

Analisis Terma dan Prestasi Tetingkap Dwi Kaca dengan Modul Fotovoltan Semi-lutsinar

(Thermal Analysis and Performance of Double Glazing Window with Semi-transparent Photovoltaic Module)

MOHD YUSOF HI OTHMAN*, SALEEM H. ZAIDI, KAMARUZZAMAN SOPIAN & MARHAMA JELITA

ABSTRAK

Analisis terma dan prestasi modul fotovoltan semi-lutsinar yang dipasang pada tetingkap dwi kaca (TDK) telah dikaji. Di dalam TDK terjadi pemindahan haba olakan yang disebabkan oleh perbezaan suhu. Perisian COMSOL digunakan untuk menyelesaikan model matematik dengan empat jenis gas yang berlainan disimulasikan untuk mengisi ruang dalam TDK iaitu udara, argon, kripton dan xenon. Ruang dalam TDK diubah antara 5 hingga 100 mm. Keadaan cuaca di Kuala Lumpur, Malaysia telah digunakan. Modul fotovoltan yang digunakan untuk kajian simulasi ialah jenis silikon amorfus (Si-a). Kajian ini mendapati penggunaan gas xenon dalam ruang TDK memberikan prestasi maksimum dalam mengurangkan beban penyejukan. Ketebalan optimum ruang TDK bergantung kepada jenis gas yang digunakan dan secara umumnya berada dalam julat 10 hingga 20 mm.

Kata kunci: Analisis terma; modul semi lutsinar; pemindahan haba perolakan; prestasi sistem; tingkap dwi kaca

ABSTRACT

Thermal analysis and performance of a semi-transparent photovoltaic module installed with a double glazing window (TDK) has been studied. The convective heat transfer occurs because of the temperature differences. The software COMSOL was used to solve the mathematical model and four different gases namely air, argon, krypton and xenon were used. The gap's thickness varies from 5 to 100 mm. The climate conditions in Kuala Lumpur, Malaysia was used. The photovoltaic module used for the simulation studies are of the amorphous type (Si-a). It was concluded that the use of xenon for filling up the gaps of the windows gave maximum benefits for reducing cooling load. The optimal gap thickness obtained were between 10 and 20 mm.

Keywords: Convective heat transfer; double glazing window; semi-transparent module; system performance; thermal analysis

PENDAHULUAN

Salah satu cara untuk mengurangkan kehilangan haba melalui tetingkap adalah dengan menggunakan tetingkap dwi kaca (TDK). Kajian pemindahan haba menerusi TDK pertama kali dikaji oleh Korpela et al. (1982). Mereka menggunakan skema pembezaan terhad Arakawa secara eksplisit dan kaedah DuFort–Frankel untuk menyelesaikan masalah pemindahan haba tersebut. Mereka menghadkan kajian tersebut untuk aspek nisbah tingkap, iaitu tinggi tingkap (H) kepada tebal tingkap (L), yang kurang daripada 20. Kemudiannya, Lee dan Korpela (1983) meluaskan kajian mereka untuk aspek nisbah tingkap sehingga 40 dengan menggunakan pelbagai nombor Prandtl. Setelah itu, Novak dan Nowak (1993) melakukan kajian ke atas pelbagai lapisan sempadan yang tertutup dengan aspek nisbah antara 10 dan 20, serta julat nombor Grashof antara 1×10^8 hingga 3×10^9 .

Muneer dan Han (1996) kemudiannya melakukan analisis pemindahan haba menerusi ruang tertutup TDK. Mereka mendapati pemindahan haba dapat dikurangkan dengan menggunakan gas kripton dan xenon yang diisi

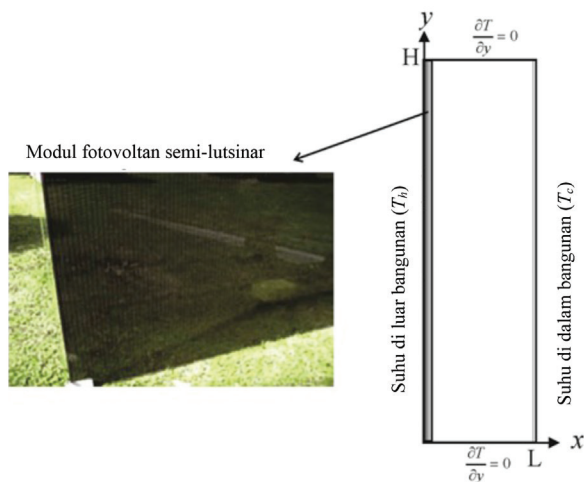
dalam ruang TDK. Weir dan Muneer (1998) kemudiannya menganalisis pemindahan haba ke atas empat jenis bahan utama yang digunakan untuk membina TDK. Keempat-empat bahan itu adalah kayu, aluminium, kaca dan gas (argon, kripton dan xenon) yang diisi dalam ruang TDK. Mereka juga mengira amaun tenaga yang diperlukan dan kesan persekitaran dalam proses pengilangan TDK berkenaan. Aydin (2000) telah mencatatkan penggunaan TDK di empat bandar berbeza iaitu Antalya, Trabzon, Ankara dan Kars. Beliau berusaha untuk mendapatkan ketebalan terbaik antara kepingan kaca dalam TDK. Dengan menggunakan kaedah pembezaan terhad, Aydin (2000) mendapati ketebalan terbaik antara kaca sangat dipengaruhi oleh keadaan cuaca. Aydin (2006) mengembangkan kajiannya dengan mengambil kira kesan nisbah kekonduksian terma kaca dengan kekonduksian gas di dalam ruang TDK. Beliau mendapati penggunaan gas yang mempunyai nilai kekonduksian terma yang lebih rendah boleh menurunkan nilai penebat TDK.

Dengan peningkatan kesedaran manusia tentang penjimatan tenaga dan pemuliharaan alam sekitar dan

dengan berkurangnya sumber tenaga fosil seperti arang batu, minyak dan gas asli, kajian fotovoltan bersepadu bangunan (FVBB) berkembang dengan pesat. Pada awal 1990-an, modul FVBB direka khas untuk dipasang pada dinding bangunan (Yang et al. 1997). Brinkworth et al. (1997) mendapati ruang udara antara modul FVBB dengan dinding bangunan boleh menaikkan kecekapan penjanaan elektrik panel FVBB. Yang et al. (2000) mendapati pemasangan FVBB pada dinding bangunan boleh mengurangkan beban penyejukan sehingga 50%. Kemudian, Fung dan Yang (2008) membina model untuk menilai prestasi pemindahan haba modul FVBB semi-lutsinar. Penggunaan TDK bersepadu dengan modul FVBB semi-lutsinar pertama direka bentuk oleh Han et al. (2009). Mereka melakukan simulasi terhadap corak aliran dan pemindahan haba menerusi TDK untuk mendapatkan ketebalan yang terbaik. Sungguhpun demikian, Han et al. (2009) hanya melakukan simulasi khusus untuk cuaca di Hong Kong dan dengan ruang TDK diisi dengan udara. Dalam kajian ini, kami telah berjaya melakukan simulasi ke atas sistem TDK dan mendapatkan ketebalan ruang gas (udara, xenon, argon, kripton) yang terbaik untuk diisi dalam ruang TDK berkenaan dengan menggunakan keadaan cuaca di Kuala Lumpur, Malaysia. Kajian ini juga berusaha untuk menilai suhu modul, kecekapan modul dan prestasi tenaga untuk modul FVBB semi-lutsinar.

PERMODELAN MATEMATIK

TDK bersepadu dengan modul fotovoltan (FV) yang dipasang pada bangunan dapat digambarkan seperti dalam Rajah 1. Permukaan kaca bahagian luar bangunan disepadukan dengan modul fotovoltan jenis silikon amorfus (Si-a) semi-lutsinar yang membolehkan sinaran suria melalui kaca dari luar bangunan. Dalam ruang TDK, aliran haba dianggap mantap, bersifat Newtonian, tak-termampat, gas dianggap lamina dan juga tidak terdapat ventilasi secara mekanik. Anggaran Boussinesq digunakan untuk mentaksir kesan perubahan ketumpatan gas. Kesan lesapan likatan gas dan



RAJAH 1. Model pemindahan haba untuk tettingkap dwi kaca (TDK) modul fotovoltan semi-lutsinar

haba dalaman diabaikan. Dengan andaian ini, persamaan yang terhasil daripada hukum keabadian jisim, hukum Newton kedua dan hukum keabadian tenaga dapat ditulis sebagai (Kakac & Yener 1995):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right). \tag{2}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta g (T - T_c). \tag{3}$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \tag{4}$$

Dengan syarat sempadannya:

$$\begin{aligned} u = v = 0 & \text{ pada setiap dinding TDK;} \\ T = T_h & \text{ pada } x = 0 \\ T = T_c & \text{ pada } x = L \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 & \text{ pada } y = 0 \text{ dan } y = H. \end{aligned} \tag{5}$$

Persamaan di atas dapat ditukar ke bentuk tidak bermatra. Pelbagai cara boleh digunakan bagi menyahmatra sistem persamaan ini, contohnya sebagaimana yang diberikan oleh Oosthuizen dan Naylor (1999) yang memperkenalkan pemboleh ubah berikut:

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha}, \\ V = \frac{vL}{\alpha}, \quad \Theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad P = \frac{pL^2}{\rho \alpha^2}. \end{aligned} \tag{6}$$

Dengan demikian kita boleh gantikan pemboleh ubah dalam (1) - (4) dengan pemboleh ubah (6). Dengan menggunakan kaedah aljabar berhingga, kita memperoleh:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = 0. \tag{7}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right). \tag{8}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ra \cdot Pr \cdot \Theta. \tag{9}$$

$$U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2}, \tag{10}$$

dengan Pr dan Ra adalah masing-masing nombor Prandtl dan nombor Rayleigh yang ditakrifkan sebagai:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad Ra = \frac{g\beta(T_h - T_c)L^3 Pr}{\nu^2} \text{ dimana } \alpha = \frac{k}{\rho c_p}. \tag{11}$$

Mengikuti pemboleh ubah (6), keadaan sempadan (5) menjadi:

$$\begin{aligned} U = V = 0 \text{ pada setiap dinding TKG} \\ \Theta = 1 \text{ pada } X = 0 \\ \Theta = 0 \text{ pada } X = 1 \\ \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0 \text{ pada } Y = 0 \text{ dan } Y = A, \end{aligned} \quad (12)$$

dengan A adalah nisbah tinggi (H) berbanding dengan ketebalan (L) dalam ruang TDK.

Daripada perspektif kejuruteraan, perkara yang penting untuk dinilai adalah prestasi pemindahan haba melalui TDK. Prestasi pemindahan haba ini diwakili oleh nombor Nusselt yang ditakrifkan sebagai:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{A} \int_0^A \left[-\frac{\partial \Theta}{\partial X} \right]_{X=0.1} dY. \quad (13)$$

Selain kadar pemindahan haba, perkara lain yang perlu dinilai adalah fluks haba. Fluks haba atau fluks terma adalah kadar pemindahan tenaga melalui sesuatu permukaan. Fluks haba menerusi ruang TDK ditakrifkan sebagai:

$$q = \frac{T_h T_c}{\left(\frac{2L_{gh}}{k_g} \right) + \left(\frac{L_{gc}}{k_g} \right) + \left(\frac{L_F}{k_F} \right) + \left(\frac{1}{ht} \right) + \left(\frac{1}{ht_h} \right) + \left(\frac{1}{ht_c} \right)}, \quad (14)$$

dengan ht , ht_h dan ht_c adalah masing-masing pekali pemindahan haba gas, luar dan dalam bangunan yang ditakrifkan sebagai (Curcija & Goss 1995; Loveday & Taki 1996):

$$\begin{aligned} ht = \frac{k_{gas} \overline{Nu}}{L}. \quad ht_h = 2V_m + 8.91, \\ ht_c = 1.46 \left(\frac{T_h - T_c}{H} \right)^{0.25}, \end{aligned} \quad (15)$$

dengan V_m (m/s) adalah kelajuan angin. Untuk Kuala Lumpur, purata kelajuan angin setiap bulan tersenarai pada laman sesawang Myforecast (2012). L_F adalah ketebalan modul FV semi-lutsinar, $L_F = 2$ mm. L_{gh} adalah ketebalan kaca bahagian luar, $L_{gh} = 4$ mm. L_{gc} adalah ketebalan kaca bahagian dalam, $L_{gc} = 10$ mm. k_F adalah kekonduksian terma modul FV, $k_F = 237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ adalah kekonduksian terma kaca, $k_g = 0.96 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. k_{gas} adalah kekonduksian terma gas di dalam ruang TDK. Dalam kajian ini, simulasi ke atas empat jenis gas seperti tersenarai dalam Jadual 1 telah dilakukan. T_c adalah suhu dalam bangunan yang ditetapkan sebagai, $T_c = 25^\circ\text{C}$. T_h adalah suhu sekitaran luar bangunan. Untuk cuaca di Malaysia khususnya di Kuala Lumpur, nilai T_h berubah sesuai dengan musim seperti disenaraikan pada laman sesawang World Weather Information Service (2012).

JADUAL 1. Kekonduksian terma empat jenis gas pada suhu 25°C (The National Institute of Standards and Technology 2011)

Bil.	Jenis gas	($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
1.	Udara	0.02597
2.	Argon	0.01762
3.	Kripton	0.00935
4.	Xenon	0.00553

Tenaga output (P) daripada modul FVBB semi-lutsinar untuk setiap luas unit modul dikira dengan menggunakan rumus berikut (Brandemuehl & Beckman 1980):

$$P = 1.01 \cdot S \cdot \eta \cdot \tau_{gh} \cdot \alpha_{sel} \cdot R, \quad (16)$$

dengan S adalah keamatan sinaran suria, η_{STC} adalah kecekapan piawai sel suria, T_{sel} adalah suhu sel suria, τ_{gh} adalah pekali kepencaran lapisan kaca penutup, α_{sel} adalah pekali serapan sel suria dan R adalah darjah kegelapan modul. Kecekapan piawai modul fotovoltan, η_{STC} , bergantung kepada jenis bahan modul fotovoltan. Dalam kajian ini modul fotovoltan jenis silicon amorfus (Si-a) semi-lutsinar digunakan dengan kecekapan 6%, voltan litar terbuka 89 V, voltan maksimum 69 V, arus litar pintas 0.38 A, arus maksimum 0.28 A dan luas permukaan modul fotovoltan adalah 0.466 m^2 . Kecekapan sel suria (η) dapat dikira dengan menggunakan (17) (Zondag et al. 2003):

$$\eta = \eta_{STC} \cdot [1 - 0.0045(T_{sel} - 25)], \quad (17)$$

dengan T_{sel} pada (17) dinilai daripada suhu purata (T_p) dengan korelasi (Markvart 2000):

$$T_{sel} = \frac{SOSN - 20}{0.8} \cdot S + T_p, \quad (18)$$

dengan $SOSN$ adalah suhu operasi sel normal yang ditakrifkan sebagai suhu modul ketika modul beroperasi pada keadaan khas. Dalam kajian ini $SOSN$ ditetapkan pada suhu 47°C adalah keamatan sinaran suria. Data keamatan sinaran suria Malaysia setiap bulan dapat dimuat turun daripada pangkalan data Homer (2012).

PENYELESAIAN COMSOL

Pemindahan haba olakan bebas dalam ruang TDK tertakluk kepada sistem persamaan tak-linear terbitan separa. Hampir mustahil untuk menyelesaikan persamaan ini dengan menggunakan kaedah tepat kerana ketaklinearannya dan keadaan sempadan yang rumit. Oleh yang demikian, sistem persamaan tersebut mesti diselesaikan secara berangka. Dalam kajian ini, kami menggunakan kaedah unsur berhingga yang disepadukan dalam perisian COMSOL.

Untuk analisis menggunakan perisian ini, aliran lamina (spf) dan pemindahan haba dalam cecair (ht) yang masing-masing merujuk kepada (7) - (10) telah digunakan. Kami menggunakan pre-takrif dengan saiz grid yang disediakan oleh COMSOL, iaitu teramat kasar, ekstra kasar, lebih kasar, kasar, normal, halus, lebih halus dan ekstra halus seperti yang tersenarai dalam Jadual 2. Jadual 2 menunjukkan bahawa nilai Ψ_{\min} dan \overline{Nu} tertumpu ke suatu nilai. Ini menunjukkan semua prosedur yang digunakan sudah tepat dan nilai yang diperolehi pasti akan menuju ke nilai tepat tersebut. Adalah menarik untuk membincangkan kejituan hasil COMSOL ini dengan nilai tepatnya sekiranya kaedah analitik boleh dilakukan. Jadual 2 juga menyatakan masa yang diperlukan oleh unit pemprosesan pusat (CPU) komputer untuk melakukan pengiraan. Grid yang lebih halus memerlukan masa yang lebih lama untuk pengiraan. Dengan kejituan yang tinggi dan masa pengiraan lebih lama, maka saiz grid 'mesh' pre-takrif yang lebih halus digunakan untuk semua pengiraan dalam kajian ini.

Hasil kajian ini ditentusahkan dengan membandingkan hasil kajian ini dengan yang dilakukan oleh ElSherbiny et al. (1982) dan Yin et al. (1978) untuk model olakan bebas dalam ruang TDK yang tinggi seperti yang diberikan dalam Rajah 2. Daripada rajah ini dapat disimpulkan hasil kajian ini sesuai dengan hasil yang diperolehi oleh para penyelidik sebelumnya.

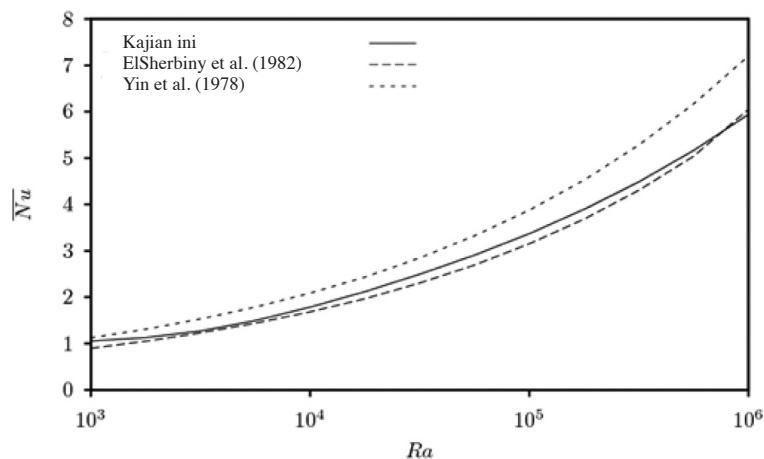
HASIL DAN PERBINCANGAN

Corak aliran atau kontur garis-strim dan medan suhu dalam ruang TDK akan dibincangkan. Berikutnya daripada hasil medan suhu, dapat ditentukan kadar pemindahan haba melalui ruang TDK. Pekali pemindahan haba TDK, pekali pemindahan haba luar dan dalam bangunan perlu dikira untuk mendapatkan fluks terma. Empat jenis gas, seperti yang disenaraikan dalam Jadual 1, kemudiannya disimulasikan untuk mengisi ruang dan ketebalan yang berubah antara 5 hingga 100 mm. Akhir sekali suhu modul, kecekapan modul dan prestasi tenaga modul FVBB semi-lutsinar dinilai. Pelbagai tingkat kegelapan modul FVBB disimulasikan bagi mendapatkan tenaga output yang optimum.

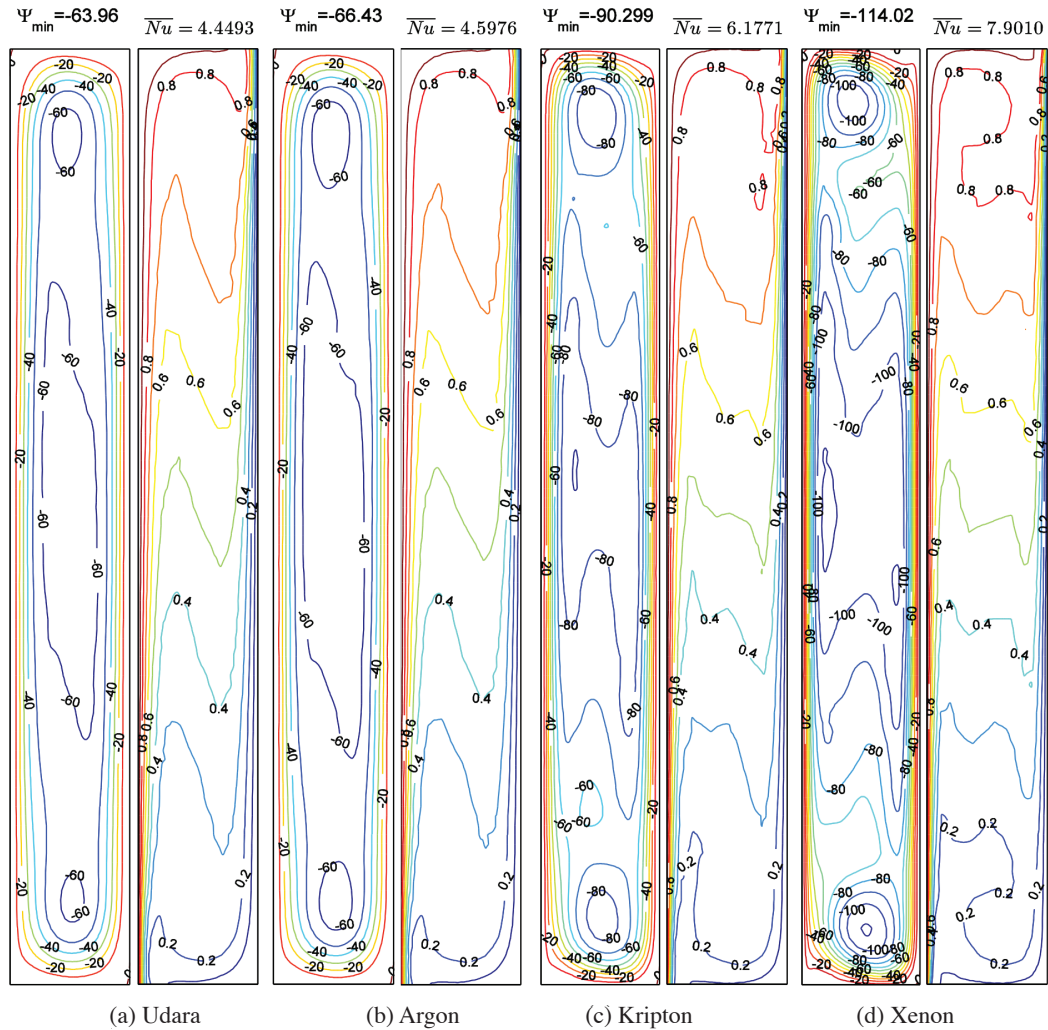
Rajah 3 menunjukkan corak garis-strim dan medan suhu dalam ruang TDK untuk gas yang berbeza, iaitu udara, argon, kripton dan xenon pada °C. Pergerakan gas seperti ditunjukkan dalam Rajah 3 dapat diterangkan seperti berikut: Oleh sebab suhu pada dinding sebelah kiri (suhu di luar bangunan) lebih tinggi berbanding dengan suhu gas di dalam ruang TDK, dinding kiri tersebut memancarkan haba kepada gas dan menaikkan suhu zarah gas bersebelahan dengan dinding kiri. Sebaik sahaja suhunya meningkat, gas bergerak dari dinding kiri (panas) ke dinding kanan (sejuk) dan berkurangan di sepanjang dinding sejuk, lalu meningkat lagi pada dinding panas. Pergerakan gas ini

JADUAL 2. Analisis kepekaan grid untuk mm, udara sebagai gas dan °C

Saiz 'mesh' pre-takrif	Unsur 'mesh'	Ψ_{\min}	\overline{Nu}	Masa CPU (s)
Teramat kasar	440	-12.8896	1.4992	4
Ekstra kasar	752	-13.1233	1.5019	4
Lebih kasar	1314	-13.7335	1.5253	5
Kasar	1716	-13.7938	1.5315	6
Normal	2686	-13.7238	1.5366	8
Halus	3582	-13.7864	1.5377	9
Lebih halus	4376	-13.8911	1.5410	12
Ekstra halus	10028	-13.5960	1.5403	18



RAJAH 2. Perbandingan hasil kajian ini dengan hasil kajian sebelumnya untuk model olakan dalam ruang TDK yang tinggi



RAJAH 3. Garis-strim dan medan suhu udara, argon, kripton dan xenon pada $\Delta T = 3.4^{\circ}\text{C}$

membentuk pusaran zarah gas mengikut arah pusingan jam di dalam ruang TDK dan medan suhu bermula dari dinding panas atau dari dinding bawah dan berakhir pada dinding atas atau dinding sejuk. Udara mempunyai nilai minimum fungsi strim dan kadar pemindahan haba terendah berbanding dengan gas lain. Ini disebabkan kekonduksian udara yang lebih tinggi berbanding gas lainnya seperti tersenarai dalam Jadual 2.

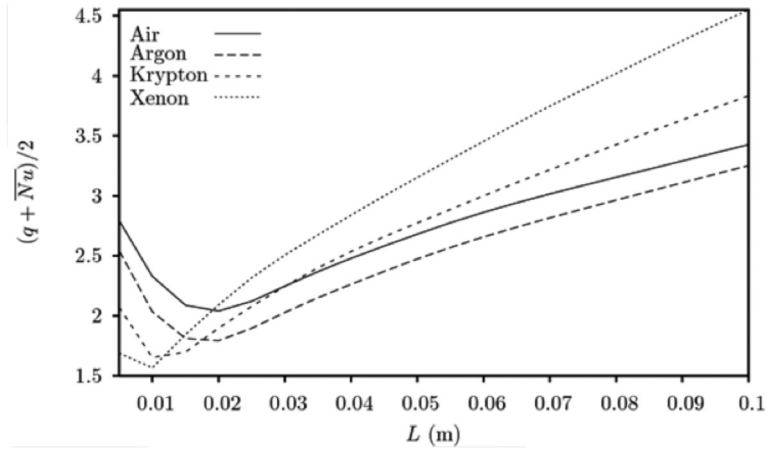
Untuk mencari ketebalan dan gas yang terbaik untuk mengisi ruang TDK, gas yang memberikan kehilangan haba dan kadar pemindahan yang terendah perlu dihitung. Nilai tersebut dapat diwakili dengan mengira purata fluks haba (q) dan kadar pemindahan haba (\overline{Nu}) menerusi ruang TDK seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4. Rajah ini menunjukkan ketebalan terbaik terjadi pada $L = 20$ (mm) untuk gas udara dan argon, $L = 10$ (mm) untuk gas kripton dan xenon. Rajah 4 juga menunjukkan bahawa xenon adalah gas terbaik yang memberikan kehilangan haba paling rendah dengan kadar pemindahan haba yang juga rendah.

Rajah 5 menunjukkan perubahan kecekapan modul fotovoltaik, $\eta(\%)$ dengan suhu modul, T_{sel} ($^{\circ}\text{C}$). Kecekapan

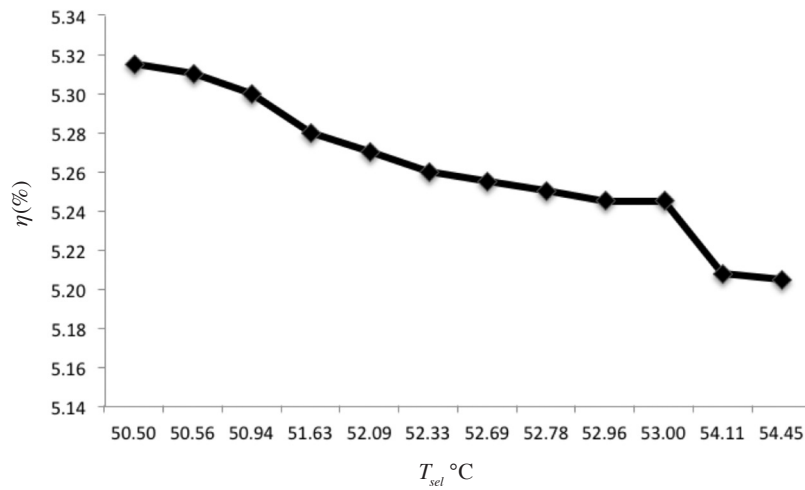
modul berkurang apabila suhu modul meningkat kerana penambahan suhu akan menyebabkan pertambahan pembawa majoriti yang berlawanan arah dengan pembawa minoriti. Dalam masa yang sama fonon (getaran kekisi) akan meningkat apabila suhu bertambah yang menyebabkan rintangan elektrik bertambah.

Rajah 6 menunjukkan perubahan tenaga output (P) terhadap kecekapan modul (η). Tenaga output untuk setiap meter persegi yang dijanakan oleh modul FVBB untuk kes $R = 0.6$ berada dalam julat 13 W hingga 14.5 W. Rajah 6 menunjukkan tenaga output akan berkurang apabila kecekapan modul bertambah.

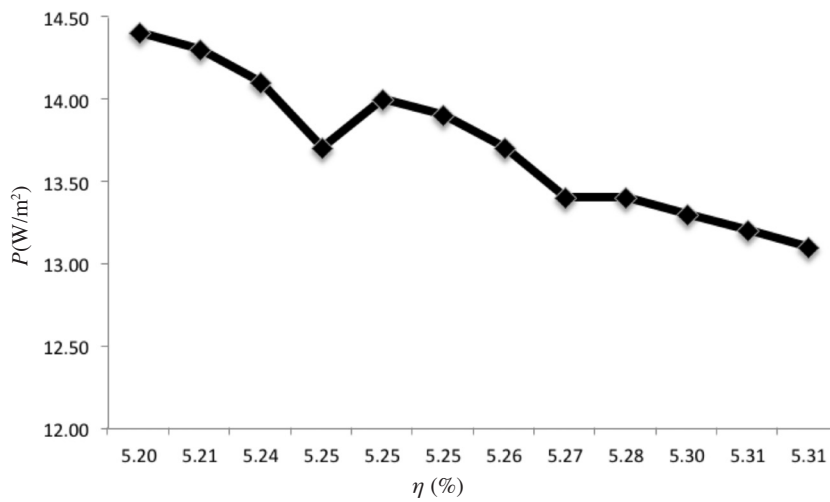
Rajah 7 menunjukkan perubahan tenaga output (P) dengan keamatan sinaran suria (S). Tenaga output meningkat apabila keamatan sinaran suria bertambah. Nilai S yang tertinggi adalah 771.9 W/m^2 pada bulan April seperti yang diberikan oleh pangkalan data homerenergy.com. Tenaga output meningkat disebabkan oleh semakin tinggi keamatan sinaran suria yang menimpa modul suria, semakin banyak elektron diuja dari aras valensi ke aras konduksi modul, yang akhirnya akan meningkatkan kuasa elektrik output.



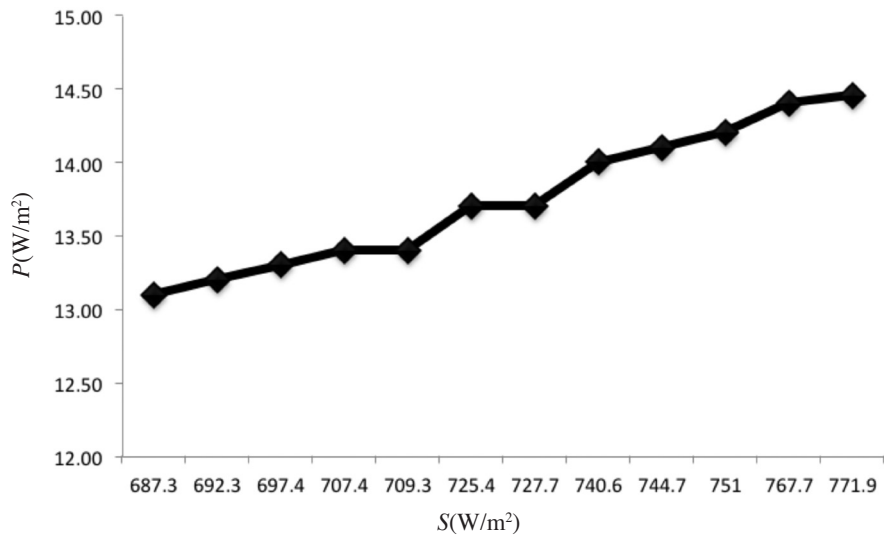
RAJAH 4. Perubahan purata pemindahan dan fluks haba menerusi TDK dengan ketebalan yang berbeza untuk udara, argon, kripton dan xenon pada °C



RAJAH 5. Perubahan kecekapan modul dengan suhu modul



RAJAH 6. Perubahan tenaga output dengan kecekapan modul pada $R = 0.6$

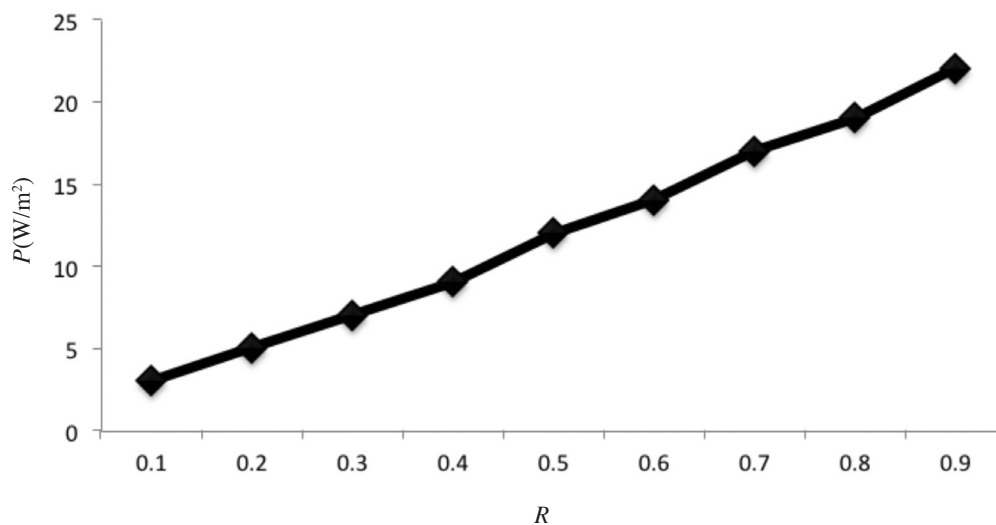


RAJAH 7. Perubahan tenaga output dengan keamatan sinaran suria pada $R = 0.6$

Rajah 8 menunjukkan perubahan tenaga output (P) terhadap kegelapan modul fotovoltaik, R , untuk keamatan sinaran suria $S = 771.9 \text{ W/m}^2$. Seperti yang dijangkakan, semakin gelap modul FVBB akan menghasilkan tenaga yang lebih besar. Apabila permukaan sel suria lebih luas berbanding dengan keluasan kaca lutsinar, maka semakin banyak sinaran suria dalam bentuk foton yang dapat diserap. Penambahan tenaga output secara linear berlaku dengan bertambahnya nilai R . Dengan menganggap fungsi tetingkap adalah kesediaan sinaran suria menembusi tingkap masuk ke bangunan, maka nilai R tidak boleh diambil terlalu tinggi. Nilai R sekitar 0.5 hingga 0.7 sudah memenuhi persyaratan tetingkap dengan pelbagai fungsi (menjana elektrik dan membenarkan cahaya memasuki bangunan).

KESIMPULAN

Perisian COMSOL berjaya menyelesaikan model matematik pemindahan haba olakan tabii dalam ruang TDK bersepadu dengan modul FVBB semi-lutsinar. Corak aliran haba, medan suhu, kadar pemindahan dan fluks haba, suhu modul, kecekapan modul dan tenaga output modul fotovoltaik telah digambarkan dalam bentuk rajah grafik. Daripada rajah grafik tersebut didapati penggunaan xenon yang diisi dalam ruang di sela kaca TDK memberikan kesan terbaik bagi beban penyejukan. Tebal optimum ruang TDK bergantung kepada jenis gas yang terdapat dalam sela kaca. Secara umumnya julat 10 hingga 20 mm adalah yang terbaik. Tenaga output modul FVBB mempunyai kecenderungan untuk berkurang apabila kecekapan modul meningkat, bertambah apabila suhu modul meningkat



RAJAH 8. Perubahan tenaga output dengan darjah kegelapan modul FVBB, R , untuk $S = 771.9 \text{ W/m}^2$

dan tenaga outputnya bertambah dengan banyak apabila keamatan sinaran suria meningkat atau darjah kegelapan modul fotovoltan bertambah.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada pihak Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pendidikan Malaysia yang telah membiayai kajian ini di bawah projek Dana Lonjakan Penerbitan UKM-DLP-2011-053.

RUJUKAN

- Aydn, O. 2000. Determination of optimum air-layer thickness in double-pane windows. *Energy and Buildings* 32: 303-308.
- Aydn, O. 2006. Conjugate heat transfer analysis of double pane windows. *Building and Environment* 41: 109-116.
- Brandemuehl, M.J. & Beckman, W.A. 1980. Transmission of diffuse radiation through CPC and flat plate collector glazings. *Solar Energy* 24: 511-513.
- Brinkworth, B.J., Cross, B.M., Marshall, R.H. & Yang, H. 1997. Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy* 61: 169-178.
- COMSOLAB. 2009. *COMSOL Multiphysics Handbook*. Hatfield, United Kingdom: Publisher
- Curcija, D. & Goss, W.P. 1995. New correlations for convective heat transfer coefficient on indoor fenestration surfaces- compilation of more recent work. *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings* 6: 567-572.
- ElSherbiny, S.M., Raithby, G.D. & Hollands, K.G. 1982. Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers. *Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME* 104: 96-102.
- Fung, Y.Y. & Yang, H.X. 2008. Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings. *Energy and Buildings* 40: 341-350.
- Han, J., Lu, L. & Yang, H. 2009. Thermal behavior of a novel type see-through glazing system with integrated PV cells. *Building and Environment* 44: 2129-2136.
- Homer. 2012. *Optimizing Clean Power Everywhere*. <http://www.homerenergy.com>. Diakses pada 31 Januari 2012.
- Kakac, S. & Yener, Y. 1995. *Convective Heat Transfer*. Florida: CRC Press Inc.
- Korpela, S.A., Lee, Y. & Drummond, J.E. 1982. Heat transfer window. *Journal of Heat Transfer* 104: 539-544.
- Lee, Y. & Korpela, S.A. 1983. Multicellular convection in a vertical slot. *Journal of Fluid Mechanics* 126: 91-121.
- Loveday, D.L. & Taki, A.H., 1996. Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39: 1729-1742.
- Markvart, T. 2000. *Solar Electricity*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Muneer, T. & Han, B. 1996. Simplified analysis for free convection in enclosures - application to an industrial problem. *Energy Conversion Management* 37: 1463-1467.
- Myforecast. 2012. *Weather for Your World*. <http://www.myforecast.com>. Diakses pada 31 Januari 2012.
- Novak, M.H. & Nowak, E.S. 1993. Natural convection heat transfer in slender window cavities. *Journal of Heat Transfer* 115: 476-479.
- Oosthuizen, P.H. & Naylor, D. 1999. *An Introduction to Convection Heat Transfer Analysis*. Singapore: McGraw-Hill.
- The National Institute of Standards and Technology. 2011. Published by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America. <http://webbook.nist.gov>. Diakses pada 31 Januari 2012.
- Weir, G. & Muneer, T. 1998. Energy and environmental impact analysis of double-glazed windows. *Energy Conversion Management* 39: 243-256.
- World Meteorological Organization. 2012. *World Weather Information Service*. <http://worldweather.wmo.int>. Diakses pada 31 Januari 2012.
- Yang, H.X., Burnett, J. & Ji, J. 2000. Simple approach to cooling load component calculation through PV walls. *Energy and Buildings* 31: 285-290.
- Yang, H.X., Burnett, J. & You, S. 1997. Photovoltaics applications in Hong Kong buildings. *Asia Engineer*.
- Yin, S.H., Wung, T.Y. & Chen, K. 1978. Natural convection in an air layer enclosed within rectangular cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 21: 307-315.
- Zondag, H.A., de Vries, D.W., van Helden, W.G.J., van Zolingen, R.J.C. & van Steenhoven, A.A. 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy* 74: 253-269.

Institut Penyelidikan Tenaga Suria
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; e-mail: myho@ukm.my

Diserahkan: 13 Februari 2012

Diterima: 5 Ogos 2013