

SIMULASI LENS *GRATING* TERHADAP EFISIENSI DIFRAKSI *GRATING* PADA SISTEM PEMISAH CAHAYA SPEKTRAL *CONCENTRATED PHOTOVOLTAIC/THERMAL*

Yuke Hary Laksono^{1*}, Okasatria Novyanto²

¹Politeknik Kota Malang, Jl Raya Tlogowaru no 3, Kec. Kedungkandang, Kota Malang, Jawa Timur

²Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia, Badan Standardisasi Nasional, Kompleks PUSPIPTEK Gedung 420, Setu, Tangerang Selatan 15314

Email: *yukelaksono@gmail.com

ABSTRACT

A spectral beam splitting concentrated photovoltaic/thermal (SBS CPVT) system is a new technology in PV areas. In order to split the sunlight, the grating lens is used in this study. The tool of this study is G-Solver software which simulates the diffraction efficiency of visible light and infrared light of the blazed and binary grating lens. The aim of this paper is to analyze the potential of the diffraction efficiency of grating lens when applied in SBS CPVT. The result show that binary grating, the highest diffraction efficiency for the visible light is also almost unchanged for the aspect ratio from 1.4 to 2, but the peak wavelength shift from around 360 nm to 510 nm, while, for Infrared light, the diffraction efficiency decrease from aspect ratio 1.4 to 2. On the other hand, blazed grating, The highest diffraction efficiency for the visible light is almost unchanged for the aspect ratio from 1.4 to 2, but the peak wavelengths shift from around 350 nm to 500 nm. While IR light, the diffraction efficiency decrease with the aspect ratio 1.4 to 2.

Keywords: Binary and blazed grating lens, diffraction efficiency, G-solver, concentrated photovoltaic/ thermal

PENDAHULUAN

Berdasarkan *International Energy Agency* (IEA) laporan energi terbarukan (ET) tahun 2017 menggarisbawahi bahwa kapasitas fotovoltaik yang baru, tumbuh secara umum sekitar 50% pada tahun 2016, yaitu mencapai 74 GW [1]. Penggunaan tenaga surya untuk dikonversi menjadi energi listrik, energi panas atau keduanya yaitu listrik dan panas sekaligus, sudah banyak dilakukan oleh para peneliti. Salah satu teknologi surya yang hingga saat ini masih terus dikembangkan adalah *concentrated photovoltaic/thermal (CPVT) system* untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik dan energi panas secara bersamaan [2]. Manfaat yang diperoleh dari sistem CPVT dibandingkan dengan sistem fotovoltaik tradisional antara lain luasan sel surya jauh lebih kecil, efisiensi jauh lebih tinggi dan dapat menghasilkan dua jenis energi sekaligus yaitu listrik dan panas [3].

Teknologi sistem CPVT sendiri merupakan teknologi surya yang dikombinasikan dari sistem *concentrated photovoltaic (CPV)* dan sistem *photovoltaic thermal (PVT)* [4]. Sistem CPV menggunakan optik (lensa/cermin) untuk memfokuskan cahaya matahari yang akan dikenakan pada sel surya, sehingga efektif untuk mengurangi luasan penerima dari sel surya.

Namun penggunaan optik sebagai konsentrator akan menimbulkan panas yang tinggi pada sel surya, sehingga memerlukan jenis sel surya khusus dan juga sistem pendinginan untuk meningkatkan efisiensinya [5].

Salah satu teknologi CPVT mutakhir yang dikembangkan pada lima tahun terakhir adalah *spectral beam splitting concentrated photovoltaic/thermal (SBS CPVT)* [6][3]. SBS CPVT merupakan teknologi surya yang memanfaatkan sistem optik untuk melakukan fungsi memisahkan cahaya tampak dan cahaya infra merah, yang selanjutnya memfokuskan pada sel penerima cahaya tampak (untuk konversi cahaya menjadi listrik) dan sel penerima infra merah (untuk konversi cahaya menjadi panas) [7]. Skema konsep SBS CPVT dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Skema konsep SBS CPVT

Ada beberapa sistem optik yang digunakan untuk memisahkan cahaya tampak dan cahaya infra merah antara lain: filter compound parabolic concentrator (CPC) [8]–[10], lensa fresnel [11][12] dan grating [13][14]. Teknik pemisahan cahaya tampak dan infra merah pada pustaka [8-14] ditujukan mendapatkan sistem paling sederhana dan kompak dalam teknologi CPVT. Sampai saat ini teknologi tersebut masih terus dikembangkan. Untuk memperkaya teknik tersebut dalam penelitian ini akan disimulasikan grating. Grating adalah elemen optik yang memisahkan dan melakukan difraksi sinar datang menjadi beberapa sinar yang membentuk sudut difraksi spesifik. Secara umum grating dibagi menjadi dua macam yaitu grating refleksi dan grating transmisi [15]. Grating refleksi merupakan grating menggunakan media cermin, sementara grating transmisi menggunakan media lensa. Penelitian ini menggunakan grating transmisi yang bertujuan untuk menganalisa dan membandingkan pengaruh geometri difraksi *binary* dan *blazed grating* terhadap spektrum energi yang dihasilkan sesuai yang dibutuhkan pada perangkat penerima cahaya (sel surya).

METODOLOGI PENELITIAN

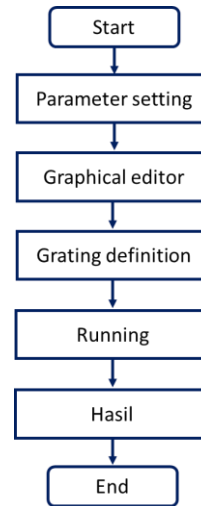
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi. Untuk menentukan geometri *binary grating* dan *blazed grating* serta spektrum energi yang dihasilkan digunakan software G-solver. Software G-Solver merupakan software yang berbasis implementasi vektor menggunakan teori *rigorous coupled wave analysis* (RCWA) [16]. Fungsi utama dari G-solver adalah untuk menghitung efisiensi difraksi pada grating iluminasi periodik dengan gelombang datar monokromatik.

Dalam aplikasi CPVT, desain grating setidaknya harus memenuhi dua kriteria. *Pertama*, desain grating harus memiliki efisiensi difraksi tertinggi dalam rentang gelombang yang dipancarkan oleh matahari. Spektrum iradiasi spektra terluas matahari dimiliki oleh panjang gelombang yang berkisar antara 480 – 510 nm berdasarkan *air mass* (AM 1.5) [17]. *Air mass* didefinisikan sebagai jarak tempuh cahaya matahari dalam atmosfer bumi sebagai fungsi dari sudut elevasi matahari terhadap permukaan bumi. *Air mass* dapat dirumuskan:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

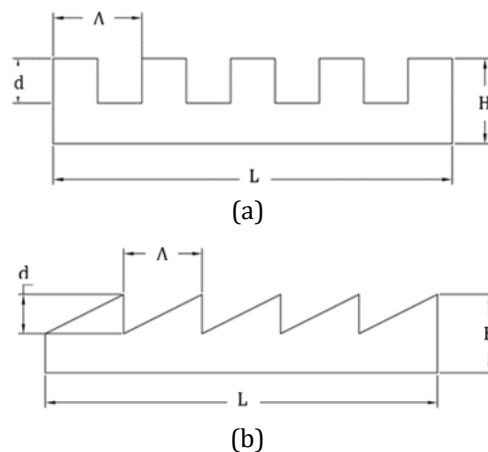
dimana θ adalah sudut terhadap normal horizon (sudut *zenith*). Umumnya AM1.5 dengan sudut elevasi 48° digunakan sebagai standar untuk pengukuran sistem panel surya. Besar energi untuk AM1.5 yaitu 1000 W/m².

Kedua, desain grating harus memiliki periode yang tepat untuk mencapai sudut difraksi yang sesuai. Karena pada ukuran tertentu periode dapat menyebabkan terjadinya bayangan [18], sehingga batas ukuran periode harus diperhatikan. Langkah – langkah untuk mendesain grating dapat dideskripsikan di diagram blok pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok simulasi desain grating

Langkah pertama adalah pengaturan parameter grating. Untuk mendesain grating ada beberapa parameter penting yang harus diperhatikan antara lain: periode (Λ), jenis material, sudut datang (θ_i), kedalaman (d) dan *duty cycle* (d_c). Dalam penelitian ini besar parameter dari periode $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, *duty cycle* $d_c = 0.5$, material grating yang digunakan adalah BK7. Penentuan panjang grating (L) disesuaikan dengan kebutuhan lensa yang akan digunakan. Desain *binary grating* dapat diperhatikan pada gambar 3. Langkah berikutnya adalah menggambar profil grating pada *graphical editor*. Bentuk yang diambil pada langkah ini adalah bentuk persegi panjang untuk *binary grating* dan bentuk segitiga untuk *blazed grating*.



Gambar 3. Penampang melintang (a) desain *binary grating*, (b) desain *blazed grating*

Hubungan antara periode (Λ), panjang gelombang (λ), dan sudut datang (θ_i) dirumuskan melalui persamaan:

$$m\lambda = \Lambda(\sin \theta_i - \sin \beta) \quad (2)$$

dimana m adalah orde kisi difraksi grating, β adalah sudut transmisi.

Ketiga langkah berikutnya yaitu *grating definition*, *running* dan *result*. Besaran dan informasi yang akan digunakan pada software G-Solver dapat diringkas pada tabel 1.

Tabel 1. Besaran dan parameter pada desain *grating*

Parameter	Nilai
Periode (Λ)	5 μm
Sudut datang (θ_i)	0 derajat
Orde kisi (m)	Orde -5 hingga +5
Duty cycle (dc)	0,5
Panjang gelombang (λ)	280 – 2520 nm
Material grating	BK 7
Substrat	BK 7
Dimensi grating: P x L x H	50 x 50 x 1 mm
Medium lingkungan grating	Udara ($n = 1$)
Aspect ratio	2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Faktor penting untuk mendapatkan efisiensi difraksi yang optimal adalah penentuan aspect ratio (a_r). Aspect ratio merupakan perbandingan antara kedalaman grating (d) dengan lebar grating. Orde yang diamati pada simulasi ini dibuat mulai dari rentang 0 sampai 5. Hasil simulasi ini dengan asumsi tidak terdapat cacat produksi dalam dimensi dan bentuk grating karena kondisi dan teknologi mesin pembuat grating yang berbeda akurasi. Karena jika terjadi cacat tersebut, akan menurunkan nilai efisiensi difraksinya. Peminimalisiran cacat akan berpengaruh terhadap efisiensi difraksi. Untuk memprediksi pengaruh cacat produksi akan dilakukan pada jurnal yang lain dengan pendekatan matematis. Sehingga hasil simulasi simulasi ini dapat divalidasi dengan nilai lensa grating yang ada di pasaran yaitu lebih dari 75%.

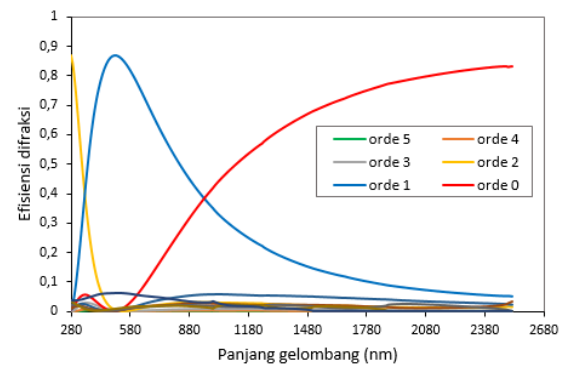
3.1 Efisiensi Difraksi Grating

Hasil yang diperoleh setelah melakukan proses running pada G-solver diekspresikan pada gambar 4 (a) dan 4 (b). Pada grating *blazed* sebagaimana gambar 4(a), tampak bahwa orde 1 (garis solid warna biru) memiliki efisiensi difraksi paling tinggi sebesar 86,71% pada panjang gelombang 500 nm. Sementara itu, orde 0 (garis solid warna merah) cenderung memiliki efisiensi

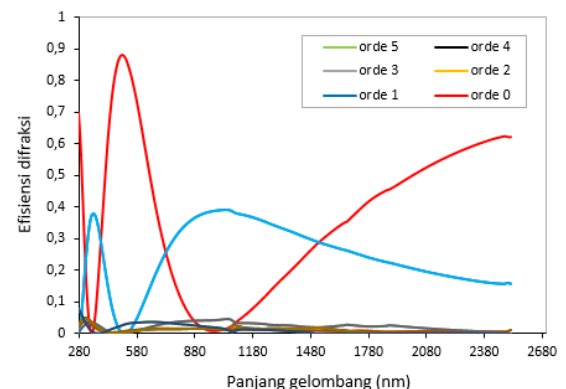
difraksi yang terus naik pada panjang gelombang inframerah (750 – 2500 nm) dengan kisaran efisiensi difraksi 18,71% - 83,13%. Untuk orde 2 sampai orde 5 terlihat bahwa semuanya memiliki efisiensi di bawah 10% untuk spektrum cahaya tampak maupun spektrum inframerah.

Pada grating *binary* sebagaimana gambar 4(b), tampak bahwa orde 1 dan -1 (garis solid warna biru) memiliki efisiensi difraksi paling tinggi sebesar 39,12% pada panjang gelombang 1040 nm. Sementara itu, orde 0 (garis solid warna merah) memiliki efisiensi difraksi tertinggi 88,14% pada panjang gelombang 510 nm. Untuk orde 2 sampai orde 5 terlihat bahwa semuanya memiliki efisiensi di bawah 10% untuk spektrum cahaya tampak maupun spektrum inframerah sama sebagaimana grating *blazed*.

Untuk optimasi dalam aplikasi sel surya maka akan dibuat variasi aspect ratio pada rancangan grating mulai dari 1,4; 1,6; 1,8 dan 2. Agar didapatkan efisiensi terbaik pada energi terbesar iradiasi matahari yaitu pada panjang gelombang 480-510 nm. Hasilnya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5(a) dan 5(b) yang menampilkan hanya orde 1 dan 0 untuk tiap aspect ratio.



(a)



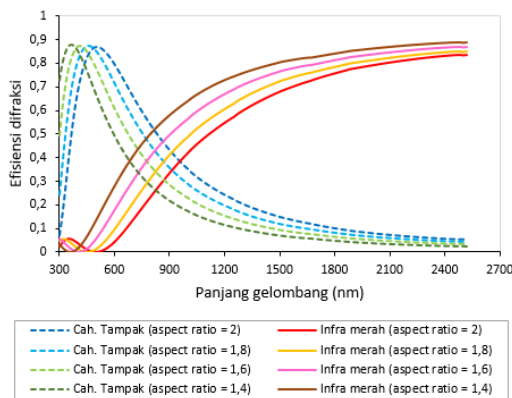
(b)

Gambar 4. Efisiensi difraksi orde 0 sampai orde 5 pada grating (a) *blazed* dan (b) *binary*

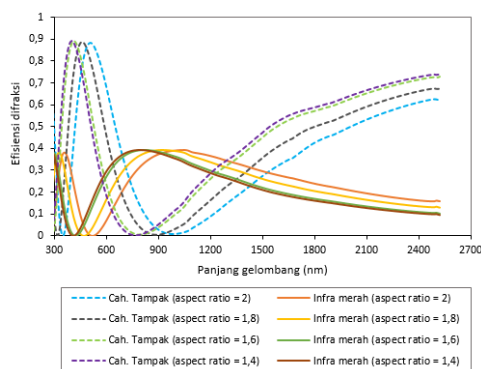
3.2 Optimasi Efisiensi Difraksi Grating Dengan Aspect Ratio

Pada gambar 5 (a) tampak bahwa grating *blazed* untuk orde 1 dengan *aspect ratio* 1,4; 1,6; 1,8 dan 2 memiliki besar efisiensi difraksi yang hampir sama yaitu berturut-turut 87,62%, 88,29%, 87,39% dan 86,71% pada panjang gelombang berturut-turut 360 nm, 410 nm, 460 nm dan 500 nm. Sementara itu, untuk orde 0 dengan *aspect ratio* 1,4; 1,6; 1,8 dan 2 memiliki besar efisiensi difraksi berturut-turut pada panjang gelombang 750 nm yaitu 46,97%, 37,1%, 27,58% dan 19,75% kemudian terus naik hingga panjang gelombang 2500 nm berturut-turut 88,86%, 86,94%, 84,98% dan 83,14%.

Pada gambar 5 (b) tampak bahwa grating *binary* untuk orde 0 dengan *aspect ratio* 1,4; 1,6; 1,8 dan 2 memiliki besar efisiensi difraksi yang hampir sama yaitu berturut-turut 89,12%, 89,00%, 88,70% dan 88,14% pada panjang gelombang berturut-turut 340 nm, 400 nm, 460 nm dan 510 nm. Sementara itu, untuk orde +1 dengan *aspect ratio* 1,4; 1,6; 1,8 dan 2 memiliki besar efisiensi difraksi tertinggi yang hampir sama yaitu 39,12%, tetapi menempati panjang gelombang berturut-turut 700 nm, 790 nm, 920 nm dan 1040 nm.



(a)



(b)

Gambar 5. Efisiensi difraksi dengan variasi *aspect ratio* 1,4 – 2 pada grating (a) *blazed* dan (b) *binary*

Efisiensi difraksi dari grating difraksi periodik dapat dihitung melalui software G-Solver dengan analisa numerik dengan pendekatan RCWA[19]. Berdasarkan hasil yang didapatkan pada gambar 4(a) dan 4(b), terlihat bahwa pada spektrum cahaya tampak (400-750 nm), grating *binary* dengan profil persegi memiliki efisiensi difraksi lebih unggul 1,43% yaitu 88,14% (pada panjang gelombang 510 nm) dibandingkan dengan efisiensi difraksi grating *blazed* yang menggunakan profil segitiga sebagaimana gigi hiu yaitu 86,71% pada panjang gelombang 500 nm. Pada gambar 5 (a) dan 5(b) tampak bahwa semakin kecil *aspect ratio*, dapat meningkatkan efisiensi difraksi. Namun tetap perlu diperhatikan kebutuhan panjang gelombang cahaya tampak yang dapat dikonversi menjadi listrik oleh sel surya yang digunakan pada aplikasi pembangkit listrik tenaga matahari. Baik grating *binary* maupun *blazed* dengan periode 5 μm dapat memiliki efisiensi difraksi yang tinggi dengan *aspect ratio* paling kecil yaitu 1,8.

Pada sel surya yang menggunakan *multi-junction photovoltaic* (MJPV) seperti *triple junction photovoltaic* (sel InGaP, InGaAs dan Ge), maka penggunaan cahaya tampak dengan spektrum 380-780 nm dapat diserap oleh sel InGaP, spektrum cahaya merah 780-900 nm dapat diserap oleh sel InGaAs, dan yang terakhir spektrum inframerah 900-1700 nm dapat diserap oleh sel Ge[20]. Dari hasil gambar 4 dan 5 maka potensi penggunaan grating difraksi sebagai pemecah panjang gelombang berdasarkan orde yang ditransmisikan pada SBS CPVT sangat memungkinkan untuk diterapkan, terutama orde 0 dan orde 1.

KESIMPULAN

Desain grating difraksi telah dibuat dalam dua profil yaitu grating *binary* dan grating *blazed*. Grating *binary* merupakan grating dengan profil persegi panjang, sementara itu grating *blazed* merupakan profil segitiga mirip gigi hiu. Kedua grating difraksi didesain dengan periode 5 μm berbahan BK.

Setelah proses simulasi menggunakan software G-Solver dilakukan, didapatkan bahwa efisiensi difraksi grating *binary* lebih tinggi dalam mentransmisikan cahaya tampak dibandingkan dengan efisiensi difraksi grating *blazed* pada panjang gelombang 500 nm. Kedua panjang gelombang tersebut sesuai dengan rentang kemampuan sel surya untuk mengkonversi menjadi listrik.

Adapun potensi transmisi spektrum infra merah, grating *blazed* memiliki kecenderungan lebih baik dibandingkan dengan grating *binary*. *Aspect ratio* yang diijinkan pada kedua grating adalah antara 1,8 sampai dengan 2, agar dapat memenuhi spektrum sel surya yang digunakan.

SARAN

Agar penerapan grating difraksi dapat lebih aplikatif pada SBS CPVT, maka diperlukan penelitian lanjutan menggunakan perangkat optik baik cermin maupun lensa untuk mengarahkan dan mengkonsentrasikan orde 1 dan 0 pada grating *binary* dan grating *blazed* sesuai keinginan media penerimanya (sel surya dan sel panas).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] EIA, 2017. Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050, pp. 1–64.
- [2] Azarian, R. D., Cuce, E. dan Cuce, P. M. 2017. *An Overview of Concentrating Photovoltaic Thermal (CPVT) Collectors*,” *Energy Res. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 11–21.
- [3] Ju, X., Xu, C., Han, X., Du, X., Wei, G. dan Yang, Y. 2017. *A review of the concentrated photovoltaic/thermal (CPVT) hybrid solar systems based on the spectral beam splitting technology*, *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 534–563.
- [4] Sharaf, O. Z., dan Orhann, M. F. 2015. *Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II - Implemented systems, performance assessment, and future directions*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1566–1633.
- [5] Daneshazarian, R., Cuce, E., P. M. Cuce, dan Sher, F. 2018. *Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and applications*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. July 2017, pp. 473–492.
- [6] Michel, C., Loicq, J., Thibert, T. dan Habraken, S. 2015. *Optical study of diffraction grating/Fresnel lens combinations applied to a spectral-splitting solar concentrator for space applications*, *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 22, pp. 6666–73.
- [7] Michel, C., Loicq, J., Languy, F. dan Habraken, S. 2014. *Solar Energy Materials & Solar Cells Optical study of a solar concentrator for space applications based on a diffractive/refractive optical combination*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 120, pp. 183–190.
- [8] Tien, N. dan Shin, S.. 2016. *A Novel Concentrator Photovoltaic (CPV) System with the Improvement of Irradiance Uniformity and the Capturing of Diffuse Solar Radiation*, *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 9, p. 251.
- [9] Fern, E. F., Garc, A. J. dan G. P. Smestad, G. P. 2015. *High Concentrator Photovoltaics*.
- [10] Meng, X. L. *et al.*, 2016. *A novel absorptive/reflective solar concentrator for heat and electricity generation: An optical and thermal analysis*, *Energy Convers. Manag.*, vol. 114, pp. 142–153,.
- [11] Anderson, W. G., Dussinger, P. M., Sarraf, D. B., dan Tamanna, S. 2008. Heat pipe cooling of concentrating photovoltaic cells. *33rd IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, no. July, pp. 1–6.
- [12] Shanks, K., S. Senthilarasu, S., dan Mallick, T. K. 2016. *Optics for concentrating photovoltaics: Trends, limits and opportunities for materials and design*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 394–407.
- [13] Michel, C. *et al.* 2017. *Waveguide solar concentrator design with spectrally separated light*, *Sol. Energy*, vol. 157, no. February, pp. 1005–1016.
- [14] Siewert, F. *et al.*, 2018. *Gratings for synchrotron and FEL beamlines: A project for the manufacture of ultra-precise gratings at Helmholtz Zentrum Berlin*, *J. Synchrotron Radiat.*, vol. 25, no. 1, pp. 91–99.
- [15] Palmer, C. 2005. *Diffraction Grating Handbook*. *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 46, no. 1, pp. 20–23, 2005.
- [16] G. Solver and D. Company, *GSolver*.
- [17] *Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5*. 2018. [Online]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>. [Accessed: 13-Jun-2018].
- [18] Swanson, G. J. 1989. *Binary Optics Technology: The Theory and Design of Multi-level Diffractive Optical Elements*. Contract, pp. 1–53.
- [19] Okano, M., Kikuta, H., Hirai, Y., Yamamoto, K., dan Yotsuya, T. 2004. *Optimization of diffraction grating profiles in fabrication by electron-beam lithography*. vol. 43, no. 27, pp. 5137–5142.
- [20] *Triple Junction Solar Cell*. [Online]. Available: http://www.arima.com.tw/group1-detail.php?index_m1_id=1&index_m2_id=6&index_id=3#parentHorizontalTab3. [Accessed: 07-Mar-2018].