

## Kajian Parametrik Analisis Terma Bumbung Menggunakan Teknik Berangka

(Parametric Study of Roofing Thermal Analysis Using Numerical Method)

Muhamad Zahin Mohd Ashhar & Lim Chin Haw\*  
*Solar Energy Research Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia'*

Ivan Loo  
*Terreal (Singapore) Pte Ltd*

\*Corresponding author; email: [chinhaw.lim@ukm.edu.my](mailto:chinhaw.lim@ukm.edu.my)

Received 12 June 2019, Received in revised form 23 September 2019  
Accepted 02 November 2019, Available online 30 August 2020

### ABSTRAK

Suhu iklim yang semakin meningkat kini telah membawa perhatian untuk mengurangkan tenaga haba solar masuk ke dalam bangunan. Usaha mengurangkan kebergantungan kepada penyaman udara untuk penyejukan dalaman telah membawa kepada pelaksanaan strategi penyejukan pasif dalam bangunan. Makalah ini membentangkan penyiasatan pelaksanaan teknologi reflektif dalam bentuk sistem penebat reflektif dan sistem penghalang bersinar dalam bumbung gable. Prestasi terma sistem penebat reflektif dan sistem penghalang bersinar telah disiasat dengan menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD). Prestasi terma teknologi reflektif dibentangkan dari segi ketahanan haba, nilai RSI. Kajian ini dijalankan untuk beberapa konfigurasi bumbung di mana ketebalan ruang udara reflektif, sudut bumbung dan jenis bumbung diubah. Hasil yang diperoleh daripada simulasi CFD telah disahkan dengan data empirik untuk memastikan simulasi memberikan ramalan yang berketepatan yang tinggi. Analisis parametrik menunjukkan ruang udara reflektif yang lebih tebal akan memberikan pengudaraan udara yang lebih baik di kawasan ruang udara dan ini membawa kepada daya tahan haba yang lebih tinggi. Selain itu, sudut bumbung yang lebih curam akan meningkatkan kesan keapungan dan meningkatkan penyingkiran haba melalui rabung yang juga menghasilkan daya tahan haba yang lebih tinggi. Dari segi jenis bumbung, hanya perbezaan kecil diperhatikan dari segi kerintang haba apabila menukar jenis bumbung antara jubin tanah liat dan jubin konkrit. Kajian ini berjaya menggunakan simulasi CFD dalam menyiasat teknologi penebat haba di bangunan dan kaedah ini harus diterokai lebih lanjut pada masa akan datang.

Kata kunci: Penebat reflektif; penghalang radiasi; CFD; penebat bumbung; penebatan haba

### ABSTRACT

The ever-increasing temperature of current climate has brought the attention on reducing the incoming solar heat energy into buildings. The efforts on reducing the dependency on air-conditioning for indoor cooling has led to the implementation of passive cooling strategies in buildings. This paper investigates the implementation of reflective technologies in the form of reflective insulation and radiant barrier systems in a gable roof assembly. The thermal performance of reflective insulation and radiant barrier systems was investigated by using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The thermal performance of the reflective technologies was presented in terms of thermal resistivity, RSI value. The study was conducted for several roof configurations where the thickness of reflective air space, roof pitch and the roof material were varied. The results obtained from the CFD simulation was validated against empirical measurements to ensure the simulation gives high accuracy prediction. From the parametric analysis, it was found that thicker reflective air space would provide better air ventilation in the air space area which led to higher thermal resistivity. Besides that, steeper roof pitch would enhance the buoyancy effect and increases the heat exhaustion through the ridge which also results in higher thermal resistivity. In terms of roof tiles material, only small difference was observed in terms of thermal resistivity when switching the roof tiles material between clay tiles and concrete tiles. This research was able to demonstrate the use of CFD simulation in investigating thermal insulation technologies in buildings and this method should be explored further in the future.

Keywords: Reflective insulation; radiant barrier; CFD; roof insulation; thermal resistance

Iklim Malaysia dikategorikan sebagai khatulistiwa, iaitu negara yang mempunyai suhu purata tinggi 31.0°C - 33.0°C dan kelembapan yang tinggi sepanjang tahun. Purata penyiranan harian berkisar dari 4.21 kWh/m<sup>2</sup> hingga 5.56 kWh/m<sup>2</sup> sepanjang tahun (Sarawak Energy 2017). Peratusan besar tenaga suria yang diserap oleh permukaan bumbung dan kebanyakan tenaga ini masuk ke dalam bangunan. Walaupun setiap komponen bangunan menyumbang kepada kemasukan dan kehilangan haba bangunan, komponen bumbung adalah penyumbang tertinggi kepada kenaikan suhu (Hernández-Pérez et al. 2014). Sebanyak 50% haba bangunan di dalam iklim panas adalah melalui komponen bumbung (Nahar et al. 2003).

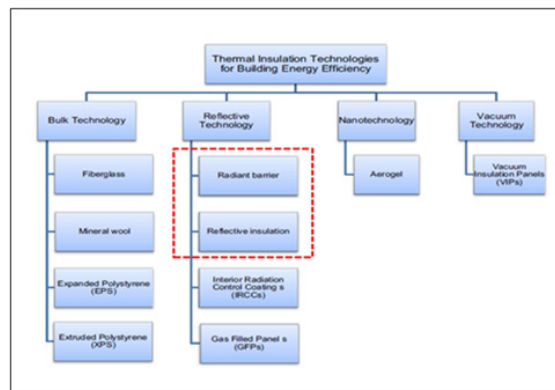
Haba dari tenaga suria memasuki bangunan melalui pemindahan haba konduksi, perolakan dan radiasi. Daripada jumlah tenaga haba yang memasuki bangunan melalui siling, 87% adalah melalui pemindahan haba radiasi dan selebihnya melalui pemindahan haba konduksi dan perolakan (Richards 1977). Dengan menggunakan sistem penebat yang sesuai dalam bumbung bangunan, sebanyak 45% penembusan aliran haba boleh dikurangkan (Medina, 2012). Bahan penebat pukal biasanya digunakan untuk penebat haba. Walau bagaimanapun, di dalam negara beriklim panas dan lembap di mana pengaliran haba ke bawah mendominasi, penghalang radiasi dan penebat reflektif adalah pilihan penebat haba yang lebih efektif untuk digunakan di bumbung.

Bagi mengekalkan suhu yang selesa di dalam bangunan, tenaga suria yang masuk ke dalam bangunan melalui bumbung perlu dikurangkan. Oleh kerana peningkatan kos tenaga elektrik pada masa kini, penggunaan tenaga dengan cekap menjadi sangat penting dan bergantung kepada penggunaan penyaman udara untuk menyejukkan udara dalam bangunan perlu dikurangkan. Sebaiknya, bangunan perlu direka bentuk dan dibina dengan mempunyai ciri-ciri kecekapan tenaga, keselesaan terma, harga berpatutan dan mesra alam. Salah satu cara untuk mencapai matlamat ini adalah dengan melaksanakan strategi penyejukan pasif. Strategi penyejukan pasif merangkumi tiga kategori iaitu: (i) pencegahan / pengurangan haba, (ii) terma moderasi, dan (iii) pelepasan haba (Geetha dan Velraj, 2012). Salah satu strategi penyejukan pasif adalah penggunaan teknologi

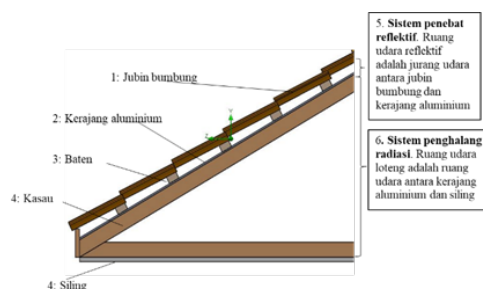
penebat haba di dalam bumbung bangunan.

Tujuan bahan penebat haba adalah untuk mengurangkan pengaliran tenaga haba masuk atau keluar dari bangunan. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1, kebanyakan teknologi penebat haba yang digunakan dalam bangunan adalah penebat berasaskan udara. Penebat reflektif dan sistem penghalang radiasi berfungsi untuk mengurangkan pemindahan haba radiasi ke dalam bangunan. Kedua-dua sistem penebat reflektif dan sistem penghalang radiasi menggunakan bahan-bahan yang mempunyai kememancaran yang rendah untuk mengurangkan pemindahan tenaga panas di dalam ruang udara tertutup (RIMA 2002). Sistem ini bergantung kepada kekonduksian terma udara yang rendah di ruang udara untuk mengurangkan pemindahan haba seluruh sistem. Sistem penebat reflektif mempunyai ruang udara tertutup bersebelahan dengan permukaan kememancaran yang rendah. Sistem penebat reflektif mempunyai ruang udara sebesar 0.25 m. Bahan penebat reflektif terdiri daripada satu atau lebih kerajang aluminium yang dipasangkan kepada bahan teras untuk sokongan mekanikal. Perintang haba adalah hasil daripada pengangkutan radiasi yang dikurangkan di ruang udara yang tertutup. Selain itu, perintang terma sistem penebat reflektif bergantung kepada orientasi sistem tersebut. Sistem penghalang radiasi mesti mempunyai ruang udara berventilasi atau tidak berventilasi, yang umumnya lebih besar daripada 0.5 m. Sistem penghalang radiasi terdiri daripada permukaan kememancaran rendah yang menghadap ruang udara yang besar dengan satu atau lebih ruang udara yang tertutup. Prestasi sistem penghalang bersinar bergantung kepada arah aliran haba, yang bermakna prestasi sistem penghalang bersinar akan berbeza pada musim panas dan musim sejuk disebabkan oleh arah aliran haba yang berbeza (Yarbrough 2010).

Dalam sistem penebat reflektif, kerajang reflektif seperti aluminium dipasang di bawah jubin bumbung yang dipisahkan oleh baten, mewujudkan ruang udara di antara jubin bumbung dan kerajang reflektif. Dalam sistem penebat reflektif, kerajang reflektif mesti dipasang menghadap ruang udara yang tertutup. Bagaimanapun, agak mustahil untuk menjadikan ruang udara antara jubin bumbung dan kerangka reflektif sebagai udara yang tidak berventilasi. Sendi-sendi jubin tersebut menghasilkan aliran udara antara di dalam ruang udara dan luar, yang membolehkan pengudaraan



RAJAH 1. Klasifikasi bahan penebat (Lee et al. 2016)



RAJAH 2. Padangan rentang lintang bumbung yang menggabungkan sistem penambat reflektif dan sistem halangan radiasi

udara menjadi faktor penyumbang kepada system ini. Selain dari itu, kerajang reflektif yang menghadap ruang loteng membentuk sistem penghalang radiasi. Keberkesanan sistem penghalang radiasi sangat dipengaruhi oleh ventilasi udara di ruang loteng. Kedua-dua sistem ini boleh digabungkan di dalam bumbung dan pelaksanaan gabungan kedua-dua sistem ini digambarkan dalam Rajah 2.

#### KAJIAN KESUSASTERAAN

Beberapa karya penyelidikan telah dijalankan dalam menganalisis factor-faktor yang mempunyai kesan ke atas prestasi penambat reflektif dan sistem penghalang radiasi. Kesan kepancaran bahan penambat pada prestasi terma bumbung telah disiasat sebelum ini (Roels and Deurinck 2011) (Yarbrough, Teh, Lim, Saleh 2016). Adalah terbukti bahawa bahan kepancaran yang lebih rendah akan menghasilkan pengaliran haba yang lebih rendah ke ruang loteng. Prestasi terma bahan kepancaran rendah telah dilaporkan oleh Saber (2013), dimana penyelidik tersebut menyatakan bahawa bahan yang mempunyai kepancaran yang rendah menyumbang kepada ketahanan haba yang lebih tinggi dalam sesebuah sistem. Penggunaan kerajang aluminium sebagai bahan penambat kepancaran yang rendah di dalam bumbung telah disiasat sebelum ini (Dos Santos dan Mendes, 2015). Para penyelidik tersebut telah menggunakan model matematik untuk menganalisis pengurangan fluks haba apabila kerajang aluminium digunakan sebagai bahan penambat dalam bumbung. Penggunaan kerajang aluminium yang mempunyai kepancaran yang rendah sebagai lapisan penambat di bawah jubin mengurangkan sebanyak 40% fluks haba di permukaan dalam bumbung.

Ketebalan ruang udara reflektif adalah salah satu parameter penting yang mempengaruhi prestasi sistem penambat reflektif. Ketebalan ruang udara yang mencukupi diperlukan untuk mengurangkan pemindahan haba berseri melalui ruang udara yang mencerminkan. Walaupun ruang udara reflektif dalam sistem penambat reflektif sepatutnya tidak berventilasi, pengaliran udara ke dalam ruang udara reflektif tidak dapat dielakkan disebabkan oleh kebolehtelapan udara jubin itu sendiri (Bottarelli et al. 2017). Walaubagaimanapun, ventilasi udara memberikan kesan yang positif bagi mengurangkan kemasukan haba melalui bumbung dan meningkatkan keselesaan terma di dalam bangunan. Kesan gabungan bahan penambat reflektif dan kadar aliran udara dalam ruang udara yang berventilasi

yang berlaku disebabkan oleh pemindahan haba perolakan membantu untuk mengurangkan haba kerana aliran udara panas dari tepi bumbung dan keluar melalui rabung (Roels dan Deurinck, 2011). Ketebalan jurang udara yang besar adalah bagus untuk meningkatkan kadar aliran udara dan mengurangkan suhu jubin bumbung (Li et al. 2016). Selain itu, meningkatkan kadar aliran udara yang lebih tinggi di ruang udara reflektif akan meningkatkan peratusan pengurangan fluks haba ke dalam bumbung dengan system penghalang radiasi (Miranville et al. 2012) (Gagliano et al. 2012). Kesan sudut kecenderungan ruang udara reflektif dan arah aliran haba pada prestasi haba ruang udara reflektif yang tertutup telah dikaji sebelum ini (Saber 2015). Keputusan mereka menunjukkan bahawa untuk aliran haba ke bawah, halaju udara dalam ruang udara tertutup untuk kes sudut kecerunan  $0^\circ$  lebih rendah daripada kes  $30^\circ$ . Selain itu, daya tahan haba ruang udara yang tertutup dengan sudut kecenderungan  $30^\circ$  lebih rendah daripada ruang udara yang tertutup bersudut  $0^\circ$ .

Beberapa penyelidikan telah dijalankan ke atas penggunaan sisten penghalang radiasi dalam loteng untuk mengurangkan aliran haba masuk ke dalam bangunan melalui siling. Medina (2000) menjalankan kedua-dua simulasi pengiraan dan kajian eksperimen untuk mengkaji penggunaan sistem penghalang radiasi di dalam loteng. Peratusan pengurangan fluks haba melalui bumbung yang dijumpai adalah antara 25% dan 42%, dan hasilnya juga menunjukkan bahawa pengurangan pemindahan haba oleh penghalang radiasi menurun apabila penebatan loteng meningkat. Kajian ini diperluaskan lagi untuk menilai prestasi sistem penghalang radiasi untuk iklim yang berlainan di Amerika Syarikat (Medina dan Young 2006). Kajian ini dijalankan menggunakan simulasi komputer untuk mengkaji keberkesanan penghalang radiasi di dalam ruang loteng yang berbentuk segitiga. Keputusan kajian menunjukkan bahawa peratusan pengurangan dalam fluks haba siling berbeza untuk iklim yang berbeza. Oleh itu, prestasi sistem penghalang radiasi di dalam loteng bergantung kepada iklim di mana bangunan itu terletak. Suhu udara, kelembapan udara, dan ketinggian tempatan memberi kesan pertama pada prestasi sistem halangan berseri. Peratusan fluks haba melalui siling adalah dari 36.8% dalam iklim Savana Savanna dan 2.3% dalam iklim Mediterranean. Soubdhan et al. (2005) mengkaji penggunaan bahan penambat yang berbeza pada pengurangan fluks haba di dalam bumbung bangunan. Empat sel kajian dibina untuk empat konfigurasi penambat iaitu; polistirena, penghalang

radiasi, kaca serat dan tiada penebat sebagai sel rujukan. Keputusan menunjukkan bahawa penghalang radiasi berjaya mengurangkan penembusan fluks haba sebanyak 33% hingga 37% berbanding dengan tiada sel rujukan penebat. Keputusan mereka juga menyatakan bahawa satu lapisan jurang udara diperlukan untuk menyediakan jalan keluar untuk fluks haba yang dipantulkan. Apabila ruang udara berventilasi, penghalang radiasi adalah bahan penebat yang paling berkesan. Miranville et al. (2012) menjalankan ujian empirikal untuk mengkaji penggunaan multi-reflective radiant barrier (MRRB) yang dipasang di atas bumbung. Lapisan ruang udara teratas berventilasi secara mekanikal untuk mengkaji kesan pengudaraan udara berventilasi. Dari penyelidikan mereka, didapati bahawa MRRB berjaya mengurangkan jumlah fluks haba yang besar melalui bumbung, lebih-lebih lagi ketika ruang udara berventilasi. Kadar aliran udara yang lebih tinggi menghasilkan pengurangan fluks haba yang lebih tinggi dan rintangan bumbung tersebut meningkat. Baru-baru ini, Fantucci et al. (2019) mengkaji gabungan penebat reflektif dalam bentuk kerajang aluminium dan cat kepancaran yang rendah di bawah jubin bumbung dalam sistem bumbung. Hasil kajian penyelidikan tersebut menunjukkan pengurangan kenaikan haba musim panas antara 10% hingga 53% dan pengurangan maksimum suhu musim panas dalam bangunan sebanyak 1.2°C.

Parameter lain yang telah dikaji adalah kesan mengubah sudut bumbung pada prestasi terma bumbung. Kajian tentang kesan bumbung pada beban pendinginan bangunan bumbung bumbung telah dijalankan oleh (Wang et al. 2012). Penyelidikan ini dilakukan dengan menjalankan simulasi CFD 2D, mensimulasikan aliran gelora di dalam ruang loteng untuk pelbagai sudut bumbung. Kajian mereka mendapati bahawa peningkatan bumbung dari 3/12 hingga 8/12 menyebabkan penurunan dalam beban pendinginan sekitar 9%. Para penyelidik juga mencadangkan bahawa mengubah sudut bumbung sahaja mempunyai kesan terhadap ke atas beban penyejukan loteng. Walaubagaimanapun, penyelidikan mereka hanya tertumpu pada ruang loteng bumbung dan mengabaikan pengaruh struktur bumbung lain yang mungkin mempunyai kesan yang signifikan terhadap prestasi terma bumbung. Kesan mengubah sudut bumbung pada pengeluaran haba dikaji sebelum ini dan didapati bahawa apabila kecerunan bumbung meningkat kepada 55°, aliran udara terhasil dan menyebabkan halaju aliran udara dan perbezaan suhu meningkat. Sudut bumbung yang lebih curam menghasilkan jumlah haba yang keluar meningkat kerana daya apungan yang terhasil (Lee et al. 2009).

Baru-baru ini, Teh et al. (2017) menjalankan eksperimen untuk mendapatkan data prestasi terma bagi pelaksanaan teknologi reflektif dalam bumbung. Sel-sel kajian dibina untuk mendapatkan data fana untuk cuaca Malaysia yang panas dan lembap. Kajian ini dijalankan untuk pelbagai konfigurasi bumbung di mana ketebalan ruang udara reflektif, bahan jubin bumbung, dan bahan-bahan penebat diubah. Prestasi terma setiap sel ujian dinilai dari segi ketahanan haba nilai RSI. Makalah ini menggunakan

ukuran empirikal dari Teh et al. (2017) untuk mengesahkan keputusan yang diperolehi dari simulasi CFD.

Dalam kajian-kajian yang dikemukakan dalam kesusasteraan, parameter-parameter yang mempunyai kesan ke atas prestasi terma penebat reflektif dan sistem penghalang radiasi adalah seperti kepancaran bahan reflektif, ketebalan ruang udara reflektif, sudut bumbung dan sudut kecenderungan ruang udara tertutup telah dibentangkan. Walau bagaimanapun, kombinasi penebat reflektif dan sistem penghalang radiasi dalam bumbung masih belum dikaji. Selain itu, analisis parametrik prestasi terma bumbung keseluruhan dari segi nilai RSI belum diterokai secara intensif. Ketebalan dan kecenderungan ruang udara reflektif boleh menyebabkan percanggahan pergerakan udara di dalam ruang udara yang akan mempengaruhi ketahanan haba. Selain itu, mengubah sudut bumbung mungkin akan memberi kesan terhadap pemindahan haba perolakan haba melalui ruang loteng, dan rintangan haba parameter ini belum dikaji.

#### ISTILAH-ISTILAH PENEBAT HABA

Istilah-istilah yang digunakan untuk sifat-sifat penebat haba adalah (American Society for Materials Testing, 2017):

*Kehantaran Terma*, nilai-U adalah ukuran haba yang dipancar melalui sesuatu bahan pembinaan atau sempadan filem udara yang berpunca dari perbezaan suhu antara bahan dan persekitaran. Unit yang digunakan untuk mengukur nilai U adalah W/m<sup>2</sup>K. Unit tersebut dikira dengan membahagikan kekonduksian terma bahan dengan ketebalan bahan sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (1) di bawah:

$$U = \frac{\lambda}{l} \quad (1)$$

di mana:

$\lambda$  adalah kekonduksian terma bahan, W/mK

$l$  adalah ketebalan material, m

Nilai-U menunjukkan prestasi kesan penebatan bahan. Nilai-U yang rendah bermakna sifat penebat bahan tersebut adalah baik.

*Rintangan Terma*, nilai RSI, adalah ukuran rintangan kepada aliran haba dalam keadaan mantap, melalui sesuatu ketebalan bahan. Ini bermakna bahan yang mempunyai nilai RSI yang lebih tinggi, akan mempunyai rintangan yang lebih tinggi terhadap aliran haba yang melaluinya. Oleh itu, bahan penebat haba seharusnya mempunyai nilai RSI yang tinggi.

Nilai RSI yang dinyatakan dalam unit SI sebagai m<sup>2</sup>K/W dan boleh dikira menggunakan Persamaan (2) di bawah.

$$RSI = \frac{1}{U} \quad (2)$$

Menurut undang-undang *Fourier*, rintangan terma, nilai RSI juga boleh dinyatakan sebagai:

$$RSI = \frac{\Delta T}{\Delta Q} \quad (3)$$

$\Delta T$  adalah perbezaan suhu antara dua permukaan, K  
 $\Delta Q$  adalah fluks haba merentasi dua permukaan, W/m<sup>2</sup>  
 Standard Malaysia (MS 1525)

Kemasukan terkini MS 1525 ke *Uniform Building By-Law* (UBBL) Seksyen 38A- (2), di mana bangunan kediaman dan bukan kediaman wajib untuk mendapatkan kelulusan pihak berkuasa Kepancaran Terma (nilai-U) yang boleh dicapai oleh bumbung bangunan tersebut. Menurut UBBL Seksyen 38A- (2), bumbung semua bangunan (kediaman dan bukan kediaman) tidak mempunyai nilai-U melebihi 0.4 W/m<sup>2</sup>K untuk bumbung ringan (50 kg/m<sup>2</sup> ke bawah) dan 0.6 W/m<sup>2</sup>K untuk bumbung berat (melebihi 50 kg/m<sup>2</sup>) kecuali dengan cara lain iaitu dengan teknik peneduhan dan penyejukan (Department of Standards Malaysia, 2014). Pelaksanaan peraturan ini masih belum jelas, dan perhitungan nilai-U yang dilaksanakan peraturan ini tidak berdasarkan pemasangan bumbung keseluruhan.

#### MATLAMAT PENYELIDIKAN

Objektif kajian ini adalah untuk mengkaji prestasi terma bumbung yang berpenibat terma dengan menggunakan teknik simulasi CFD untuk pelbagai konfigurasi bumbung. Prestasi terma dinilai dengan mengira nilai rintangan haba, nilai RSI untuk keseluruhan bumbung.

Konfigurasi bumbung yang dikaji dalam kajian ini adalah; (a) ketebalan ruang udara reflektif: 25 mm, 50 mm, 75 mm, dan 100 mm. dan (b) sudut bumbung: 30° dan 45°. Bahan jubin bumbung: jubin tanah liat dan jubin konkrit.

#### METODOLOGI

##### SIMULASI CFD

Dalam kajian ini, perisian FloEFD - alat pakej CFD telah digunakan. FloEFD menggunakan k- $\epsilon$  model pergolakan (model standard) untuk menyelesaikan simulasi 3D keadaan mantap.

##### KONFIGURASI BUMBUNG

Untuk kajian ini, pemindahan haba melalui bumbung telah dikaji sebagai sebuah sistem bebas, di mana kesan pemindahan haba dari struktur-struktur rumah yang lain tidak diambil kira. Selain itu, hanya bumbung gable dipertimbangkan dalam kajian ini kerana ia dikenali sebagai jenis bumbung umum yang digunakan di rumah kediaman di Malaysia. Sudut bumbung 30° dan 45° dikaji dalam

kajian ini untuk mengkaji kesan mengubah sudut bumbung pada prestasi terma bumbung.

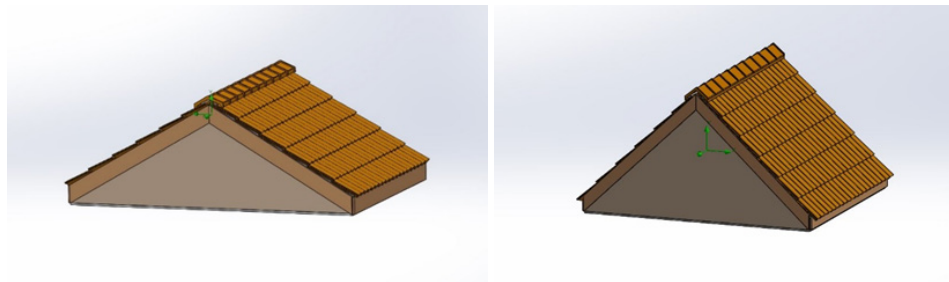
Rajah 3 menunjukkan komponen utama bumbung bumbung yang diselidiki, di mana sistem penebat reflektif dan sistem penghalang radiasi digabungkan di dalam bumbung bumbung yang dikaji. Konfigurasi bumbung adalah sama untuk bumbung bersudut 30° dan bumbung bersudut 45°. Jumlah panjang, lebar dan ketinggian bumbung adalah 4.2 m x 3.3 m x 1.7 m dan 3.5 m x 3.3 m x 2.1 m untuk bumbung bersudut 30° dan bumbung bersudut 45°. Walaubagaimanapun, bumbung bersudut 45° mempunyai ketinggian yang lebih tinggi dan panjang yang lebih pendek kerana sudut bumbung tersebut meningkat sementara jumlah permukaan permukaan jubin bumbung dikekalkan. Pandangan keratan lintang bumbung yang dikaji boleh dirujuk di Rajah 2. Ketebalan ruang udara reflektif yang diselidiki dalam kajian ini adalah 25 mm, 50 mm, 75 mm, dan 100 mm. Ruang udara reflektif tidak wujud apabila kerajang aluminium tidak dipasang.

#### SYARAT SEMPADAN

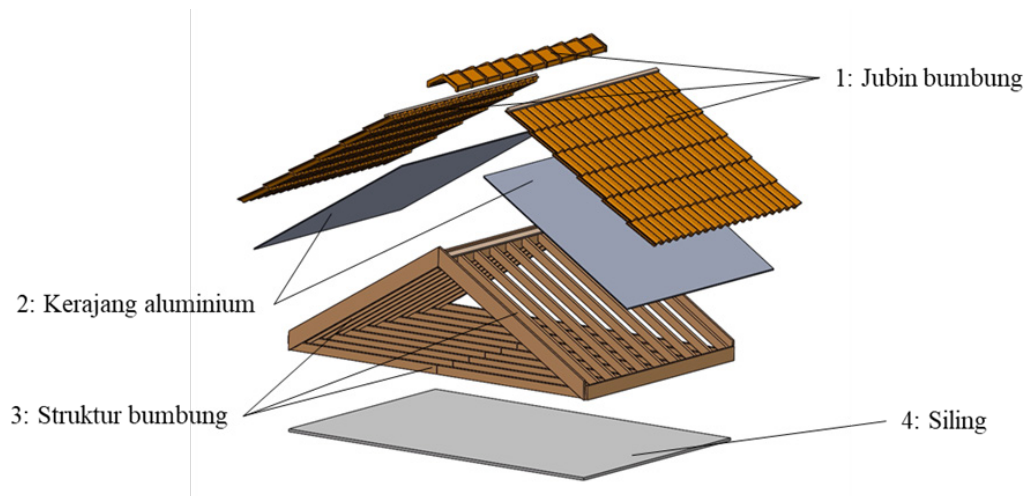
Bahan yang digunakan dalam simulasi ialah: udara sebagai cecair, tanah liat dan konkrit sebagai jubin bumbung, kerajang aluminium sebagai bahan penebat reflektif, kayu sebagai struktur bumbung (kasau dan baten), dan papan gypsum sebagai siling. Saiz computational domain telah ditetapkan sebesar 5 m x 4 m x 3 m untuk merangkumi saiz bumbung tersebut. Spesifikasi bahan-bahan yang digunakan dalam simulasi adalah seperti yang disenaraikan di bawah:

Oleh kerana kajian ini bertujuan untuk mensimulasikan bumbung dalam persekitaran luar, simulasi CFD analisis jenis eksternal telah digunakan. Suhu ambien simulasi telah ditetapkan kepada 33°C. Radiasi haba antara 600 W/m<sup>2</sup> dan 1000 W/m<sup>2</sup> dipancarkan ke arah jubin bumbung untuk simulasi radiasi matahari. Tekanan atmosfera ditetapkan sebanyak 101.3kPa. Halaju udara ditetapkan pada 0.5 m/s, dan kelembapan relatif dianggarkan pada tahap 60% pada hari panas biasa di Kuala Lumpur.

*Finite volume method* digunakan untuk penyelesaian berangka model bumbung yang dikaji. Untuk meramal aliran gelora, persamaan tenaga, jisim dan momentum (*Favre-averaged Navier-Stokes*) diadaptasikan. Kualiti mesh mempengaruhi ketepatan bacaan apabila dibandingkan dengan hasil kajian empirikal. Oleh itu, untuk mencapai simulasi yang tepat pada bumbung tersebut, mesh yang lebih banyak dan padat digunakan di kawasan yang mempunyai geometri yang rumit seperti jubin bumbung. Mesh yang padat juga digunakan pada bahan yang memerlukan kepekaan yang lebih tinggi untuk mendapat keputusan yang tepat seperti lapisan penebat reflektif dan siling. Mesh kasar digunakan pada struktur bumbung lain seperti kasau, rabung, dan di semua struktur bumbung. Salah satu ciri FloEFD adalah teknik penghalusan mesh pada komponen yang dikehendaki. Ciri ini digunakan pada jubin bumbung, penebat dan siling, dengan tahap penghalusan tertinggi digunakan pada jubin bumbung disebabkan kerumitan



RAJAH 3. (i) Bumbung bersudut 30°. (ii) Bumbung bersudut 45°



RAJAH 4. Pandangan besar bumbung yang menggabungkan sistem penebat reflektif dan sistem penghalang radiasi (1: Jubin bumbung; 2: Kerajang bumbung; 3: Struktur bumbung; 4: Siling)

JADUAL 1. Senarai sifat bahan yang digunakan dalam simulasi CFD

Sifat	Bahan	Nilai
Kepancaran	Jubin tanah liat	0.9
	Jubin konkrit	0.9
	Papan gypsum	0.85
	Kayu	0.90
	Kerajang aluminium	0.03
Kekonduksian Terma (W/m·K)	Jubin tanah liat	0.84
	Jubin konkrit	1.10
	Papan gypsum	0.16
	Kayu	0.14
	Kerajang aluminium	0.896
Kapasiti Haba Spesifik (J/K·kg)	Jubin tanah liat	800
	Jubin konkrit	837
	Papan gypsum	840
	Kayu	1200
	Kerajang aluminium	167
Ketumpatan (kg/m <sup>3</sup> )	Jubin tanah liat	1900
	Jubin konkrit	2100
	Papan gypsum	950
	Kayu	650
	Kerajang aluminium	2689

geometri jubin tersebut. Jumlah sel mesh yang digunakan dalam simulasi adalah sebanyak 199374 untuk perhimpunan bumbung, dan simulasi itu selesai dan converge selepas lebih daripada 200 lelaran.

#### PENGIRAAN NILAI RSI DARI HASIL SIMULASI CFD

Kajian ini bertujuan untuk mengkuantifikasikan prestasi haba sistem penambat reflektif dan sistem penghalang radiasi di dalam bumbung dengan mengira rintangan haba, nilai RSI. Untuk mencapai itu, persamaan berikut akan digunakan untuk memperoleh nilai RSI berdasarkan suhu dan nilai fluks haba yang diperolehi daripada simulasi CFD.

$$RSI_{Jumlah} = RSI_A + RSI_B \quad (4)$$

$$RSI_{Jumlah} = \frac{T_1 - T_2}{Q_A} + \frac{T_2 - T_3}{Q_B} \quad (5)$$

di mana,

$RSI_A$  adalah nilai RSI sistem penambat reflektif.

$RSI_B$  adalah nilai RSI sistem penghalang radiasi.

$RSI_{Jumlah}$  adalah jumlah nilai RSI untuk bumbung keseluruhan.

$T_1$  adalah suhu purata permukaan jubin bumbung.

$T_2$  ialah suhu purata permukaan bahan penambat reflektif.

$T_3$  ialah suhu purata permukaan siling.

$Q_A$  adalah fluks haba merentasi ruang udara reflektif.

$Q_B$  adalah fluks haba merentasi ruang loteng.

#### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

##### PENGESAHAN KEPUTUSAN CFD TERHADAP KEPUTUSAN KAJIAN EMPIRIKAL

Untuk memastikan bahawa keputusan yang tepat diperolehi oleh simulasi CFD, keputusan CFD mesti terlebih dahulu disahkan dengan beberapa keputusan empirikal yang diperolehi oleh kajian empirikal yang dijalankan oleh Teh et al. (2017). Oleh disebabkan beberapa batasan dalam menjalankan kajian empirikal, hanya beberapa keputusan kajian yang dapat dibandingkan. Keputusan yang dapat dibandingkan adalah bagi bumbung bersudut 30° jubin tanah liat dan jubin bumbung konkrit dengan ketebalan ruang udara reflektif setebal 25 mm. Dengan menggunakan persamaan *mean absolute percentage error (MAPE)*, ketepatan keputusan yang diperolehi oleh simulasi CFD boleh dianggarkan. Persamaan *MAPE* adalah seperti yang ditunjukkan di bawah:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|A_t - F_t|}{A_t} \quad (6)$$

di mana,

$A_t$  adalah nilai sebenar ukuran empirikal.

$F_t$  adalah nilai ramalan daripada simulasi CFD.

$N$  adalah bilangan kajian.

Jadual 2 membentangkan data yang digunakan untuk mengesahkan keputusan simulasi CFD terhadap keputusan kajian empirikal dengan menggunakan persamaan *MAPE*. Nilai *MAPE* di antara keputusan simulasi CFD dan kajian empirikal menunjukkan ralat sebanyak 3.60%. Ini menunjukkan bahawa simulasi CFD menghasilkan keputusan yang tepat dan boleh diterima apabila dibandingkan dengan keputusan kajian empirikal. Oleh itu, boleh dikatakan bahawa FloEFD adalah perisian CFD yang boleh dipercayai dan boleh digunakan untuk menyiasat dan meramalkan nilai RSI konfigurasi dan reka bentuk bumbung yang lain.

#### NILAI RSI

##### NILAI RSI SISTEM PENEBAH REFLEKTIF ( $RSI_A$ )

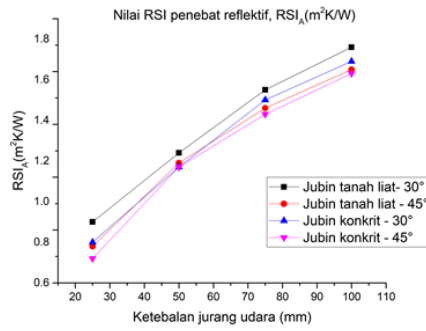
Rajah 4 menunjukkan nilai RSI sistem penambat reflektif dalam bumbung untuk ketebalan ruang udara reflektif dari 25 mm hingga 100 mm dengan jubin tanah liat dan jubin konkrit. Apabila ketebalan ruang udara reflektif meningkat, nilai RSI bagi sistem penambatan reflektif meningkat. Ini disebabkan oleh peningkatan pengudaraan udara di dalam kawasan ruang udara reflektif apabila ketebalan bertambah. Ini menyebabkan kadar aliran udara panas dari tepi bumbung ke rabung meningkat. Oleh itu, kehilangan haba yang disebabkan oleh perolakan haba meningkat, dan penembusan fluks haba ke dalam siling berkurang. Di samping itu, dapat dilihat bahawa bumbung bersudut 45° mempunyai nilai RSI yang sedikit lebih rendah daripada perhimpunan bumbung bersudut 30°. Ini adalah benar untuk semua ketebalan ruang udara reflektif dan untuk kedua-dua bahan bumbung. Fenomena ini sejajar dengan rintangan haba ruang udara untuk pelbagai kecurunran ruang udara yang tertutup seperti yang dilaporkan dalam *ASHRAE Handbook of Fundamentals* di mana ruang udara reflektif yang curam menghasilkan rintangan yang sedikit rendah (ASHRAE, 2009).

##### NILAI RSI SISTEM PENAHAN RADIASI, $RSI_B$

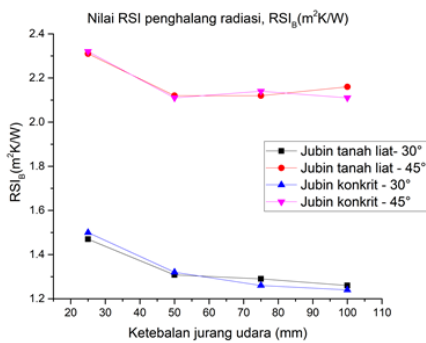
Rajah 5 menunjukkan nilai RSI sistem penghalang radiasi di dalam bumbung dengan ketebalan ruang udara yang reflektif dari 25 mm hingga 100 mm dengan jubin tanah liat dan jubin konkrit. Nilai RSI sistem penghalang radiasi untuk bumbung bersudut 45° adalah jelas lebih besar daripada bumbung bersudut 30°. Adalah jelas bahawa ruang loteng memainkan peranan yang lebih besar dalam menyumbang kepada nilai RSI bumbung secara keseluruhan daripada ruang udara reflektif. Bumbung yang curam membawa kepada kesan keapungan yang lebih tinggi (Lee et al. 2009). Kesan keapungan yang lebih tinggi membawa kepada arus udara yang lebih tinggi di bumbung bersudut 45°. Aliran

JADUAL 2. Kiraan Mean absolute percentage error (MAPE)

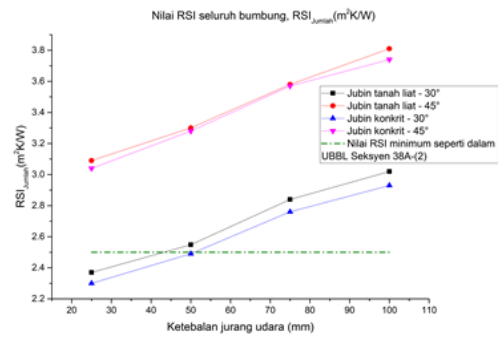
Jenis dan konfigurasi bumbung	Nilai RSI dari kajian empirikal	Hasil simulasi CFD	Ralat peratusan (%)
Jurang udara 25 mm dengan jubin tanah liat (fasa 5)	2.40 (Teh et al. 2017)	2.37	1.25
Jurang udara 25 mm dengan jubin konkrit (fasa 3)	2.15 (Teh et al. 2017)	2.33	8.37
Jurang udara 25 mm dengan jubin konkrit (fasa 5)	2.26 (Teh et al. 2017)	2.33	3.10
Jurang udara 25 mm dengan jubin konkrit (fasa 1)	2.37 (Teh et al. 2017)	2.33	1.69
<i>Mean absolute percentage error</i>			3.60



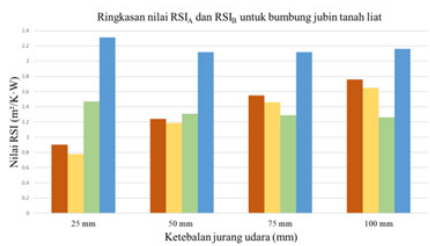
RAJAH 5. Nilai RSI sistem penambat reflektif untuk pelbagai ketebalan jurang udara reflektif



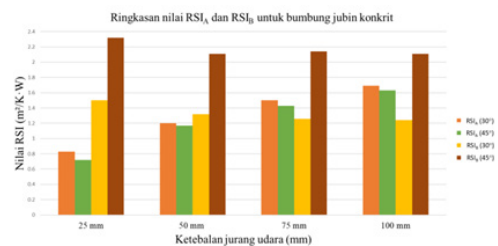
RAJAH 6. Nilai RSI sistem penghalang radiasi untuk pelbagai ketebalan jurang udara reflektif



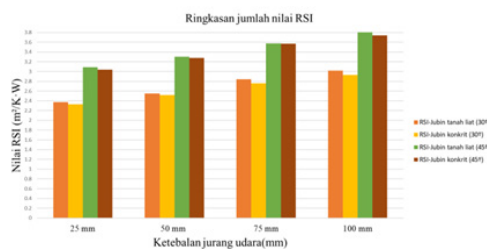
RAJAH 7. Jumlah nilai RSI seluruh bumbung untuk pelbagai ketebalan jurang udara reflektif



RAJAH 8. Ringkasan nilai  $RSI_A$  dan  $RSI_B$  untuk bumbung jubin tanah liat



RAJAH 9. Ringkasan nilai  $RSI_A$  dan  $RSI_B$  untuk bumbung jubin konkrit



RAJAH 10. Jumlah nilai RSI untuk semua konfigurasi bumbung



JADUAL 3. Ringkasan kesemua nilai RSI

Jenis bumbung	Sudut bumbung	Reflective air space thickness											
		25 mm			50 mm			75 mm			100 mm		
		RSI <sub>A</sub>	RSI <sub>B</sub>	RSI <sub>Jumlah</sub>	RSI <sub>A</sub>	RSI <sub>B</sub>	RSI <sub>Jumlah</sub>	RSI <sub>A</sub>	RSI <sub>B</sub>	RSI <sub>Jumlah</sub>	RSI <sub>A</sub>	RSI <sub>B</sub>	RSI <sub>Jumlah</sub>
Jubin tanah liat	30°	0.9	1.47	2.37	1.24	1.31	2.55	1.55	1.29	2.84	1.76	1.26	3.02
	45°	0.78	2.31	3.09	1.19	2.12	3.30	1.46	2.12	3.58	1.65	2.16	3.81
Jubin konkrit	30°	0.83	1.5	2.33	1.2	1.32	2.52	1.5	1.26	2.76	1.69	1.24	2.93
	45°	0.72	2.32	3.04	1.17	2.11	3.28	1.43	2.14	3.57	1.63	2.11	3.74

udara mengurangkan pengumpulan haba dan mengurangkan aliran haba yang dipindahkan ke dalam siling (Gagliano et al. 2012).

#### JUMLAH NILAI RSI SELURUH BUMBUNG, RSI<sub>JUMLAH</sub>

Rajah 6 menunjukkan jumlah nilai RSI seluruh bumbung untuk bumbung dengan ketebalan ruang udara yang reflektif dari 25 mm hingga 100 mm dengan jubin tanah liat dan jubin konkrit. Jumlah nilai RSI jauh lebih tinggi untuk bumbung bersudut 45° daripada bersudut 30°. Selain itu, jumlah nilai RSI meningkat apabila ketebalan ruang udara reflektif meningkat, dan jumlah nilai RSI untuk jubin konkrit sedikit lebih rendah daripada jubin tanah liat untuk semua konfigurasi bumbung. Ini kerana jubin tanah liat mempunyai kekonduksian haba yang lebih rendah daripada jubin konkrit. Oleh itu, jubin konkrit dapat memindahkan haba lebih baik daripada jubin tanah liat yang menyebabkan penembusan fluks haba sedikit lebih tinggi untuk bumbung berjubin konkrit. Simulasi CFD meramalkan bahawa jumlah nilai RSI melebihi nilai RSI minimum yang dinyatakan dalam *UBBL* Seksyen 38A-(2) apabila ketebalan ruang udara reflektif adalah 50 mm dan 60 mm bagi jubin tanah liat dan jubin konkrit masing-masing untuk bumbung bersudut 30°. Untuk bumbung bersudut 45°, nilai RSI melebihi nilai RSI minimum untuk semua konfigurasi bumbung.

#### SUMMARY OF RSI VALUES

Rajah 7 dan Rajah 8 membutirkan nilai RSI sistem penambat reflektif dan nilai RSI penghalang radiasi untuk bumbung bersudut 30° dan bumbung 45° menggunakan jubin bumbung tanah liat dan jubin bumbung konkrit. Trend nilai RSI adalah serupa untuk kedua-dua jenis jubin bumbung. Daripada kedua-dua rajah tersebut, ia boleh dirumuskan bahawa:

1. Nilai-nilai RSI sistem penambat reflektif untuk bumbung bersudut 45° adalah lebih rendah sedikit daripada bumbung bersudut 30° untuk semua ketebalan ruang udara reflektif.
2. Nilai RSI sistem penghalang radiasi untuk bumbung bersudut 45° adalah lebih tinggi daripada bumbung bersudut 30° untuk semua ketebalan ruang udara reflektif.

Walaupun nilai-nilai RSI sistem penambat reflektif meningkat apabila ketebalan ruang udara reflektif

meningkat, nilai RSI sistem penghalang radiasi berkurang apabila ruang udara reflektif ketebalan bertambah.

Rajah 9 menunjukkan jumlah nilai RSI bumbung untuk pelbagai ketebalan ruang udara reflektif untuk pelbagai konfigurasi bumbung. Jumlah nilai RSI bumbung bersudut 45° jauh lebih besar daripada bumbung bersudut 30°. Jumlah nilai RSI bumbung yang menggunakan jubin konkrit lebih rendah daripada perhimpunan bumbung yang menggunakan jubin tanah untuk semua ketebalan ruang udara reflektif.

#### KESIMPULAN

Kajian simulasi CFD prestasi terma bumbung berpenambat haba yang menggabungkan sistem penambat reflektif dan sistem penghalang radiasi telah dijalankan. Kajian ini dijalankan menggunakan teknik simulasi 3D CFD dengan bantuan pengisian FloEFD. Hasil yang diperolehi oleh simulasi telah disahkan dengan kajian empirikal, yang menunjukkan *MAPE* sebanyak 3.60%. Siasatan dijalankan untuk mensimulasikan cuaca hari yang panas di Kuala Lumpur.

Parameter yang diselidiki adalah ketebalan ruang udara reflektif, kecondongan bumbung, dan bahan jubin bumbung. Prestasi terma pemasangan bumbung dinilai dari segi rintangan haba, iaitu nilai RSI.

Daripada hasil kajian simulasi tersebut, didapati bahawa peningkatan ketebalan ruang udara reflektif, berjaya meningkatkan daya tahan haba sistem penambat reflektif. Ruang udara reflektif tebal meningkatkan pengudaraan udara dan meningkatkan kadar aliran udara dari tepi bumbung ke rabung dan mengurangkan penembusan fluks haba melalui siling.

Walaupun bagaimanapun, hasil kajian juga mendapati bahawa bumbung bersudut 45° mempunyai kesan yang lebih besar untuk meningkatkan daya tahan haba bumbung. Disebabkan sudut bumbung yang lebih curam, kesan keapungan meningkat di ruang loteng dan mengurangkan pengumpulan haba, dan ini mengakibatkan penembusan fluks haba yang lebih rendah.

Hasil kajian ini juga menunjukkan bahawa terdapat sedikit perbezaan daya rintangan terma antara jubin tanah liat dan jubin konkrit. Walaupun bagaimanapun, jenis pemindahan haba di dalam bumbung adalah sama untuk kedua-dua jenis bahan jubin.

Simulasi CFD meramalkan bahawa untuk bumbung bersudut 30°, jumlah nilai RSI melebihi nilai minimum

RSI 2.5 m<sup>2</sup>/W·K apabila ketebalan ruang udara reflektif adalah 50 mm dan 60 mm bagi jubin tanah liat dan jubin konkrit masing-masing. Untuk bumbung bersudut 45°, nilai RSI melebihi nilai RSI minimum untuk semua konfigurasi bumbung.

Simulasi yang diperolehi menunjukkan bahawa penggunaan sistem penebat reflektif dan sistem penghalang radiasi dalam bumbung gable mampu memberikan penebatan haba yang mencukupi untuk bangunan. Tahap peningkatan keselesaan terma dalam bangunan oleh sistem penebatan terma harus dijadikan subjek kajian masa depan.

Akhir sekali, penggunaan teknik simulasi CFD harus dijadikan kaedah alternatif untuk menyiasat keberkesanan teknologi penebat haba di bangunan dan kaedah ini harus diterokai dengan lebih lanjut.

#### PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

#### PENGHARGAAN

Para penulis ingin mengucapkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan kewangan mereka di bawah geran AP-2017-006/1. Para pengarang juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Persidangan Antarabangsa ReSTED 2019 untuk menerima kertas penyelidikan ini

#### RUJUKAN

- American Society for Testing Materials. 2017. *ASTM C168-15a Standard Terminology Relating to Thermal Insulation*. 2017 Editi. ASTM International (ASTM).
- ASHRAE .2009. Chap. 26: Heat, air and moisture control in building assemblies - Material properties. In: *ASHRAE Handbook of Fundamentals* 26.1--26.22.
- Bottarelli M, Zannoni G, Bortoloni M, et al. 2017. CFD analysis and experimental comparison of novel roof tile shapes. *Propulsion and Power Research* 6(2): 134–139.
- Department of Standards Malaysia .2014. *Malaysian Standard. Energy efficiency and use of renewable energy for residential buildings - Code of practice*.
- Dos Santos, G. H. and Mendes, N. 2015. Numerical analysis of hygrothermal performance of reflective insulated roof coatings. *Applied Thermal Engineering* 81: 66–73.
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F. et al. 2012. Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings* 49: 611–618.
- Geetha, N. B. and Velraj, R. 2012. Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage - A review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 29(2): 913–946.
- Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J. et al. 2014. Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings* 80: 81–105.
- Lee, S., Park, S.H., Yeo, M.S. et al. 2009. An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment* 44(7): 1431–1439.
- Lee, S. W., Lim, C. H. and Salleh, E. 2016. Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65: 643–661.
- Li, D., Zheng, Y., Liu, C. et al. 2016. Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters. *Sustainable Cities and Society* 22: 86–93.
- Medina, M. A. 2012. A comprehensive review of radiant barrier research including laboratory and field experiments. *ASHRAE Transactions* 118(PART 1): 400–407.
- Medina, M. A. and Young, B. 2006. A perspective on the effect of climate and local environmental variables on the performance of attic radiant barriers in the United States. *Building and Environment* 41(12): 1767–1778.
- Miranville, F., Fakra, A. H., Guichard, S. et al. 2012. Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from field measurements. *Energy and Buildings* 48: 79–90.
- Nahar, N., Sharma, P. and M. P. 2003. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in Arid Regions. *Building and Environment* 38(1): 109–116.
- Richards, F. 1977. *Reflective Insulation and the Control of Thermal Environments*.
- RIMA. 2002. *Reflective Insulation , Radiant Barriers And Radiation Control Coatings*. (Second Edition).
- Roels, S. and Deurinck, M. 2011. The effect of a reflective underlay on the global thermal behaviour of pitched roofs. *Building and Environment* 46(1): 134–143.
- Saber, H. H. 2013. Thermal performance of wall assemblies with low emissivity. *Journal of Building Physics* 36(3): 308–329.
- Saber, H. H. 2015. Thermal resistance of enclosed reflective airspaces. *Construction Portfolio, National Research Council Canada* 1(613): 1–16.
- Sarawak Energy .2017. Solar Energy by Sarawak Energy. <https://www.sarawakenergy.com/what-we-do/power-generation>. Accessed on:19 March 2018.
- The, K.S., Yarbrough, D. W., Lim, C. H. et al. 2017. Field evaluation of reflective insulation in south east Asia. *Open Engineering* 7(1): 352–362.
- Wang, S., Shen, Z. and Gu, L. 2012. The impact of roof pitch and ceiling insulation on cooling load of naturally-ventilated attics. *Energies* 5(7): 2178–2196.
- Yarbrough, D. W., The, K. S., Lim, C. H., Saleh E MS and SM .2016. Hybrid and reflective insulation assemblies for buildings. *Journal of Geoscience and Environment Protection* (2016): 1–11.
- Yarbrough, D. W. 2010. Reflective materials and radiant barriers for insulation in buildings. *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*: 305–318.