

Sains Malaysiana 47(4)(2018): 789-795  
<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2018-4704-18>

## Kebergantungan Suhu dengan Penggunaan Tiub Kuarza Relau ke atas Sel Suria Dwi-Muka

(Temperature Dependences by using Furnace Quartz Tube on Bifacial Solar Cell)

NURUL AQIDAH MOHD SININ, MOHD ADIB IBRAHIM\*, SUHAILA SEPEAI, MOHD ASRI MAT TERIDI, NORASIKIN AHMAD LUDIN, KAMARUZZAMAN SOPIAN & SALEEM H. ZAIDI

### ABSTRAK

*Sel suria digunakan untuk menawan foton untuk menjana tenaga. Walau bagaimanapun, penambahbaikan sel diperlukan untuk meningkatkan jumlah penangkapan foton dan juga untuk meningkatkan kecekapan sel. Ini melibatkan keseluruhan proses pembuatan sel, dengan proses penyepuhlindapan adalah salah satu daripada langkah penting yang perlu dioptimumkan. Percetakan perlogaman menggunakan dwi pembakaran merupakan kaedah yang paling biasa digunakan dalam penghasilan sel suria kristal secara komersial. Aluminium (Al) digunakan pada bahagian belakang sel sebagai medan permukaan belakang dan penyambung belakang manakala perak (Ag) dicetak pada bahagian hadapan sebagai grid pemungut. Proses dwi pembakaran bagi komponen ini adalah penting dalam menentukan kecekapan sel. Oleh itu, dalam kajian ini, rawatan pembakaran telah dikaji dengan menggunakan relau tiub kuarza (QTF) dengan perubahan suhu pembakaran (700, 750, 800 and 850°C) sebagai satu percubaan untuk mendapatkan kecekapan yang tinggi serta meningkatkan kesan pemirauan persimpangan Ag. Apabila suhu meningkat, sifat elektrik sel suria dwi-muka juga turut meningkat. Kebergantungan suhu menunjukkan rintangan pirau yang tinggi disebabkan oleh proses penyejukan yang pantas selepas proses pembakaran dan seterusnya membawa kepada faktor isi dan kecekapan sel yang tinggi.*

*Kata kunci: Kebergantungan suhu; medan permukaan belakang; pemirauan persimpangan; sel suria dwi-muka; tiub kuarza relau*

### ABSTRACT

*Solar cells are used to capture photons to generate energy. However, cell enhancements are needed to increase the amount of photon capture and also to increase cell efficiency. This involves the entire cell manufacturing process, where the annealing process is one of the most important steps needs to be optimized. Metallization printing using dual combustion is the most commonly used method in the production of commercial crystalline solar cells. Aluminum (Al) is used on the back of the cell as a back surface and rear connector while silver (Ag) is printed on the front as a collector grid. The dual combustion process for this component is important in determining the efficiency of the cells. Therefore, in this study, combustion treatment has been studied by using quartz tubes furnace (QTF) with the change of combustion temperature (700, 750, 800 and 850°C) as an attempt to obtain high efficiency and increase the shunting effect of Ag junction. As temperatures rise, the electric properties of the bifacial solar cells also increase. Temperature dependence shows high shunt resistances due to rapid cooling process after the combustion process and thus leading to fill factor and high cell efficiency.*

*Keywords: Bifacial solar cells; furnace quartz tube; rear surface plane; shunting junction; temperature dependence*

### PENGENALAN

Dalam industri pengeluaran, pencetakan skrin merupakan teknik yang selalu digunakan untuk perlogaman bahagian hadapan dan belakang kerana proses ini boleh dipercayai dan difahami dengan kadar daya pemrosesan yang tinggi (Erath et al. 2010). Perlogaman pencetakan skrin merupakan cara yang sering digunakan didalam menghasilkan sel suria kristal hablur secara komersial. Keadaan pembakaran dan proses pencetakan skrin merupakan beberapa parameter yang perlu dikawal dalam menghasilkan sel suria berkecekapan tinggi. Proses perlogaman memberi beberapa impak terhadap sifat sel

suria seperti arus litar pintas ( $I_{SC}$ ), voltan litar terbuka ( $V_{OC}$ ), kerintangan bersiri ( $R_S$ ), kerintangan pirau ( $R_{SH}$ ) dan faktor isi ( $FF$ ) (Kwon et al. 2010). Sepanjang pembangunan proses perlogaman dwi-pembakaran secara komersial, kecekapan sel yang lebih baik telah pun diperolehi dengan menggunakan profil pembakaran menggunakan relau penghantar industri (Ballif et al. 2003; Hilali et al. 2004). Pes perak (Ag) dan aluminium (Al) telah digunakan pada bahagian belakang sel manakala komposisi Ag dicetak di bahagian hadapan yang berfungsi sebagai grid pengumpul. Kecekapan penukaran tenaga sel suria boleh meningkat dengan penambahbaikan sifat-sifat bahan dan

reka bentuk struktur sel suria (Kabir et al. 2010). Pelbagai sifat boleh dikawal dengan mengaloi Al-Si pada bahagian belakang wafer silikon sebagai medan permukaan belakang (BSF). Pembakaran pantas diperlukan untuk memastikan pembakaran yang menyeluruh bagi menghasilkan sentuhan yang terbaik dan seterusnya memperbaiki medan permukaan belakang (BSF) Al. Pembakaran pantas pada suhu yang tinggi diperlukan untuk menghalang degradasi kualiti elektrik pada elektrod logam Aluminium (Al) dan perak (Ag) (Vinod 2008). Proses penyejukan yang pantas diperlukan untuk menghalang penyerapan perak dan aluminium ke dalam persimpangan.

Secara asasnya, pes perak memerlukan suhu pembakaran melebihi  $830^{\circ}\text{C}$  dan masa pembakaran yang lama untuk punaran penyaduran anti-pantulan (ARC) silikon nitrida yang sempurna (Richter et al. 2011). Terdapat beberapa jenama pes yang baru dengan penambahbaikan komposisi gelas di dalamnya yang memerlukan suhu pembakaran serendah  $780^{\circ}\text{C}$  dan sangat berkesan digunakan dengan profil tembakan. Kelebihan utama pembakaran ini adalah memerlukan tempoh masa yang singkat. Tempoh masa yang singkat ini dapat menghalang pes Ag dan Al daripada menembusi dan penghabluran semula ke dalam lapisan penebat gelas di antara elektrod dan permukaan silikon. Ini mengakibatkan pengurangan pemirauan atau pun degradasi persimpangan. Melalui pembakaran tembakan ini, rintangan siri yang terhasil adalah rendah (Grupp et al. 2005; Hilali et al. 2004; Jeong et al. 2001). Kebelakangan ini, kemajuan dalam bahan dan alat pembakaran telah menggalakkan penjelajahan kajian kepada proses dwi pembakaran berkelajuan tinggi secara terperinci. Profil piawai pembakaran yang digunakan dalam industri dengan kadar pembakaran dan penyejukan antara 60-100/s merupakan suatu kadar penyediaan keadaan yang mencukupi untuk pembentukan medan permukaan belakang ketika pengaloi aluminium (Richter et al. 2011). Tiub kuarza relau (QTF) adalah salah satu alat pembakaran dan bahan termaju yang boleh dikaji untuk proses dwi pembakaran dengan suhu yang tinggi disebabkan oleh kos yang berkesan, penghasilan yang cepat dan mudah. QTF merupakan relau bukan tali sawat penyampai kerana alat ini berkeupayaan untuk dipanaskan sehingga mencecah suhu  $1100^{\circ}\text{C}$  dan boleh dikawal untuk masa pegangan secara manual. Profil suhu diperlukan bagi memastikan putaran pembakaran optimum dicapai. Adalah penting untuk mencapai putaran pembakaran optimum untuk mendapat prestasi elektrik sel suria yang bagus.

Pemirauan boleh terjadi disebabkan oleh keadaan pembakaran yang melampau ketika proses perlogaman. Keadaan pembakaran melampau ketika pembentukan medan permukaan belakang boleh menyebabkan pembakaran dalaman dan merosakkan persimpangan sel. Secara umumnya, pemirauan perlogaman hadapan adalah sangat susah untuk dielakkan apabila nilai kerintangan elektrod yang rendah perlu dicapai. Fenomena ini seterusnya mengurangkan kecekapan sel suria dan prestasi modul. Kesan daripada fenomena ini dapat dilihat melalui

keputusan IV. Melalui keputusan IV, litar pintas terhasil daripada pemirauan tersebut. Adalah penting untuk mengoptimumkan suhu pembakaran bagi mengelakkan pemirauan dan meningkatkan prestasi sel.

Matlamat utama penyelidikan ini adalah untuk mengkaji rawatan pembakaran pada elektrod perlogaman menggunakan QTF dengan pelbagai suhu ( $700$ ,  $750$ ,  $800$  dan  $850^{\circ}\text{C}$ ) sebagai percubaan untuk mendapatkan kecekapan yang tinggi dan mengurangkan pemirauan persimpangan Ag. Untuk rawatan pembakaran, puncak suhu mempunyai kelebihan dalam meningkatkan prestasi sel. Di sini, kesan faktor isi dan kecekapan sel akan dikaji dengan peningkatan suhu pembakaran.

## BAHAN DAN KAEDAH

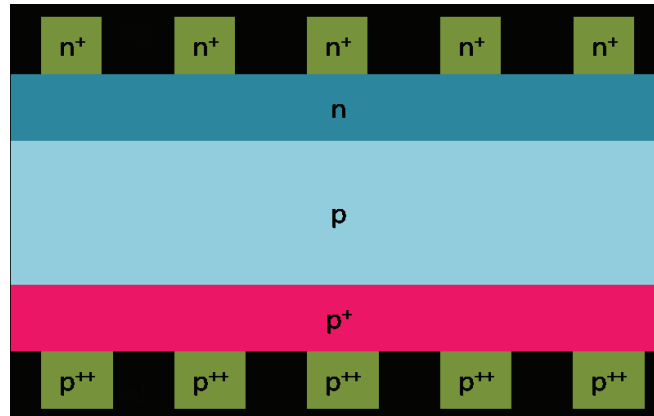
### BAHAN-BAHAN

Sampel wafer jenis-*p* Si (100) dengan ketebalan  $200\ \mu\text{m}$  telah digunakan dalam uji kaji ini. Kerintangan wafer ini adalah antara  $3.0 \sim 6.0\ \Omega\text{cm}$  dan setiap sampel dipotong kepada saiz  $10 \times 10\ \text{cm}$ . Larutan asid hidrofluorik (HF), asid nitrik ( $\text{HNO}_3$ ), kalium hidroksida (KOH), isopropil alkohol (IPA), asid hidroklorik (HCl) dan hidrogen peroksida ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) telah diperolehi daripada Sigma Aldrich dan Fisher Scientific dan digunakan terus tanpa melalui proses penulenan. Pes aluminium (Al) dan perak (Ag) yang digunakan adalah FERRO yang dibeli daripada Electronic Material.

### METOD

Sel suria dwi-muka dengan  $n^+pp^+$  telah difabrikasi. Strukturnya telah ditunjukkan dalam Rajah 1. Wafer Si dibersihkan dengan merendam wafer di dalam larutan 10% KOH pada suhu  $70^{\circ}\text{C}$  selama 10 min untuk menyingkirkan sisa potongan gergaji. Selepas dibilas dengan air ternyah ion, wafer direndam di dalam larutan HF dan air dengan nisbah 1:50 selama 1 minit. Proses penteksturan diteruskan selepas proses penyingkiran sisa potongan. Wafer ditekstur menggunakan larutan KOH, IPA dan  $\text{H}_2\text{O}$  dengan nisbah 1:5:125 selama 30 minit. Kemudian, pembersihan wafer diulang dengan merendam wafer ke dalam larutan HF: $\text{H}_2\text{O}$  selepas dibilas dengan air ternyah ion. Wafer yang telah ditekstur kemudian direndam ke dalam larutan HF dan  $\text{HNO}_3$  dalam nisbah 1:100 selama 10 min. Selepas dibilas dengan air ternyah ion, wafer sekali lagi direndam di dalam larutan HF: $\text{H}_2\text{O}$  selama 1 minit. Selepas proses penteksturan, wafer diteruskan dengan proses penyebaran jenis-*n*. Rantau  $n^+$  berdop tinggi dibentuk pada permukaan wafer Si dengan menggunakan fosforus oksiklorida ( $\text{POCl}_3$ ) sebagai sumber penyebaran pada suhu  $875^{\circ}\text{C}$  selama 30 min. Oksida  $\text{POCl}_3$  di bahagian belakang telah disingkirkan melalui punaran wap (HF) selama 90 s.

Bagi sel suria dwi muka dengan Al-BSF, pes Al telah dicetak pada bahagian belakang wafer Si menggunakan mesin pencetakan skrin. Pes Al dicetak dengan menggunakan pelitup tanpa corak. Kemudian, wafer diselipuh lindap pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$  selama 10 min bagi mengeringkan pes Al. Selepas proses pengeringan,



RAJAH 1. Struktur sel suria dwi muka Al-BSF

wafer telah dipanaskan di dalam tiub kuarza relau pada suhu berbeza (700, 750, 800 dan 850°C) untuk membentuk lapisan Al- $p^+$  tersebar. Lebihan Al telah disingkirkan dengan merendamnya di dalam larutan HCl dan  $H_2O_2$  pada suhu 30°C. Melalui kaedah ini, struktur  $n^+pp^+$  telah berjaya difabrikasi.

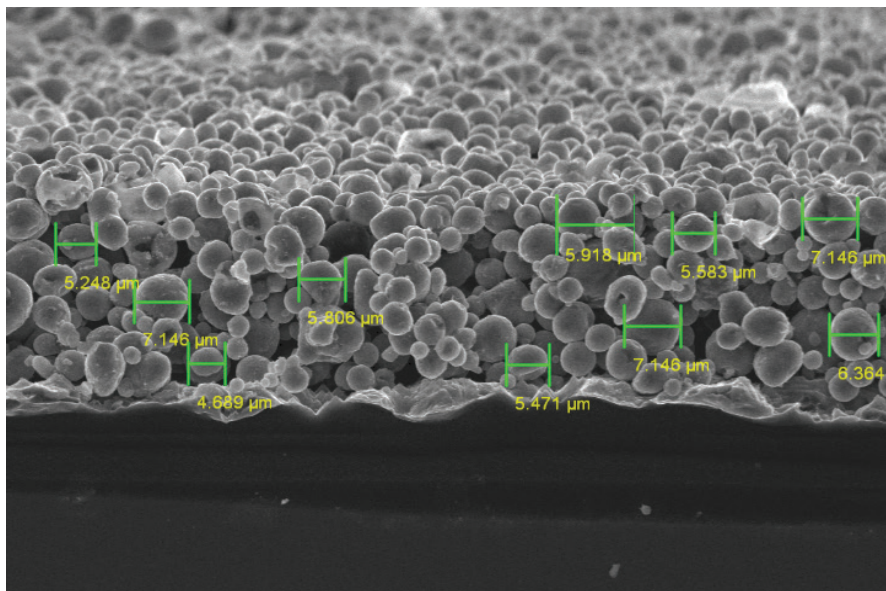
Seterusnya, wafer telah siap sedia untuk proses perlogaman dan proses ini terbahagi kepada dua bahagian iaitu pembentukan elektrod hadapan dan belakang melalui kaedah pencetakan skrin dan pembakaran elektrod bersuhu tinggi. Pes Ag dan Al telah dicetak pada kedua-dua wafer Si menggunakan mesin pencetakan skrin untuk membentuk elektrod hadapan dan belakang. Kedua-dua pes ini dicetak menggunakan pelitup bergrid yang sama. Selepas itu, wafer diselipuh lindap pada suhu 100°C selama 10 min bagi proses pengeringan pes. Selepas pengeringan, wafer dibakar di dalam tiub kuarza relau. Sel suria yang sudah siap, dipotong kepada saiz  $3 \times 3$  cm dan dianalisis menggunakan sistem pengukur lampu arus-voltan (LIV). Imej keratan rentas pes Ag dan Al sel suria itu telah dikaji menggunakan mikroskop imbasan elektron (SEM).

Dalam kajian ini, tiada penyaduran anti-pantulan disadur pada permukaan wafer yang berfungsi untuk mengurangkan pantulan cahaya daripada permukaan wafer. Hal ini kerana, fokus kajian lebih tertumpu pada proses perlogaman iaitu pembakaran Al untuk membentuk medan permukaan belakang Al (Al-BSF) menggunakan tiub relau Kuarza.

#### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

##### MIKROSTRUKTUR DAN MORFOLOGI

Rajah 2 menunjukkan imej saiz zarah Ag yang belum dipanaskan yang telah dianalisis menggunakan SEM. Daripada analisis SEM ini, purata saiz bahan Ag sebelum proses pembakaran ialah  $6.052 \pm 0.871 \mu\text{m}$  berdasarkan 10 titik saiz bahan yang berbeza kedudukan melalui pengimejan SEM. Terdapat peningkatan pada saiz zarah disebabkan zarah-zarah berdampingan bersama (Sepeai et al. 2011). Selagi terdapat peningkatan suhu, semakin banyak zarah-zarah Ag terkumpul dan tercantum bersama



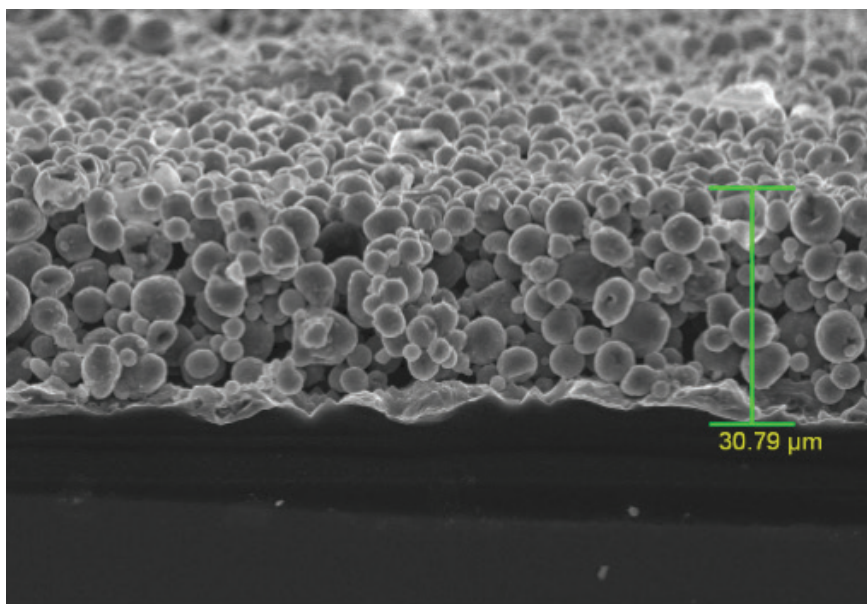
RAJAH 2. Imej saiz bahan pes Ag sebelum proses pembakaran

menjadi jambangan dan bertindak balas dengan Si untuk membentuk lapisan  $n^+$ . Lapisan  $n^+$  menyediakan lorong untuk elektron bagi membolehkannya bergerak ke arah elektrod dan seterusnya menambahbaik  $V_{OC}$  (Sepeai et al. 2011).

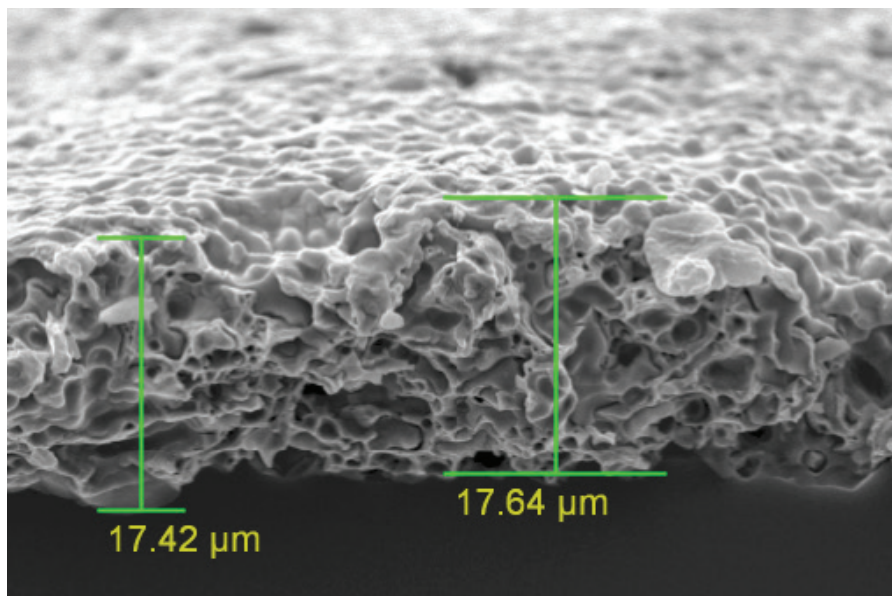
Rajah 3 dan 4 menunjukkan imej keratan rentas pada suhu pembakaran 700°C. Ketebalan sel sebelum dipanaskan ialah 30.79  $\mu\text{m}$ , manakala ketebalan sel yang dibakar pada suhu 700°C ialah 17.64  $\mu\text{m}$ . Daripada rajah tersebut, ia jelas menunjukkan bahawa pes Ag tersebar di dalam lapisan Si jenis  $p$ - dan membuktikan bahawa lapisan  $n^+$  telah terbentuk. Keadaan yang sama berlaku pada pes Al. Zarah-zarah Al terkumpul dan diresap bersama menjadi jambangan selagi suhu meningkat dan bertindak balas dengan Si untuk menghasilkan lapisan  $p^+$ .

PRESTASI ELEKTRIK

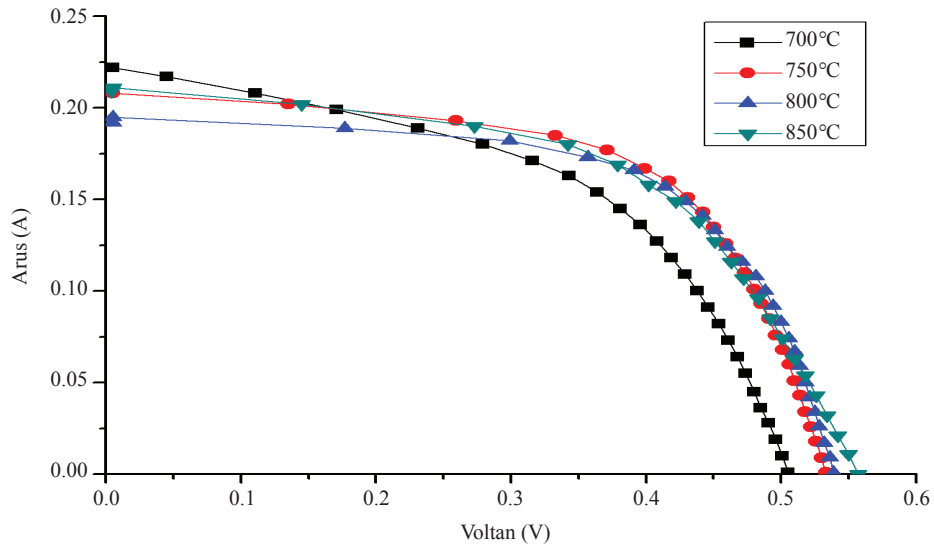
Rajah 5 dan 6 menunjukkan pencirian arus-voltan (I-V) sel suria dwi muka untuk permukaan hadapan dan belakang. Nilai  $V_{OC}$  paling tinggi telah dikenal pasti pada suhu pembakaran 850°C bagi kedua-dua bahagian sel. Namun begitu, nilai  $V_{OC}$  paling rendah direkodkan pada suhu pembakaran 700°C bagi kedua-dua bahagian hadapan dan bahagian belakang. Dapat diperhatikan bahawa, prestasi elektrik  $V_{OC}$  meningkat pada kedua-dua bahagian permukaan dengan peningkatan suhu pembakaran. Berdasarkan Rajah 5 dan 6, tiada kesan pemirauan persimpangan diperhatikan yang dapat merosakkan persimpangan dan seterusnya mengurangkan nilai  $V_{OC}$ . Peningkatan  $V_{OC}$  ini juga adalah disebabkan oleh ketebalan tipisan nipis yang mendekati penyerapan



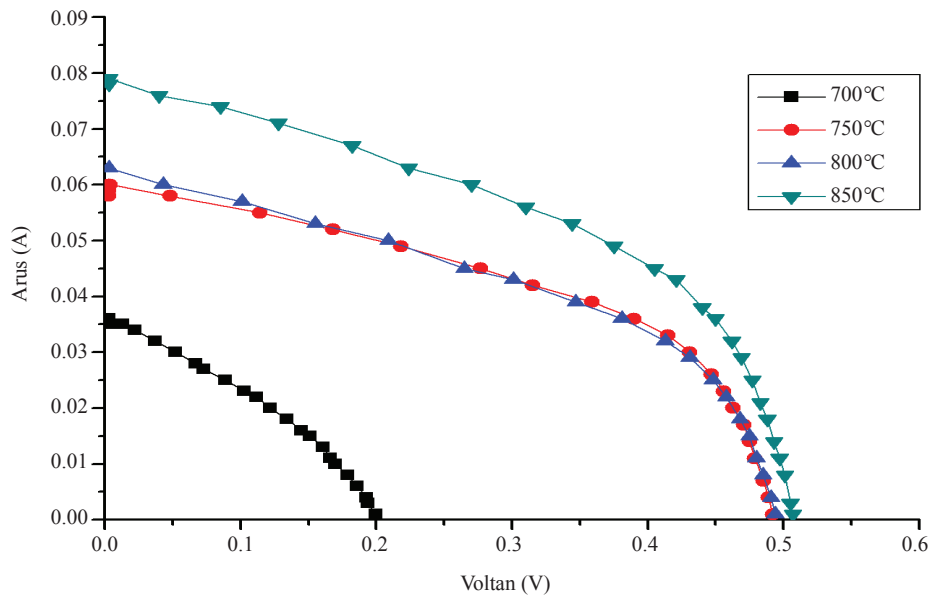
RAJAH 3. Imej keratan rentas elektrod Ag sebelum pembakaran pada suhu 700°C



RAJAH 4. Imej keratan rentas elektrod Ag selepas pembakaran pada suhu 700°C



RAJAH 5. Keluk I-V sel suria dwi muka bagi bahagian hadapan dengan suhu pembakaran yang berbeza



RAJAH 6. Keluk I-V sel suria dwi muka bagi bahagian belakang dengan suhu pembakaran yang berbeza

pembawa di dalam peranti (Sepeai et al. 2011). Nilai  $V_{OC}$  yang tinggi dapat dicapai apabila wafer didedahkan pada suhu pembakaran yang panjang dan ia disifatkan dwi pembakaran Al-BSF yang optimum. Ritcher et al. (2011) mencadangkan bahawa pendedahan kepada pembakaran yang singkat menjurus kepada kehilangan  $V_{OC}$  dan ia disifatkan sebagai dwi pembakaran Al-BSF yang tidak optimum. Nilai kecekapan bagi setiap suhu telah diringkaskan dalam Jadual 1.

Kepekaan cahaya telah diukur menggunakan kecekapan kuantum (QE). Daripada analisis QE bagi semua suhu pembakaran, ia menunjukkan paten yang serupa bagi EQE dan IQE. Rajah 7 menunjukkan kecekapan kuantum luaran (IQE) bagi bahagian hadapan dan belakang, manakala Rajah 8 menunjukkan kecekapan kuantum dalaman (IQE) bagi sel suria dwi muka bahagian hadapan dan belakang. Berdasarkan graf, kesemua keputusan telah dibandingkan

JADUAL 1. Ringkasan kecekapan bagi setiap suhu pembakaran

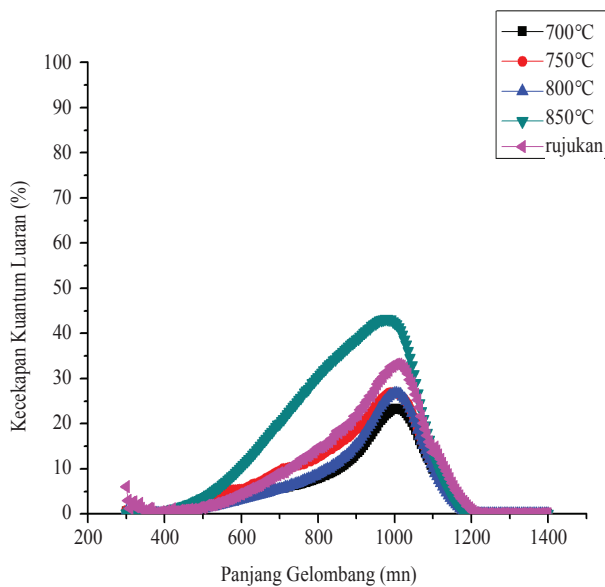
Suhu (°C)	Permukaan belakang	Permukaan depan
700	0.2	6.1
750	1.5	7.4
800	1.5	7.1
850	2.0	7.1

dengan sel suria dwi muka yang telah dipanaskan melalui penyepuhlindungan terma pantas (RTA), yang dikenali sebagai rujukan. RTA merupakan alat paling berkesan untuk proses perlogaman yang digunakan dalam industri. Bagi permukaan belakang, suhu 700°C menunjukkan peratus terendah bagi kedua-dua QE iaitu 23% untuk EQE dan 28% untuk IQE pada panjang gelombang yang sama, 1005 nm. Manakala, bagi permukaan hadapan, suhu 800°C

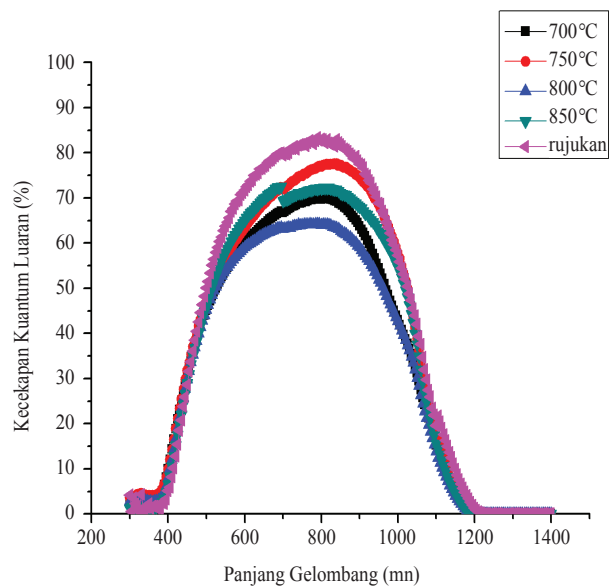
menunjukkan peratusan paling rendah bagi kedua-dua QE iaitu 64% pada panjang gelombang 785 nm dan 75% pada panjang gelombang 740 nm. Peratusan terendah pada permukaan belakang disebabkan oleh pembakaran melampau semasa pembakaran Al-BSF. Masa pegangan untuk setiap perbezaan suhu adalah 5 min. Namun begitu, sedikit kesilapan telah dikesan bagi suhu 700°C kerana sampel telah dimasukkan sebelum suhu dan masa yang optimum dicapai. Semakin tinggi suhu, semakin susah untuk Al disingkirkan. Justeru, lebih Al tidak dapat disingkirkan secara menyeluruh dan meninggalkan lebih pada permukaan belakang.

Nilai QE bagi kedua-dua bahagian hadapan dan belakang di rantau panjang gelombang antara 300-400

nm adalah rendah disebabkan oleh penggabungan semula permukaan dengan pembawa cas tidak dapat bergerak ke dalam litar luar, seterusnya memberi kesan kepada pungutan cas. Semakin meningkat panjang gelombang menghampiri ke 1200 nm, tiada cahaya yang diserap dan seterusnya menyebabkan pengurangan foto-terjana. Pengubahsuaian permukaan juga boleh menjejaskan pungutan pembawa yang dijanakan yang terletak berhampiran dengan permukaan. Oleh kerana tenaga cahaya tinggi pada panjang gelombang 400-500 nm diserap sangat dekat dengan permukaan, penggabungan semula permukaan berlaku dengan tinggi, manakala tenaga cahaya dan penyerapan yang rendah pada panjang gelombang di antara 500-600 nm turut memberi kesan kepada

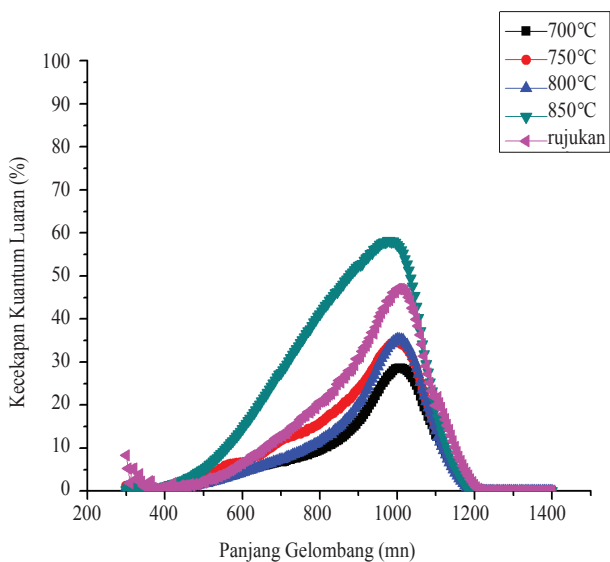


(a)

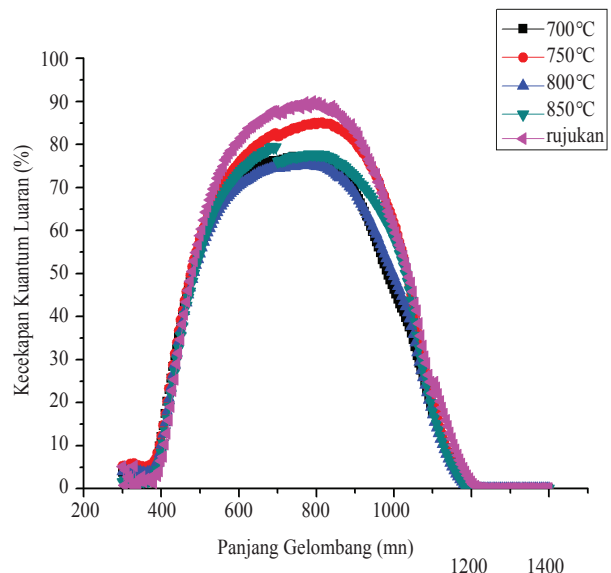


(b)

RAJAH 7. Kecekapan kuantum luaran bagi perbezaan rawatan suhu (a) permukaan belakang dan (b) permukaan hadapan



(a)



(b)

RAJAH 8. Kecekapan kuantum dalaman bagi perbezaan rawatan suhu (a) permukaan belakang dan (b) permukaan hadapan

pengumpulan cas dan seterusnya mengurangkan peratusan QE pada rantau tersebut. Faktor lain yang menyebabkan degradasi kecekapan kuantum dalam sel suria adalah disebabkan penyerapan yang rendah, faktor isi yang rendah, ketumpatan arus yang tinggi, medan permukaan belakang yang tidak berkesan dan penggabungan semula pukal yang tinggi (Sepeai et al. 2012).

#### KESIMPULAN

Dalam kajian ini, rawatan pembakaran untuk menambah baik kecekapan sel telah dikaji begitu juga dengan voltan litar terbuka, arus litar pintas dan faktor isi. Peningkatan suhu pembakaran akan meningkatkan ciri elektrik pada sel. Namun begitu, bagi kajian ini, suhu 700, 750, 800 dan 850°C menunjukkan peningkatan dalam  $V_{OC}$  dan  $I_{SC}$ . Dalam proses ini, penyejukan yang pantas selepas pembakaran dapat menyekat ketelusan kedua-dua pes dan menyebabkan pemirauan kerintangan yang tinggi. Hal ini meningkatkan kecekapan sel dan faktor isi. Suhu yang tinggi diperlukan dalam proses pembakaran untuk memastikan zarah Ag dan Al terkumpul dan teresap pada permukaan Si. Bagi keputusan QE pula, suhu 850°C menunjukkan peratusan kecekapan yang lebih tinggi bagi permukaan belakang berbanding dengan suhu yang lain bagi kedua-dua kecekapan kuantum luaran dan dalaman. Namun begitu, suhu 750°C pula menunjukkan peratusan kecekapan kuantum yang lebih tinggi bagi permukaan hadapan berbanding dengan suhu yang lain bagi kedua-dua kecekapan kuantum luaran dan dalaman. Dengan menggunakan tiub relau Kuarza bagi proses perlogaman, suhu 700°C mencatatkan kecekapan sebanyak 0.2% bagi permukaan belakang dan 6.1% bagi permukaan hadapan, 1.5% (permukaan belakang) dan 7.4% (permukaan hadapan) bagi suhu 750°C, 1.5% bagi permukaan belakang dan 7.1% bagi permukaan hadapan pada suhu 800°C dan bagi suhu 850°C mencatatkan kecekapan sebanyak 2.0% bagi permukaan belakang manakala 7.1% bagi permukaan hadapan. Oleh itu, QTF juga mampu memberi keputusan yang sama atau lebih kurang sama dengan menggunakan RTA.

#### PENGHARGAAN

Pengarang ingin memberi penghargaan kepada beberapa penaja kewangan daripada ERGS/1/2012/TK07/UKM/03/4, GGPM-2012-085 dan GGPM-2014-048.

#### RUJUKAN

Ballif, C., Huljić, D.M., Willeke, G. & Hessler-Wyser, A. 2003. Silver thick-film contacts on highly doped n-type silicon emitters: Structural and electronic properties of the interface. *Applied Physics Letters* 82(12): 1878-1880.

- Erath, D., Filipović, A., Retzlaff, M., Goetz, A.K., Clement, F., Biro, D. & Preu, R. 2010. Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94(1): 57-61.
- Grupp, G., Huljik, D.M., Preu, R., Willeke, G. & Luther, J. 2005. Peak firing temperature dependence of the microstructure of Ag thick-film contacts on silicon solar cells - A detailed AFM study of the interface. *Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. pp. 1379-1382.
- Hilali, M., Rohatgi, A. & To, B. 2004. A review and understanding of screen-printed contacts and selective-emitter formation. In *14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules* 1617: 1-40.
- Jeong, J.W., Rohatgi, A., Yelundur, V., Ebong, A., Rosenblum, M.D. & Kalejs, J.P. 2001. Enhanced silicon solar cell performance by rapid thermal firing of screen-printed metals. *IEEE Transactions on Electron Devices* 48(12): 2836-2841.
- Kabir, M.I., Ibrahim, Z., Sopian, K. & Amin, N. 2010. Effect of structural variations in amorphous silicon based single and multi-junction solar cells from numerical analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94(9): 1542-1545.
- Kwon, T.Y., Kim, S.C., Kyung, D.Y., Jung, W.W., Kim, S.Y., Lee, Y.W., Kim, Y.K., Jang, K.S., Jung, S.W., Shin, M.C. & Yi, J.S. 2010. The effect of firing temperature profiles for the high efficiency of crystalline Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94(5): 823-829.
- Richter, P.J., Bottari, F.J. & Wong, D.C. 2011. Rapid metallization paste firing of crystalline silicon solar cells. *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. pp. 2198-2201.
- Sepeai, S., Sulaiman, M.Y., Sopian, K. & Zaidi, S.H. 2012. Surface passivation studies on  $n^+pp^+$  bifacial solar cell. *International Journal of Photoenergy* 2012: Article ID. 278764.
- Sepeai, S., Sulaiman, M.Y., Zaidi, S.H. & Sopian, K. 2011. Microstructural studies on fire-through front contact metallization of Si solar cells. *2011 IEEE Regional Symposium on Micro and Nano Electronics*. pp. 364-367.
- Vinod, P.N. 2008. Formation of fire-through silver metal contacts on the porous silicon surface for silicon solar cells. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. pp. 1-5.

Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI)  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: mdadib@ukm.edu.my

Diserahkan: 30 Jun 2017

Diterima: 9 November 2017

