Luas penampang bukaan turut berperan penting untuk memanipulasi kecepatan angin *internal*. Arah angin dan kecepatan angin *internal* akan menentukan nilai Cp dan kecepatan angin yang mengenai bukaan.

Penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh angin setempat terhadap kinerja bukaan *inlet-outlet* bangunan hunian bertingkat (rusun) yang memiliki masalah orientasi bukaan bukan pada posisi arah angin datang. AIOLOS sebagai program komputer yang dapat menghitung parameter ventilasi (*air flow rate* dan *air change*), dipakai untuk mensimulasikan kondisi ventilasi pada bangunan rusun.

Analisis dilakukan melalui penilaian ACH ruang dalam sehubungan dengan jumlah pergantian udara (kebersihan udara) serta kondisi kecepatan angin *internal* sehubungan dengan usaha penciptaan kenyamanan termal terhadap persyaratan yang ditetapkan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang besarnya pengaruh iklim setempat dalam perancangan lingkungan penghawaan suatu bangunan rusun di wilayah *sub-urban*, utamanya masalah orientasi dan luasan bukaan terhadap aliran angin, dalam upaya peningkatan kenyamanan bagi penghuni di dalam bangunan. Hal ini perlu diperhatikan mengingat kondisi kinerja suatu bangunan akan berhubungan dengan usaha-usaha penghematan energi operasional, di mana konservasi energi sangat diperlukan akhir-akhir ini.

METODE PENELITIAN

Penelitian dan simulasi ini dilakukan dengan terlebih dahulu mencari alternatif hunian rusun di wilayah *sub-urban* yang tidak berorientasi langsung terhadap aliran angin. *Input* data iklim setempat ke dalam program simulasi dan menganalisis temperatur, arah, dan kecepatan angin di sekitar bangunan.

AIOLOS sebagai *software* berprinsip ventilasi *multizone* (*network*) menunjukkan hubungan antar

zona *external* dan zona *internal* maupun antar zona *internal*. Oleh karena keterbatasan kemampuan AIOLOS dalam melakukan simulasi, maka perlu dilakukan penyederhanaan zona ruang yang ada. Hubungan antar zona tersebut ditinjau melalui *building zone* yang dibedakan menjadi zona-zona (terbatas zona 1-10), dimensi bukaan (m), area (m²), *reference height* (m), dan volume ruang (m³). Selanjutnya menghitung dimensi *building zone* tersebut untuk lantai 1 dan 3 serta memasukkannya ke dalam program simulasi, menghitung dimensi *external-internal* bukaan *existing* dan memasukkan ke dalam program simulasi.

Hasil simulasi *existing* pada bukaan *external-internal* dilakukan analisis *Number of Exchange per Hour* (ACH) dan melihat hasilnya, jika belum memenuhi standar maka perlu membuat modifikasi bukaan *external-internal* dengan menambah dan/atau memperluas bukaan serta memasukkannya lagi ke dalam program simulasi. Kembali melakukan analisis *Number of Exchange per Hour* (ACH) pada bukaan modifikasi dalam ruang sehingga dapat menentukan dimensi dan orientasi bukaan bagi ruang hunian rusun di wilayah *sub-urban*.

Selanjutnya, melakukan perhitungan penampang bukaan efektif (*Ae*) untuk memperoleh nilai kecepatan angin *internal* dan melakukan analisis kondisi kecepatan angin *internal* pada bangunan *existing* maupun modifikasi dalam upaya penciptaan kenyamanan termal dalam ruang hunian rusun dan membuat kesimpulan.

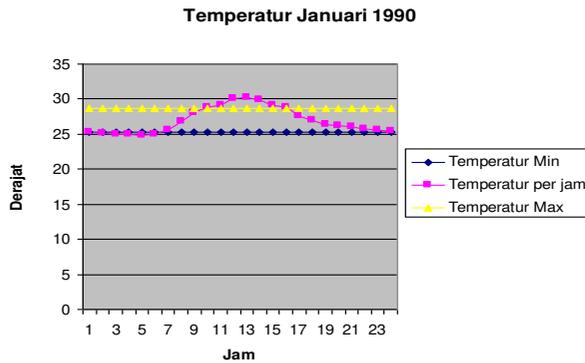
HASIL DAN PEMBAHASAN

Posisi *latitude* kota Surabaya berada pada 7°2' LS. Hasil rekapitulasi data iklim Surabaya 1990 (*hourly values for a period of 365 day-year*) menunjukkan bahwa pada bulan Januari (*cool-month*) temperatur udara per-jam rata-rata sebesar 27,0°C sedangkan bulan Oktober (*hot-month*) sebesar 29,1°C.

Hasil Rekapitulasi Kecepatan dan Arah Angin

a. Bulan Januari

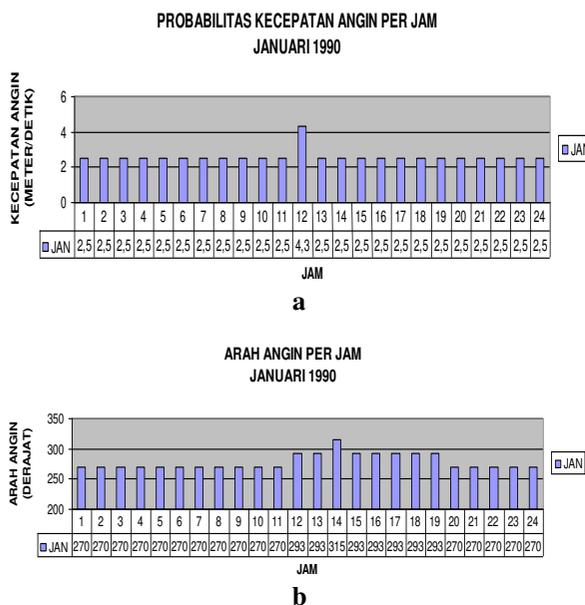
Batas-batas *comfort* bangunan diperoleh dari perhitungan temperatur rata-rata bulan Januari sebesar 27°C ± 1,75°C, sehingga temperatur minimum-maksimum antara 25,25°C-28,75°C. Pada grafik temperatur (gambar 1) terlihat bahwa kondisi *comfort* bangunan berlangsung hanya selama 10 jam dalam sehari yaitu antara pukul 07.00-10.00, 18.00-24.00, dan 01.00 dini hari.



Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 1. Batas *comfort* pada bulan Januari

Pada pukul 11.00-17.00 bangunan mengalami *over-heating*, sedangkan kecepatan angin rata-rata di luar bangunan hanya sekitar 2,575 m/s (*open-country*) (Gambar 2a) dengan arah angin dominan 270° yaitu arah Barat (Gambar 2b).

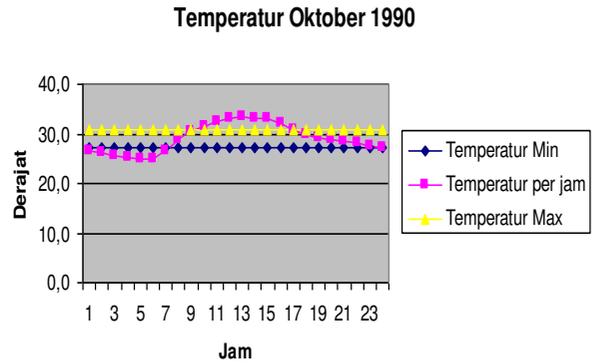


Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 2. Probabilitas kecepatan angin per-jam (a) dan kecenderungan arah angin per-jam (b) pada bulan Januari

b. Bulan Oktober

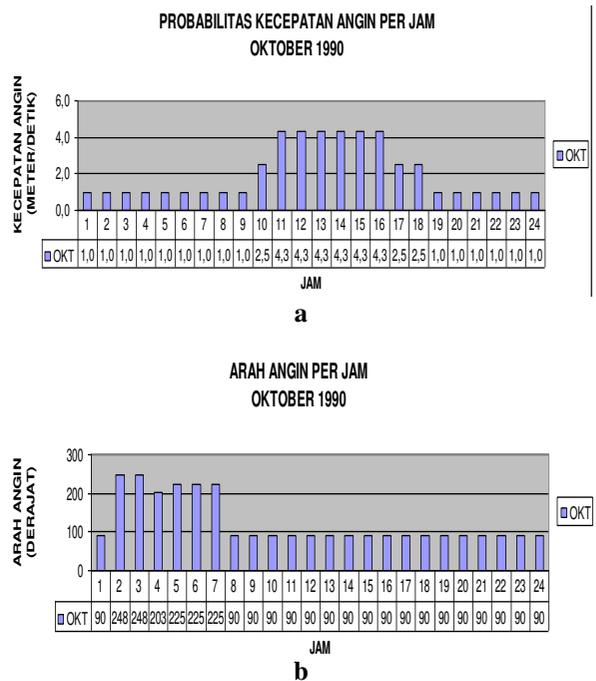
Batas wilayah *comfort* bangunan diperoleh dari perhitungan temperatur rata-rata bulan Oktober sebesar 29,1°C ± 1,75°C, sehingga temperatur minimum-maksimum antara 27,35°C-30,85°C. Pada grafik temperatur (gambar 3) terlihat bahwa bangunan berada pada wilayah *comfort* hanya selama 6 jam yaitu antara pukul 08.00-09.00 dan 18.00-23.00.



Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 3. Batas *comfort* pada bulan Oktober

Pada pukul 10.00-17.00 temperatur sudah berada di luar batas *comfort* (*over-heating*), sedangkan kecepatan angin rata-rata lebih rendah hanya 2,0125 m/s (*open-country*) (Gambar 4a) dengan arah dominan 90° yaitu arah Timur (Gambar 4b).



Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 4. Probabilitas kecepatan angin per-j (a) dan kecenderungan arah angin per-jam (b) pada bulan Oktober

Hasil Studi Permodelan pada Program AIOLOS

Lokasi penelitian dipilih Rusun Dupak Bangunrejo yang terletak di daerah *sub-urban* dengan tingkat *exposure* bangunan *semi-exposed*. Rusun memiliki arah hadap 45° dari utara

(Gambar 5), terdiri atas 3 (tiga) lantai, dan memiliki ruang hunian sebanyak 25 unit dengan perincian 10 unit di lantai 1, 8 unit di lantai 2, dan 7 unit di lantai 3 (Gambar 6).



a



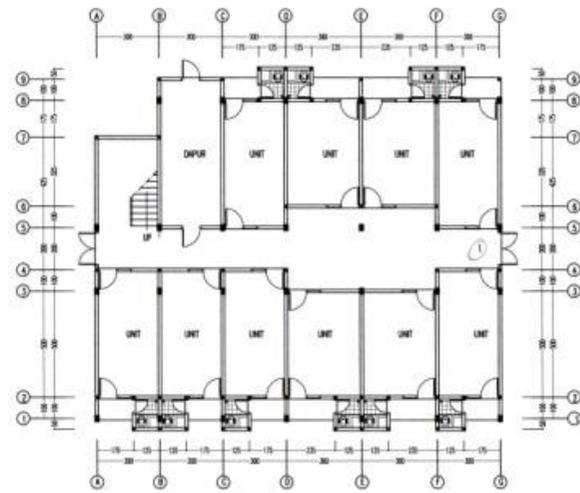
b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

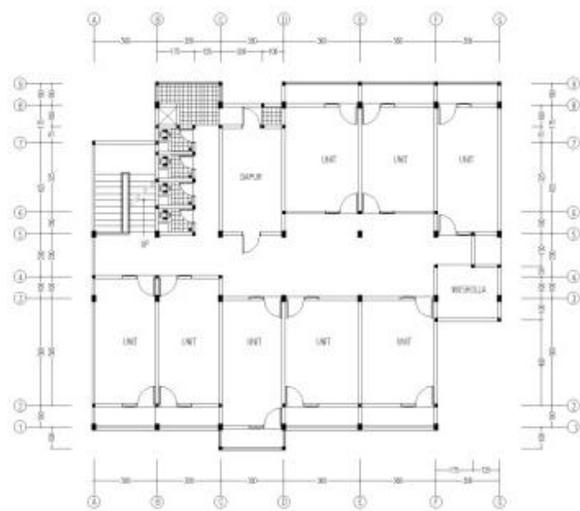
Gambar 5. Arah hadap rusun 45° (a) perspektif sisi selatan (b) perspektif sisi utara

Fasilitas pendukung berupa KM/WC dan dapur komunal berada pada setiap lantai dan 2 (dua) musholla yang masing-masing terletak di lantai 2 dan 3. Sirkulasi vertikal menggunakan tangga yang menghubungkan antar lantai (Gambar 7).

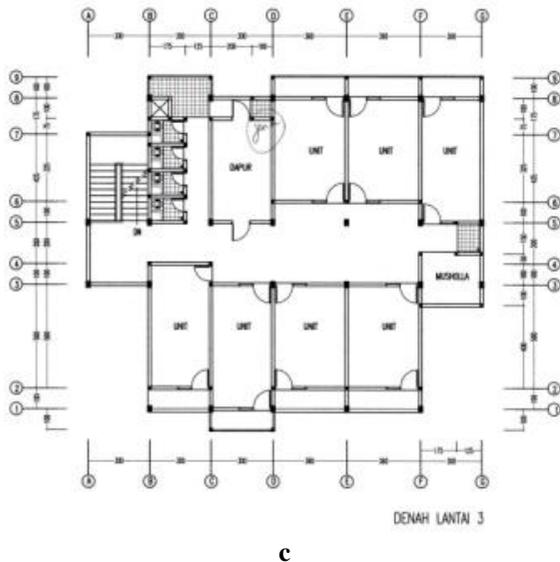
Masing-masing ruang hunian memiliki dimensi 3.0 x 6.0 m² dan 3.6 x 5.0 m² dengan karakteristik penataan ruang tiap unit diatur saling berhadapan dan dipisahkan oleh lorong (*internal-corridor*). Untuk akses masuk ke *internal-corridor* lantai 1, terdapat 2 (dua) buah pintu ganda terbuat dari besi yang terletak pada masing-masing ujung koridor. Tiap unit hunian di lantai 1 dilengkapi KM/WC di dalam (pribadi), sedangkan dapur bersifat komunal (Gambar 6a dan 7a). Unit hunian di lantai 2 dan 3 dilengkapi balkon, KM/WC komunal yang dibatasi dinding setinggi ± 2.3 m (Gambar 6b, 6c dan 7b, 7c).



a

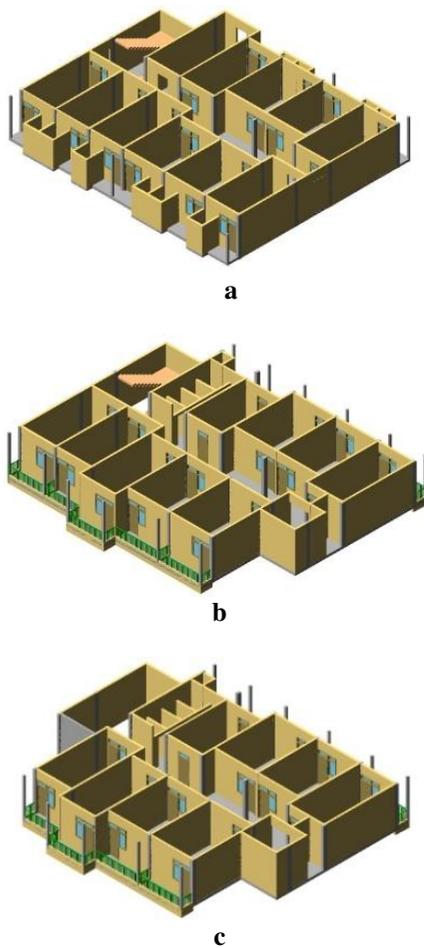


b



Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 6. Denah (a) lantai 1, (b) denah lantai 2 dan (c) denah lantai 3



Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 7. Isometri ruang (a) lantai 1, (b) lantai 2, dan (c) lantai 3

Program simulasi AIOLOS yang dipergunakan untuk menganalisis performa ventilasi alami bangunan memiliki beberapa keterbatasan, dimana jumlah maksimum ruang permodelan hanya untuk 10 zona, jumlah maksimum *internal opening* hanya untuk 10 *opening*, sehingga diperlukan penyederhanaan permodelan ruang hunian dan *opening* berdasarkan kesamaan bentuk dan fungsi.

Sebelum melakukan simulasi perlu terlebih dahulu membuat perhitungan antara lain *reference height* dan volume dari permodelan ke-10 zona lantai 1 dan 3; orientasi, dimensi, dan posisi ketinggian model bukaan *external-internal* pada dinding lantai 1 dan 3. Selain itu, perlu menentukan jadwal pembukaan masing-masing model bukaan *external-internal* selama 24 jam.

Temperatur masing-masing zona hunian (T_n) dihitung menggunakan rumus $T_n = 17,6 + 0,31 \times T_{av}$ (Szokolay, 1987:13), dimana T_{av} bulan Januari $27,0 \text{ }^\circ\text{C}$ sehingga T_n bulan Januari sebesar $17,6 + 0,31 \times 27,0 = 25,97^\circ\text{C}$. T_{av} bulan Oktober sebesar $29,1 \text{ }^\circ\text{C}$ sehingga T_n bulan Oktober adalah $17,6 + 0,31 \times 29,1 = 26,62 \text{ }^\circ\text{C}$. Untuk *Pressure Coefficient* (C_p) didapat dari perhitungan simulasi AIOLOS sedangkan *Discharge Coefficient* (C_d) didapat dari penelitian Swami-Chandra (1988:23) yaitu sebesar 0,62.

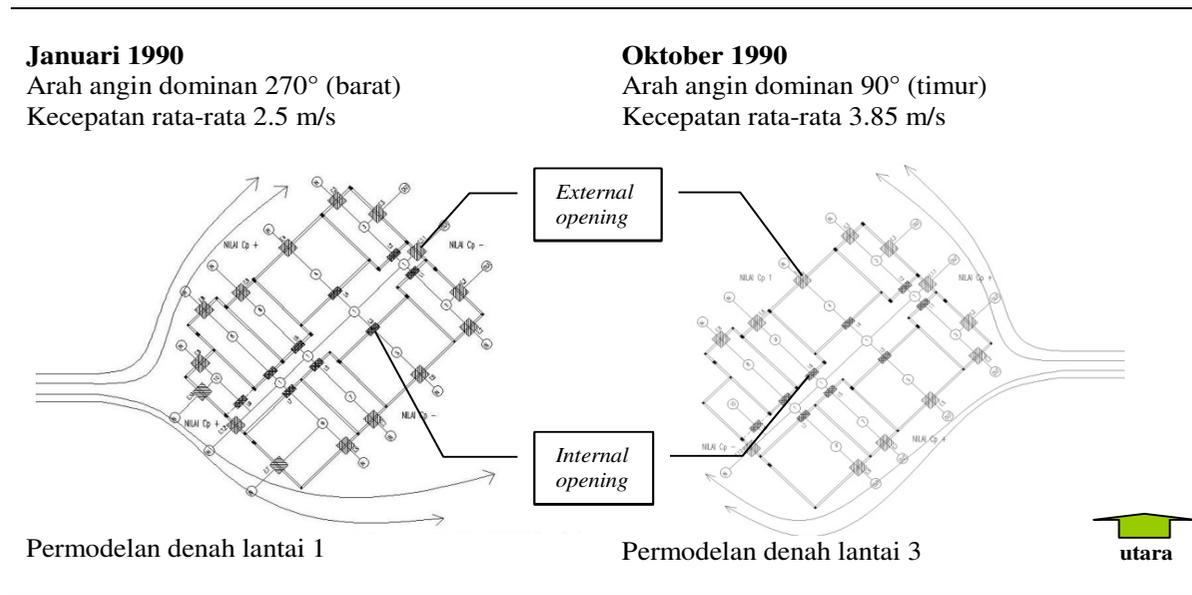
a. Existing Bukaan External-Internal

Untuk bangunan yang berorientasi 45° terhadap arah Utara, pada bulan Januari aliran angin mengenai bangunan dominan dari arah 270° (Barat), sehingga orientasi bukaan *external-internal* tidak tegak lurus angin. Pada bulan Oktober, arah angin mengenai bangunan dominan dari arah 90° , maka orientasi bukaan *external-internal* juga tidak tegak lurus aliran angin (Tabel 4).

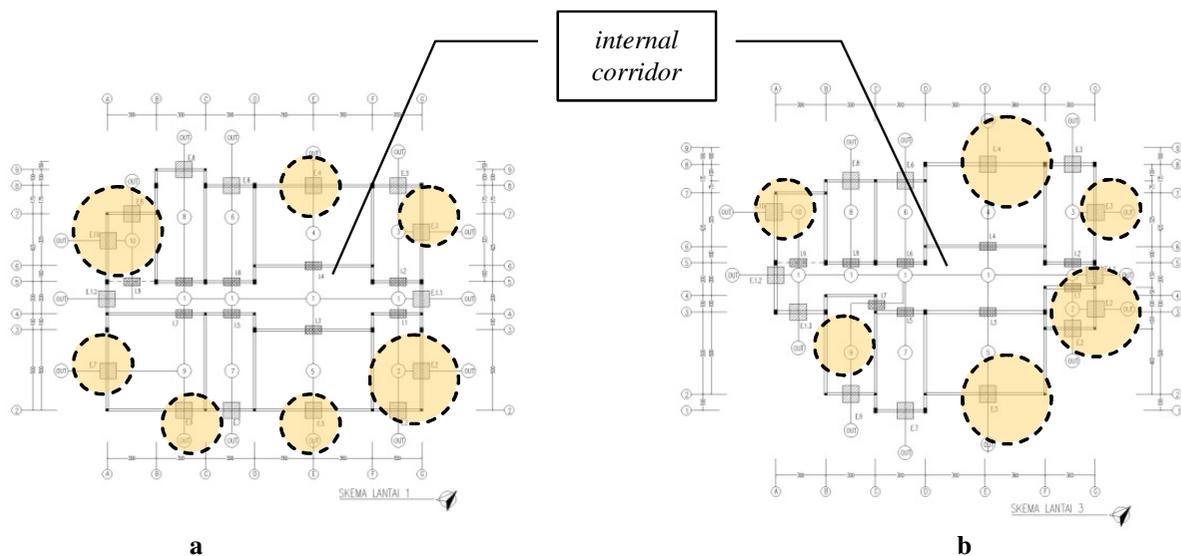
b. Modifikasi Bukaan External-Internal

Hasil studi simulasi menunjukkan bahwa kondisi bukaan *existing* baik pada lantai 1 maupun 3 tidak memenuhi persyaratan pergantian udara, utamanya pada *internal-corridor* (zona 1). Untuk itu, perlu dilakukan modifikasi pada bukaan *external-internal* agar terjadi peningkatan ACH pada zona 1.

Tabel 1. Model Bukaannya *External-Internal Existing*



Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006



Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 8. Letak modifikasi bukaan (a) lantai 1 dan (b) lantai 3

Penambahan dan perluasan bukaan *external-internal* dilakukan pada pintu, jendela, dan *bovenlicht* maksimal sebesar kondisi luasan masing-masing bidang dinding yang tersedia (Gambar 8).

adalah 2, ACH dapur adalah 15, dan ACH tangga adalah 4 (Szokolay, 1987:57).

Hasil Studi Simulasi dan Analisis

a. Performa ACH per Hour sehubungan dengan Persyaratan Pergantian Udara Ruang Dalam

Persyaratan pergantian udara untuk kesehatan telah ditetapkan untuk berbagai fungsi ruang dimana *Number of Air Exchange* (ACH) koridor dan hunian

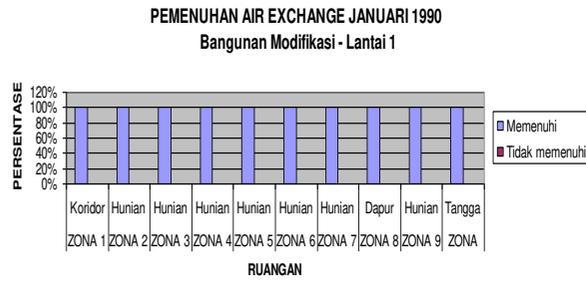
▪ **Januari: Lantai 1 dan 3**

Gambar 9a memperlihatkan bahwa pergantian udara zona 1 lantai 1 (*internal-corridor*) hanya terpenuhi sekitar 54% akibat *out-flow* cenderung 0 m³/h. Angin melalui pintu ganda ke dalam *internal-corridor* hanya pada jadwal pembukaan pintu pukul 07.00-19.00, selebihnya tidak ada pergantian udara (ACH = 0).

Pergantian udara pada zona 2-10 (hunian, dapur, dan tangga) lantai 1 dapat memenuhi persyaratan karena elemen pintu dan jendela masing-masing zona memiliki *bovenlicht* yang selalu dalam keadaan terbuka (jadual pembukaan selama 24 jam) dan letaknya tidak *internal* seperti zona 1.



a



b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 9. Pemenuhan ACH bulan Januari untuk lantai 1 (a) bangunan *existing* dan (b) bangunan modifikasi

Gambar 9b menunjukkan bahwa pergantian udara zona 1 dapat meningkat menjadi 100% setelah diadakan penambahan *bovenlicht* di atas semua pintu ganda dengan jadual pembukaan selama 24 jam. Penambahan luasan bukaan hingga 50% luasan lantai cukup efektif untuk merubah pola pergantian udara hunian menjadi lebih baik.

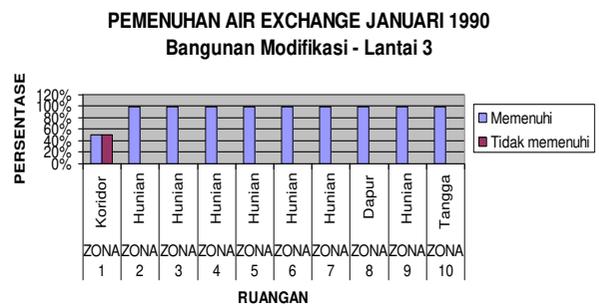
Gambar 10a menunjukkan bahwa pergantian udara zona 1 lantai 3 hanya terpenuhi sekitar 50% akibat *out-flow* cenderung 0 m³/h. Aliran angin (270°) tidak dapat masuk ke dalam *internal-corridor* melalui bukaan posisi 225° (pukul 08.00-19.00) sehingga mengenai dinding yang lain. Selain itu, kecepatan angin *V reference* (*Vref.*) di lantai 3 tidak mencukupi (1,5 m/s) sehingga tidak dapat mencapai zona 1. Hanya pada pukul 19.00-08.00 zona 1 berada dalam lingkup *Cp+* (*windward*) sehingga persyaratan pergantian udara (*ACH* >2) masih bisa terpenuhi.

Setelah dilakukan modifikasi maksimum pada sisi *external opening* (*width* 1,5 m menjadi 2,5 m) kondisi pergantian udara zona 1 lantai 3 tidak mengalami perubahan karena antara pukul 08.00-19.00 tidak terjadi *out-flow* (Gambar 10b).

Untuk meningkatkan pola pergantian udara agar memenuhi persyaratan maka orientasi bukaan *external* terhadap arah datangnya angin (*windward*) memegang peranan penting.



a



b

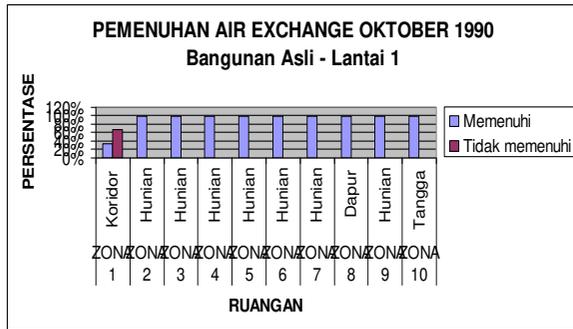
Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006.

Gambar 10. Pemenuhan ACH bulan Januari untuk lantai 3 (a) bangunan *existing* dan (b) bangunan modifikasi

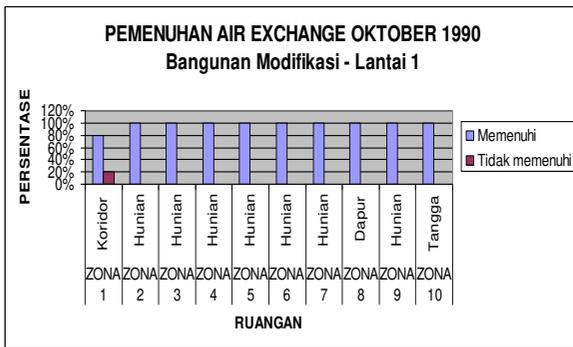
▪ **Oktober: Lantai 1 dan 3**

Kecepatan angin bulan Oktober cenderung rendah yaitu 1 m/s (sebesar 61%). Pergantian udara pada zona 1 lantai 1 sangat tergantung pada pembukaan pintu ganda sehingga hanya terjadi sebesar 33% (gambar 11a), akibat *air flow* lebih sering 0 m³/h. Arah angin 90° dengan *Cp+* dapat masuk melalui pintu ganda ke dalam *internal-corridor* hanya pada jadual pembukaan pintu pukul 07.00-19.00 walau beberapa jam masih kurang memenuhi persyaratan pergantian udara (*ACH* < 2). Selebihnya berada pada *Cp-* dan kecepatan angin sangat rendah hingga tidak dapat memenuhi persyaratan (*ACH* = 0).

Hasil modifikasi melalui penambahan *bovenlicht* pada masing-masing pintu ganda zona 1 lantai 1 belum sepenuhnya dapat meningkatkan ACH, hanya meningkat 50% daripada bangunan *existing* (gambar 11b). Hal ini dipengaruhi keadaan kecepatan angin pada *site* yang tidak signifikan (*Vref.* = 0,62 m/s).



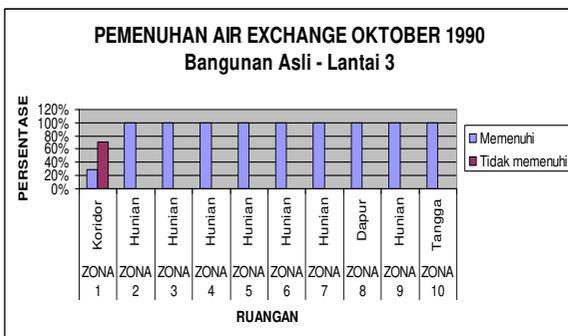
a



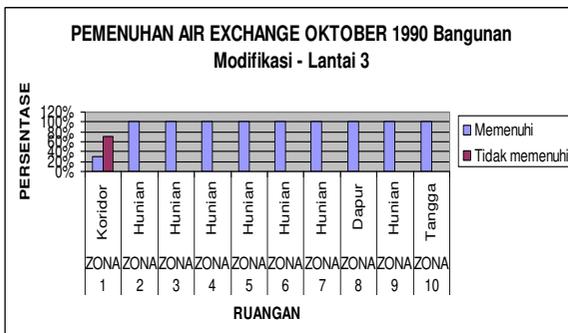
b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 11. Pemenuhan ACH bulan Oktober untuk lantai 1 (a) bangunan existing dan (b) bangunan modifikasi



a



b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 12. Pemenuhan ACH bulan Oktober untuk lantai 3 (a) bangunan existing dan (b) bangunan modifikasi

Pergantian udara zona 1 lantai 3 sangat tergantung pada orientasi bukaan sehingga hanya mampu terjadi 29% (gambar 12a), akibat *air flow* cenderung 0 m³/h. Aliran angin yang dapat masuk ke dalam zona 1 hanya pukul 01.00-07.00 (6 jam) dari sisi Barat Daya (225°) tegak lurus pintu ganda.

Setelah dilakukan modifikasi *external opening* melalui penambahan luasan bukaan (*width* 1,5 m menjadi 2,5 m), ternyata untuk zona 1 lantai 3 juga tidak ada peningkatan (gambar 12b). Pada pukul 02.00-07.00 (5 jam) arah angin bertiup dari Barat Daya (225°), sehingga dapat melewati salah satu bukaan *internal-corridor* berada. Namun pada jam-jam berikutnya dimana orientasi bangunan 45° (Timur-Laut) sedangkan arah angin cenderung 90° (Timur) dan kecepatan angin pada lantai 3 (*Vref.* = 1,5 m/s) tidak mampu mencapai *internal-corridor* maka pergantian udara pun tidak bisa mencapai optimum.

Gambar 12 menunjukkan bahwa semua pintu dan jendela pada zona 2-10 yang memiliki *bovenlicht* dengan jadwal pembukaan selama 24 jam dan letaknya tidak *internal*, sudah dapat memenuhi kebutuhan pergantian udara 100%.

b. Kecepatan Angin Internal dalam Upaya Penciptaan Kenyamanan Termal Ruang Dalam

Berdasarkan data iklim, kecepatan angin di Surabaya tidak terlalu tinggi, umumnya sebesar 2,5 m/s (diukur di bandara) dan sebagian besar arah angin dari Timur-Barat. Untuk menghitung kecepatan angin yang ada pada *site* dapat dilakukan dengan tahap berikut:

- Mencari kecepatan angin 100% pada ketinggian yang sesuai dengan lokasi pengukuran. Pada tiap kelompok daerah mempunyai tinggi tertentu dimana kecepatan angin akan mencapai nilai 100%.
- Berdasarkan rumus Aynsley (1995:89) tentang *Power law* adalah:

$$V_z = V_g \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^a$$

Keterangan:

V_z = mean wind speed at height z, dalam hal ini pada ketinggian 10 m.

V_g = mean wind speed pada gradient tinggi *Z_g*, dalam hal ini kecepatan angin yang mencapai 100%, dengan ketinggian yang sesuai dengan *terrain roughness*-nya.

a = eksponen yang terkait dengan *terrain roughness* (tabel 5)

Tabel 2. Terrain constant for the earth boundary layers

| Terrain Description | Zg gradient height, ft (m) | Zo roughness length ft (m) | α mean wind speed exponent | B gust speed exponent |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Open sea, ice, tundra, desert | 800 (250) | 0,003 (0,001) | 0,11 | 0,07 |
| Open country with low bushes or scattered trees | 1000 (300) | 1,0 (0,03) | 0,15 | 0,09 |
| Suburban areas, small towns, well wooded areas | 1300 (400) | 1,0 (0,3) | 0,25 | 0,14 |
| Numerous tall buildings, city centers, dense industrial development | 1600 (500) | 10 (3) | 0,36 | 0,20 |

Sumber: Aynsley, 1997

- Mencari V_{ref} . dengan rumus yang sama. Nilai V_g berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya; Z_g adalah ketinggian yang sesuai dengan *terrain roughness* dimana kecepatan angin mencapai 100%; Z_{ref} . adalah tinggi *reference*.

$$V_{ref} = V_g \left(\frac{Z_{ref}}{Z_g} \right)^{\alpha}$$

Jika kecepatan angin yang paling sering terjadi di Surabaya adalah 2,5 m/s dan diukur di bandara, maka kecepatan angin pada *site* adalah:

- $V_z = 2.5 \text{ m/s}$
- $Z = 10 \text{ m}$
- $Z_g \text{ (open country)} = 300 \text{ m}$
- $Z_g \text{ (sub-urban)} = 400 \text{ m}$
- $a \text{ (open country)} = 0,15$
- $a \text{ (sub-urban)} = 0,25$

A. Prosedur Perhitungan Kecepatan Angin

1. Mencari kecepatan angin 100% di daerah *open-country* pada ketinggian 300 m:

$$V_z = V_g \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\alpha}$$

$$2.5 = V_g \left(\frac{10}{300} \right)^{0.15}$$

$$V_g = 4,2 \text{ m/s}$$

Maka kecepatan angin 100% di daerah *open-country* adalah 4,2 m/s dan kecepatan tersebut setara dengan kecepatan angin 100% di daerah *sub-urban*, yaitu pada ketinggian 400 m.

2. Mencari V_{ref} :
 Untuk lantai 1: $Z = 0.2$
 Untuk lantai 3: $Z = 6.6$

$$V_{ref} = V_g \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\alpha}$$

$$V_{ref} = 4.2 \left(\frac{0.2}{400} \right)^{0.25}$$

$$V_{ref} = 0.62 \text{ m/s}$$

$$V_{ref} = V_g \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\alpha}$$

$$V_{ref} = 4.2 \left[\frac{6.6}{400} \right]^{0.25}$$

$$V_{ref} = 1.5 \text{ m/s}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh V_{ref} . lantai 1 sebesar **0,62 m/s** dan V_{ref} . lantai 3 sebesar **1,5 m/s**.

Persyaratan kecepatan angin untuk kenyamanan termal pada bangunan sangat dipengaruhi oleh temperatur *internal* dan kelembaban relatif (RH). Semakin tidak nyaman, kecepatan angin yang dibutuhkan semakin tinggi. Dari hasil studi yang dilakukan oleh Macfarlane, telah dibuat sebuah persamaan untuk menghitung kecepatan angin yang dibutuhkan untuk kenyamanan termal dan telah memasukkan unsur temperatur dan kelembaban, yaitu:

$$C_v = 0.15 \{ DBT - 27.2 + ([RH - 60]/10) \times 0.56 \} \text{ m/s}$$

Keterangan:

C_v = kec. pergerakan angin untuk memperbaiki kenyamanan termal (m/s)

DBT = *Dry-Bulb Temperature*/temperatur bola kering (°C)

RH = *Relative humidity*/kelembaban relatif (%)

Persamaan matematis tersebut telah dikembangkan oleh Aynsley dalam bentuk Nomogram untuk memperkirakan kecepatan angin yang diperlukan untuk kenyamanan termal. Berdasarkan rumus tersebut, maka kecepatan angin yang dibutuhkan untuk kenyamanan termal Rusun Dupak Bangunrejo dapat dihitung. Untuk perhitungan, diambil asumsi temperatur *T neutrality* (T_n) pada bulan Januari dan Oktober, berdasarkan data iklim *T average* (T_{av}) pada bulan Januari adalah 27°C dan bulan Oktober adalah 29.1°C, maka:

Pada bulan Januari $T_n = 17.6 + 0.31 * T_{av} = 25.97^\circ\text{C}$

Pada bulan Oktober $T_n = 17.6 + 0.31 * T_{av} = 26.62^\circ\text{C}$

Untuk kelembaban, digunakan kelembaban rata-rata dari data iklim yaitu pada bulan Januari sebesar 81% dan pada bulan Oktober sebesar 64%. Berdasarkan perhitungan Macfarlane, kecepatan angin yang dibutuhkan adalah:

Bulan Januari:

$$C_v = 0.15 \{ DBT - 27.2 + ([RH - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = 0.15 \{ 25.97 - 27.2 + ([81 - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = -0.0081 m/s$$

Bulan Oktober:

$$C_v = 0.15 \{ BDT - 27.2 + ([RH - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = 0.15 \{ 26.62 - 27.2 + ([64 - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = -0.0534 m/s$$

Dari hasil perhitungan menggunakan metoda Macfarlane dengan T_n diperoleh nilai negatif. Namun, apabila menggunakan T_{av} dalam tiap bulan maka diperoleh nilai sebagai berikut:

Bulan Januari :

$$C_v = 0.15 \{ DBT - 27.2 + ([RH - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = 0.15 \{ 27 - 27.2 + ([81 - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = 0.1464 m/s \approx 0.15 m/s$$

Bulan Oktober :

$$C_v = 0.15 \{ BDT - 27.2 + ([RH - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = 0.15 \{ 29.1 - 27.2 + ([64 - 60]/10) \times 0.56 \} m/s$$

$$C_v = 0.3186 m/s \approx 0.32 m/s$$

Prianto dan Depecker (2001:15) menyatakan bahwa beberapa peneliti telah melakukan studi mengenai gerakan udara dalam bangunan yang dapat memberikan kenyamanan termal dimana harus ditentukan pada 1,0-1,5 m/s dan 0,2-1,5 m/s untuk aktivitas ringan serta koefisien kecepatan rata-rata harus berkisar 0,3-0,7.

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan program AIOLOS diperoleh data ACH dari tiap zona. Data tersebut dapat digunakan untuk menghitung kecepatan angin (V) dan dianalisis berdasarkan kenyamanan termal. Untuk menghitung kecepatan angin dari data ACH, digunakan rumus dari Szokolay (2004:74) dan Swami-Chandra (1988:254), secara singkat diperoleh rumus kecepatan angin sebagai berikut :

$$V = \frac{ACH \times V_{zona}}{A_e \times 3600} \quad \text{dimana} \quad A_e = \frac{A_o \times A_i}{\sqrt{(A_o^2 + A_i^2)}}$$

Rumus tersebut dimasukkan ke dalam tabel ACH bangunan *existing* dan modifikasi, sehingga diperoleh kecepatan angin *internal* untuk dianalisis.

B. Analisis Kenyamanan Termal

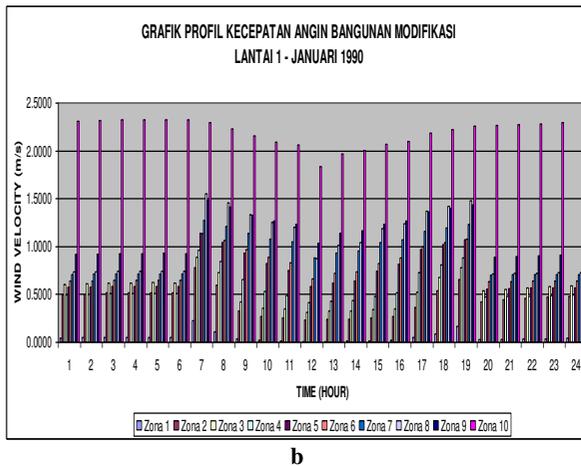
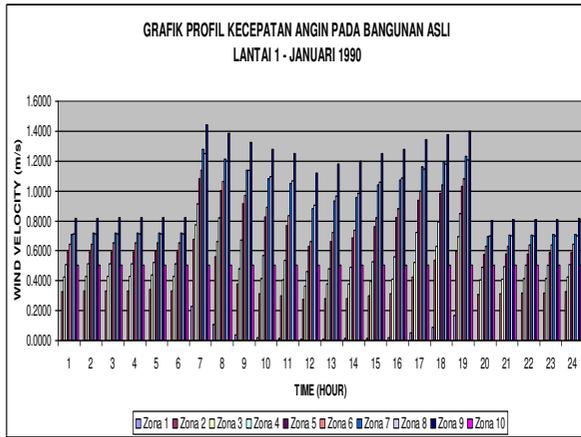
Untuk menganalisis kondisi kecepatan angin *internal* pada bangunan *existing* dan modifikasi, digunakan standar kecepatan angin berdasarkan metoda Macfarlane dan hasil penelitian Prianto dan Depecker (2001:21). Perhitungan dengan metoda Macfarlane menggunakan temperatur *external* rata-rata di bulan Januari dan Oktober, seperti yang telah dihitung di atas. Standar kecepatan angin untuk kenyamanan termal bulan Januari sebesar **0,15 m/s** untuk zona hunian, koridor, tangga, dan musholla, sedangkan bulan Oktober sebesar **0,32 m/s** untuk zona yang sama. Khusus untuk zona dapur, kecepatan angin yang disyaratkan sebesar **1,0 m/s** karena dapur membutuhkan pendinginan lebih besar dibandingkan ruang lain, akibat panas kompor dan kegiatan memasak.

▪ Kondisi Ventilasi Lantai 1 dan 3 pada bulan Januari

Gambar 13a memperlihatkan bahwa pada lantai 1 kecepatan angin *internal* terbesar rata-rata terdapat pada zona 9 (hunian) dan terendah terdapat pada zona 1. Rata-rata tiap zona mengalami kenaikan kecepatan angin yang signifikan pada saat pintu dan jendela mulai dibuka pukul 07.00. Berdasarkan prinsip aliran angin, angin mengalir karena adanya perbedaan tekanan. Kecepatan angin cenderung stabil setelah tekanan menjadi homogen.

Pada zona hunian, persyaratan kecepatan angin dalam upaya menciptakan kenyamanan termal telah terpenuhi sepanjang hari. Namun, pada zona non-hunian seperti *internal-corridor* kecepatan angin hanya terpenuhi selama 2 jam saja berada dalam kondisi nyaman yaitu pada jam 07.00 dan 19.00

(gambar 14a). Kecepatan angin pada *internal-corridor* menjadi sangat rendah karena seringkali tidak terjadi hembusan angin (0 m/s). Selain itu, luas penampang efektif (A_e) sangat besar yaitu 7.3528 m² sehingga hasil perhitungan menunjukkan kecepatan angin menjadi sangat kecil berkisar antara 0-1,9 m/s. Dapur dapat terasa nyaman selama 10 jam yaitu pada jam 07.00-11.00 dan 15.00-19.00 ketika kegiatan memasak berlangsung.

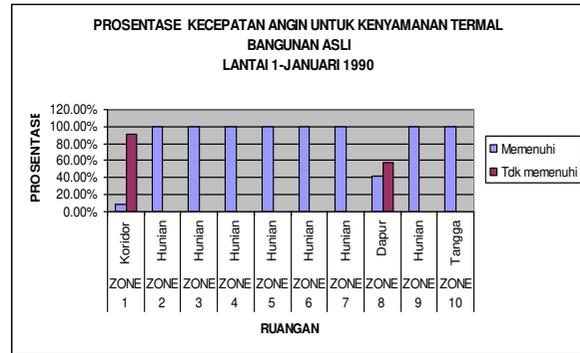


Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

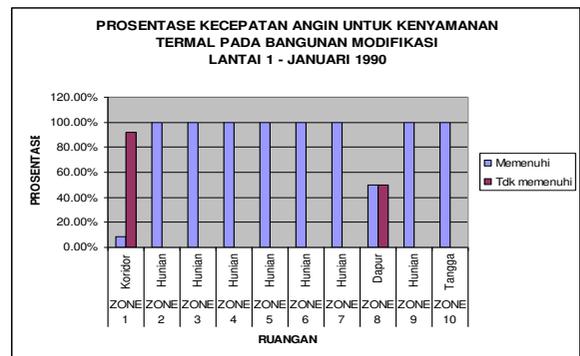
Gambar 13. Profil kecepatan angin *internal* (a) bangunan *existing*: terbesar pada zona 9 dan terkecil pada zona 1 dan (b) bangunan modifikasi: terbesar pada zona 10 dan terkecil pada zona 1

Gambar 13b menunjukkan bahwa hasil modifikasi bukaan pada lantai 1 menghasilkan peningkatan kecepatan angin *internal* terbesar rata-rata pada zona 10 (tangga), karena diberi penambahan jendela dan *bovenlicht* pada kedua sisi sehingga prinsip *cross ventilation* bisa berjalan dengan baik, namun kecepatan angin terendah masih pada zona 1 (*internal-corridor*). Gambar 14b memperlihatkan pola yang tidak jauh berbeda dengan bangunan *existing* (sebelum dimodifikasi) yaitu terjadi kenaikan

kecepatan walaupun tidak terlalu besar (10%) pada zona 8 (dapur).



a



b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

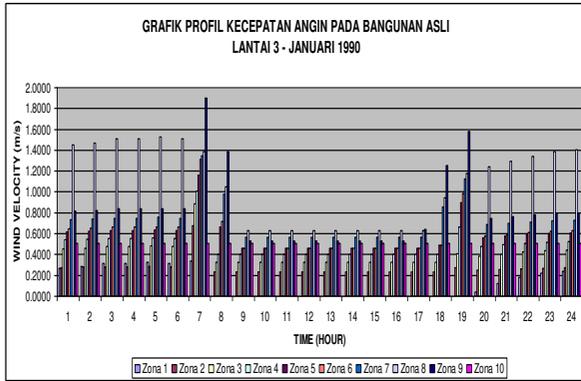
Gambar 14. Prosentase kecepatan angin *internal* untuk kenyamanan termal tiap zona lantai 1 (a) bangunan *existing* dan (b) bangunan modifikasi

Untuk lantai 3 (gambar 15a) kecepatan angin *internal* terbesar rata-rata terjadi pada zona 8 (toilet) dan kecepatan angin terendah terjadi pada zona 1 (*internal corridor*). Rata-rata tiap zona mengalami juga kenaikan kecepatan angin yang signifikan pada saat jadwal pintu dan jendela dibuka, yaitu pukul 07.00 seperti lantai 1. Kecepatan angin *external* di lantai 3 pada bulan Januari dari hasil perhitungan adalah 1,5 m/s, sementara kecepatan angin *internal* berkisar antara 0-1,9 m/s. tidak berbeda jauh dengan kecepatan angin di lantai 1.

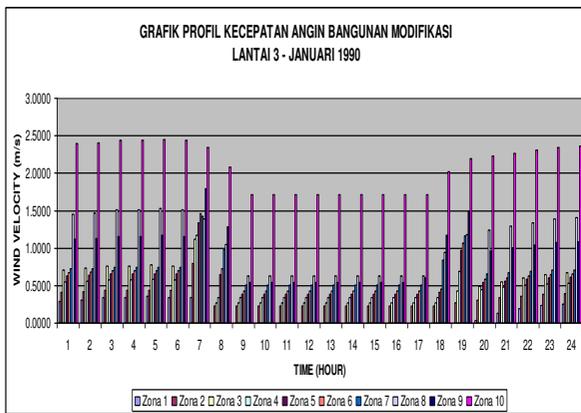
Kecepatan angin di siang hari cenderung stabil, kenaikan kecepatan angin terjadi pada jam 07.00 dan 19.00. Untuk zona 8 (toilet), pada malam hari kecepatan angin cenderung tinggi karena *external opening* menghadap arah 315° sehingga memungkinkan mendapatkan angin dari arah 270° yang sebagian besar terjadi pada malam hari.

Pada zona hunian, persyaratan kecepatan angin dalam upaya menciptakan kenyamanan termal telah terpenuhi sepanjang hari (100%) tetapi pada zona non-hunian kurang memenuhi. Pada zona 1 hanya

terpenuhi selama 10 jam namun 8 jam lebih lama dibandingkan lantai 1. Sedangkan dapur terasa nyaman selama 1 jam yaitu pukul 07.00, kondisi ini lebih buruk dari lantai 1 (gambar 16a).



a



b

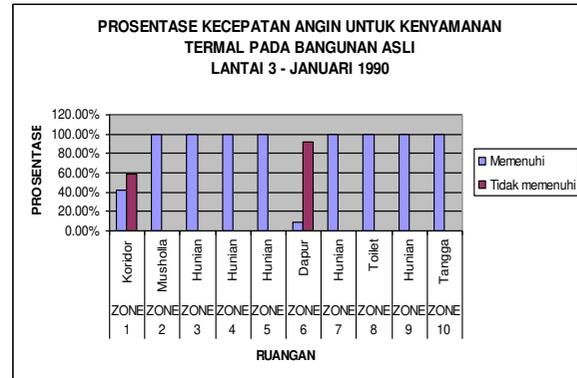
Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 15. Profil kecepatan angin *internal* (a) bangunan *existing*: terbesar pada zona 8 dan terkecil pada zona 1 dan (b) bangunan modifikasi: terbesar pada zona 10 dan terkecil pada zona 1

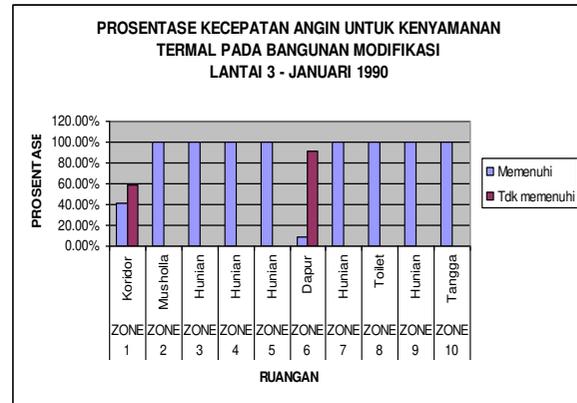
Modifikasi pada bukaan lantai 3 berupa penambahan jendela dan *bovenlicht* pada setiap zona sehingga membawa pengaruh terhadap nilai *in-out flow*, ACH, dan kecepatan angin, utamanya pada luasan efektif bukaan. Gambar 15b memperlihatkan pola yang tidak jauh berbeda dengan bangunan *existing* sebelum dimodifikasi yaitu terjadi kenaikan kecepatan walaupun tidak terlalu besar. Kecepatan terbesar kini berada pada zona 10 (tangga) karena diberi penambahan jendela dan *bovenlicht* pada kedua sisi sehingga prinsip *cross ventilation* bisa berjalan dengan baik.

Pada zona hunian, persyaratan kecepatan angin dalam upaya menciptakan kenyamanan termal telah terpenuhi sepanjang hari (100%). Namun pada zona non-hunian (zona 1) hanya terpenuhi selama 10 jam berada dalam kondisi nyaman, 8 jam lebih lama dibandingkan lantai 1. Sedangkan zona 6 (dapur),

nyaman selama 2 jam yaitu pada pukul 07.00-09.00, hanya lebih lama 1 jam dibandingkan sebelum dimodifikasi (gambar 16b).



a



b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

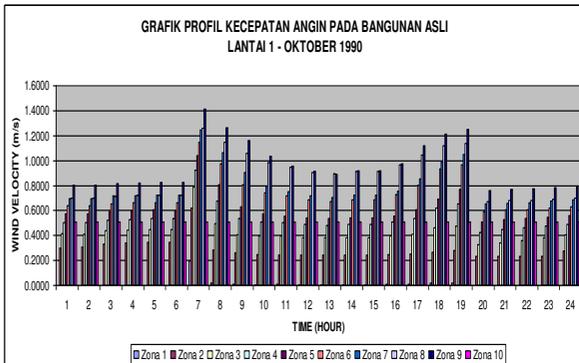
Gambar 16. Presentase kecepatan angin *internal* untuk kenyamanan termal tiap zona lantai 3 (a) bangunan *existing* dan (b) bangunan modifikasi

Jika ditinjau menurut aktifitas di dalam zona 1 (*internal corridor*), kondisi nyaman tidak harus terpenuhi, karena hanya digunakan untuk sirkulasi penghuni dalam bangunan. Berbeda dengan zona hunian (unit ruangan). Sementara zona 8 (dapur), jika dilihat dari waktu nyaman dan tidak nyaman, maka ketidaknyamanan masih dapat ditolerir karena hanya terjadi pukul 20.00-06.00 dan 12.00-14.00. Pada waktu tersebut, dimungkinkan aktifitas dapur tidak berlangsung karena biasanya memasak pada pagi atau sore hari. Secara keseluruhan, pada bulan Januari kondisi ruang hunian lantai 1 dan 3 sudah memenuhi persyaratan kenyamanan termal.

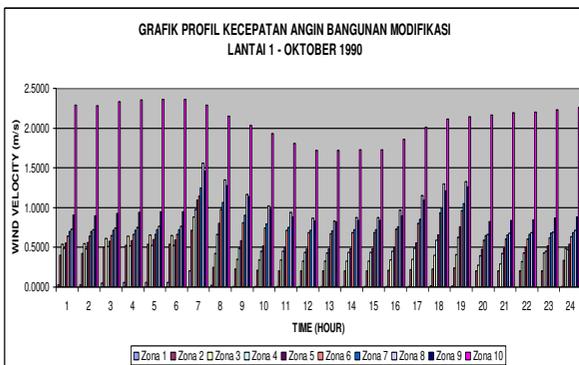
▪ **Kondisi Ventilasi Lantai 1 dan 3 pada bulan Oktober**

Gambar 17a menunjukkan bahwa untuk lantai 1 kecepatan angin *internal* terbesar rata-rata terdapat pada zona 9 (hunian) dan kecepatan angin terendah

terdapat pada zona 1 (*internal-corridor*). Rata-rata tiap zona mengalami kenaikan kecepatan angin yang signifikan pada saat jadwal pintu dan jendela dibuka.



a



b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 17. Profil kecepatan angin *internal* (a) bangunan *existing*: terbesar pada zona 9 dan terkecil pada zona 1 dan (b) bangunan modifikasi: terbesar pada zona 10 dan terkecil pada zona 1

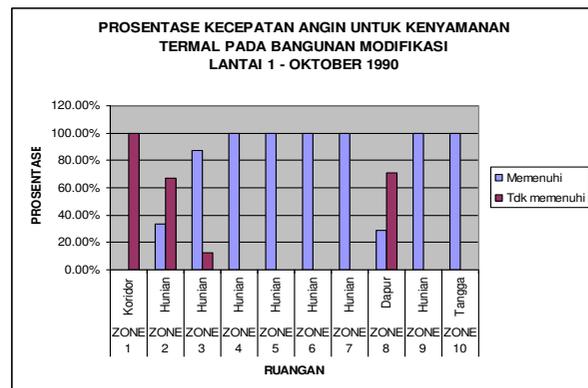
Kecepatan angin bulan Oktober cenderung rendah, seringkali terjadi 1,0 m/s pada waktu malam hari, sementara pada siang hari dapat mencapai 4,3 m/s dan arah angin dominan 90° (Timur). Pada zona hunian, persyaratan kecepatan angin dalam upaya menciptakan kenyamanan termal telah terpenuhi sepanjang hari (100%), kecuali pada zona 2 kenyamanan sedikit terpenuhi saat angin berhembus dari arah 225° dan 247,5° saja. Pada zona non-hunian persyaratan kurang terpenuhi seperti zona 1 (*internal-corridor*) selama 24 jam berada dalam kondisi tidak nyaman dan zona 6 (dapur) hanya terasa nyaman selama 6 jam saja (Gambar 18a).

Gambar 18b menunjukkan bahwa untuk bangunan modifikasi lantai 1 kecepatan angin *internal* terbesar rata-rata terdapat pada zona 10 (tangga) dan kecepatan angin terendah tetap pada zona 1 (*internal-corridor*). Kenyamanan lantai 1 pada bangunan modifikasi tidak jauh berbeda dengan bangunan *existing* (gambar 18b). Zona 1 tetap tidak mengalami

peningkatan, zona 2 sedikit lebih baik, setidaknya bertambah 3 jam. Namun pada zona 3, kecepatan angin cenderung menurun sehingga selama 3 jam terasa tidak nyaman. Penambahan penampang bukaan membuat nilai Ae menjadi lebih besar, sementara volume tetap. Hasil penambahan nilai ACH akibat perluasan penampang bukaan yang tidak terlalu signifikan, berakibat justru menurunkan kecepatan angin dalam zona 3.



a



B

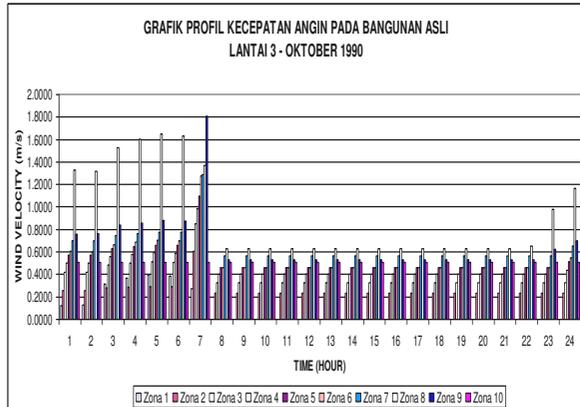
Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 18. Prosentase kecepatan angin *internal* untuk kenyamanan termal tiap zona lantai 1 (a) bangunan *existing* dan (b) bangunan modifikasi

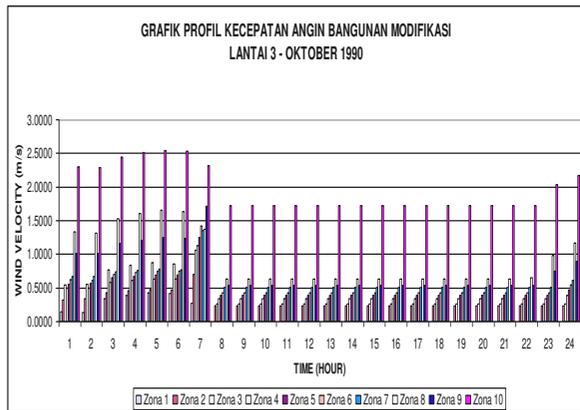
Dapur mengalami sedikit peningkatan kenyamanan hingga selama 7 jam antara pukul 07.00-10.00 dan 15.00-19.00. Segera setelah pintu ditutup dan di siang hari maka pemakaian dapur akan terasa tidak nyaman. Namun jika ditinjau menurut jadwal aktifitasnya maka kenyamanan kegiatan memasak pada waktu pagi dan sore hari seperti jadwal di atas sudah cukup memadai.

Pada bulan Oktober, kondisi lantai 3 lebih buruk daripada lantai 1. Kecepatan angin *internal* terbesar rata-rata terdapat pada zona 8 (toilet) dan kecepatan angin terendah terdapat pada zona 1 (gambar 19a). Rata-rata kecepatan angin tiap zona cenderung stabil

sepanjang hari. Pengaruh suhu yang cukup tinggi dari pagi hingga malam hari dimungkinkan turut mempengaruhi kecepatan angin, terutama tekanan di dalam ruang. Temperatur pada pukul 07.00-24.00 sebesar 26,4°C dan 27,2°C, sehingga lebih panas daripada Tn di bulan Oktober (26,62° C) yang pada simulasi menjadi temperatur *internal* bangunan.



a



b

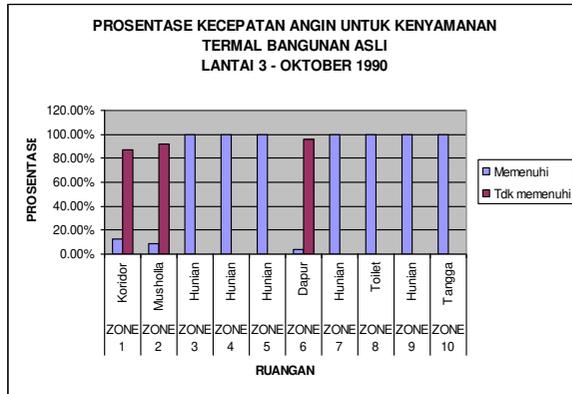
Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 19. Profil kecepatan angin *internal* (a) bangunan *existing*: terbesar pada zona 8 dan terkecil pada zona 1 dan (b) bangunan modifikasi: terbesar pada zona 10 dan terkecil pada zona 1

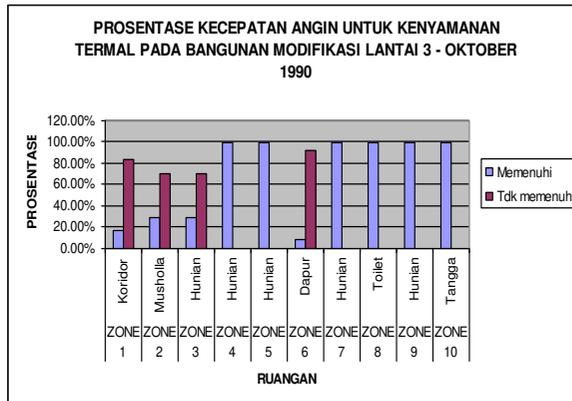
Zona 2 (musholla) hanya memperoleh kecepatan angin yang nyaman selama 1 jam artinya lebih buruk dibandingkan lantai 1 (gambar 20a) dan hampir sama dengan zona 6 (dapur). Zona 1 nyaman hanya selama 3 jam saja. Kecepatan angin *internal* pada beberapa zona mencapai nilai tertinggi ketika angin datang dari arah 225° dan 247,5° saja.

Hasil modifikasi menunjukkan bahwa zona 10 (tangga) mengalami kenaikan kecepatan angin yang sangat besar dibandingkan zona lainnya (gambar 19b). Gambar 20b menunjukkan bahwa kenyamanan di zona 1 dan 2 sedikit meningkat namun zona 3 (hunian) justru menurun, kenyamanan hanya antara

pukul 01.00-07.00 dan sepanjang hari menjadi tidak nyaman. Dapur sedikit mengalami perubahan, kenyamanan berlangsung selama 1 jam. Perluasan penampang jendela dan *bovenlicht* justru dapat menurunkan kecepatan angin *internal*.



a



b

Sumber: Indrani dan Nurdiah, 2006

Gambar 20. Prosentase kecepatan angin *internal* untuk kenyamanan termal tiap zona lantai 3 (a) bangunan *existing* dan (b) bangunan modifikasi

SIMPULAN

Hasil studi menunjukkan bahwa secara keseluruhan kinerja rusun di wilayah *sub-urban* yang tidak memiliki orientasi bukaan tegak lurus aliran angin masih dapat memenuhi persyaratan pergantian udara jika pintu dan jendelanya memiliki *bovenlicht* dengan jadwal pembukaan selama 24 jam. Namun jika *layout* bangunan memiliki ruang di dalam ruang seperti *internal corridor* pada penelitian di atas, maka persyaratan pergantian udara pasti tidak terpenuhi sehingga luasan bukaan perlu ditingkatkan minimal 50% luasan lantai. Dalam hal ini pernyataan yang pernah menjadi patokan (*rule of thumb*) bahwa luas jendela minimal adalah 20% dari luasan lantai, untuk *layout* tiga lapis di wilayah *sub-urban* sudah tidak memadai.

Dalam mendesain bukaan untuk peningkatan ventilasi alami dan kenyamanan termal ruang dalam, tidak hanya memperhatikan luasan bukaan maksimal yang mampu dibuat pada sebuah bidang dinding tetapi posisi terhadap arah aliran angin (orientasi bukaan) juga harus diperhitungkan terhadap kondisi iklim setempat. Apabila orientasi bukaan berada di wilayah *wind shadow* maka nilai C_p akan negatif, sehingga ruang dalam bukannya menerima angin, yang terjadi justru menerima tekanan hisap.

Hasil simulasi modifikasi melalui penambahan luasan bukaan *external* pada beberapa zona mampu menaikkan kecepatan angin *internal*. Zona-zona tersebut mendapatkan aliran angin langsung dengan nilai C_p positif. Sementara pada zona tertentu, justru menurunkan kecepatan angin di dalam ruang. Untuk itu, perluasan bukaan harus memperhatikan perbandingan besaran *outlet* dan *inlet*. Sesuai dengan prinsip *ventury effect*, *inlet* yang lebih kecil dapat menaikkan kecepatan angin. Perluasan bukaan dapat berakibat naiknya nilai *air change*, namun juga menaikkan luasan bukaan efektif (A_e). Apabila ACH tidak mengalami perubahan kenaikan yang berarti, maka dalam prosedur perhitungan nilai A_e justru akan menjadi pembagi yang besar sehingga kecepatan angin *internal* menjadi rendah, akibatnya kenyamanan termal tidak terpenuhi.

Untuk memperoleh debit ventilasi efektif pada rusun di lingkungan *sub-urban* yang terpaksa tidak pada posisi *windward*, disarankan agar *layout* dibuat satu lapis, artinya tidak ada ruang di dalam ruang seperti *internal corridor* yang dapat mengakibatkan ruang tersebut tidak memperoleh aliran angin langsung. Pemilihan *layout* ruang satu lapis memastikan terjadinya *cross ventilation* secara lebih baik.

Dengan kecepatan angin yang cukup dan arah yang langsung menuju pada *inlet* akan memungkinkan terjadinya pertukaran udara yang lancar. Namun keberadaan bangunan di sekitarnya seringkali mengurangi laju udara dan dapat membelokkan arah angin. Pada kondisi di mana bangunan berada di area yang rapat, perlu dicari siasat desain jendela dan detail elemen bangunan lainnya yang dapat membantu mengarahkan angin kepada *inlet* dan menambah kecepatannya yang telah berkurang akibat obyek di seputar bangunan.

Proses pergantian udara (*air change*) akan lebih lancar bila didukung dengan kecepatan udara yang memadai. Pada kondisi udara hampir tidak bergerak

(kecepatan sangat rendah) harus dibantu dengan desain jendela yang mampu mendorong terjadinya pergerakan yang lebih cepat atau memperbesar kecepatan udara.

Selain itu, peningkatan dapat juga dilakukan dengan memilih tipe jendela yang berbeda kemampuan dalam mengalirkan udara. Apabila tipe jendela yang dipilih dengan luas area efektif lebih kecil maka diperlukan jumlah jendela yang lebih banyak. Semakin besar volume ruang maka dibutuhkan jendela semakin banyak (besar). Semakin padat bangunan di sekitarnya, semakin banyak (besar) jendela yang diperlukan agar penggunaan sistem pengkondisian udara buatan dapat dihindarkan dan penghematan energi operasional bangunan dapat diwujudkan.

REFERENSI

- Aynsley, R.M., 1995. *Architectural Aerodynamics: Handbook of Architectural Technology*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Aynsley, R.M. 1997. *Architectural Aerodynamics*. Applied Science Publishers Ltd. London.
- Aynsley, R.M. 1999. *Estimation of Airflow Inside Buildings*. James Cook University of North Queensland, Australia.
- Indrani, Hedy C. dan Nurdiah, Esti N. 2006. *Penilaian Performa Bangunan Rumah Susun dari Segi Ventilasi, Termal, dan Daylighting*. Program Pasca Sarjana, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, hal. 63-94, 159-162.
- Givoni, Baruch. 1976. *Man, Climate, and Architecture*. Applied Science Publisher Ltd., London, p. 289-306.
- Prianto, E, and P. Depecker. 2001. *A Case Study of Traditional Dwelling in Urban Living Quarter in Tropical Humid Region*, CERMA Laboratory Ecole d'Architecture de Nantes Rue Massenet.
- Swami, M.V. and Chandra, S. 1988. *Correlations for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflow*. ASHRAE Transaction, Vol. 94. No. 1, p. 243-266.
- Szocolay, S.V. 1987. *Thermal Design of Buildings*, RAI Education Division, Canberra.
- Szocolay, S.V. 2004. *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*, Architectural Press, Oxford.