

DOKUMEN HKI/PATEN

KARYA CIPTA

JUDUL

Disain Geometri Reaktor Fotovoltaik Cahaya Ruang

(Indoor Lights Photoreactor)

Pencipta :

Dr. Rahadian Zainul, S.Pd., M.Si.

UNIVERSITAS NEGERI PADANG

TAHUN 2018

Disain Geometri Reaktor Fotovoltaik Cahaya Ruang (Indoor Lights Photoreactor)

Dr. Rahadian Zainul, S.Pd., M.Si.
Universitas Negeri Padang

This research aims to obtain reactor design photocells that can convert light energy into electrical energy space. Room light energy derived from sunlight that comes into the room and fluorescent light irradiation. Photocells reactor using a panel of copper oxide ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$) of calcined Cu plate and filler electrolyte Na_2SO_4 0.5 N. The design of the geometry of the reactor photocells covering thickness of the glass pane, the distance between the electrodes, the interface layer, layer and coating reflector panels, and junction type np used. Reactor photocells 1 (R1) and 2 (R2) is identical in geometry to the thickness of the glass panel 3 mm thick reactor 15 mm without anti reflector, but the difference at the junction of type n, (R1 = plate Cu; R2 = plate Aluminum) generate 182.82 mW/m^2 and $21119644.3 \text{ NW/m}^2$. Design R3 (junction-type n = plate Cu) and R4 (junction-type n = plate Al), a panel thickness of 15 cm and has a layer anti reflector provide power 214.95 mW/m^2 and $24163298.3 \text{ NW/m}^2$. Design Reactor 5 (R5 = Cu) and R6 (Al), thickness of 9 mm, the distance between the electrodes 0:30 mm, using anti reflector carbon, giving each the power of 277.36 mW/m^2 and $31258420.91 \text{ NW/m}^2$. The most optimum reactor design is the design of R6 with 2:14% conversion capabilities (Intensity = 90.21 foot candles) for the sunlight into the room.

PENDAHULUAN

Energi surya merupakan energi yang ramah terhadap lingkungan. Pemanfaatannya tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Konversi energi cahaya menjadi energi listrik tidak menghasilkan sisa buangan seperti halnya pembakaran BBM dan bahan bakar fosil lainnya. Energi adalah bagian penting dari produktifitas, sama halnya dengan bahan baku, modal dan tenaga kerja [1].

Dewasa ini, sebagian besar energi berasal dari bahan bakar fosil yang banyak menimbulkan masalah [2,3]. Antara lain ; pertama, polusi udara akibat pembakaran batubara dan minyak yang menghasilkan partikulat berbahaya dan karbon dioksida (CO_2). Kedua, ketersediaan yang terbatas dan tidak dapat diperbaharui. Ketiga, distribusi yang dikuasai beberapa negara membuat

biaya relokasi dan distribusi membengkak dan sangat mahal [4,5] . Oleh karena itu, diperlukan riset untuk sumber energi baru, yang ramah terhadap lingkungan (ekologis), murah (ekonomis), berkelanjutan dan berlimpah ketersediaanya di alam [6-10] .

Bumi menerima sekitar 1000-1369 Watt/m² energi surya setiap tahunnya, atau sekitar 10.000 kali dari jumlah konsumsi energi dunia pertahun [4,11] . Densitas kekuatannya 1 -2 kW m pada saat hari cerah, dan kekuatan surya secara global sekitar 160.000 TW [12]. Ketersediaan tersebut menjadi potensi besar untuk sumber energi terbarukan dan berkelanjutan.

Konversi energi terbarukan masih berkendala, yakni efisiensi konversi energi surya yang masih rendah. Secara teoritis, maksimum efisiensi dari konversi energi surya adalah antara 11% hingga 12% (110 Wm^{-2} hingga 120 Wm^{-2} [11]) . Sel surya pertama diproduksi dari silikon kristal dan memiliki efisiensi konversi 6%. Penelitian berkembang dan perbaikan sel surya terus dilakukan, hingga dihasilkan dari silikon kristal dengan efisiensi konversi hingga 25% (skala laboratorium) dan 22% (modul yang dipasarkan). Di pasaran ada beberapa jenis teknologi sel surya yang tersedia termasuk kristal, mikro-kristal dan silikon amorf. Karena efisiensi yang lebih tinggi dan skala ekonomi, pasar dunia didominasi oleh sel surya silikon kristal, yang mencapai 93,5% pada tahun 2005 [11] .

Perkembangan riset fotovoltaiik atau PV telah berlangsung lama. Sejak Hammond, A.L mempublikasikan, "*Photovoltaic cells : direct conversion of solar energy*", penelitian sel fotovoltaiik dikembangkan dengan berbagai aspek [13]. Pertama, aspek isi reaktor fotovoltaiik meliputi PV organik [14,15] , PV [16,17] anorganik/polymer dan Dye-Sensitized [18-20] Solar Cell . Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) dibuat dengan molekul *dye*, nanokristalin oksida logam dan elektrolit organik liquid [21] . Berbagai polimer dipakai untuk meningkatkan efisiensi sel PV [22] . Kedua, aspek *design* panel permukaan sel PV, antara lain permukaan semikonduktor multilayer [23] , permukaan berpola/ [24] nanocone , permukaan nanowire [25,26] , dan [23,27] permukaan film . Berbagai upaya meningkatkan efisiensi PV melalui modifikasi permukaan, bertujuan agar cahaya ditangkap dan diserap permukaan PV, atau tertahan lebih lama pada permukaan fotokatalis [28] .

Ketiga, pengembangan pada aspek optik meliputi *absorber* cahaya [29] , penguatan dan penggeseran cahaya [30] [31] , konsentrator , [32] antireflektor [33] , *sensitizer* , *collector hole* [34] [35,36] , kemiringan panel dan *block* dinding panel yang terintegrasi dengan [37] semikonduktor . Keempat, pada aspek semikonduktor sel PV, meliputi sel PV tipe N, sel PV tipe

P dan sel PV *heterojunction* serta sel PV multi P-N, juga telah dikembangkan [38, 39] . Pengembangan ini dilakukan untuk mendapatkan konversi energi yang tinggi.

Pada sisi lain, pengembangan sel PV yang bekerja pada cahaya ruang dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan cahaya matahari langsung pada area terbuka di luar ruang, menjadi tantangan tersendiri. Pada satu sisi, sumber energi yang dipakai berdaya rendah, dan pada sisi lain diperlukan rancangan sel PV yang memadai agar bisa bekerja dengan keterbatasan energi tersebut. Oleh karena itu, dalam riset ini dilakukan uji coba beberapa disain geometri Fotosel yang meliputi blok building PV dan penempatan elektroda agar dihasilkan kinerja fotosel terbaik.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kaca (PT Asahimas), lem kaca, Plat Cu, Plat Al, Natrium sulfat(Na_2SO_4) (Merck), tepung agar, kloroform(Merck) dan aquades.

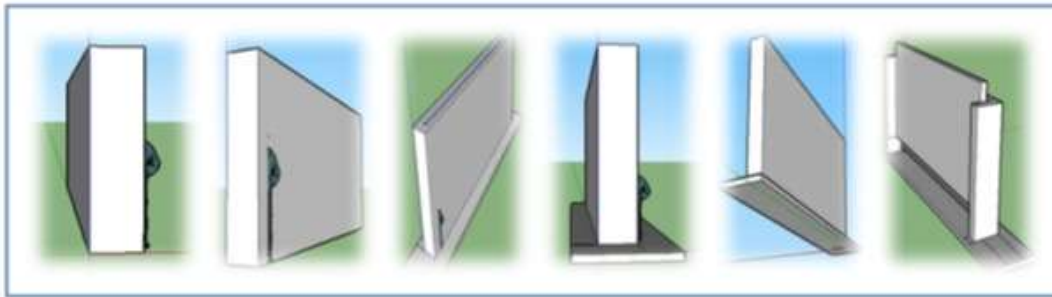
Alat Yang digunakan dalam penelitian ini adalah Multimeter (Heles), Lightmeter, SEM-EDX (Hitachi S-3400N), XRD, lampu neon (Philip 10 watt), Timbangan Analitik, Alat alat gelas dan Komputer dengan software SKETCHUP 2015.

Prosedur Penelitian Pembuatan Disain Geometri Sel PV

Rancangan sel PV didisain dengan menggunakan computer dengan software sketchup 2015. Skala geometri disesuaikan material interior yang dipakai di ruangan, misalnya ketebalan kaca, dan jenis kaca yang dipakai untuk pembuatan sel PV. Prototipe Reaktor Fotosel dibuat dengan menyerupai panel dinding, yang disesuaikan dengan panel interior pada ruangan seperti pada Gambar 1.

Disain dilakukan dengan membuat disain utama reaktor sebanyak tiga Disain dan menjadi 6 disain setelah penggantian n-p junctionnya. Sel PV didesain dengan variasi jarak dan jenis elektroda yang dipakai. Disain atau rancangan sel PV dibuat dengan model Disain 1 (R1), Disain 2 (R2), Disain 3 (R3), Disain 4 (R4), Disain 5 (R5) dan Disain 6 (R6). Keenam disain ini dirancang dan dibuat dengan menggunakan kaca dan lem *silicon*. Keenam sel PV ini diuji efisiensinya dan kinerjanya, sehingga diperoleh sel PV optimum untuk pengujian selanjutnya.

Katoda ($\text{Cu}_2\text{O-CuO}$) dan anoda (Cu , Al) dibatasi dengan kaca (setebal 3 mm) dan berjarak 6 mm, untuk desain 1, 2, 3 dan 4.



Gambar 1. Sketsa pembuatan Disain Sel PV berdasarkan interior ruangan

Pada desain 1 dan 2, dinding kaca luar pada Anoda digunakan kaca hitam, sedangkan pada desain 3 dan 4 dipakai kertas karbon. Pada desain 5 dan 6, katoda dan anoda hanya dibatasi dengan kertas membran setebal 0,32 mm dan kaca luar anoda dibatasi dengan kertas karbon.

Pembuatan Elektroda Tembaga Oksida

Elektroda tembaga oksida dibuat dengan melakukan pembakaran plat Cu pada variasi suhu 300, 350, 400, 450 dan 500 o C, selama 1 jam. Hasil dari plat oksida tembaga dikarakterisasi dengan menggunakan SEM EDX dan XRD.

Pembuatan Larutan Elektrolit Agar Natrium Sulfat (Na_2SO_4)

Sebanyak 3,6 gram Na_2SO_4 dilarutkan ke dalam 100 mL air dan ditambahkan agar sebanyak 0,5 gram. Campuran diaduk dan dipanaskan sampai mendidih sampai larutan menjadi bening. Setelah itu tambahkan beberapa tetes kloroform. Dalam keadaan panas larutan elektrolit dituangkan ke dalam sel PV.

Pengukuran arus dan tegangan sel PV

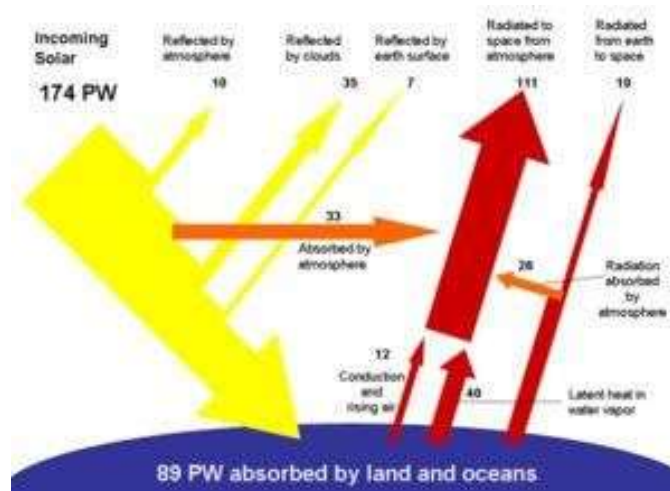
Tiap sel PV diisi dengan agar natrium sulfat, lalu disinari dengan cahaya matahari yang masuk ke dalam ruangan dan cahaya lampu neon. Arus dan tegangan dari tiap sel diukur dengan menggunakan multimeter.

HASIL DAN DISKUSI

a. Sejarah Fotovoltaik

Efek photovoltaic pertama kali dikenali pada tahun 1839 oleh fisikawan Perancis Alexandre-Edmond Becquerel. Akan tetapi, sel surya yang pertama dibuat baru pada tahun 1883 oleh Ilmuan Charles Fritts, yang melingkupi semikonduktor selenium dengan sebuah lapisan emas yang sangat tipis untuk membentuk sambungan- sambungan. Alat tersebut hanya memiliki efisiensi 1%. Russell Ohl mematenkan sel surya modern pada tahun 1946 (U.S. Patent 2,402,662, "Light sensitive device"). Masa emas teknologi tenaga surya tiba pada tahun 1954 ketika Bell Laboratories, yang bereksperimen dengan semikonduktor, secara tidak disengaja menemukan bahwa silikon yang di doping dengan unsur lain menjadi sangat sensitif terhadap cahaya. (Lorenzo, E. 1984:108-110)

Hal ini menyebabkan dimulainya proses produksi sel surya praktis dengan kemampuan konversi energi surya sebesar sekitar 6 persen.



Gambar 2.1 Transfer Energi dari Matahari(Bachtiar, M., 2006:34)

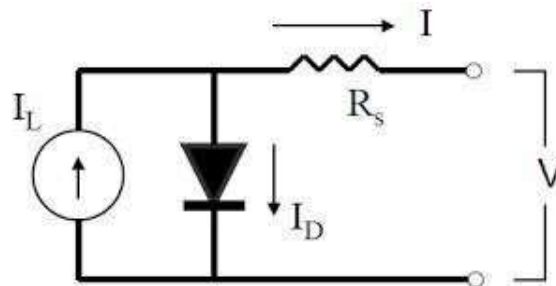
Gambar di atas mengilustrasikan transfer energi dari matahari ke bagian- bagian Bumi. Dapat terlihat bahwa sekitar setengah dari energi masuk diserap oleh air dan daratan, sedangkan yang lainnya diradiasikan kembali ke luar angkasa. (nilai 1 PW = 1015 W).(Kim, M. S. 2009:205)

b. Konversi dan Efisiensi Sel Potovoltaik

Bila sel-sel semikonduktor terkena cahaya matahari, maka foton - foton yang jatuh pada permukaan semikonduktor PV akan menghasilkan pasangan-pasangan electron dan hole. Elektron - elektron akan cenderung untuk berjalan ke arah negative (tipe N), sedangkan lubang (hole) akan cenderung untuk berjalan ke arah daerah yang bermuatan positif (tipe P). Bila positif dan negatif diberi sambungan listrik, maka terjadilah aliran arus listrik dalam sambungan itu. Besarnya arus listrik atau tenaga listrik yang diperoleh tergantung antara lain dari jumlah energi cahaya yang mencapai sel-sel semikonduktor dan tergantung dari luas permukaan sel PV. (Culp, A. W. Jr. 1984:211-212)

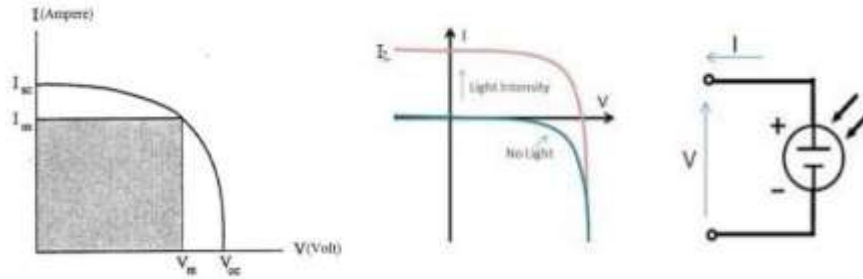
Sel PV merupakan sel semikonduktor sebagai sumber energi. Sel tunggal yang menjadi sumber energi dapat disusun secara seri-paralel dan menjadi arah apabila memiliki beberapa *sel PV*. Dalam susunan seri, akan menghasilkan arus yang sama, namun tegangan pada *sel PV* akan bertambah. Pada susunan paralel, tegangan tetap namun arus semakin besar. Sel surya merupakan sel non linear, sehingga untuk menjelaskan hubungan antara arus dan tegangan tidaklah mudah secara matematik, diperlukan pemodelan. (Sears WM, Fortin E. 1984:93-103)

Model Sel PV dimodelkan dengan memparalelkannya dengan diode. Pada saat tidak diiluminasi, maka arus yang ada adalah arus diode (I_D). Pada saat iluminasi, maka sel PV berfungsi sebagai sumber arus dan arus (I_L) yang dihasilkan meningkat sesuai dengan semakin bertambahnya intensitas cahaya.



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen pada sel tunggal (Ooyama Y, Harima Y. 2012:353)

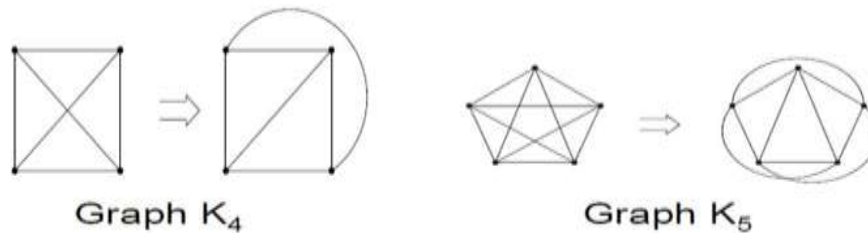
Model ini menggambarkan adanya sumber arus fotolistrik (I_L), satu diode dan hambatan seri R_s dimana menggambarkan hambatan setiap sel dan koneksi antara sel. Arus yang didapat adalah selisih antara arus fotolistrik (I_L) dan arus diode (I_D)



Gambar 2.3 Hubungan antara arus (I) dengan Tegangan (V) (Zainul et al 2015: 353- 31)

c. Perancangan dan Pembuatan Sel PV

Sebelum kami melakukan perancangan desain pada bidang planar , terlebih dahulu kami jelaskan apa yang dimaksud bidang planar. Bidang planar adalah bidang datar dengan sisi yang tidak saling memotong (bersilangan) sudut satu dengan sudut yang lain.



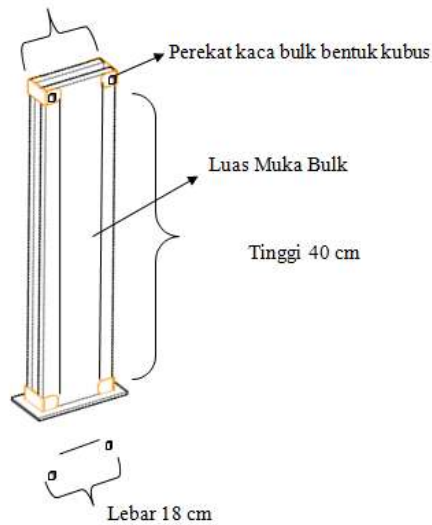
a) Bidang planar

b) Bidang tidak planar

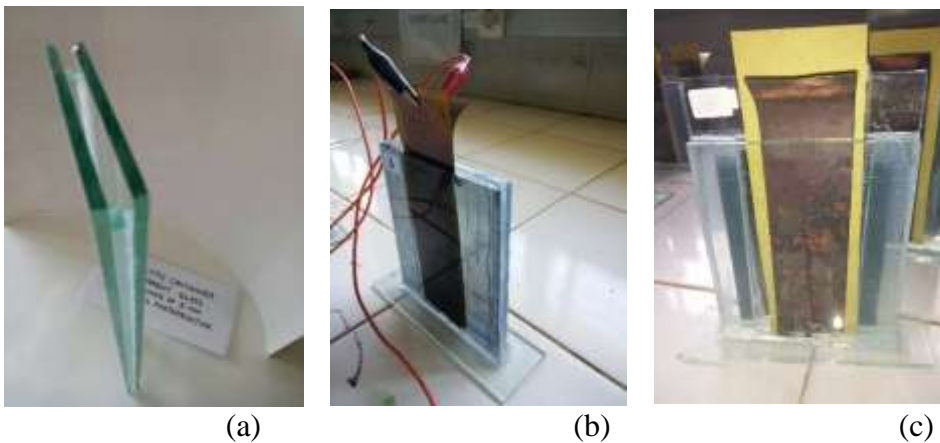
Gambar 2.4 Contoh bidang planar (Gareth J. Janacek and Mark Lemmon. 2011: 234-235)

Rancangan sel PV dibuat dengan model sketsa gambar reaktor geometri pada bidang ruang planar. Pada Rancangan ini bagian dalam nya terdapat celah kecil dengan jarak 5 mm ke arah sisi luar dan sisi dalam. Elektrolit akan dimasukan kedalam celah tersebut yang dinamakan dengan *bulk* atau *reaktor*. Pada satu sisi planar terdapat 2 buah *bulk* yang bersisian.

Design atau rancangan sel PV dibuat dengan model Design 1, sebagai berikut Tebal pada bulk masing-masing 5mm depan, celah, belakang



Gambar 2.5 Skema dan design sel PV yang dibuat (Courtesy : Firmansyah Khairul Kamal)



Gambar 2.6 Rancangan Sel PV

Dari gambar diatas kita dapat menghitung volume dari ruang Planar dengan menggunakan rumus trigonometri serta aturan cosinus untuk menghitung luas permukaan, bila ditengah ruang ditempatkan satu titik sumber cahaya, yang akan memancarkan sinar ke seluruh permukaan.

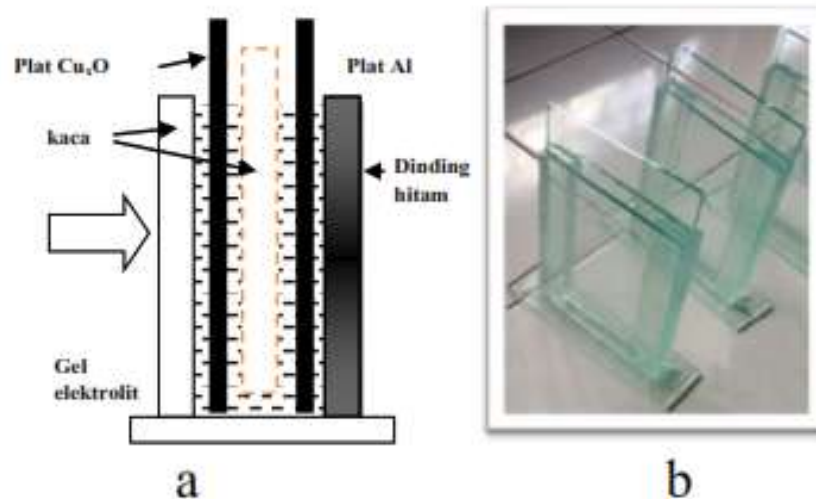
Pembuatan Disain dan Sel PV

Sel PV Design 1 (R1), yakni kaca transparan bening dengan ketebalan 3 mm, dipotong dengan ukuran 2 cm x 12 cm sebanyak 4 buah. Ukuran 10 cm x 12 cm sebanyak 2 buah, dan ukuran 10 cm x 14 cm sebanyak 1 buah dan 4 cm x 14 cm sebanyak 1 buah. Pada elektroda

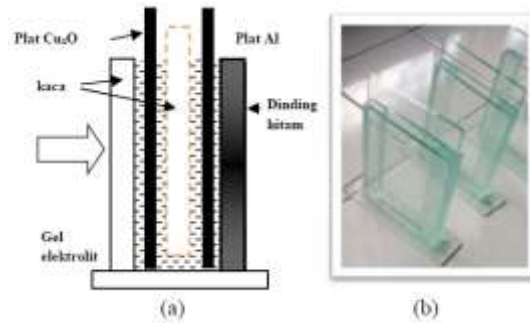
Cu₂O/CuO adalah bagian masuk/terkena cahaya ruang, dan satu bagian lain adalah ditutup kertas karbon (elektroda Cu) seperti pada Gambar 2.

Sel PV Design 2 (R2), yakni kaca transparan bening dengan ketebalan 3 mm, dipotong dengan ukuran 2 cm x 12 cm sebanyak 4 buah. Ukuran 10 cm x 12 cm sebanyak 2 buah, dan ukuran 10 cm x 14 cm sebanyak 1 buah dan 4 cm x 14 cm sebanyak 1 buah. Pada elektroda Cu₂O/CuO adalah bagian masuk/terkena cahaya ruang, dan satu bagian lain adalah ditutup kertas karbon (elektroda Al) seperti pada Gambar 3.

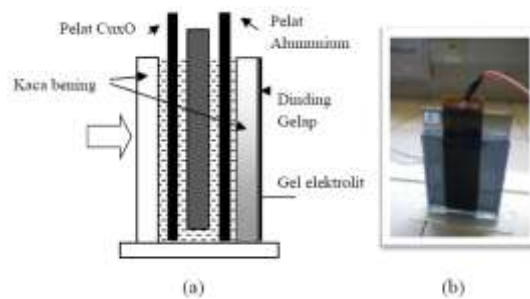
Sel PV Design 3 (R3), yakni kaca transparan bening dan kaca hitam dengan ketebalan 3 mm, dipotong dengan ukuran 2 cm x 12 cm sebanyak 4 buah. Ukuran 10 cm x 12 cm sebanyak 2 buah (1 bening dan 1 hitam), dan ukuran 10 cm x 14 cm sebanyak 1 buah dan 4 cm x 14 cm sebanyak 1 buah. Pada bagian elektroda Cu₂O/CuO adalah kaca bening, dan bagian elektroda Cu adalah kaca hitam seperti Gambar 4.



Gambar 2. Skema dan Sel PV Disain 1 (R1) (a) Skema Sel PV dan (b) Sel PV yang sudah dibuat



Gambar 3. Skema dan Sel PV Disain 2 (R2) (a) Skema rancangan sel PV dan (b) sel PV yang sudah dibuat



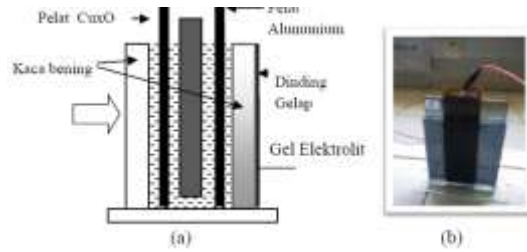
Gambar 4. Skema dan Sel PV Disain 3 (R3) (a) Skema rancangan sel PV dan (b) sel PV yang sudah dibuat

Sel PV Design 4 (R4), yakni kaca transparan bening dan kaca hitam dengan ketebalan 3 mm, dipotong dengan ukuran 2 cm x 12 cm sebanyak 4 buah. Ukuran 10 cm x 12 cm sebanyak 2 buah (1 bening dan 1 hitam), dan ukuran 10 cm x 14 cm sebanyak 1 buah dan 4 cm x 14 cm sebanyak 1 buah. Pada bagian elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ adalah kaca bening, dan bagian elektroda Al adalah kaca hitam seperti Gambar 5.

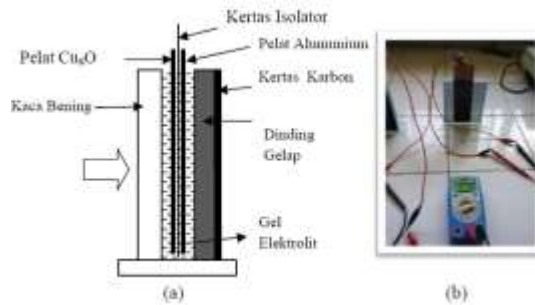
Sel PV Design 5 (R5), yakni kaca transparan bening dengan ketebalan 3 mm, dipotong dengan ukuran 2 cm x 12 cm sebanyak 2 buah. Ukuran 10 cm x 12 cm sebanyak 2 buah, dan 4 cm x 14 cm sebanyak 1 buah. Pada bagian bening elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$, bagian gelap, elektroda Cu. Antara elektroda $\text{Cu}_2\text{O}-\text{CuO}/\text{Cu}$ hanya dibatasi dengan kertas isolator seperti Gambar 6.

Sel PV Design 6 (R6), yakni kaca transparan bening dengan ketebalan 3 mm, dipotong dengan ukuran 2 cm x 12 cm sebanyak 2 buah. Ukuran 10 cm x 12 cm sebanyak 2 buah, dan 4

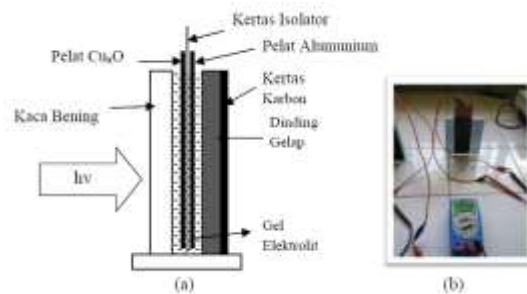
cm x 14 cm sebanyak 1 buah. Pada bagian bening elektroda $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$, bagian gelap, elektroda Cu. Antara elektroda $\text{Cu}_2\text{O}-\text{CuO}/\text{Al}$ hanya dibatasi dengan kertas kacang padi seperti Gambar 7.



Gambar 5. Skema dan Sel PV Disain 4 (R4) (a) Skema rancangan sel PV dan (b) sel PV yang sudah dibuat



Gambar 6. Skema dan Sel PV Disain 5 (R5) (a) Skema rancangan sel PV dan (b) sel PV yang sudah dibuat



Gambar 7. Skema dan Sel PV Disain 6 (R6) (a) Skema rancangan sel PV dan (b) sel PV yang sudah dibuat

Plat tembaga (Cu)

Plat tembaga (Cu) dalam bentuk lembaran dengan tiga variasi ukuran. Plat tembaga diperoleh dari PT. Metalindo Sejahtera, Jakarta, dalam bentuk lembaran berukuran 36,5 cm x 120 cm, sebagaimana terlihat pada Tabel 1. Plat tembaga (Cu) dipotong dengan ukuran 4 cm x 14.5 cm dan diukur ketebalan dan luas permukaannya. Selanjutnya diberi penomoran dan ditimbang yang beratnya masing masing sebelum dibakar. Hal ini bertujuan untuk melihat pengaruh suhu pembakaran terhadap pembentukan oksida.

Tabel 1. Spesifikasi plat tembaga yang digunakan

No	Plat	Ketebalan (mm)	Ukuran (cm)	Berat (Kg)
1	Cu	0,15 mm	36,5 cm x 120 cm	0,60
2	Cu	0,20 mm	36,5 cm x 120 cm	0,80
3	Cu	0,30 mm	36,5 cm x 120 cm	1,20

Perubahan yang terjadi setelah proses pembakaran adalah terjadinya penambahan berat pada plat tembaga. Hal ini disebabkan terbentuknya oksida tembaga pada permukaan plat tembaga. Dari hasil penimbangan terhadap elektroda berdasarkan suhu pembakaran yang bervariasi, seperti terlihat pada tabel, bahwa semakin tinggi suhu pembakaran, semakin besar penambahan berat plat tembaga. Peningkatan ini merupakan akibat semakin banyaknya tembaga yang terionisasi dan berdifusi ke daerah antar muka dan bereaksi dengan oksigen untuk membentuk tembaga oksida.

Dari Table 3 terlihat bahwa semakin tinggi suhu pembakaran pada plat tembaga, maka semakin besar tembaga oksida (Cu_xO) yang terbentuk. Pada suhu 300 o C, sebanyak 0,010667 gram tembaga oksida yang terbentuk. Pada suhu 400 o C, oksida tembaga terbentuk mencapai 0,023667 gram. Pada suhu 500 o C, oksida tembaga terbentuk mencapai 0,090667 gram.

Tabel 2. Pengukuran Pelat Tembaga Sebelum Dikalsinasi

No elektroda	berat awal (gram)	Tebal (m)	l1(m)	l2(m)	l rerata (m)	p1(m)	p2(m)	p rerata (m)	Luas (m ²)
1 (Cu 015)	16.3	0.00027	0.0395	0.04	0.03975	0.156	0.156	0.156	0.006201
2 (Cu 016)	16.144	0.00027	0.0395	0.04	0.03975	0.156	0.156	0.156	0.006201
3 (Cu 021)	16.379	0.00027	0.04	0.041	0.0405	0.156	0.156	0.156	0.006318
4 (Cu 008)	16.343	0.00027	0.04	0.04	0.04	0.156	0.156	0.156	0.00624
5 (Cu 017)	16.298	0.00027	0.0395	0.041	0.04025	0.156	0.156	0.156	0.006279
6 (Cu 027)	16.053	0.00027	0.0395	0.04	0.03975	0.156	0.156	0.156	0.006201
7 (Cu 013)	16.606	0.00027	0.0395	0.0395	0.0395	0.154	0.154	0.154	0.006083
8 (Cu 007)	16.25	0.00027	0.04	0.045	0.0425	0.155	0.155	0.155	0.006588
9 (Cu 024)	15.959	0.00027	0.04	0.04	0.04	0.155	0.155	0.155	0.0062
10 (Cu 002)	16.113	0.00027	0.039	0.041	0.04	0.154	0.154	0.154	0.00616
11 (Cu 005)	16.36	0.00027	0.0415	0.0405	0.041	0.154	0.154	0.154	0.006314
12 (Cu 018)	16.627	0.00027	0.04	0.041	0.0405	0.155	0.156	0.1555	0.006298
13 (Cu 004)	17.001	0.00027	0.041	0.042	0.0415	0.155	0.155	0.155	0.006433
14 (Cu 011)	16.242	0.00027	0.041	0.041	0.041	0.155	0.155	0.155	0.006355
15 (Cu 026)	16.372	0.00027	0.041	0.04	0.0405	0.156	0.156	0.156	0.006318

Tabel 3. Pelat Tembaga setelah dikalsinasi pada variasi suhu pembakaran

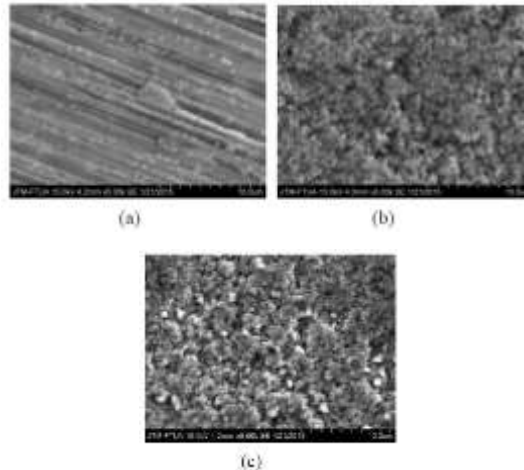
Suhu (°C)	Δ+berat 1(g)	Δ+berat 2 (g)	Δ+berat 3 (g)	rerata Δ+berat (g)
300	0,011	0,011	0,01	0,010667
350	0,024	0,026	0,021	0,023667
400	0,046	0,044	0,04	0,043333
450	0,064	0,05	0,08	0,064667
500	0,092	0,089	0,091	0,090667

Table 4. Hasil EDX plat tembaga sebelum dan setelah pembakaran pada suhu 400 dan 500 °C

Kandungan Unsur	Sebelum pembakaran	Setelah Pembakaran pada suhu 400°C	Setelah Pembakaran pada suhu 500°C
Karbon	10.47	10.45	6.70
Oksigen	1.23	16.34	15.28
Tembaga	88.31	73.21	78.02

Karakterisasi Elektroda Pelat Tembaga Karakterisasi SEM (Scanning Electron Microscope)

Analisis morfologi dan ukuran partikel dilakukan dengan SEM (*Scanning Microscope Electron*). Foto SEM diambil di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Andalas Padang. Perbesaran masing masing objek adalah 5000x seperti Gambar 8.



Gambar 8. Foto SEM perbesaran 5000 kali untuk (a) Pelat tembaga sebelum dikalsinasi (b) Pelat tembaga setelah dikalsinasi pada suhu 400 o C dan (c) pelat tembaga setelah dikalsinasi pada suhu 500 o C

Dari Gambar 8, terlihat terjadi perubahan pada permukaan lempengan Cu sebelum dan setelah pembakaran. Senyawa Cu_2O terbentuk setelah dikalsinasi berdiameter sekitar 3 - 6 μm . Terbentuknya oksida tembaga pada permukaan plat Cu tersebut, sebagai indikasi bahwa plat Cu sudah berubah sifatnya dari konduktor menjadi semikonduktor dan bersifat katalis.

Pembentukan oksida tembaga dapat dilakukan dengan dua teknik, yaitu oksidasi anodik dan oksidasi termal. Pada oksidasi anodik menggunakan larutan CuBr dan CuSO_4 dalam suasana basa. Proses oksidasi termal terjadi melalui pembakaran. W.M. Sears, et. al. melaporkan bahwa pada suhu 400 o C didapatkan struktur oksida yang paling optimum. Apabila temperatur dinaikkan, maka oksida yang terbentuk sangat tipis dan tidak beraturan. Apabila temperatur lebih rendah dari 400 o C, oksida terbentuk juga [40] sangat tipis .

Karakterisasi EDX

Dari analisa EDX yang tertera pada Tabel 4, diketahui terjadi peningkatan jumlah oksigen pada permukaan plat Cu yang awalnya 1,22 %. Pada suhu pembakaran 400 o C diperoleh persen oksigen sebesar 16.5 %. Pada suhu 500, persen oksigen pada permukaan lempengan Cu sebesar 15.27 %. Dari hasil EDX diketahui bahwa pada suhu 400 o C, jumlah oksida yang terbentuk optimum. Hal ini diketahui dari makin besarnya persentase atom oksigen yang bersenyawa dengan tembaga.

Proses terbentuknya oksida logam tembaga dilaporkan Pfeil (Kenneth R. Trethewey, 1991) sama halnya dengan fenomena terbentuknya oksida besi. Pada proses pembakaran, saat temperatur mulai naik, distribusi elektron pada permukaan logam tidak merata, dan tembaga mengalami ionisasi dengan terdiffusinya ion tembaga (I) ke lapisan sebelah luar dari antar muka [41].

Diagram skematik untuk mekanisme oksidasi tembaga adalah sebagai berikut sebagaimana dilaporkan R Trethewey (1988);

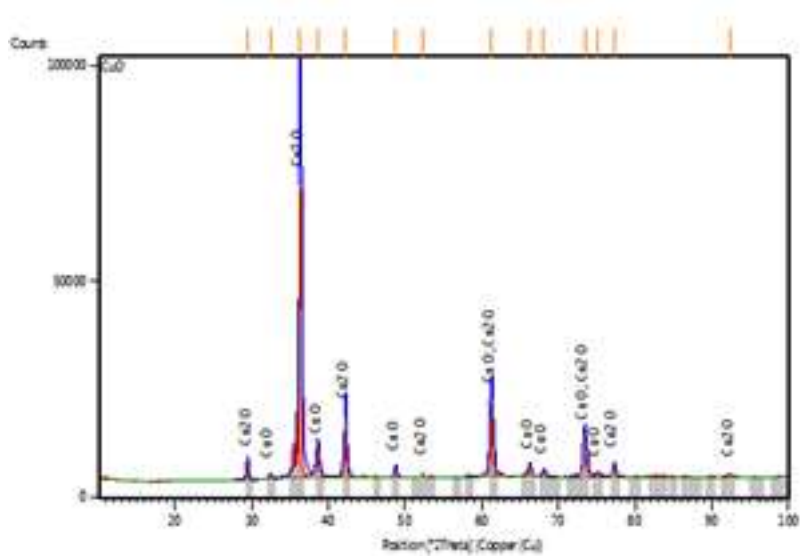
- (a) Difusi ion Cu^+ dari logam ke antar muka udara/oksida berkat adanya kekosongan kation. Adanya kekosongan kation menyebabkan setaranya jumlah ion tembaga yang harus terdapat dalam kondisi oksidasi divalen.
- (b) Reaksi molekul oksigen dengan ion ion tembaga (I) di antar muka udara/oksida. Reaksi sebuah oksigen menyebabkan menyatunya kisi dua ion oksida dan teroksidasinya empat ion tembaga (I) menjadi ion ion tembaga (II).
- (c) Difusi muatan positif ke arah dalam (elektron ke arah luar) untuk menetralkan kelebihan elektron dalam logam.

Karakterisasi XRD

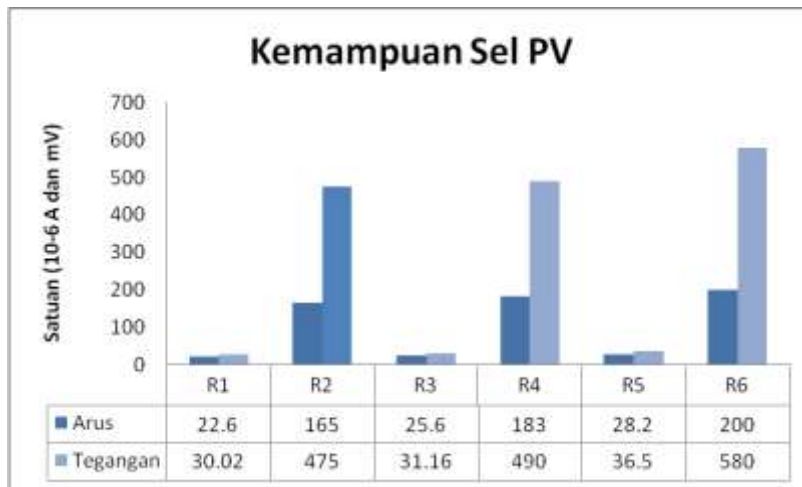
Analisis XRD dilakukan untuk mengidentifikasi senyawa yang terkandung dalam produk. Dari Gambar 9, hasil XRD terlihat adanya terbentuk puncak kurva yang menunjukkan terbentuknya senyawa tembaga oksida, yaitu senyawa CuO sebesar 26.7 % dan Cu_2O sebesar 73.3 %.

Hasil Pengukuran Kemampuan Sel PV

Dari hasil pengukuran arus dan tegangan dari sumber cahaya matahari yang masuk ke dalam ruangan, pada susunan beberapa Sel PV pasangan elektroda Cu₂O-CuO/Cu (untuk R1, R3 dan R5) dan sel PV pasangan elektroda Cu₂O-CuO/Al (untuk R2, R4 dan R6) dihasilkan arus masing masing R1, R2, R3, R4, R5 dan R6 sebesar 22.6 ; 165 ; 25.5 ; 183 ; 28.2 dan 200 μ A. Sementara, pengukuran tegangannya dihasilkan masing masing secara berurutan dari R1, R2, R3, R4, R5 dan R6 adalah 30.02 ; 475 ; 31.15 ; 490 ; 36.5 ; dan 580 mV seperti terlihat pada Gambar 10.



Gambar 9. Hasil XRD pelat tembaga setelah dikalsinasi pada suhu 400 o C



Gambar 10. Kemampuan Sel PV berdasarkan Disain Geometri Fotosel

Dari hasil pengukuran arus dan tegangan dari sumber cahaya matahari yang masuk ke dalam ruangan, dihasilkan daya sel PV masing masing R1, R2, R3, R4, R5 dan R6 sebesar 182821.9;

21119644.3; 214954.5; 24163298.3 ; 277364.6 ; dan 31258420.9 nW/m² seperti terlihat pada Gambar 11.

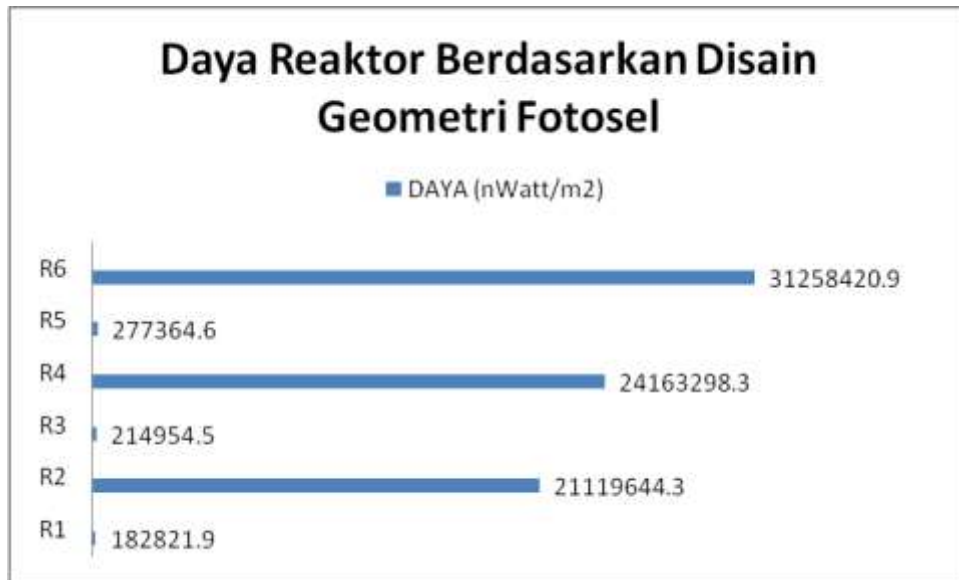
Pada R1, kemampuan sel PV terendah dibandingkan semua disain yang ada. Hal ini disebabkan pada disain R1, jarak antara Katoda dan Anoda lebih besar dibandingkan R5 dan R6. Pada R1, R2, R3, dan R4, jarak antara katoda dan anoda mencapai 6 mm. Jarak kedua elektroda ini diasumsikan, yakni total penjumlahan dari tebal pembatas reaktor yang terbuat dari kaca (3 mm) dan penempatan plat Katoda (Cu₂O-CuO) sebesar 1.5 mm dan plat Anoda (Cu atau Al) juga sebesar 1.5 mm. Semakin besar jarak antara pelat ini semakin mengurangi kemampuan reaktor sel PV menghasilkan arus dan tegangan listrik [40] .

Peningkatan daya sel PV pada rancangan berdasarkan jarak dibandingkan dengan pengaruh penggantian logam pada anoda sangat tinggi sekali. Hal ini terlihat pada peningkatan signifikan kemampuan sel PV pada R1 dibandingkan R2 sebesar 114.5 kali lipat saat Anoda diganti dari plat tembaga dengan pelat Alumunium. Hal serupa juga terjadi pada Disain R3 dan R4 dengan peningkatan mencapai 111,4 kali lipat, dan pada R5/R6 mencapai 111.7 kali lipat.

Peningkatan yang sangat signifikan ini disebabkan faktor Alumunium yang bersifat junction tipe N, sehingga kaya akan electron. Kecenderungan menyediakan electron ini menyebabkan perbedaan tegangan meningkatkan kemampuan sel PV dalam menghasilkan listrik.

Pada penggunaan anti reflector dengan menggunakan kaca berwarna gelap dan kertas karbon, pengaruhnya terhadap kemampuan sel PV tidak signifikan. Hal ini terbukti dengan perubahan arus dan voltase pada R1 dan R3 dengan peningkatan sekitar 0,17 kali lipat (sekitar 17%). Pada R3/R1 dengan antireflektor (peredam) dua blok (R3) dibandingkan satu blok (R1), terjadi peningkatan sekitar 17%. Hal ini disebabkan cahaya yang diserap pada blok berwarna gelap akan meningkatkan kemampuan sel PV pada Katoda dan menstabilkan Anoda dari pengaruh foton [42] .

Pada saat jarak antara katoda dan anoda diperkecil (0,27 mm) maka kemampuan meningkat sel PV mengalami peningkatan sebesar 29 % (R3/R1) dan 151 % (R5/R1). Hal ini disebabkan karena semakin kecil jarak antara Katoda dan Anoda, potensial barrier yang terbentuk akan semakin besar dan cepat terjadi oleh pengaruh foton. Hal ini juga memudahkannya elektron untuk mengalir dari katoda ke anoda dan seterusnya menuju sirkuit sehingga menghasilkan gaya gerak listrik [43].



Gambar 11. Daya yang dihasilkan Reaktor Sel PV untuk setiap Disain

Efisiensi Reaktor Fotosel

Kemampuan konversi sel PV dihasilkan dengan menghitung persentase daya sel PV dari cahaya yang mengenai/dating pada panel dibandingkan dengan yang dihasilkan sel PV atau daya yang dikonversi. Dalam penelitian ini cahaya ruang yang digunakan memiliki intensitas Intensitas ditentukan dengan satuan foot candle dan flux. Berdasarkan pengukuran dengan menggunakan sensor cahaya diperoleh hasil atau angka dalam satuan fc (foot candle) dan flux. Pengkonversian dilakukan dengan pengalihan faktor pengalinya yakni 10,76 untuk setiap 1 fc sehingga diperoleh satuan lumens. Satuan lumens dikonversi ke W/m² dengan mengalihkan dengan factor pengali 0,0015.

Dari pengukuran lightmeter, diperoleh Intensitas cahaya ruang dalam penelitian ini sebesar 90.21 fc. Maka, jika dikonversikan akan menjadi sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I &= 90.21 \times 10.76 \text{ lumens} \\
 &= 970.6596 \text{ lux} \times \text{lumens} \\
 &= 970.6596 \times 0.0015 \text{ W/m}^2 \\
 &= 1.46 \text{ W/m}
 \end{aligned}$$

Sementara dalam penentuan efisiensi dapat ditentukan dengan membandingkan intensitas cahaya ruang dengan daya yang dapat dikonversi sel PV.

$$\eta = I/I_0 \times 100\%$$

Efisiensi dari keenam reactor Fotosel dari hasil perhitungan diperoleh masing masing seperti terlihat pada Tabel 5.

Berdasarkan disain sel reaktor terlihat bahwa Disain R6 memberikan daya yang terbesar dibandingkan R1-R5. Hal ini disebabkan berbagai faktor, antara lain jarak antara elektroda, pilihan elektroda yang digunakan sehingga potensial barrier yang dihasilkan semakin besar, serta pengaruh tangkapan dan pemerangkapan cahaya yang mengenai panel kaca sel PV [44].

Tabel 5. Efisiensi dari keenam reactor Fotosel

Reaktor	Daya (nW/m ²)	Daya (W/m ²)	η (%)
R1	182821.9	0.000182822	0.0125
R2	21119644.3	0.021119644	1.4466
R3	214954.5	0.000214955	0.0147
R4	24163298.3	0.024163298	1.655
R5	277364.6	0.000277365	0.019
R6	31258420.9	0.031258421	2.141

Kesimpulan

Dari hasil disain terhadap variable jarak, maka didapatkan semakin kecil jarak kedua elektroda, semakin besar daya sel PV. Daya R5 dan R6 lebih besar dibandingkan daya reactor sel PV rancangan no 1, 2, 3 dan 4.

Pada Disain R5 dan R6 ini diperoleh jarak antara Katoda dan Anoda sebesar 0.27 mm. Pengaruh peredam (antireflektor) cahaya dapat meningkatkan kemampuan reaktor sebesar 17% tanpa merubah jarak antara elektroda, namun apabila jarak elektroda diperkecil sebesar 21,2 kali maka terjadi peningkatan kemampuan sel PV sebesar 151 %.

Untuk meningkatkan kemampuan sel PV secara signifikan, modifikasi dapat dilakukan dengan mengganti pelat Anoda yang berlawanan sifatnya dengan pelat katoda, sehingga dihasilkan tegangan barrier yang semakin besar. Dari hasil penelitian ini Desain R6 memberikan daya terbesar yakni 31258420.9 nW/m² atau 170 kali lipat dibandingkan R1 dan memberikan efisiensi sebesar 2.14 %.

Referensi

1. Santini A, Morselli L, Passarini F, Vassura I, Di Carlo S, Bonino F. 2011. End-of-Life Vehicles management: Italian material and energy recovery efficiency. *Waste management* 31:48994
2. Pang SH, Frey HC, Rasdorf WJ. 2009. Life cycle inventory energy consumption and emissions for biodiesel versus petroleum diesel fueled construction vehicles. *Environmental science & technology* 43:6398-405
3. Stephenson AL, Dupree P, Scott SA, Dennis JS. 2010. The environmental and economic sustainability of potential bioethanol from willow in the UK. *Bioresource technology* 101:9612-23
4. Zuttel A, Remhof A, Borgschulte A, Friedrichs O. 2010. Hydrogen: the future energy carrier. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 368:3329-42
5. Edwards PP, Kuznetsov VL, David WI. 2007. Hydrogen energy. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 365:1043-56
6. Aresta M, Dibenedetto A, Angelini A. 2013. The use of solar energy can enhance the conversion of carbon dioxide into energy-rich products: stepping towards artificial photosynthesis. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 371:20120111
7. Haber W. 2007. Energy, food, and land- the ecological traps of humankind. *Environmental science and pollution research international* 14:359-65
8. Irimia-Vladu M. 2014. "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future. *Chemical Society reviews* 43:588-610

9. Mills N, Pearce P, Farrow J, Thorpe RB, Kirkby NF. 2014. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste management* 34:185-95
10. Mudimu O, Rybalka N, Bauersachs T, Born J, Friedl T, Schulz R. 2014. Biotechnological screening of microalgal and cyanobacterial strains for biogas production and antibacterial and antifungal effects. *Metabolites* 4:373-93
11. Parlevliet D, Moheimani NR. 2014. Efficient conversion of solar energy to biomass and electricity. *Aquatic biosystems* 10:4
12. Swierk JR, Mallouk TE. 2013. Design and development of photoanodes for water-splitting dye-sensitized photoelectrochemical cells. *Chemical Society reviews* 42:2357-87
13. Hammond AL. 1972. Photovoltaic cells: direct conversion of solar energy. *Science* 178:732-3
14. Feron K, Belcher WJ, Fell CJ, Dastoor PC. 2012. Organic solar cells: understanding the role of Forster resonance energy transfer. *International journal of molecular sciences* 13:1701947
15. Chen YC, Hsu CY, Lin RY, Ho KC, Lin JT. 2013. Materials for the active layer of organic photovoltaics: ternary solar cell approach. *ChemSusChem* 6:20-35
16. Alturaif HA, ZA AL, Shapter JG, Wabaidur SM. 2014. Use of carbon nanotubes (CNTs) with polymers in solar cells. *Molecules* 19:17329-44
17. Kim H, Ok S, Chae H, Choe Y. 2012. Performance characteristics of polymer photovoltaic solar cells with an additive- incorporated active layer. *Nanoscale research letters* 7:56
18. Kao MC, Chen HZ, Young SL, Lin CC, Kung CY. 2012. Structure and photovoltaic properties of ZnO nanowire for dye-sensitized solar cells. *Nanoscale research letters* 7:260
19. Lee CH, Rhee SW, Choi HW. 2012. Preparation of TiO₂ nanotube/ nanoparticle composite particles and their applications in dye-sensitized solar cells. *Nanoscale research letters* 7:48

20. Stergiopoulos T, Rozi E, Karagianni CS, Falaras P. 2011. Influence of electrolyte co-additives on the performance of dyesensitized solar cells. *Nanoscale research letters* 6:307
21. Kim YK, Kang HJ, Jang YW, Lee SB, Lee SM, et al. 2008. Synthesis, characterization, and photovoltaic properties of soluble TiOPc derivatives. *International journal of molecular sciences* 9:2745-56
22. Liu M, Rieger R, Li C, Menges H, Kastler M, et al. 2010. A polymer with a benzo[2,1-b;3,4-b']dithiophene moiety for photovoltaic applications. *ChemSusChem* 3:106-11
23. Krishnan A, Das S, Krishna SR, Khan MZ. 2014. Multilayer nanoparticle arrays for broad spectrum absorption enhancement in thin film solar cells. *Optics express* 22 Suppl 3:A800-11
24. Thiyagu S, Pei Z, Jhong MS. 2012. Amorphous silicon nanocone array solar cell. *Nanoscale research letters* 7:172
25. Liu K, Qu S, Zhang X, Tan F, Wang Z. 2013. Improved photovoltaic performance of silicon nanowire/organic hybrid solar cells by incorporating silver nanoparticles. *Nanoscale research letters* 8:88
26. Lundgren C, Lopez R, Redwing J, Melde K. 2013. FDTD modeling of solar energy absorption in silicon branched nanowires. *Optics express* 21 Suppl 3:A392-400
27. Kaltenbrunner M, White MS, Glowacki ED, Sekitani T, Someya T, et al. 2012. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility. *Nature communications* 3:770
28. Gundel P, Schubert MC, Heinz FD, Woehl R, Benick J, et al. 2011. Microspectroscopy on silicon wafers and solar cells. *Nanoscale research letters* 6:197
29. Song L, Uddin A. 2012. Design of high efficiency organic solar cell with light trapping. *Optics express* 20 Suppl 5:A606-21
30. Sablon K, Sergeev A, Vagidov N, Antipov A, Little J, Mitin V. 2011. Effective harvesting, detection, and conversion of IR radiation due to quantum dots with built-in charge. *Nanoscale research letters* 6:584
31. Stefancich M, Zayan A, Chiesa M, Rampino S, Roncati D, et al. 2012. Single element spectral splitting solar concentrator for multiple cells CPV system. *Optics express* 20:9004-18

32. Perl EE, McMahon WE, Bowers JE, Friedman DJ. 2014. Design of antireflective nanostructures and optical coatings for next-generation multijunction photovoltaic devices. *Optics express* 22 Suppl 5:A1243-56
33. Li Y, Wei L, Chen X, Zhang R, Sui X, et al. 2013. Efficient PbS/CdS cosensitized solar cells based on TiO₂ nanorod arrays. *Nanoscale research letters* 8:67
34. Jia Y, Li X, Li P, Wang K, Cao A, et al. 2012. Strong, conductive carbon nanotube fibers as efficient hole collectors. *Nanoscale research letters* 7:137
35. Guo X, Li H, Ahn BY, Duoss EB, Hsia KJ, et al. 2009. Two- and threedimensional folding of thin film singlecrystalline silicon for photovoltaic power applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106:20149-54
36. Alexandru C. 2013. A novel open-loop tracking strategy for photovoltaic systems. *TheScientificWorldJournal* 2013:205396
37. Kim JH, Lee KJ, Roh JH, Song SW, Park JH, et al. 2012. Ga-doped ZnO transparent electrodes with TiO₂ blocking layer/nanoparticles for dyesensitized solar cells. *Nanoscale research letters* 7:11
38. Dou L, You J, Hong Z, Xu Z, Li G, et al. 2013. 25th anniversary article: a decade of organic/polymeric photovoltaic research. *Advanced materials* 25:664271
39. ur Rehman A, Lee SH. 2013. Advancements in n-type base crystalline silicon solar cells and their emergence in the photovoltaic industry. *TheScientificWorldJournal* 2013:470347
40. Sears WM, Fortin E. 1984. Preparation and Properties of Cu₂O/Cu Photovoltaic Cells. *Solar Energy Materials* 10 93-103
41. R.Trethewey. K. 1988. Corrosion, for Students of Science and Engineering. *longman Group, UK Limited*:pages. 83, 349-61
42. Zainul; R, Alif; A, Aziz; H, Arief; S, Syukri;, Yasthopi A. 2015. Photoelectrosplitting Water for Hydrogen Production using Illumination of indoor lights. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 7, 9s:24656
43. Zainul R, Alif A, Aziz H, Arief S, Syukri, Munaf E. 2015. Design of Photovoltaic Cell with Copper Oxide Electrode by using Indoor Lights. *Research Journal of Pharmaceutical Biological Chemical Science* 6.4. JulyAugust:353-61

44. Ping-Kuan Chang, Ting-Wei Kuo, MauPhon Houng, Chun-Hsiung Lu, Yeh CH. 2012
Effects of Temperature and Electrode Distance on Short-circuit Current in Amorphous
Silicon Solar Cells. *IEEE journal* 978-1-4577-1829