

STUDI PREPARASI DAN KARAKTERISASI SEL SURYA BERBASIS TITANIA MELALUI PENYISIPAN LOGAM TEMBAGA (CU) DENGAN BERBAGAI VARIASI MASSA PADA LAPISAN AKTIF TITANIA

EFFECT OF CU INSERTION WITH VARIATION OF MASS ON TITANIA ACTIVE LAYER TO MORPHOLOGICAL STRUCTURE, RESISTANCE, AND SOLAR CELLS PERFORMANCE

Rita Prasetyowati, Laila Katriani dan Yunita Ambarwati

Juridik Fisika FMIPA UNY

email : Rita_P@uny.ac.id

Diterima 21 Desember 2016, disetujui 17 Maret 2017

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penyisipan logam tembaga (Cu) dengan berbagai variasi massa terhadap struktur morfologi dan komposisi bahan pada permukaan, absorbansi, resistansi, dan performansi sel surya berbasis titania. Preparasi lapisan titania-tembaga menjadi bentuk pasta dilakukan dengan metode sol-gel. Pasta titania-tembaga dideposisikan pada elektroda transparan dengan metode *doctor blade*. Dilakukan lima variasi massa Cu yang disisipkan pada lapisan titania, yaitu 0,050 gram; 0,075 gram; 0,100 gram; 0,0125 dan 0,0150. Masing-masing variasi massa Cu disisipkan pada 1 gram TiO₂. Karakterisasi SEM dan EDS dilakukan pada lapisan titania-tembaga untuk mengetahui struktur morfologi dan komposisi bahan lapisan. Absorbansi lapisan dikarakterisasi menggunakan UV-Visible spektrometer. Pengukuran resistansi lapisan dilakukan dengan *Jembatan Wheatstone*. Sedangkan performansi sel surya dilakukan dengan mengukur tegangannya. Berdasarkan hasil SEM, butiran yang terbentuk pada lapisan TiO₂ dan TiO₂-Cu relatif sama. Hasil EDS memperlihatkan bahwa komposisi bahan pada lapisan TiO₂-Cu sampel 5, yaitu lapisan unsur Ti sebanyak 59,98 %, unsur O sebanyak 40,05 % dan unsur Cu sebanyak 0,07%. Absorbansi lapisan aktif TiO₂ terjadi dari panjang gelombang 200 nm-382 nm dan 649 nm-800 nm. Absorbansi lapisan aktif TiO₂Cu terjadi dari panjang gelombang 200 nm-381 nm dan 649 nm- 800 nm. Penambahan Cu pada lapisan aktif TiO₂ meningkatkan sifat absorbansi dari lapisan aktif titania. Penyisipan logam Cu pada lapisan titania dapat menurunkan resistansi listrik lapisan. Lapisan titania tanpa disisipi Cu memiliki nilai resistansi sebesar 3190,602 Ω. Tembaga yang disisipkan pada lapisan aktif TiO₂ mempengaruhi tegangan yang dihasilkan oleh sel surya berbasis titania.

Kata kunci : titania, tembaga, morfologi permukaan, absorbansi, resistansi, sel surya

Abstract

This study aims to determine the effect of insertion of copper (Cu) with a variety of mass to structure morphology and composition of surface layer, absorbance, resistance and solar cell performance based on titania. Preparation of titania-copper layer to form a paste was made using a sol-gel method. Pasta titania-copper deposited on a transparent electrode with a doctor blade method. There were five variations of Cu mass pasted on layers of titania, namely 0,050 grams; 0,075 grams; 0,100 grams; 0.0125 and 0.0150. Each variation of the mass of Cu is inserted in one gram of TiO₂. SEM and EDS characterization performed on layers of titania-copper to know the structure morphology and composition of the titania-copper. Layer absorbance was characterized using UV-Visible spectrometer. Resistance of titania was measured using a Wheatstone bridge. The performance of solar cells measured by measuring the voltage of the solar cell. Insertion of Cu on titania does not affect the structure of the titania morphology when seen from the results of SEM characterization. EDS results showed that the composition of sample 5 containing Ti element as much as 59.98%, O elements as much as 40.05% and Cu element as much as 0.07%. The absorbance of TiO₂ occurs from 200 nm- wavelength of 382 nm and 649 nm - 800 nm. While the absorbance of the active layer TiO₂-Cu occur from the wavelength of 200 nm-381 nm and 649 nm- 800 nm. From the results obtained, it can be seen that the addition of Cu in the active layer of TiO₂ improve the absorbance properties of the active layer of titania. Insertion of Cu on titania can reduce the electrical resistance of the layer.

Keywords: titania, copper, surface morphology, absorbance, resistance, solar cells

Pendahuluan

Persediaan energi di dunia ini semakin lama semakin menipis, begitu juga dengan persediaan listrik dunia. Listrik yang berasal dari sumber tenaga konvensional, seperti bahan bakar minyak, semakin lama semakin menurun, sedangkan kebutuhan manusia akan listrik semakin meningkat. Manusia perlu terus mencari dan mengembangkan sumber-sumber energi alternatif yang lain, yang dapat dijadikan sebagai sumber energi listrik. Salah satu sumber energi alternatif sebagai sumber energi listrik adalah sel surya, yang sudah mulai diteliti dan dikembangkan oleh banyak peneliti di berbagai negara.

Sel surya generasi pertama (silikon wafer dan pita silikon) dan sel surya generasi kedua (lapisan tipis) memberikan efisiensi sel surya yang baik, yaitu mencapai 20%. Tetapi kedua generasi sel surya tersebut dalam proses produksinya memerlukan teknologi tinggi dan biayanya sangat mahal. Sehingga dikembangkan sel surya generasi ketiga, yaitu sel surya organik dan sel surya fotoelektrokimia. Sel surya tersebut dibuat dengan menggunakan polimer. Sel surya yang dihasilkan memiliki efisiensi rendah dan umur pakai singkat, tetapi harganya murah dan proses pembuatannya mudah. [1]

Saat ini sel surya organik dan sel surya fotoelektrokimia mulai banyak diteliti dan dikembangkan di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Pembuatan sel surya organik dan sel surya fotoelektrokimia hanya memerlukan proses fabrikasi yang relatif mudah, sederhana, tidak memerlukan teknologi yang rumit, dan murah. Selain itu, bahan-bahannya mudah didapatkan di Indonesia dengan harga yang murah, mengingat Indonesia memiliki sumber alam yang melimpah. Sehingga diharapkan sel surya tersebut dapat dikembangkan oleh peneliti-peneliti di Indonesia. Berbagai jenis bahan telah banyak digunakan untuk membuat sel fotoelektrokimia. Salah satu sel surya fotoelektrokimia yang menarik untuk diteliti dan dikembangkan adalah sel surya yang terdiri dari bahan nanokomposit, larutan elektrolit dan elektroda.

Nanokomposit adalah kombinasi dari satu atau lebih komponen terpisah dan salah satu komponennya adalah material skala nanometer. Tujuan dari pembuatan komposit adalah untuk menghasilkan sifat yang terbaik dari tiap komponen (komposit). Nanokomposit dibuat dengan menyisipkan nanopartikel (*filler*) ke dalam sebuah sampel bahan makroskopik (*matriks*). [2]

Pada Konferensi Nanokomposit tahun 2000, telah diungkapkan keunggulan sifat-sifat nanokomposit. Sifat-sifat bahan yang memperlihatkan peningkatan signifikan, diantaranya adalah konduktivitas listrik. [2]. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dipelajari pengaruh penyisipan logam tembaga (Cu) dengan berbagai variasi massa pada lapisan titania terhadap sifat-sifat fisis lapisan. Sifat fisis yang diselidiki meliputi struktur morfologi permukaan, komposisi kimia, absorbansi dan konduktivitas listrik. Pada penelitian ini juga akan diselidiki performansi sel surya yang dihasilkan.

Metode Penelitian

Teknik pengambilan data dilakukan dalam dua tahap yaitu tahap preparasi (pembuatan lapisan titania) dan tahap karakterisasi lapisan titania.

a. Tahap Preparasi (pembuatan lapisan titania)

1) Pembuatan nanokomposit titania dan titania-tembaga.

PVA sebanyak 0,1 gram dilarutkan dalam 10 ml aquades, larutan tersebut diaduk sambil dipanaskan di atas hot plate pada suhu 80°C selama 2 jam, larutan ini berfungsi sebagai *binder* dalam pembuatan pasta titania. Selanjutnya TiO₂ sebanyak 1 gram dimasukkan ke dalam binder, sambil tetap diaduk dan dipanaskan pada suhu 80°C sampai terbentuk pasta yang baik (± 1 jam), sehingga terbentuk pasta titania. Untuk membuat pasta nanokomposit titania-tembaga : ke dalam larutan *binder* dimasukkan 1 gram TiO₂ dan 0,05 gram Cu, sambil diaduk dan dipanaskan pada suhu 80°C sampai terbentuk pasta yang baik (± 1 jam), sehingga terbentuk pasta titania-tembaga. Langkah ini dapat diulangi dengan variasi massa Cu yang ditambahkan (0,075 gram; 0,100 gram; 0,125 gram dan 0,150 gram).

2) Deposisi nanokomposit pada substrat ITO. Elektroda transparan (ITO) dipotong dengan ukuran 2,0 cm x 2,5 cm, kemudian dicuci dengan aquades selama 15 menit dan dengan alkohol 70% selama 30 menit menggunakan *ultrasonic bath*. Nanokomposit yang telah dibuat selanjutnya dicetak di atas elektroda transparan yang sudah bersih dengan teknik *doctor blade*. Nanokomposit

yang telah menempel pada elektroda transparan selanjutnya dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu 100°C selama 30 menit, dilanjutkan dipanaskan dengan menggunakan *furnace* pada suhu 450°C selama 30 menit.

3) Pembuatan lapisan elektrolit

NaF sebanyak 0,5 gram dilarutkan dalam 10 ml aquades sambil diaduk menggunakan stirrer sampai terlarut semua, kemudian 0,8 gram PEG dimasukkan sedikit demi sedikit sambil terus diaduk dan dipanaskan pada suhu 110°C sampai pelarut aquades menguap atau terbentuk gel. Gel elektrolit dilapiskan secara manual pada lapisan nanokomposit titania-tembaga.

4) Penyiapan elektroda aluminium (Al)

Lempeng Al dipotong dengan ukuran 2,0 cm x 2,5 cm, kemudian dicuci dengan aquades selama 15 menit dan dengan alkohol 70% selama 30 menit, dengan menggunakan ultrasonic bath, selanjutnya lempeng Al dikeringkan. Lapisan nanokomposit titania-tembaga yang telah diberi gel elektrolit, selanjutnya ditumpuk dengan elektroda Al, kemudian sampel dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu 80°C selama 10 menit agar gel elektrolit menjadi padatan

b. Tahap Karakterisasi Lapisan Titania

Morfologi permukaan lapisan titania dianalisis dengan SEM, sedangkan komposisi bahan dianalisis dengan EDS. Absorbansi lapisan dianalisis dengan menggunakan UV-Vis Spektrometer. Resistansi lapisan diukur dengan menggunakan Jembatan Wheatstone. Sedangkan tegangan sel surya diukur dengan multimeter.

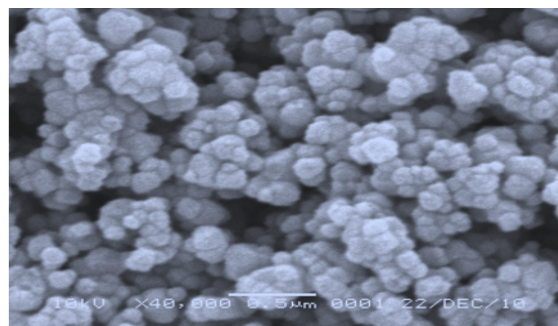
Hasil dan Pembahasan

1. Struktur Morfologi dan Komposisi Kimia Lapisan TiO₂-Cu

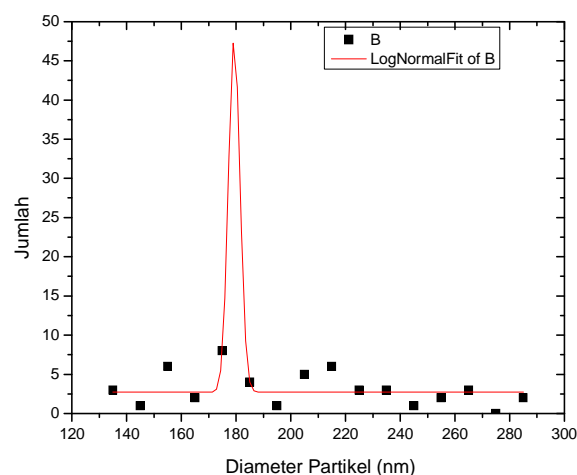
Struktur morfologi lapisan TiO₂-Cu diperoleh dari hasil karakterisasi menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Berdasarkan hasil analisis SEM dapat diperoleh morfologi permukaan suatu bahan dan ukuran butir (*grain*). Teknik SEM menghasilkan foto morfologi permukaan bahan dengan berbagai tonjolan dan lekukan yang didapatkan dari pengolahan elektron sekunder yang dipancarkan oleh bahan.

Hasil SEM lapisan TiO₂ sebagai pembanding merujuk pada penelitian sebelumnya,

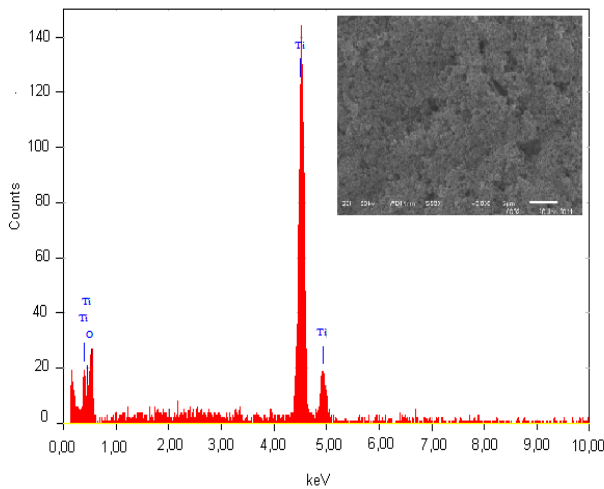
yang dilakukan oleh Rita Prasetyowati pada tahun 2011.[3]. Morfologi permukaan lapisan TiO₂ ditunjukkan pada Gambar 1. Partikel-partikel TiO₂ yang terdeposisi pada ITO mempunyai butiran (*grain*) yang cukup homogen. Dari gambar tersebut dapat dihitung bahwa ukuran diameter partikel TiO₂ sekitar 180 nm (berdasarkan distribusi ukuran partikel pada Gambar 2). Ryan O'Hyre, dkk [4] menyatakan bahwa ukuran partikel TiO₂ sebesar 50-200 nm mendukung performansi sel surya untuk menjadi lebih baik. Pada Gambar 3 ditunjukkan hasil EDS lapisan TiO₂. Hasil EDX tersebut memperlihatkan bahwa komposisi bahan yang terkandung dalam lapisan TiO₂ adalah unsur Ti sebanyak 54,25% dan unsur O sebanyak 45,75%.



Gambar 1. Foto SEM pasta TiO₂ yang dideposisikan pada ITO dengan teknik printing (Rita Prasetyowati, 2011)

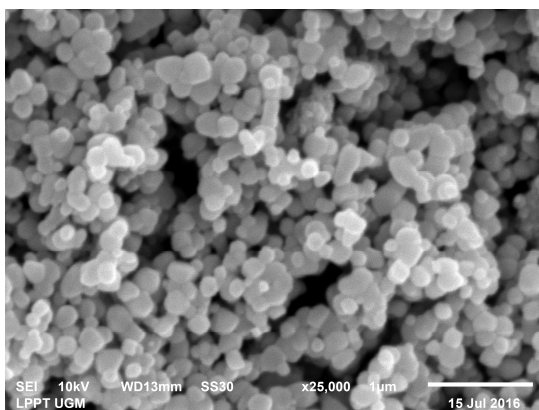


Gambar 2. Distribusi ukuran partikel TiO₂ dari hasil citra SEM.(Rita Prasetyowati, 2011)

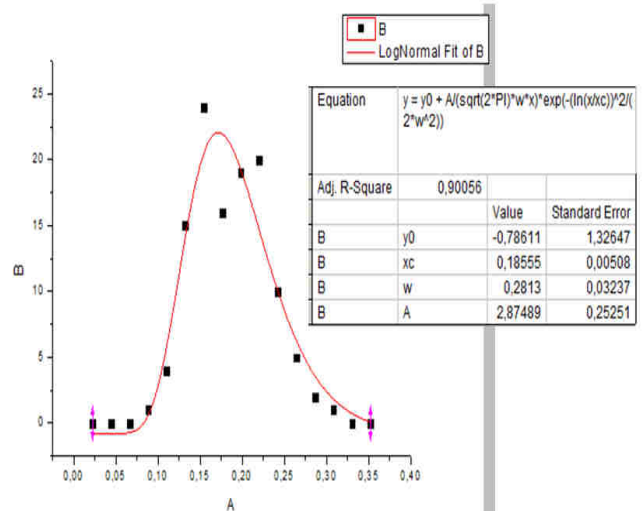


Gambar 3. Hasil EDS lapisan TiO₂. (Rita Prasetyowati, 2011)

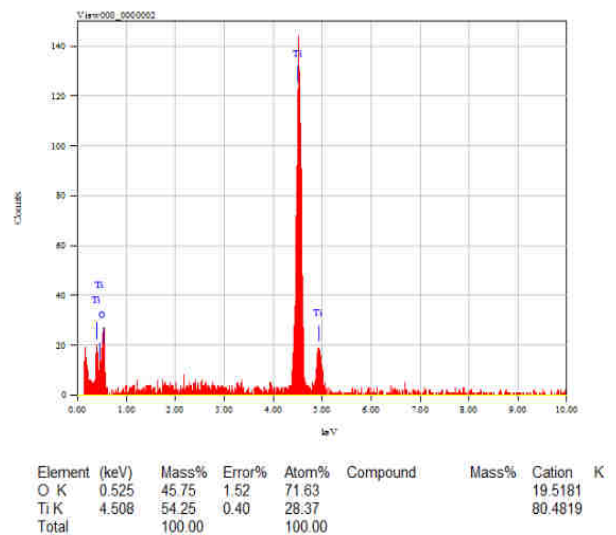
Morfologi permukaan lapisan TiO₂-Cu ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa butiran (*grain*) partikel-partikel TiO₂-Cu cukup homogen. Morfologi permukaan pada lapisan TiO₂-Cu tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan morfologi permukaan lapisan TiO₂ tanpa penambahan Cu. Keduanya terlihat sama, memiliki homogenitas butiran (*grain*) yang baik. Berdasarkan hasil SEM diperoleh rata-rata ukuran butiran (*grain*) pada lapisan TiO₂-Cu adalah 193,038 nm. Tetapi berdasarkan hasil EDS pada Gambar 5, terbukti bahwa pada lapisan TiO₂-Cu mengandung sejumlah Cu. Hal ini berarti ada partikel-partikel Cu yang menyisip diantara partikel-partikel TiO₂ ketika dilakukan pembuatan pasta nanokomposit TiO₂-Cu. Berdasarkan hasil EDS pada Gambar 5 dapat diketahui bahwa lapisan TiO₂-Cu mengandung unsur Ti sebanyak 59,98%, unsur O sebanyak 40,05% dan unsur Fe sebanyak 0,07%.



Gambar 4. Foto SEM pasta TiO₂-Cu yang dideposisikan pada ITO



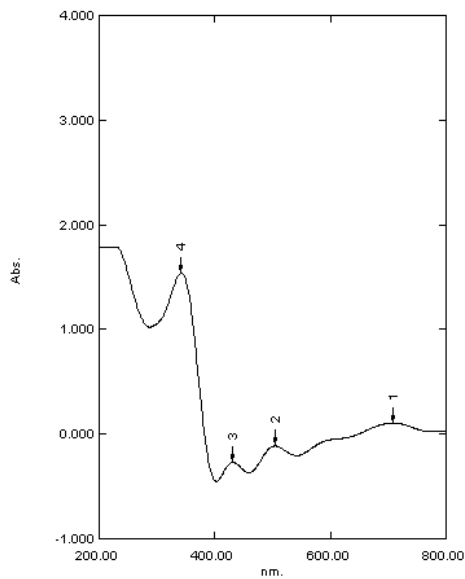
Gambar 5. Distribusi ukuran partikel TiO₂-Cu dari hasil citra SEM



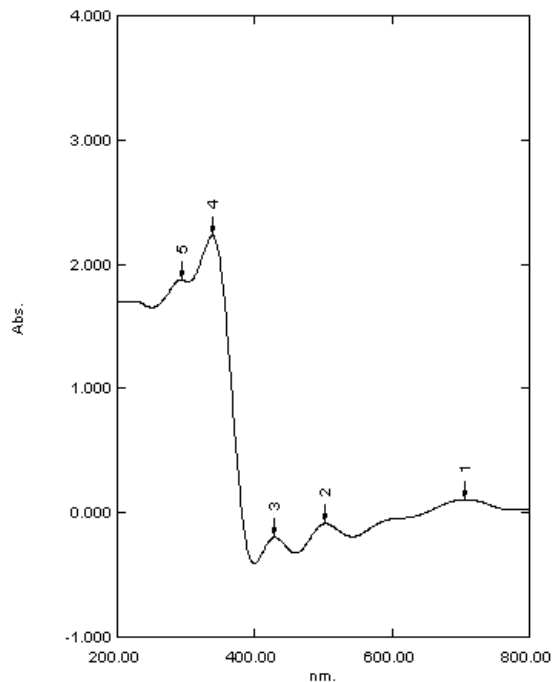
Gambar 6. Hasil EDS lapisan TiO₂-Cu

2. Absorbansi Lapisan Titania-Tembaga (TiO₂-Cu)

Spektrometer UV-Visible digunakan untuk mengkaji absorbansi material dalam rentang panjang gelombang ultraviolet (mulai sekitar 200 nm) hingga mencakup semua panjang gelombang cahaya tampak (sampai sekitar 700 nm). Pada kajian bidang material, spektrometer UV-Vis sering digunakan untuk menentukan struktur elektronik material, yaitu menentukan tingkat-tingkat energi elektronik dalam material tersebut. Salah satu aplikasi yang penting dari spektrometer UV-Vis adalah dapat digunakan untuk menentukan lebar celah energi (*E_g*) dalam material semikonduktor. Lebar celah pita energi pada semikonduktor berkaitan dengan sejumlah sifat fisis semikonduktor tersebut.



Gambar 7. Spektrum absorpsi lapisan TiO₂ hasil karakterisasi UV-Vis



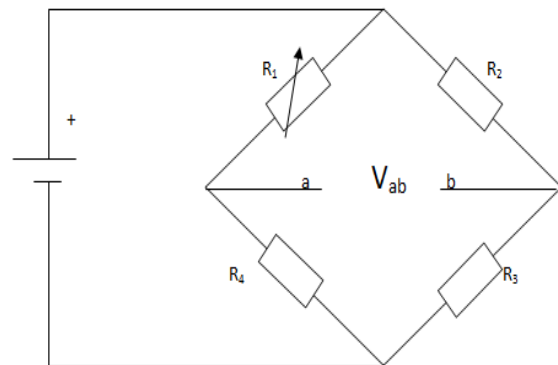
Gambar 8. Spektrum absorpsi lapisan TiO₂-Cu hasil karakterisasi UV-Vis

Absorbansi lapisan aktif TiO₂ terjadi pada panjang gelombang 200 nm- 382 nm dan 649 nm – 800 nm dengan puncak absorpsi pada panjang gelombang 708 nm dan 341 nm. Absorbansi lapisan aktif TiO₂Cu terjadi pada panjang gelombang 200 nm-381 nm dan 649 nm- 800 nm dengan puncak absorpsi pada panjang gelombang 707 nm, 338 nm dan 293 nm. Berdasarkan hasil tersebut ditunjukkan bahwa penambahan Cu pada lapisan aktif TiO₂ dapat meningkatkan sifat absorpsi dari lapisan aktif

titania, yaitu lapisan TiO₂Cu lebih banyak mempunyai puncak absorpsi daripada lapisan TiO₂.

3. Resistansi Lapisan Titania-Tembaga (TiO₂-Cu)

Nilai resistansi lapisan TiO₂ dan TiO₂Cu diukur dengan menggunakan rangkaian jembatan *wheatstone*, dengan skema seperti Gambar 19. R₁ adalah resistor variabel dimana dalam penelitian ini digunakan potensiometer, R₂ dan R₃ adalah resistor yang sudah diketahui nilainya yaitu masing-masing bernilai 10 Ω., sedangkan R₄ adalah resistor yang belum diketahui nilainya, dalam hal ini sampel lapisan TiO₂ dan TiO₂Cu sebagai R₄ yang akan diukur nilai resistansinya.



Gambar 9. Rangkaian Jembatan Wheatstone

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran Resistansi Lapisan Aktif TiO₂Cu

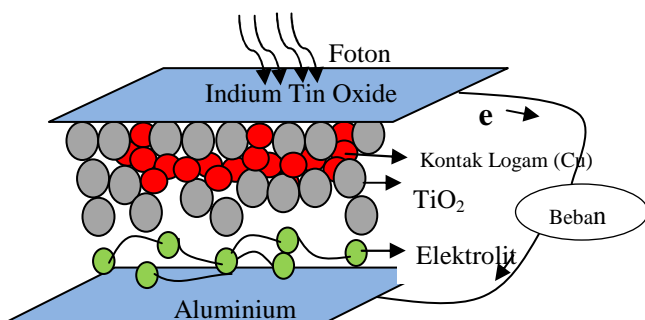
Massa Cu yang ditambahkan (gram)	R (Ω)
0,050	3184,784
0,075	3184,712
0,100	3183,843
0,125	3182,641
0,150	3182,409

Tabel 1 memperlihatkan hasil pengukuran resistansi lapisan TiO₂Cu. Pengukuran resistansi dilakukan untuk lima sampel dengan lima variasi massa Cu yang ditambahkan. Setiap variasi massa diukur resistansinya sebanyak lima kali pada lima titik yang berbeda. Nilai resistansi lapisan TiO₂ sebesar 3190,602 Ω. Berdasarkan hasil yang diperoleh, ditunjukkan bahwa semakin banyak massa Cu yang disisipkan pada lapisan TiO₂,

semakin kecil resistansi dari lapisan tersebut. Resistansi lapisan TiO_2 dan TiO_2Cu akan berpengaruh terhadap konduktivitas bahan tersebut. Penambahan Cu akan memperkecil resistansi sehingga konduktivitas semakin besar. Sehingga diharapkan performansi sel surya akan meningkat dengan penambahan massa Cu dalam TiO_2 sebagai semikonduktor yang digunakan sebagai lapisan aktif sel surya. Logam Cu yang menyisip diantara partikel TiO_2 berperan sebagai kontak logam yang menjadi lintasan bagi elektron untuk mengalir lebih cepat menuju ITO.[5]

4. Tegangan Sel Surya Berbasis Titania-Tembaga ($\text{TiO}_2\text{-Cu}$)

Pembuatan sel surya fotoelektrokimia dilakukan dengan cara memberikan lapisan elektrolit yang telah berbentuk gel pada lapisan aktif TiO_2 dan TiO_2Cu , dan ditutup dengan lempengan aluminium sebagai *counter* elektroda. Susunan sel surya yang terbentuk menyerupai *sandwich*, seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Struktur Se surya berbasis titania-tembaga

Kemudian dilakukan karakterisasi arus dan tegangan terhadap sampel sel surya yang telah terbentuk. Untuk mengukur arus dan tegangan digunakan amperemeter dan voltmeter. Pengukuran I-V dilakukan dalam dua keadaan yaitu ketika tidak ada cahaya dan ketika sel surya diberi cahaya. Ketika sel surya disinari cahaya, maka akan terjadi generasi (timbulnya pasangan elektron-hole). Foton yang diserap oleh elektron pada TiO_2 menyebabkan elektron tereksitasi dan selanjutnya elektron mengalir menuju ITO melalui lapisan kontak logam Cu. Lapisan kontak logam ini menjadi lintasan bagi elektron untuk mengalir lebih cepat menuju ITO. Selanjutnya elektron mengalir melalui beban luar menuju *counter* elektroda dan akan diterima oleh elektrolit. Sedangkan *hole* yang terbentuk akan

berdifusi menuju elektrolit. Hal ini berarti elektron yang diterima elektrolit akan berekombinasi dengan hole membentuk pembawa muatan negatif. [6]

Pada penelitian ini, yang dapat diukur hanyalah tegangan sel surya. Sedangkan arus tidak dapat diukur karena ordenya masih sangat kecil. Oleh karena itu, belum dapat ditampilkan kurva I-V dari masing-masing sampel sel surya yang dibuat sehingga belum diketahui efisiensinya. Hasil pengukuran tegangan ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui bahwa semakin banyak massa Cu yang ditambahkan pada lapisan titania, semakin besar tegangan sel surya yang dihasilkan.

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Tegangan Sel Surya yang dihasilkan

Massa Cu yang ditambahkan dalam lapisan aktif (gram)	Tegangan yang terukur (volt)
0,05	0,367
0,075	0,466
0,10	0,583
0,125	0,651
0,15	0,681

Simpulan

Penyisipan logam Fe pada lapisan titania tidak mempengaruhi struktur morfologi lapisan titania jika dilihat dari hasil karakterisasi SEM. Butiran (grain) yang terbentuk pada kedua lapisan tersebut relatif sama. Hasil EDS memperlihatkan bahwa komposisi bahan pada kedua lapisan tersebut berbeda. Lapisan $\text{TiO}_2\text{-Cu}$, yaitu lapisan TiO_2 yang disisipi logam tembaga mengandung unsur Ti sebanyak 59,88 %, unsur O sebanyak 40,05 % dan unsur Cu sebanyak 0,07 %.

Absorbansi lapisan aktif TiO_2 terjadi pada panjang gelombang 200 nm- 382 nm dan 649 nm – 800 nm dengan puncak absorbansi pada panjang gelombang 708 nm dan 341 nm. Sedangkan absorbansi lapisan aktif TiO_2Cu terjadi pada panjang gelombang 200 nm -381 nm dan 649 nm-800 nm dengan puncak absorbansi pada panjang gelombang 707 nm, 338 nm dan 293 nm. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat dilihat bahwa penambahan Cu pada lapisan aktif TiO_2

meningkatkan sifat absorbansi dari lapisan aktif titania.

Pengaruh variasi massa tembaga (Cu) yang disisipkan pada lapisan aktif TiO₂ terhadap resistansi lapisan aktif TiO₂Cu yaitu semakin banyak massa Cu yang disisipkan pada TiO₂Cu maka semakin kecil resistansi lapisan TiO₂Cu. Nilai resistansi yang diperoleh untuk variasi massa Cu 0,05 gram ; 0,75 gram ; 0,1 gram ; 0,125 gram dan 0,15 gram berturut-turut adalah 3184,78 Ω; 3184,71 Ω; 3183,84 Ω; 3182,64 Ω; 3182,41 Ω.

Pengaruh variasi massa tembaga yang disisipkan pada lapisan aktif TiO₂ terhadap tegangan yang dihasilkan oleh sel surya berbasis titania yaitu semakin besar massa Cu yang disisipkan pada lapisan aktif TiO₂, semakin besar tegangan yang terukur. Untuk massa Cu 0,05 gram; Cu 0,075 gram; Cu 0,1 gram; Cu 0,125 gram; Cu 0,15 gram, tegangan yang terukur berturut-turut adalah V=0,367 volt; V=0,466 volt; V=0,583 volt ; V=0,651 volt; dan V=0,681 volt.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada FMIPA UNY yang telah membiayai penelitian ini melalui anggaran DIPA BLU Universitas Negeri Yogyakarta Tahun 2016.

Pustaka

[1] B. Yulianto .(2006). *Berita Iptek 20 Januari 2006*

- [2] M. Abdullah. (2009). *Pengantar Nanosains*. Bandung : Penerbit ITB
- [3] R. Prasetyowati. (2011). Studi Pengembangan Sel Surya Berbasis TiO₂ Melalui Penyisipan Logam Fe dengan Metode Elektroplating. *Tesis*. Institut Teknologi Bandung
- [4] B.R. O'Hayre, M. Nanu, J. Schoonman, A. Goossens, Q. Wang dan M. Grätzel. (2006). The Influence of TiO₂ Particle Size in TiO₂/CuInS₂ Nanocomposite Solar Cells, *Adv. Funct. Mater.* **16**, 1566-1576
- [5] R. Sastrawan. (2006). Photovoltaic modules of dye solar cells Ph.D Thesis, Universität Freiburg.
- [6] K. Asagoe, Y. Suzuki, S. Ngamsinlapasathian and S. Yoshikawa. (2007). TiO₂-Anatase Nanowire Dispersed Composite Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells *J. Phys.: Conf. Ser.* **61**, 1112-1116.