

PANEL DINDING BERVENTILASI (BREATHING WALL) PADA SELUBUNG BANGUNAN DI DAERAH BERIKLIM TROPIS LEMBAB

¹⁾**Putri Herlia Pramitasari**

¹⁾ Dosen Prodi Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITN- Malang
herlia.pramitasari@gmail.com

ABSTRAKSI

*Dinding merupakan komponen selubung bangunan yang dominan. Tingginya kelembaban dan radiasi matahari di daerah beriklim tropis lembab berpengaruh terhadap kinerja selubung bangunan dan faktor kenyamanan penghuni dalam ruang. Selubung bangunan harus dapat berperan optimal sebagai pengendali kelembaban dan pencegah rambatan kalor, terutama sisi barat dan timur bangunan yang berfungsi sebagai kapasitor kalor. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu upaya pengkondisian ruang dalam bangunan untuk mengontrol kelembaban dan mencegah rambatan kalor melalui strategi desain pasif selubung bangunan yang dapat berperan sebagai modifier lingkungan. Selubung bangunan harus dapat mencegah rambatan kalor masuk ke dalam bangunan melalui penerapan insulasi termal, teknologi pembayang yang optimum, dan memiliki semacam "kualitas bernafas" untuk mengendalikan kelembaban. Metodologi kualitatif dikaji melalui pengumpulan data sekunder dan metoda analisis perbandingan deskriptif-evaluatif. Hasil studi ini dapat disimpulkan bahwa aplikasi panel dinding berventilasi (*breathing wall*) pada selubung bangunan melalui penggunaan insulasi eksternal dinamis diyakini efektif dalam mengendalikan kelembaban dan mencegah rambatan kalor pada selubung bangunan. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan sebagai validasi data melalui metode eksperimental.*

Kata Kunci: *breathing wall, kontrol kelembaban, insulasi termal.*

PENDAHULUAN

Kibert, C. J. (2008) menjelaskan bahwa strategi desain pasif harus mempertimbangkan banyak faktor, yaitu kondisi iklim, kondisi tapak, rasio bangunan, orientasi bangunan, massa bangunan, penggunaan bangunan, strategi pencahayaan, selubung bangunan, beban internal, dan strategi ventilasi (penghawaan) bangunan.

Geshwiler, M. (2006) menjelaskan bahwa selubung bangunan menunjukkan fungsi primer untuk menjaga kondisi cuaca serta menentukan seberapa baik kinerja bangunan dan pengguna. Desain dan teknik

konstruksi material selubung bangunan menunjukkan penggunaan usia pakai bangunan, kualitas udara dalam ruang, ukuran HVAC, desain struktural, dan biaya pemeliharaan, dimana seluruhnya memiliki pengaruh signifikan terhadap lingkungan dan total biaya kepemilikan.

Selubung bangunan di sisi barat dan timur bangunan pada daerah beriklim tropis lembab memiliki kemampuan sebagai kapasitor kalor, dimana dapat menyimpan dan melepas kalor saat terjadi perbedaan temperatur udara pada ruang dalam dengan ruang luar bangunan, dan memiliki kandungan energi yang besar karena mendapat sinar matahari yang banyak. Pentingnya penerapan insulasi termal pada selubung bangunan pada daerah beriklim tropis lembab dapat dijadikan sebagai strategi pencegahan pemanasan untuk mendinginkan bangunan, salah satunya dengan menghambat terjadinya penyerapan kalor melalui teknologi insulasi material pada selubung bangunan. Penggunaan insulasi material yang tepat pada bangunan berkontribusi dalam mengurangi beban pendinginan yang diperlukan, mengurangi biaya energi tahunan, dan membantu dalam memperluas periode kenyamanan termal tanpa ketergantungan pada sistem mekanis-AC.

Di sisi lain, tingginya kelembaban udara menyebabkan kandungan air pada selubung bangunan tinggi, dimana dinding bangunan memiliki sifat higroskopis, kapilaritas, dan permeabilitas uap yang menyebabkan dinding bangunan mudah lembab jika terkena air. Fenomena tersebut ditegaskan oleh Geshwiler, M. (2006) bahwa selubung bangunan berfungsi utama untuk melindungi ruang dalam bangunan dan pengguna dari cuaca buruk, namun terdapat masalah dengan adanya intrusi kelembaban melalui selubung bangunan, dimana pada akhirnya dapat mengakibatkan *sick building syndrome*. Masalah selanjutnya, seperti timbulnya jamur, lumut, produksi spora, dll. dapat mengakibatkan evakuasi bangunan dan biaya perbaikan gedung yang besar, bahkan terkadang melebihi biaya awal pembangunan gedung.

Berdasarkan uraian di atas dapat diketahui berbagai permasalahan utama pada daerah beriklim tropis lembab, seperti tingginya radiasi matahari dan kelembaban udara, sehingga perlu dilakukan suatu upaya pengkondisian ruang dalam bangunan untuk mengontrol kelembaban dan mencegah rambatan kalor melalui strategi desain pasif selubung bangunan yang dapat berperan sebagai modifier lingkungan. Selubung bangunan harus dapat mencegah rambatan kalor masuk ke dalam bangunan melalui penerapan insulasi termal dan teknologi pembayang yang optimum. Selain itu, selubung bangunan juga harus memiliki semacam "kualitas bernafas" untuk mencegah munculnya konflik antara kelembaban atau termal, dan untuk menyebarkan beban kelembaban jauh dari daerah rawan, sehingga kelembaban udara dalam ruang terkendali.

Pada kajian ini dapat dirumuskan suatu permasalahan terkait identifikasi masalah diatas, yaitu pengaruh karakteristik dinding pada selubung bangunan terhadap sinergi pengendalian kelembaban dan pencegahan rambatan kalor sebagai strategi pengkondisian ruang dalam melalui metodologi kualitatif dengan metoda analisis perbandingan deskriptif-evaluatif.

Oleh karena itu, melihat fenomena yang telah dijelaskan di atas dengan permasalahan yang terjadi, dapat dilakukan suatu upaya sebagai strategi desain pasif melalui aplikasi panel dinding berventilasi (*breathing wall*) pada selubung bangunan menggunakan insulasi dinamis. Aplikasi desain ini diharapkan dapat menangani permasalahan kelembaban yang tinggi dan mencegah rambatan kalor untuk memasuki ruang dalam bangunan.

TINJAUAN PUSTAKA

Karakteristik Selubung Bangunan

Faktor-faktor yang harus diperhatikan terkait strategi desain pasif pada selubung bangunan, yaitu geometri, insulasi, bukaan, pintu, kebocoran udara, ventilasi, pembayangan (*shading*), *termal mass*, dan warna (Kibert, C. J. 2008).

Kibert, C. J. (2008) menjelaskan bahwa dinding merupakan komponen selubung bangunan yang dominan, sehingga konduktivitas termal atau nilai U pada dinding menjadi faktor penting dalam efisiensi energi bangunan. Penempatan insulasi pada permukaan terluar selubung bangunan dekat dengan ruang luar dan memiliki termal mass pada bagian interior memberikan kondisi ideal terhadap pemanfaatan bangunan dan meminimalisir beban termal yang ditransmisikan menuju ruang dalam bangunan yang secara umum dibuang melalui AC. Selain itu, aspek pembayangan juga penting untuk dipertimbangkan atau sistem dinding berventilasi untuk memindahkan energi yang diserap pada selubung bangunan.

Kinerja Kontrol Kelembaban

Trechsel, H. R. (2001) mengemukakan bahwa untuk mencegah penyebaran kelembaban yang berlebihan melalui difusi pada dinding dan elemen dinding, dapat digunakan pelambat/penghambat uap air (*vapor retarder*), dapat berupa membran atau cat dinding dengan tingkat kelembaban rendah.

Di daerah dengan kondisi panas dan lembab, kelembaban diperkirakan dapat menyebar melalui selubung bangunan dari udara yang lebih hangat dan lembab di luar bangunan menuju area yang lebih dingin

dan lebih kering di dalam bangunan. Oleh karena itu, retarder uap umumnya harus ditempatkan pada permukaan luar insulasi (Al-Homoud, M. S. 2005).

Karakteristik Insulasi Termal

Al-Homoud, M. S. (2005) memaparkan bahwa insulasi termal terdiri dari bahan organik dan anorganik. Penempatan insulasi juga terdiri dari tiga macam, yaitu insulasi internal, insulasi eksternal, dan insulasi tengah (Al-Homoud, M. S. (2005). Szokolay, S. V. (2004) menyebutkan bahwa insulasi termal terdiri dari tiga macam, yaitu insulasi reflektif, resistif, dan kapasitif.

Karakteristik *Breathing Wall*

Morgan, C. (2008) menjelaskan tentang tiga hal kunci yang mencirikan prinsip *breathing construction*, yaitu permeabilitas uap (gerakan uap air melalui bahan dan konstruksi), higroskopisitas (kemampuan bahan untuk menyerap, menyimpan dan melepaskan uap), dan kapilaritas (kemampuan bahan untuk menyerap, menyimpan dan melepaskan air sebagai cairan).

Imbabi, M. S. E. (2006) telah mengembangkan sebuah panel modular *breathing wall*, dimana mengganti penggunaan insulasi konvensional dengan insulasi dinamis. Pendekatan baru untuk dasar bentuk konstruksi *breathing wall* dalam mendistribusikan suplai sistem ventilasi udara, dimana dinding berfungsi sebagai sumber pasokan, penukar panas, dan menyaring polutan udara.

Yoon, S., et al. (2000) menjelaskan tentang beberapa faktor yang harus dipertimbangkan terkait konstruksi panel dinding berventilasi (*breathing wall*), yaitu jumlah lapisan insulasi internal; ketebalan dinding; tingkat aliran udara melalui dinding, dimana berpengaruh terhadap kemampuan insulasi termal; serta diameter lubang atau jarak dan efektivitas area bukaan tiap lapisan insulasi internal, dimana berpengaruh terhadap tingkat aliran udara dan transmisi kelembaban.

METODE PENELITIAN

Secara umum, metodologi kajian yang digunakan, yaitu metodologi penelitian kualitatif.

Metoda pengumpulan data diperoleh melalui pengumpulan data sekunder melalui studi literatur dan artikel penelitian ilmiah (untuk menentukan variabel penelitian dan sebagai panduan dalam interpretasi hasil penelitian), serta standard-standard perancangan bangunan rumah tinggal (untuk dijadikan acuan permodelan bangunan dasar sebagai batasan objek studi penelitian).

Data yang terkumpul selanjutnya dianalisis melalui metoda analisis perbandingan terhadap model digital yang dikaji secara deskriptif-evaluatif. Tahapan yang dilakukan, yaitu:

1. Tahap formulasi model; perancangan bentuk fungsional linier model untuk menyelidiki hubungan variabel bebas dan terikat melalui analisis perbandingan secara deskriptif-evaluatif untuk mengembangkan spesifikasi panel model alternatif *breathing wall*.
2. Tahap estimasi model; perkiraan dan perbandingan spesifikasi jenis panel dinding berventilasi (*breathing wall*) hingga terpilih model terbaik dan selanjutnya dilakukan pembahasan implikasi dari model terbaik tersebut.

Faktor-faktor (variabel) yang dikaji, yaitu pengaruh karakteristik selubung bangunan (konfigurasi lapisan dinding, ketebalan dinding, jenis material dinding dan insulasi termal) terhadap kinerja lingkungan termal (*SET-Standard New Effective Temperature*) terkait kinerja kelembaban (tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, permeabilitas uap) dan kinerja rambatan kalor (temperatur udara, temperatur permukaan, tingkat transmisi kalor). Kondisi iklim, karakteristik bangunan, bukaan, dan elemen peneduh menjadi variabel tetap pada hasil studi ini.

Pemilihan waktu untuk analisis data dipilih pada siang hari dan malam hari pada tanggal 21 Maret atau 23 September karena matahari berada pada garis equator dan pada area tropis (intensitas radiasi matahari tinggi), tanggal 22 Juni saat mendapat sinar matahari langsung dan 21 Desember saat sinar matahari menurun dengan kondisi langit berawan, dimana matahari berada di luar garis khatulistiwa dan itu merupakan titik terjauh dari area tropis (intensitas radiasi matahari sedikit) untuk evaluasi kinerja termal pada tiap jenis model alternatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sesuai SNI 03-1963-1990 tentang spesifikasi berbagai matra ruang minimum untuk rumah tinggal berdasarkan ukuran tubuh dan aktivitas manusia untuk lima orang, maka didapatkan luas area minimum ruang untuk rumah tinggal sebesar 44,2 m². Berdasarkan panduan tersebut, dapat ditentukan formulasi model awal untuk modular bangunan rumah tinggal dengan spesifikasi model sebagai berikut:

1. Karakteristik bangunan

Orientasi bangunan membujur ke arah Timur-Barat dengan geometri dasar bangunan sebesar 45 m².

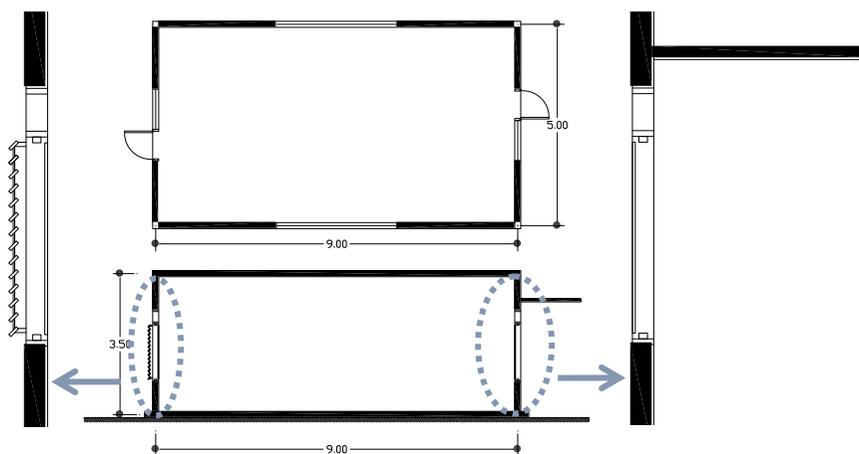
2. Karakteristik bukaan

Dominasi orientasi bukaan pada sisi utara dan selatan bangunan, namun pada pembahasan kajian kali ini dibatasi pada sisi barat dan timur bangunan jika terdapat bukaan, sehingga dipilih bentuk bukaan yang juga berfungsi sebagai bukaan ventilasi melalui infiltrasi. Ukuran/WWR (*Window to Wall Ratio*) sebesar 10% untuk mengurangi radiasi matahari yang berlebihan di sisi barat dan timur selubung bangunan, reflektansi bahan 30% (warna cenderung gelap), transmitansi kaca 50% (jenis kaca opal/ryband gelap).

3. Karakteristik elemen pembayang

Elemen pembayang eksternal dengan tipe *overhang* horizontal berbahan beton di sisi timur sebesar 1.5 m (pertimbangan variasi lebar selasar pada kondisi faktual) dan tipe kisi-kisi horizontal berbahan aluminium di sisi barat.

Terkait formulasi model dasar di atas yang merupakan variabel tetap dalam kajian ini, selengkapnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 1
Formulasi model dasar bangunan rumah tinggal.

Selanjutnya, strategi desain pasif berupa aplikasi panel dinding berventilasi (*breathing wall*) akan dikaji lebih dalam terkait pengaruhnya terhadap pengendalian kelembaban dan pencegahan rambatan kalor menuju ruang dalam.

Pemilihan karakteristik selubung bangunan, meliputi penentuan jenis material dinding sebagai komponen dominan pada selubung bangunan dan penentuan insulasi termal untuk selanjutnya dikembangkan menjadi spesifikasi model alternatif.

1. Jenis material dinding yang digunakan, yaitu beton ringan (*aerated concrete*) dan plaster *gypsum* karena tergolong *light-weight material*.

2. Jenis insulasi termal yang dipilih, yaitu insulasi reflektif, seperti aluminium foil dan insulasi resistif, seperti plastik, triplek, dan selulosa. Penggunaan insulasi termal tersebut sekaligus berfungsi sebagai retarder uap (penghalang uap air), dimana aluminium foil merupakan retarder uap yang sangat kedap air (≤ 1 perm), plastik dan tripleks sebagai retarder uap semi-permeabel ($1 < 10$ perms), dan selulosa sebagai retarder uap permeabel (≥ 10 perms).

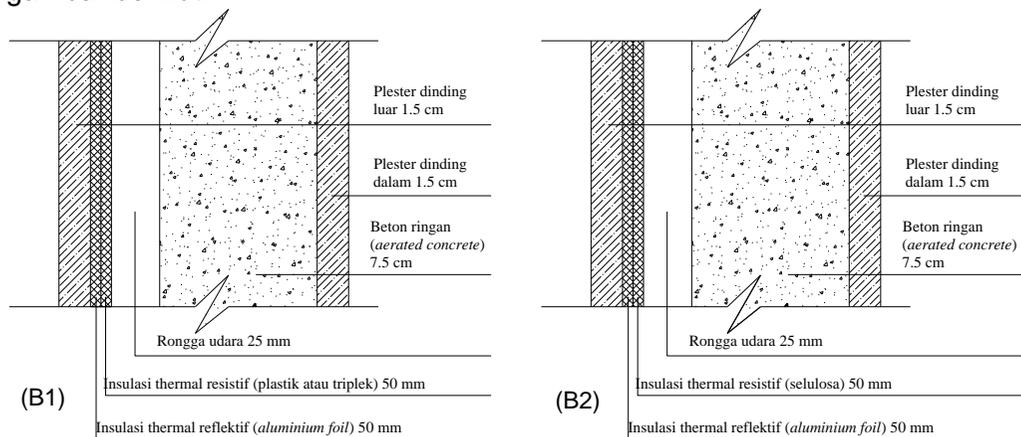
Dasar pertimbangan dalam pemilihan jenis material dinding tersebut, yaitu mengacu pada hasil penelitian oleh Neil (2005) sebagai berikut.

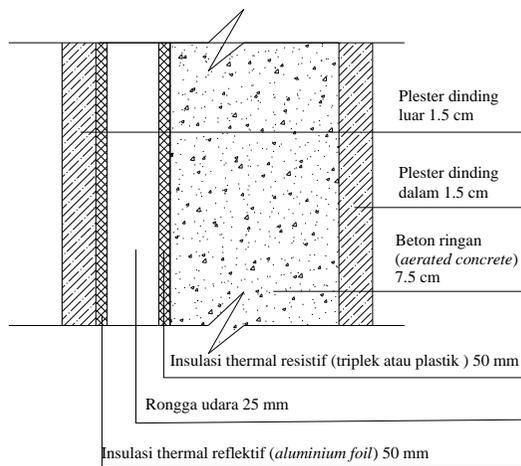
Tabel 1.
Kinerja kelembaban pada material yang dipilih sebagai bahan penutup dinding

| Jenis Material | Densitas (kg/m ³) | Equilibrium Moisture Content (EMC) pada 50% RH (20 °C) | Equilibrium Moisture Content (EMC) pada 85% RH (20 °C) | Kapilaritas w kg/m ² .h ^{0.5} | Permeabilitas uap (r) | Higroskopisitas (peningkatan kelembaban pada 20 °C dari RH 50%-85%) | Kapasitas higroskopis (Densitas x Penambahan kg/ m ³) | Kecepatan higroskopis |
|--|-------------------------------|--|--|---|-----------------------|---|---|-----------------------|
| Material Dinding | | | | | | | | |
| Beton ringan (<i>aerated concrete</i>) | 600 | 0.9% | 2.5% | - | - | 1.6% | 9.6 | Medium |
| Selulosa | 45 | 8% | 17% | > 10 | 25 | 9% | 4 | Cepat |
| Insulasi Termal | | | | | | | | |
| Plastik | 15 | 0 | 0 | 0.2 | 150 | 0% | 0 | - |
| Triplek | 500 | 9% | 18% | 0.1 | 500 | 9% | 47 | Sangat lambat |
| Selulosa | 45 | 8% | 17% | > 10 | 25 | 9% | 4 | Cepat |

Sumber: Neil (2005)

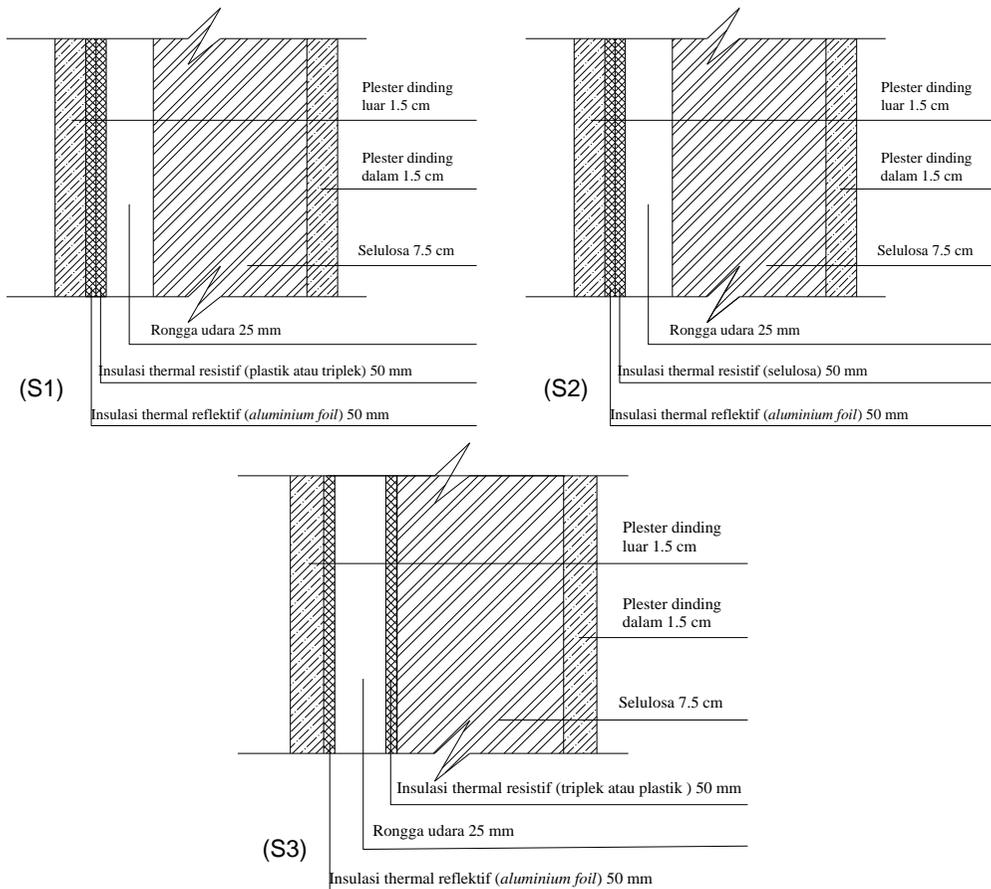
Sedangkan spesifikasi model alternatif dinding sebagai komponen selubung bangunan untuk dikaji lebih dalam, dapat ditunjukkan melalui gambar berikut.





Gambar 2

Strategi desain alternatif panel *breathing wall* pada selubung bangunan dengan bahan beton ringan (*aerated concrete*).



Gambar 3

Strategi desain alternatif panel *breathing wall* pada selubung bangunan dengan bahan selulosa.

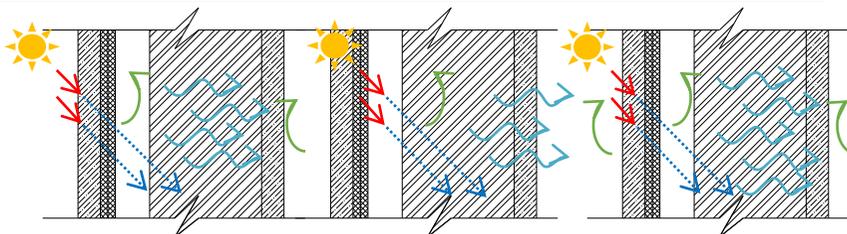
Tabel 2.
Evaluasi kinerja kelembaban dan kinerja rambatan kalor
panel dinding berventilasi (*breathing wall*) di daerah beriklim tropis lembab

| Posisi Matahari (Siang hari) | 22 Juni (Sinar matahari langsung) | 21 Maret/23 September (Sinar matahari di garis equator) | 22 desember (Sinar matahari menurun dengan kondisi langit berawan) |
|--|--|--|--|
| Strategi model desain alternatif (material dinding beton ringan-aerated concrete) | | | |
| B1 | | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap menurun. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor berkurang. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap banyak berkurang. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor rendah. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap lebih meningkat. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor lebih meningkat. |
| B2 | | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap sedikit menurun. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor sedikit berkurang. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap berkurang. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor berkurang. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap meningkat. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor meningkat. |
| B3 | | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban |

| Posisi Matahari (Siang hari) | 22 Juni (Sinar matahari langsung) | 21 Maret/23 September (Sinar matahari di garis equator) | 22 Desember (Sinar matahari menurun dengan kondisi langit berawan) |
|------------------------------|---|---|---|
| | <p>relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap banyak berkurang.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor lebih rendah. | <p>higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap paling banyak berkurang.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor paling mendekati kondisi kenyamanan termal. | <p>relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap sedikit meningkat.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor sedikit meningkat. |

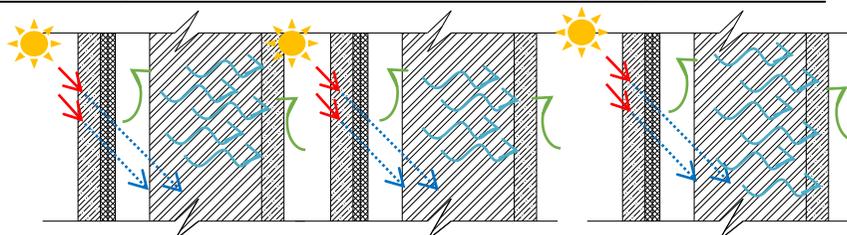
Strategi model desain alternatif (material dinding selulosa)

S1

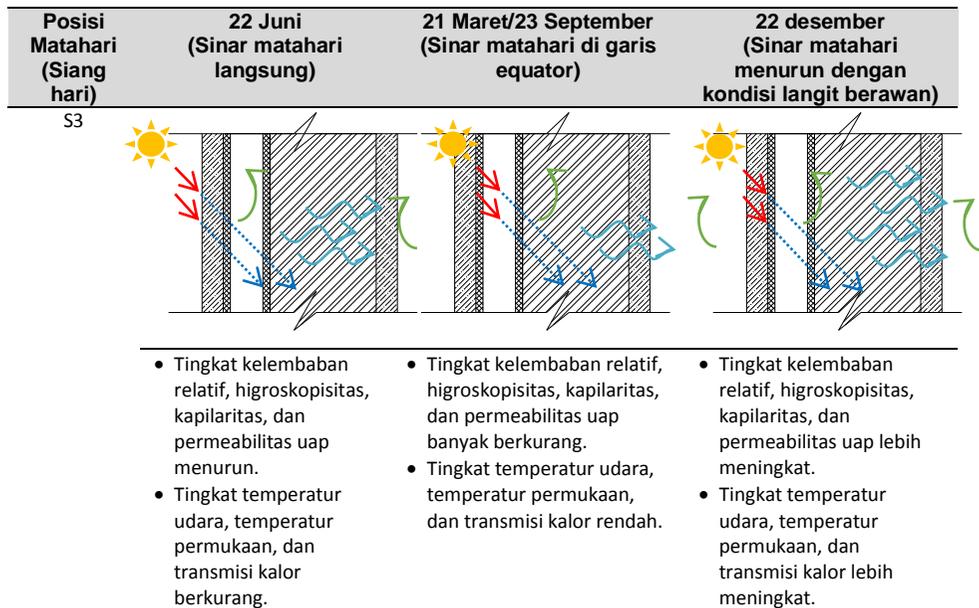


- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap menurun. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor berkurang. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap lebih berkurang. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor lebih berkurang. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap banyak meningkat. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor banyak meningkat. |
|--|--|--|

S2



- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap sedikit menurun. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor sedikit berkurang. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap berkurang sedikit. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor sedikit berkurang. | <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, dan permeabilitas uap meningkat tajam. • Tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor meningkat tajam. |
|--|--|--|



Keterangan:

→ Radiasi matahari
→ Konveksi kalor

→ Transmisi kalor
→ Absorpsi uap air

Berdasarkan analisis di atas, dapat ditentukan strategi desain melalui aplikasi panel dinding berventilasi (*breathing wall*) pada selubung bangunan menggunakan insulasi dinamis. Hal ini dapat ditunjukkan bahwa kategori model B3 menunjukkan hasil kinerja kelembaban dan rambatan kalor yang paling optimum dibandingkan model lainnya. Hal ini disebabkan tingkat kelembaban relatif, higroskopisitas, kapilaritas, permeabilitas uap memiliki tingkat terendah dibandingkan model lainnya. Selain itu, tingkat temperatur udara, temperatur permukaan, dan transmisi kalor banyak berkurang yang pada akhirnya mengakibatkan kapasitas kalor pada selubung bangunan rendah, dan kondisi ruang dalam bangunan lebih mendekati kondisi kenyamanan termal ($22,5^{\circ}\text{C}$ - $29,5^{\circ}\text{C}$) dengan kelembaban udara relatif 20%-50% (Lippsmeir, G. 1994). Aplikasi insulasi termal berupa insulasi eksternal dengan menggabungkan antara insulasi reflektif dan resistif antara rongga udara serta pemanfaatan insulasi termal dari bahan organik. Penggunaan insulasi termal tersebut juga berfungsi sebagai penghalang uap (*retarder uap*), dimana *aluminium foil* tergolong *retarder uap* yang sangat kedap air (≤ 1 perm), sementara plastik dan tripleks tergolong *retarder uap* semi-permeabel ($1 < 10$ perms). Aplikasi desain ini dapat mengendalikan permasalahan kelembaban yang tinggi dan mencegah rambatan kalor saat memasuki ruang dalam bangunan, sehingga selubung bangunan mampu berperan efektif sebagai *modifier* lingkungan di daerah beriklim tropis lembab.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian di atas, dapat disimpulkan bahwa aplikasi optimasi panel dinding berventilasi (*breathing wall*) di daerah beriklim tropis lembab didapatkan melalui pemilihan material dinding dan insulasi termal yang bersifat *light-weight material*, serta memiliki kinerja kelembaban dan kinerja rambatan kalor terendah. Optimasi insulasi termal juga ditunjukkan dari adanya aplikasi insulasi eksternal pada selubung bangunan serta penerapan insulasi dinamis yang berfungsi ganda sebagai penghambat rambatan kalor dan retarder uap (penghalang uap) yang bersifat kedap air atau semi-permeabel. Dengan begitu, dapat ditunjukkan bahwa aplikasi panel dinding berventilasi (*breathing wall*) pada selubung bangunan dapat mengendalikan permasalahan kelembaban dan mencegah rambatan kalor, sehingga berperan efektif sebagai *modifier* lingkungan. Namun, pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan validasi data dan hasil penelitian terkait aplikasi konsep *breathing wall* di daerah beriklim tropis lembab dengan menggunakan metodologi penelitian kuantitatif melalui metoda eksperimental berupa model fisik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Homoud, M. S. 2005. Performance Characteristics and Practical Applications of Common Building Thermal Insulation Materials. *Building and Environment* (40): 353–366.
- Geshwiler, M. 2006. *ASHRAE GreenGuide: The Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings*. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Imbabi, M. S-E. 2006. Modular Breathing Panels for Energy Efficient, Healthy Building Construction. *Renewable Energy* (31): 729–738.
- Kibert, C. J. 2008. *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery-Second Edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Morgan, C. 2008. *Breathing Buildings*. SelfBuild.ie - Extend & Renovate Ireland.
- Szokolay, S. V. 2004. *Introduction to Architectural Science the Basis of Sustainable Design*. Oxford: Architectural Press.
- Trechsel, H. R. 2001. *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Yoon, S., et al. 2000. *Effectiveness of Passive Ventilation Functions of "Breathing Wall" under Natural Weather Conditions*. *Proceedings of PLEA 2000-Architecture, City, Environment*. hal. 322-323.