

LAPORAN PENELITIAN
TAHUN ANGGARAN 2022

**Pemanfaatan limbah bulu ayam dalam pembuatan komposit
SnO₂-GO/rGO sebagai elektroda pada Sel Surya Tersensitisasi
Pewarna (DSSC)**

Nomor DIPA	:	DIPA BLU-DIPA 025.04.2.423812/2022
Tanggal	:	7 November 2021
Satker	:	(4238120) UIN Maulana Malik Ibrahim Malang
Kode Kegiatan	:	(2132) Peningkatan Akses, Mutu, Relevansi dan Daya Saing Pendidikan Tinggi Keagamaan Islam
Kode Output Kegiatan	:	(050) PTKIN Penerima BOPTN
Sub Output Kegiatan	:	(514) Penelitian (BOPTN)
Kode Komponen	:	(004) Dukungan Operasional Penyelenggaraan Pendidikan
Kode Sub Komponen	:	C Penelitian Dasar Interdisipliner

Oleh:

Erna Hastuti (NIP. 19811119 200801 2 009)
Utiya Hikmah (NIDT. 19880605 20180201 2 242)



KEMENTERIAN AGAMA
LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
(LP2M)
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
2022

KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmad dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat melakukan penelitian dasar interdisipliner yang berjudul Pemanfaatan limbah bulu ayam dalam pembuatan komposit SnO₂-GO/rGO sebagai elektroda pada Sel Surya Tersensitisasi Pewarna (DSSC).

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LP2M) Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah memberikan support secara financial demi kelancaran pelaksanaan penelitian ini. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan tersebut sangat sulit bagi penulis untuk dapat menyelenggarakan dan menyelesaikan kegiatan penelitian ini.

Penulis telah berusaha untuk menyempurnakan tulisan ini, namun sebagai manusia penulis pun menyadari akan keterbatasan maupun kekhilafan dan kesalahan yang tanpa disadari. Oleh karena itu, saran dan kritik untuk perbaikan laporan ini akan sangat dinantikan.

Malang, Nopember 2022

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan energi dan penurunan cadangan energi fosil dunia yaitu minyak bumi dan batu bara, serta kurangnya kesadaran masyarakat dalam menjaga keberlangsungan sumber daya alam telah memicu terjadinya krisis energi. Berbagai upaya dilakukan untuk mengurangi konsumsi energi fosil dan menggantinya dengan energi baru terbarukan (EBT). Potensi EBT di Indonesia terbilang tinggi, namun belum dimanfaatkan secara optimal sehingga belum dapat mencapai target bauran energi seperti yang diamanatkan dalam kebijakan energi nasional. Salah satu sumber EBT yang memiliki *resource* sangat besar di Indonesia, selain sumber EBT energi hidro, angin, panas bumi, biomassa, dan biodiesel, adalah tenaga surya dengan potensi sebesar 207.898 MW (4,80 kWh/m²/hari). Akan tetapi berbagai kendala yang dihadapi, salah satunya adalah biaya inovasi teknologi yang cenderung belum terjangkau, sehingga perlu dilakukan berbagai penelitian yang memanfaatkan limbah dari alam (biomassa) untuk pembuatan sel surya yang efektif dan efisien.

Sel surya berdasarkan perkembangan teknologi dan bahan pembuatannya dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu pertama, sel surya yang terbuat dari silikon kristal tunggal dan silikon multi kristal. Kedua, sel surya tipe lapisan tipis (*thin film solar cell*) dan yang ketiga, Sel Surya Pewarna Tersensitisasi (SSPT) atau *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC). Diantara ketiga tipe sel surya tersebut, yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan menjadi sumber energi alternatif adalah sel surya organik, karena bahannya mudah didapat, murah dan ramah lingkungan (Sasikumar et al., 2018).

Sel Surya Pewarna Tersensitisasi (SSPT) tersusun dari beberapa bahan, diantaranya yaitu zat warna (*dye*) yang berfungsi sebagai penyerap radiasi matahari, larutan elektrolit dan semikonduktor celah lebar seperti CuO, TiO₂, ZnO dan SnO₂ sebagai transport pembawa muatan (Bykkam et al., 2021).

SnO₂ yang biasa dikenal sebagai Tin dioksida merupakan jenis semikonduktor tipe n dengan *band gap* (celah pita) yang lebar $E_g > 3$ eV. Celah pita SnO₂ yang lebih tinggi membuat lubang oksidatif lebih sedikit pada pita valensi yang meminimalkan

laju degradasi pewarna, sehingga meningkatkan stabilitas DSSC. SnO₂ memiliki mobilitas elektron ($\sim 100\text{-}200 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$) yang jauh lebih tinggi dibandingkan TiO₂. Sifat lain yang menarik dari SnO₂ adalah pembentukan *homojunction* dengan substrat konduktor (FTO) sehingga mengurangi resistansi kontak yang tinggi (Kawade et al., 2020). SnO₂ menunjukkan sifat optik dan listrik yang sangat baik karena itu adalah pilihan terbaik untuk elektroda foto di DSSC.

Namun, perangkat DSSC dengan SnO₂ sebagai fotoanoda memiliki efisiensi konversi fotolistrik (PCE) yang cukup rendah karena rekombinasi elektron yang lebih cepat dan adsorpsi zat warna yang kurang baik. Baru-baru ini, banyak peneliti telah mengembangkan nanokomposit SnO₂/rGO yang menghasilkan stabilitas dan efisiensi konversi fotolistrik yang tinggi (Zhang et al., 2017). Grafena telah menarik perhatian khusus karena sifat optik dan listriknya yang sangat baik sejak pertama kali dilaporkan pada tahun 2004. Kisi yang berbentuk sarang lebah dengan ketebalan satu atom, biasanya digunakan sebagai komponen penting dari berbagai bahan komposit karena sifat transpor elektroniknya yang tinggi ($200.000 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), luas permukaan besar ($2630 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), dan aktivitas elektrokatalitik yang tinggi.

Pada penelitian ini akan dibuat nanokomposit SnO₂-GO/rGO dengan metode simple sonication method. Para peneliti sebelumnya belum pernah yang memanfaatkan limbah bulu ayam sebagai elektroda pada DSSC. Oleh karena itu pada penelitian ini, pembuatan GO/rGO diperoleh dari proses eksfoliasi kimia karbon dari limbah bulu ayam yang dihasilkan dari penelitian sebelumnya. Karakterisasi menggunakan XRD, FTIR dan UV Vis dilakukan untuk mengetahui struktur kristal, fasa, gugus fungsi dan energi gap sampel nanokomposit. Performa DSSC diuji dengan melapiskan sampel pada kaca konduktif dan elektrolit KI/I₂.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh penambahan GO-rGO pada struktur kristal, fasa, gugus fungsi dan energi gap dari nanokomposit SnO₂/GO-rGO?
2. Bagaimana pengaruh penambahan GO-rGO pada efisiensi DSSC dari nanokomposit SnO₂/GO-rGO?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui pengaruh penambahan GO/rGO pada struktur kristal, fasa, gugus fungsi dan energi gap dari nanokomposit SnO₂-GO/rGO?
2. Mengetahui pengaruh penambahan GO/rGO pada performa DSSC nanokomposit SnO₂-GO/rGO?

1.4. Batasan Permasalahan

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. GO/rGO yang digunakan adalah hasil penelitian sebelumnya, dengan eksfoliasi menggunakan aquades dan H₂SO₄ 1,5 M
2. Dye yang digunakan adalah dye sintetis N-719
3. Proses pembuatan komposit menggunakan metode simple sonication

1.5. Penelitian Terdahulu

Pembuatan GO/rGO menggunakan metode eksfoliasi kimia menggunakan ultrasonik pada larutan sehingga terjadi proses eksfoliasi dan reduksi. Pada metode ini, penggunaan ultrasonik ditambah dengan larutan surfaktan cair sebagai pelarut *graphite*. Penggunaan ultrasonik dipengaruhi oleh pemilihan pelarut dan surfaktan yang diiringi dengan frekuensi, amplitudo dan waktu sonikasi (Radziuk & Möhwald, 2016). Islamiyah dkk, (2017) mensintetis rGO dari tempurung kelapa dengan memodifikasi metode mechanical exfoliation. Metode mechanical exfoliation dilakukan dengan penambahan asam HCl dan H₂SO₄.

Pada penelitian ini, limbah bulu ayam yang mengandung keratin dimanfaatkan sebagai bahan GO/rGO. Sesuai penelitian sebelumnya, GO/rGO dibuat dengan proses pemanasan bulu ayam, yang dilanjutkan dengan proses eksfoliasi kimia menggunakan variasi konsentrasi H₂SO₄ (0 dan 1,5 M). Didapatkan fasa campuran antara GO dan rGO dengan nilai konduktivitas yang berbeda. Untuk aplikasi pada solar cell, GO/rGO ditambahkan pada SnO₂ dengan harapan dapat meningkatkan efisiensi pada DSSC. Du (2015), membuat nanopartikel SnO₂/rGO menggunakan metode solvotermal. Didapatkan nilai efisiensi DSSC meningkat menjadi 6,78%, jauh lebih besar jika dibandingkan nanopartikel SnO₂ (4,88%) (Du et al., 2015).

Selain itu, Sasikumar (2018) membuat nanokomposit SnO₂/GO dan didapatkan kenaikan efisiensi DSSC sampai 8,3% (Sasikumar et al., 2018). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan GO/rGO pada SnO₂ berpengaruh pada peningkatan performa DSSC.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan laporan penelitian ini, dibagi dalam beberapa bab dan sub bab seperti dijelaskan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, signifikansi, penelitian terdahulu dan sistematika penulisan.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

Menjelaskan tentang teori penunjang yang berhubungan dengan DSSC, material SnO₂, GO/rGO, XRD, FTIR, UV Vis dan uji listrik dan performa DSSC

BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang metode penelitian yang digunakan dalam penelitian. Diantaranya adalah prosedur perancangan, pembuatan nanokomposit, pengujian bahan, dan analisis data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil penelitian dan pembahasan dari permasalahan pokok penelitian yang meliputi, pembuatan komposit SnO₂/GO-rGO, serta hasil uji XRD, FTIR, UV-Vis dan uji listrik dan uji DSSC.

BAB V PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan dan saran–saran dari penulis.

BAB II

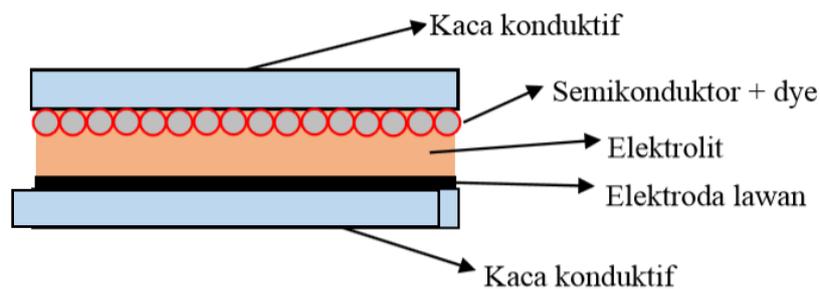
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)

Sel surya atau sel fotovoltaik merupakan piranti yang mampu mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Efek fotovoltaik merupakan dasar dari proses konversi sinar matahari (foton) menjadi listrik. Efek fotovoltaik ini ditemukan oleh Becquerel pada tahun 1839, dimana Becquerel mendeteksi adanya tegangan foton ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit (Ibn-Mohammed et al., 2017).

Teknologi pembuatan sel surya yang dikembangkan oleh para peneliti untuk mendapatkan solar sel yang memiliki efisiensi yang tinggi yang murah dan mudah dalam pembuatannya. Salah satunya yaitu sel surya tersensitisasi pewarna atau Dye Sensitized Solar Cell (DSSC). Pada DSSC, absorpsi cahaya dan separasi muatan listrik terjadi pada proses yang terpisah. Absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul dye dan separasi muatan oleh material semikonduktor nanokristal.

Elektroda kerja, sensitizer (pewarna), redoks-mediator (elektrolit), dan elektroda lawan adalah empat parameter yang mempengaruhi DSSC. DSSC adalah perakitan elektroda kerja yang direndam dengan sensitizer atau pewarna dan disegel ke counter elektroda yang direndam dengan lapisan tipis elektrolit. Komponen dan konstruksi DSSC ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Susunan DSSC (Gunawan, 2016)

Untuk membebaskan electron dari ikatan kovalennya, energi foton (hc) harus sedikit lebih besar atau diatas daripada energi bandgap. Jika energi photon terlalu besar daripada energi band gap maka ekstra energi tersebut akan dirubah dalam bentuk panas pada sel surya. Karenanya sangat penting pada sel surya untuk mengatur bahan yang dipergunakan yaitu dengan memodifikasi struktur molekul dari semikonduktor yang dipergunakan. Agar efisiensi sel surya bisa tinggi maka photon yang berasal dari sinar matahari harus bisa diserap sebanyak-banyaknya, kemudian memperkecil refleksi dan rekombinasi serta memperbesar konduktivitas dari bahannya. Agar foton bisa diserap sebanyak-banyaknya maka penyerap harus memiliki energi band gap dengan jangkauan yang lebar, sehingga memungkinkan untuk bisa menyerap sinar matahari yang memiliki energi yang bermacam-macam tersebut.

2.1.1 Substrat Transparan dan Konduktif

DSSC biasanya dibangun dengan dua lembar bahan transparan konduktif, yang membantu substrat untuk pengendapan semikonduktor dan katalis, dan bertindak sebagai kolektor arus. Terdapat dua karakteristik utama substrat yang digunakan dalam DSSC, yaitu :

- a. Pertama, lebih dari 80% transparansi diperlukan oleh substrat untuk memungkinkan lewatnya sinar matahari yang optimal ke area sel efektif.
- b. Kedua, untuk transfer muatan yang efisien dan mengurangi kehilangan energi, maka DSSC harus memiliki konduktivitas listrik yang tinggi. Tin oksida yang didoping fluor (FTO, $\text{SnO}_2: \text{F}$) dan oksida timah yang didoping indium (ITO, $\text{In}_2\text{O}_3: \text{Sn}$) biasanya digunakan sebagai substrat konduktif dalam DSSC. Substrat ini terdiri dari kaca yang dilapisi dengan lapisan timah oksida yang didoping indium dan oksida timah dengan fluorin. Film ITO memiliki transmitansi $>80\%$ dan resistansi lembaran $18 \Omega/\text{cm}^2$, sedangkan film FTO menunjukkan transmisi yang lebih rendah $\sim 75\%$ di daerah tampak dan resistansi lembaran $8,5 \Omega/\text{cm}^2$.

2.1.2 Elektroda kerja

Elektroda kerja (WE) dibuat dengan mendepositkan lapisan tipis bahan semikonduktor oksida seperti TiO_2 , Nb_2O_5 , ZnO , SnO_2 (tipe-n), dan NiO (tipe-p)

pada pelat kaca konduktor transparan yang terbuat dari FTO atau ITO. Oksida-oksida ini memiliki celah pita energi yang lebar antara 3–3,2 eV.

Lebar celah pita energi semikonduktor menentukan sejumlah sifat fisis semikonduktor tersebut. Beberapa besaran yang bergantung pada lebar celah pita energi adalah mobilitas pembawa muatan dalam semikonduktor, kerapatan pembawa muatan, spektrum absorpsi, dan spectrum luminisensi. Material semikonduktor yang berpotensi digunakan dalam teknologi DSSC ini adalah tin dioksida (SnO_2). Secara khusus, SnO_2 mengandung beragam keunggulan termasuk celah pita lebar, pita konduksi dan valensi dalam, stabilitas optik dan kimia yang sangat baik, transparansi tinggi, mobilitas tinggi, dan pembuatan yang mudah pada suhu rendah (Xiong et al., 2018).

2.1.3 Fotosensitizer atau Pewarna

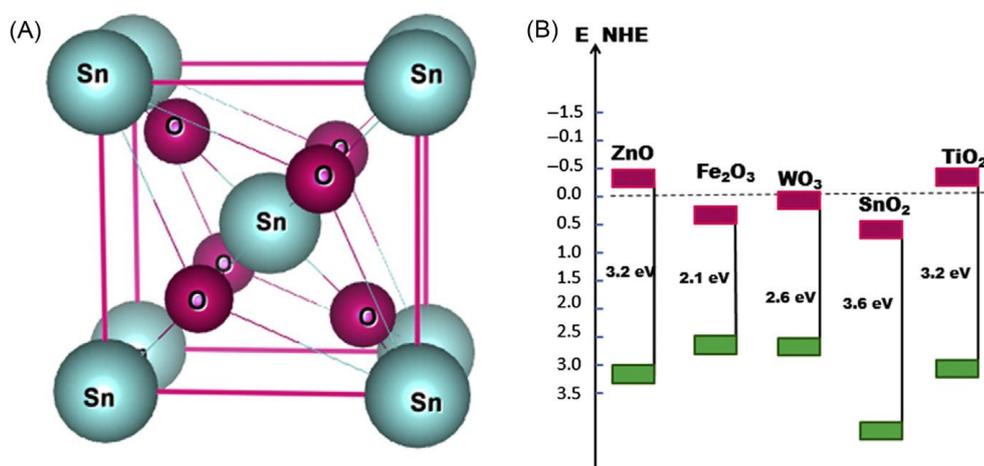
Pewarna (dye) adalah komponen DSSC yang bertanggung jawab untuk penyerapan maksimum cahaya yang datang. Setiap material pewarna harus memiliki sifat fotofisika dan elektrokimia sebagai berikut:

- a. Pewarna harus bercahaya.
- b. Spektrum serapan zat warna harus mencakup daerah ultraviolet-visible (UV-vis) dan daerah near-inframerah (NIR).
- c. Orbital molekul terisi tertinggi (HOMO) harus ditempatkan jauh dari permukaan pita konduksi elektroda dan orbital molekul kosong (LUMO) terendah harus ditempatkan sedekat mungkin dengan permukaan elektroda, dan selanjutnya harus lebih tinggi dengan terhadap potensial pita konduksi elektroda.
- d. HOMO harus terletak lebih rendah dari elektrolit redoks.
- e. Bagian tepi pewarna harus hidrofobik untuk meningkatkan stabilitas sel jangka panjang, karena menghasilkan kontak langsung yang minimal antara elektrolit dan anoda; jika tidak, distorsi pewarna yang diinduksi air dari permukaan elektroda dapat muncul yang dapat mengurangi stabilitas sel.
- f. Untuk menghindari agregasi pewarna di atas permukaan elektroda, co-absorben seperti asam chenodeoxycholic (CDCA) dan kelompok penahan seperti alkoxy-silyl, asam fosfat, dan gugus asam karboksilat, dimasukkan

antara pewarna dan material. Hal ini mengakibatkan pencegahan agregasi zat warna dan dengan demikian membatasi reaksi rekombinasi antara elektrolit redoks dan elektron dalam lapisan nanomaterial serta menghasilkan pembentukan ikatan yang stabil.

2.2 SnO₂

Fase SnO₂ yang digunakan dalam sel surya adalah struktur rutile tetragonal, yang merupakan bentuk paling penting dari casiterit SnO₂ yang terjadi secara alami. Rutile SnO₂ memiliki simetri ruang group tetragonal P42/mnm, yang termasuk dalam sistem tetragonal. Parameter kisi adalah $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, $a=b=0,473\text{ nm}$, $c=0,318\text{ nm}$. Sel satuan SnO₂ diilustrasikan pada Gambar 2.2(a). Penelitian menunjukkan bahwa rutile SnO₂ menghasilkan celah pita langsung yang terletak di titik-C zona Brillouin. Diagram khas struktur pita SnO₂ ditunjukkan pada Gambar 2.2(b). Celah pita SnO₂ dilaporkan dalam rentang referensi dari 3,5 hingga lebih dari 4,0 eV (bahkan hingga 4,4 eV untuk SnO₂) amorf, tergantung pada kondisi sintesis spesifiknya. SnO₂ memiliki pita konduksi (CB) sekitar 4,5 eV, yang lebih rendah dari CB sekitar 3,4-3,9 eV untuk semua bahan perovskit (Gambar 2.2(b)). Namun, CB SnO₂ yang rendah dapat mengurangi potensi penghalang Schottky bawaan antara perovskit dan SnO₂, sehingga menurunkan tegangan photovoltaic solar cell (Wali & Jose, 2019).



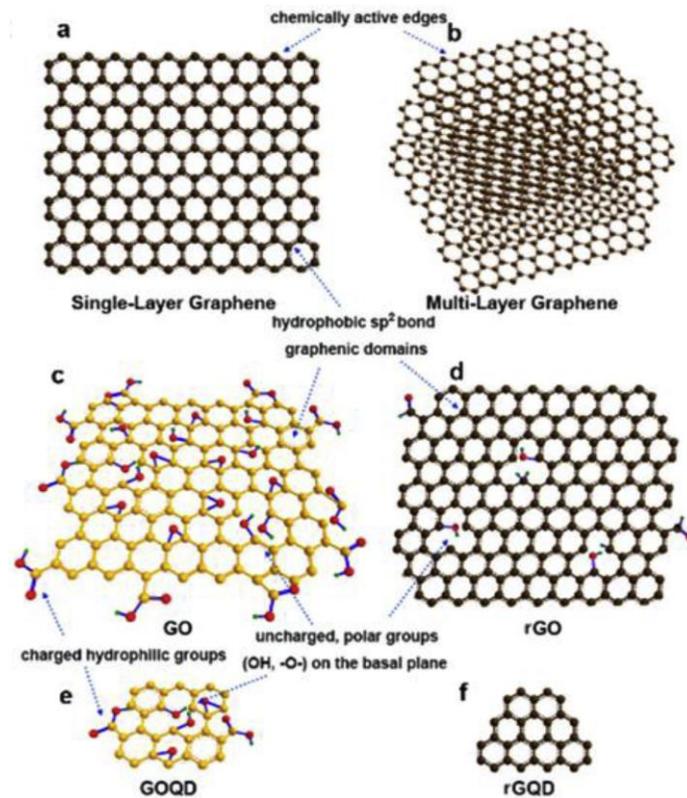
Gambar 2.1. (a) Struktur rutile SnO₂; (b) diagram pita energi (Wali & Jose, 2019)

Proses transport muatan menggunakan elektrolit yang mengandung kopel redoks ($I-I^3$). Selain itu, penggunaan *dye* yang mampu menyerap spektrum cahaya yang lebar dan cocok dengan pita energi SnO_2 merupakan karakteristik yang penting. Pada sel surya tersensitisasi *dye*, cahaya foton diserap oleh *dye* yang melekat pada permukaan partikel SnO_2 yang bertindak sebagai donor elektron dan berperan sebagai pompa fotoelektrokimia. Elektron-elektron dari level HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) dieksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi, LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) ketika molekul *dye* menyerap foton dengan energi yang sesuai, mirip dengan fungsi klorofil pada proses fotosintesis tumbuhan. Sedangkan lapisan SnO_2 bertindak sebagai akseptor atau kolektor elektron yang ditransfer dari *dye* yang teroksidasi.

Untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensinya, SnO_2 dimodifikasi dengan material yang lain membentuk nanokomposit, diantaranya SnO_2-TiO_2 , SnO_2-ZnO (Wali & Jose, 2019), SnO_2 -graphene (Sasikumar et al., 2018), SnO_2 -rGO (Gao et al., 2020). Graphene adalah nama lapisan tunggal atom karbon yang tersusun dalam kisi heksagonal kristalin dua dimensi (2D), karena hibridisasi karbon sp^2 . Graphene memiliki ikatan σ yang kuat di dalam bidang, dan berpengaruh pada kekuatan dan fleksibilitas mekaniknya yang tinggi. Graphene juga memiliki ikatan lemah π di luar bidang, yang berpengaruh pada sifat termal, muatan listrik, transparansi, dan graphene juga tidak tembus cahaya (Ammar et al., 2016).

2.3 Graphene oxide dan reduce Graphene oxide

Graphene oxide adalah bentuk graphene yang sangat teroksidasi dan umumnya diproduksi oleh oksidasi kimia dan pengelupasan grafit. Fungsi oksigen yang terkandung oleh GO didistribusikan secara acak pada lembaran dan terutama diidentifikasi sebagai gugus hidroksil, gugus epoksi dan gugus karboksil. Kehadiran gugus ini menimbulkan serangkaian cacat struktural dengan hilangnya beberapa sifat graphen. GO dapat dikelupas menggunakan proses sonikasi untuk membentuk suspensi koloid dari lapisan monolayer, lapisan dua lapis atau beberapa lapisan GO dalam pelarut yang berbeda. Yang berpengaruh dalam preparasi GO adalah pemilihan bahan pengoksidasi yang sesuai untuk mengoksidasi graphite (Alam et al., 2017).



Gambar 2.3 Bentuk graphene dan turunannya: (A) graphene single-layer, (B) graphene multilayer, (C) GO, (D) rGO, (E) GOQD, (F) rGQD (Smith et al., 2019)

Sintesis GO pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua kategori utama: metode bottom-up dimana molekul karbon sederhana digunakan untuk membangun graphene murni, dan metode top-down dimana lapisan turunan graphene diekstraksi dari sumber karbon, salah satunya adalah grafit. Sintesis bottom-up (seperti chemical vapor deposition (CVD), pertumbuhan epitaxial pada silikon karbida, dll.) membutuhkan waktu dan menghadapi tantangan skalabilitas. Oleh karena itu, fokus pada metode top-down, yang pertama kali menghasilkan GO dan/atau rGO, lebih populer untuk mewujudkan turunan graphene, terutama untuk digunakan dalam bahan nanokomposit. Sintesis pertama GO sering dikaitkan dengan Brodie, Staudenmaier, dan Hummers dan Offeman, yang masing-masing berasal dari grafit oksida melalui oksidasi grafit menggunakan berbagai teknik.

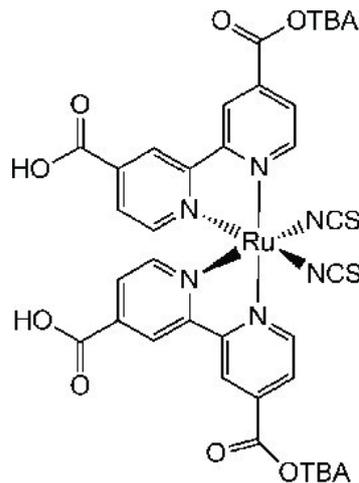
Dalam upaya untuk menghasilkan bahan dengan sifat yang hampir sama dengan graphene murni, penelitian mendalam telah dilakukan untuk menghilangkan

gugus fungsi oksigen pada GO. Reduksi ini dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu termal, kimia dan elektrokimia, yang masing-masing mengarah pada perbedaan morfologi dan sifat listrik. Faktor desain utama dalam reduksi GO meliputi rasio C/O dari produk akhir, selektivitas dalam menghilangkan satu jenis gugus oksigen (hidroksil, asam karboksilat, epoksi, dll.), penghilangan cacat permukaan GO dari oksidasi, dan pilihan zat pereduksi, serta mempertahankan atau meningkatkan sifat fisik dan kimia yang diinginkan dari GO (kekuatan mekanik, konduktivitas, sifat optik, kelarutan/dispersibilitas nanosheet)

Reduced graphene oxide (rGO) merupakan senyawa turunan grafene yang memiliki gugus fungsi oksigen yang lebih sedikit dibandingkan GO. Akan tetapi rGO juga tidak sama dengan grafena murni karena sejumlah oksigen masih tersisa didalamnya. Secara umum, rGO dihasilkan dari proses reduksi GO baik secara kimiawi, thermal ataupun elektrokimia. Dalam proses sintesis grafena skala besar, rGO menawarkan solusi yang menjanjikan karena proses produksinya relatif mudah untuk mendapatkan level kualitas grafena yang diinginkan.

2.4. Fotosensitizer (Dye N-719)

Fotosensitizer merupakan salah satu komponen utama untuk efisiensi konversi daya yang tinggi pada DSSC. Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan yang cukup besar telah dibuat dalam rekayasa struktur pewarna baru untuk meningkatkan kinerja sistem. Salah satunya adalah pewarna berbasis ruthenium. *Dye* tersebut memiliki kelebihan, diantaranya dapat meningkatkan pengikatan elektrostatis ke permukaan elektroda, penurunan muatan pada *dye* yang melemahkan gaya tolak elektrostatis diantara *dye* yang teradsorpsi sehingga meningkatkan pemuatan zat warna, meningkatkan stabilitas sel surya terhadap desorpsi pewarna, potensial oksidasi kompleks yang meningkatkan reversibilitas pasangan ruthenium III/II, yang mengarah pada peningkatan stabilitas DSSC. Salah satu jenis *dye* berbasis ruthenium yaitu N-719 dengan nama senyawa $C_{58}H_{86}N_8O_8RuS_2$ dengan struktur yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Struktur *dye* N-719 (Ellis-Gibbings et al., 2012)

2.5 Prinsip Kerja DSSC

Prinsip kerja DSSC dimulai dengan absorpsi cahaya oleh *dye* normal yaitu S yang menyerap foton menjadi S^+ (*ground state*) karena mendapat tambahan energi pada foton sebesar $h\nu$ maka S^+ akan terksitasi menjadi S^* (*excited state*). Sehingga foton dapat mengeksitasi elektron dari level HOMO ke level LUMO, dimana level LUMO terletak pada sisi ligan *dye* yaitu COOH (Portillo-Cortez et al., 2019):



Dye tereksitasi dan mengeluarkan fotoelektron untuk diinjeksikan menuju pita konduksi SnO_2 . SnO_2 dianggap sebagai semikonduktor tipe-n karena mendapat elektron dari *dye* sehingga SnO_2 mendapat tambahan elektron. Tahap selanjutnya fotoelektron yang terinjeksi bergerak sepanjang nanopartikel SnO_2 menuju sisi konduktif kaca atau anoda. Lapisan SnO_2 yang tipis menyebabkan fotoelektron yang tereksitasi tidak memerlukan perjalanan yang panjang untuk menuju anoda. Setelah mencapai anoda (sisi konduktif kaca), fotoelektron melewati kaca konduktif dan bermigrasi melalui rangkaian luar menuju elektroda pembanding atau katoda. Molekul *dye* yang tereksitasi dan mengeluarkan fotoelektron yaitu S^* yang kemudian teroksidasi dan berubah lagi menjadi S^+ menurut persamaan reaksi:



Selanjutnya, sejumlah fotoelektron yang bermigrasi melalui rangkaian luar menuju katoda mencapai elektroda pembanding dan setelah itu bergerak menuju elektrolit. Pergerakan elektron dari elektroda pembanding menuju elektrolit dapat

dipercepat dengan memanfaatkan karbon sebagai katalis. Elektrolit memiliki peran penting pada DSSC dengan kemampuannya mengalami reaksi reduksi sekaligus reaksi oksidasi. Elektrolit redoks yang sering digunakan berupa elektrolit cair berbasis iodine yang merupakan pasangan iodide dan triiodide (I^-/I_3^-) (Zainudin et al., 2019).

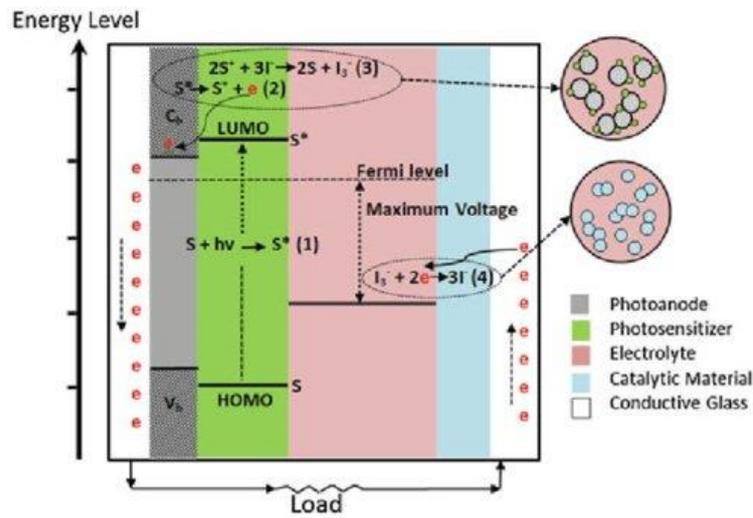
Penggunaan elektrolit cair ini memiliki kekurangan karena masih mengalami kebocoran dan cepat menguap. Untuk mengatasi hal tersebut, elektrolit cair diubah menjadi elektrolit gel dengan memanfaatkan bahan polimer. Polimer tersebut berfungsi sebagai semikonduktor tipe-p yang dapat mentransfer *hole*. Polimer yang sering digunakan adalah PEG (*polyethylene glycole*). Triiodide dari elektrolit yang terbentuk akan menangkap elektron yang berasal dari rangkaian luar dengan bantuan molekul karbon sebagai katalis. Sementara itu, iodide berperan untuk mereduksi *dye* yang telah mengalami oksidasi:



Proses reduksi *dye* yang dilakukan oleh iodide dari elektrolit menyebabkan terjadinya pergerakan *hole* dari molekul *dye* ke elektrolit dan pergerakan elektron dengan arah yang sebaliknya pada persambungan elektrolit dengan molekul *dye*, sehingga *dye* kembali ke keadaan awal dengan persamaan reaksi reduksi:

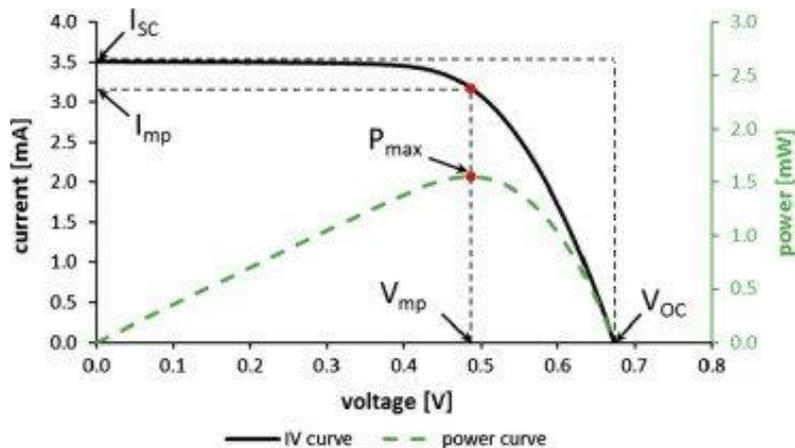


Dye normal (S) akan menyerap foton kembali sehingga terbentuk satu siklus transport elektron yang berulang-ulang dan karena adanya elektrolit pasangan I^-/I_3^- membuat siklus yang berulang tersebut terjadi dalam kurun waktu tertentu tergantung ketahanan elektrolit yang digunakan. Dengan siklus tersebut terjadi konversi langsung dari energi cahaya menjadi energi listrik (Portillo-Cortez et al., 2019).



Gambar 2.5. Mekanisme DSSC (Mansa et al., 2013)

Performa DSSC yang telah dirakit dapat dihitung efisiensinya dengan menggunakan parameter yang diperoleh dari pengujian, yang ditunjukkan pada kurva I-V pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Grafik karakteristik I-V pada DSSC (Hug et al., 2014)

Sebelum mendapatkan nilai efisiensi harus mengetahui besaran yang akan digunakan, yaitu tegangan *open circuit* (V_{oc}), arus *short circuit* (I_{sc}), tegangan maximum (V_m), arus maksimum (I_m), dan *fill factor* (FF). Perhitungan efisiensi menggunakan persamaan berikut (Banik et al., 2018):

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$P_{\max} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2.2)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{cahaya}} \cdot A} \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan:

P_{\max} = Daya Maksimum.

P_{cahaya} = Daya sinar matahari yang diukur melalui lux meter (Watt/m²).

A = Luas permukaan DSSC (m²).

V_{OC} = Tegangan pada saat hambatan maksimal (V).

I_{SC} = Arus pada saat hambatan minimal (A).

V_{MPP} = Tegangan pada saat daya maksimum (V).

I_{MPP} = Arus pada saat daya maksimum (A).

FF = *fill factor* (%).

η = Efisiensi (%).

Nilai efisiensi tersebut kemudian menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi suatu sel surya.

BAB III

METODE PENELITIAN

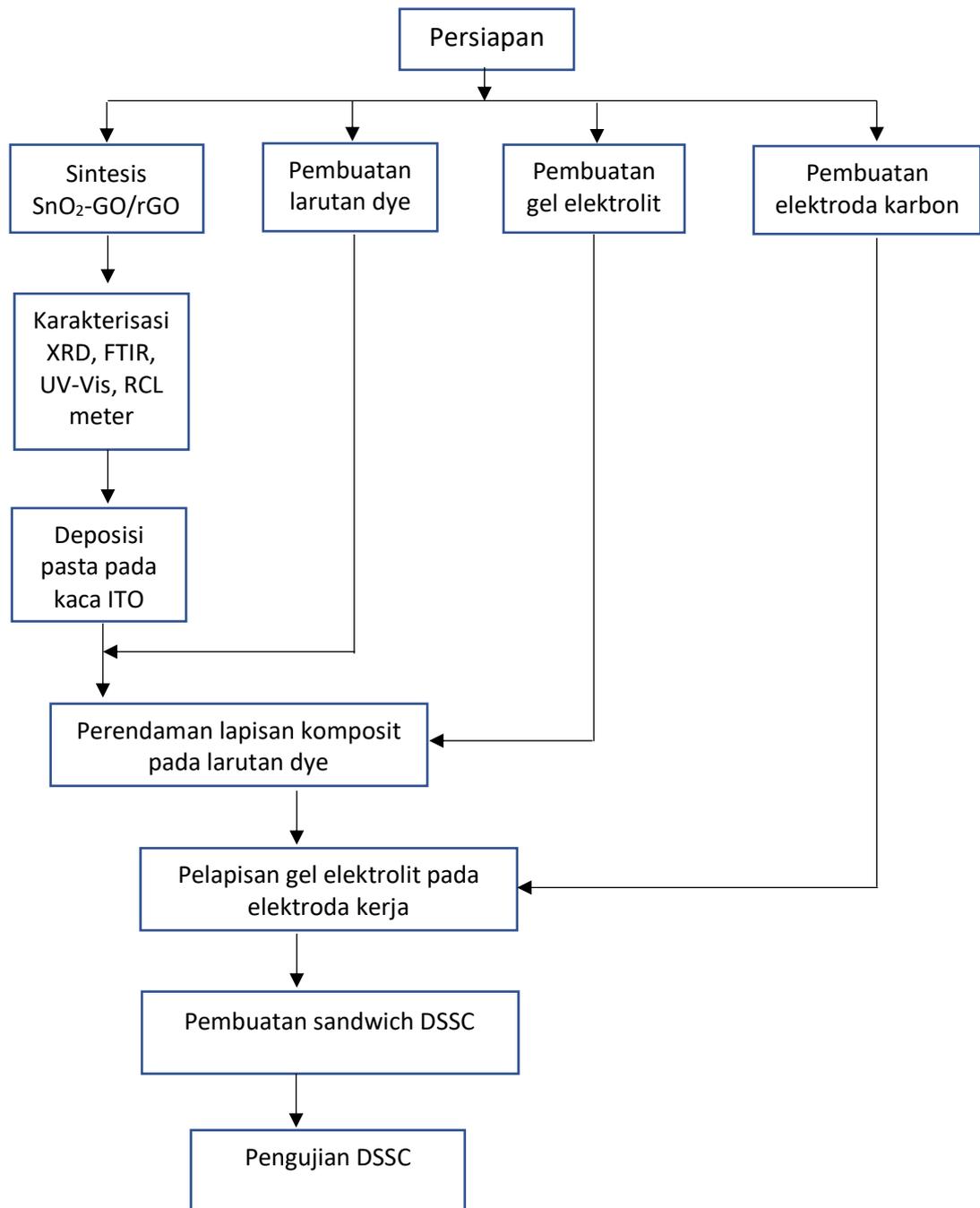
3.1 Bahan dan Alat

Bahan – bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah SnO₂, GO/rGO, ethanol, terpineol, ethyl cellulose, aquades, *dye* sintetis N-719, PEG 4000 (*Polyethylene Glycol*), KI, Acetonitril, Iodine, triton-X, kaca konduktif, karbon aktif.

Sedangkan peralatan yang digunakan meliputi Beaker glass, Gelas ukur, *Magnetik stirrer*, ultrasonic cleaner, oven, XRD, UV-Vis, FTIR (Fourier Transformation Infra Red), Keithley, solar simulator.

3.2 Langkah kerja

Secara umum, langkah kerja pada penelitian ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu pembuatan komposit SnO₂-GO/rGO, pendeposisian pasta komposit pada kaca ITO, pembuatan larutan *dye* berbahan dasar sintetis N-719, pembuatan elektrolit gel dan pembuatan elektroda pembanding, sebagaimana ditunjukkan pada diagram pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3 Pembuatan Pasta SnO₂

1. Serbuk SnO₂ sebanyak 2 gr dilarutkan ke dalam 20 mL ethanol. Larutan disonikasi menggunakan sonikasi bath selama 30 menit, kemudian dituang ke dalam mortar kemudian diaduk dan dihaluskan.
2. Sebanyak 0,25 gr PEG 10000 ditambahkan kedalam komposit dan diteteskan 0,7 mL Triton X-100 sampai terbentuk pasta
3. Pasta dipanaskan diatas hotplate dengan temperature 50 °C selama 15 menit, kemudian temperatur dinaikkan secara bertahap setiap 15 menit hingga mencapai temperatur 200 °C. Sampel diannealing pada temperatur 400 °C selama 60 menit.
4. Serbuk SnO₂ dikarakterisasi dengan XRD, FT-IR, UV-Vis, dan uji listrik.

3.4.2 Sintesis Pasta SnO₂-GO/rGO

Sampel GO/rGO disiapkan dengan menggunakan metode pada penelitian sebelumnya, yaitu variasi pada proses eksfoliasi kimia menggunakan aquades dan H₂SO₄ 1,5 M. Komposit SnO₂-GO/rGO dibuat dengan variasi komposisi 0, 1 dan 2 (% wt) dengan kode sampel S, SG-A1, SG-A2, SG-H1 dan SG-H2 yang secara berturut-turut merupakan sampel SnO₂ (tanpa GO/rGO), SnO₂-GO/rGO (aquades-1%), SnO₂-GO/rGO (aquades-2%), SnO₂-GO/rGO (H₂SO₄-1%), dan SnO₂-GO/rGO (H₂SO₄-2%). Pembuatan pasta komposit dilakukan dengan metode simple sonication method (hamad chema, 2019)

1. Pencampuran serbuk SnO₂ 2 gr dan serbuk GO/rGO A dan B dengan variasi komposisi 1 dan 2 wt%, kemudian dilarutkan ke dalam 20 mL ethanol.
2. Larutan disonikasi menggunakan sonikasi bath selama 30 menit, kemudian komposit SnO₂-GO/rGO dituang ke dalam mortar kemudian diaduk dan dihaluskan.
3. Sebanyak 0,25 gr PEG 10000 ditambahkan kedalam komposit dan diteteskan 0,7 mL Triton X-100 sampai terbentuk pasta
4. Pasta dipanaskan diatas hotplate dengan temperature 50°C selama 15 menit, kemudian temperature dinaikkan secara bertahap setiap 15 menit hingga

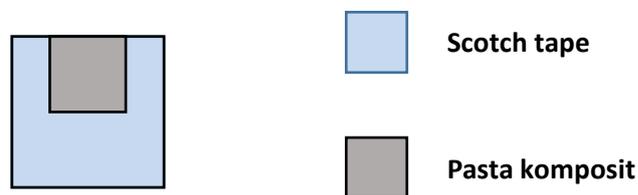
mencapai temperature 200°C. Sampel diannealing pada temperature 400°C selama 60 menit.

5. Serbuk komposit SnO₂-GO/rGO dikarakterisasi dengan XRD, FT-IR, UV-Vis, dan uji listrik.

3.2.2 Pendeposisian pasta komposit pada kaca ITO

Sebelum dideposisikan, kaca ITO dibersihkan dengan ultrasonic cleaner. Etanol sebanyak 200 ml digunakan untuk merendam kaca yang sudah dipotong dengan ukuran 2×2 cm². Gelas kimia yang berisi alkohol dan kaca ITO dimasukkan ke ultrasonic cleaner kemudian diatur waktu 60 menit. Setelah itu kaca dikeringkan. Pembersihan ini bertujuan agar kaca terbebas dari material-material pengotor yang mempengaruhi hasil pengujian dari sampel yang akan dilapiskan pada kaca substrat.

Pada penelitian ini komposit dideposisi pada Kaca ITO dengan menggunakan metode Doktor Blade. Pada sisi kaca ITO berukuran 2×2 cm² dibentuk area pembatas dari isolasi plastik untuk mendapatkan area pendeposisian pasta komposit dengan ukuran luasan 1×1 cm² juga sebagai kontrol ketebalan lapisan. Setelah pasta terdeposisi kemudian dipanaskan diatas hotplate dengan temperature 50 °C selama 15 menit, kemudian temperatur dinaikkan secara bertahap setiap 15 menit hingga mencapai temperature 200 °C. Sampel diannealing pada temperature 400 °C selama 60 menit.



Gambar 3.2 Proses pelapisan pasta komposit

3.2.3 Pembuatan Larutan Dye N-719 dan Perendaman Lapisan komposit

Larutan dye yang digunakan dalam penelitian ini adalah dye berbasis bahan sintesis yakni dye N-719, dimana 1,1 mg serbuk dye dilarutkan kedalam 20 mL ethanol dan diaduk menggunakan stirrer selama 10 menit. Larutan dye yang sudah terbentuk

dimasukkan ke dalam botol kemudian ditutup rapat. Selanjutnya elektroda kerja direndam pada 10 mL larutan dye selama 2 jam.

3.2.4 Pembuatan Elektrolit Gel

Elektrolit yang digunakan pada DSSC ini berupa elektrolit gel berbasis polimer PEG (polyethylene glycole) dengan berat molekul (BM) 4000. Larutan elektrolit (*Iodide/Triiodide*) cair dibuat dari campuran Kalium Iodida (KI) 3 gr yang dilarutkan pada 10 mL acetonitrile dan 3 mL Iodine. Kemudian diaduk menggunakan stirrer selama 15 menit. Sebanyak 7 gr PEG 4000 dan 25 mL klorofom ditambahkan ke dalam larutan, kemudian diaduk diatas hotplate 80 °C selama 1 jam hingga diperoleh elektrolit bersifat gel. Larutan disimpan di dalam tempat yang gelap dan tertutup rapat.

3.2.5 Pembuatan Elektroda Pembanding

Elektroda pembanding pada DSSC berupa kaca dengan permukaan konduktif yang dilapisi oleh grafit maupun karbon. Fungsi grafit maupun karbon adalah sebagai katalis yang mempercepat aliran elektron pada DSSC. Dalam penelitian ini akan digunakan black carbon, yakni sebanyak 3.5 g serbuk black carbon dilarutkan kedalam 15 mL ethanol. Larutan tersebut kemudian di deposisikan pada bagian konduktif kaca ITO. Setelah itu dipanaskan di atas hotplate pada suhu 150 °C selama 30 menit.



Gambar 3.3 Proses pelapisan karbon sebagai elektroda pembanding

3.2.6 Pembuatan Sandwich DSSC

Setelah substrat yang dilapisi bahan komposit telah menyatu dengan dye, larutan elektrolit yang diteteskan secara merata pada area sampel ukuran $1 \times 1 \text{ cm}^2$. DSSC dirakit menggunakan struktur sandwich yaitu kedua substrat (elektroda) yang telah

siap disatukan. Substrat fotoelektroda dilekatkan bersama-sama dengan substrat yang telah menjadi counter elektrode dengan masing-masing ujung diberi offset sebesar 0,5 cm sebagai kontak listrik. Substrat digabungkan bersama-sama menggunakan binder klip di bagian tepi untuk mendapatkan jumlah maksimum cahaya yang dapat diterima sel.

3.3 Karakterisasi Material

- a) Pengujian menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk identifikasi struktur kristal komposit SnO₂-GO/rGO
- b) Pengujian menggunakan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk pada komposit SnO₂-GO/rGO
- c) Pengujian menggunakan UV-Vis untuk mengetahui panjang gelombang serapan dan Energi gap yang dihasilkan
- d) Uji sifat listrik menggunakan Keithley

3.4 Pengujian Arus dan Tegangan (I-V) pada DSSC

Pengujian arus dan tegangan (I-V) dilakukan menggunakan alat solar simulator dengan keluaran merupakan nilai arus dan tegangan. Intensitas sinar diukur menggunakan luxmeter.

3.5 Rencana Analisis Data

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah data pengujian fisis, sifat listrik dan aplikasi pada DSSC. Pengujian sifat fisis menghasilkan data struktur kristal, fasa yg terbentuk, morfologi permukaan, komposisi dan energi gap. Pengujian sifat listrik menghasilkan data konduktivitas listrik sampel, sedangkan uji performa DSSC didapatkan data I dan V.

Hasil pengujian difraksi sinar X (XRD) akan dianalisis menggunakan software Match! untuk menunjukkan fasa yang dihasilkan, dengan teknik mencocokkan hasil dan database kristal. Selain itu sampel diuji menggunakan FTIR. Hasil karakterisasi dengan grafik fungsi bilangan gelombang dan transmitansi digunakan untuk menentukan gugus fingsi dari komposit.

Tabel 1. Contoh tabel data hasil uji menggunakan FTIR

Sampel	Bilangan gelombang	Gugus fungsi
S		
SG-A1		
SG-A2		
SG-H1		
SG-H2		

Sampel diuji dengan spektrofotometer UV-Vis untuk mengetahui panjang gelombang serapan dan puncak absorbansi. Rentang panjang gelombang yang digunakan untuk uji UV-Vis berkisar pada 200-800 nm. Rentang panjang gelombang ini dipilih karena pengujian sampel menggunakan sinar UV yang berada pada rentang 200-400 nm dan sinar tampak (*Visible*) pada rentang 400-800 nm. Hasil pengujian akan dianalisis menggunakan persamaan dan kurva, untuk mendapatkan energi gap sampel.

Tabel 2. Contoh tabel data hasil pengujian UV-Vis

Sampel	Intensitas	Panjang Gelombang (nm)	Energi Gap (ev)
S			
SG-A1			
SG-A2			
SG-H1			
SG-H2			

Nilai konduktivitas listrik komposit diukur menggunakan LCR-meter. Sedangkan dari sel DSSC, yang dibuat dengan menganalisa parameter sel-surya seperti; Tegangan *open-circuit* (*Voc*), Arus *short circuit* (*Isc*), *Maximum Power Point* (*MPP*), tegangan dan arus pada *MPP* (*VMPP* dan *IMPP*), *Fill factor* (*FF*) dan Efisiensi. Teknik pengukuran pada DSSC ini adalah meletakkan *probe* kutub positif pada bagian elektroda pembanding yang merupakan katoda dari DSSC, sedangkan *probe* kutub negatifnya pada bagian elektroda kerja yang merupakan anoda dari DSSC. Elektron mengalir dari elektroda kerja menuju rangkaian luar selanjutnya elektron masuk melalui elektroda pembanding. Arus listrik yang mengalir dari elektroda pembanding ke rangkaian luar selanjutnya menuju elektroda kerja yang diukur oleh alat.

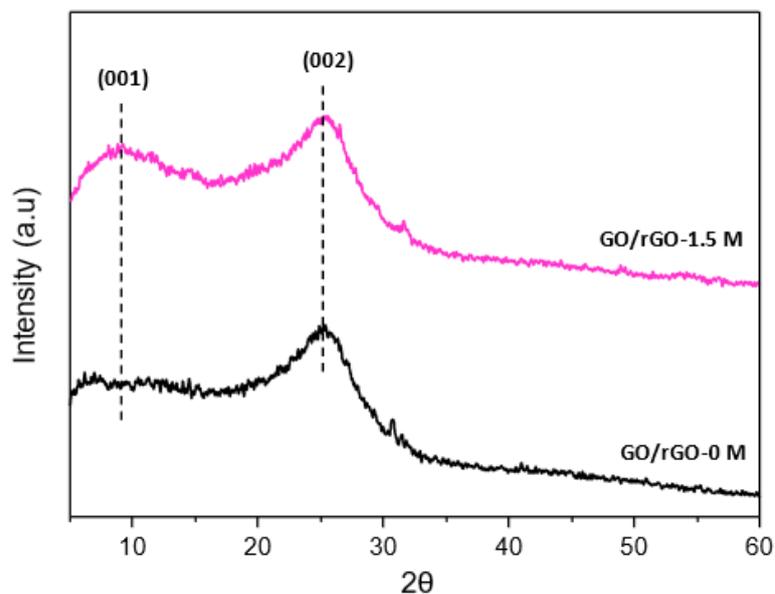
Tabel 3. Contoh tabel data hasil pengujian DSSC

Sampel	V_{oc}	I_{sc}	FF	Efisiensi
S				
SG-A1				
SG-A2				
SG-H1				
SG-H2				

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

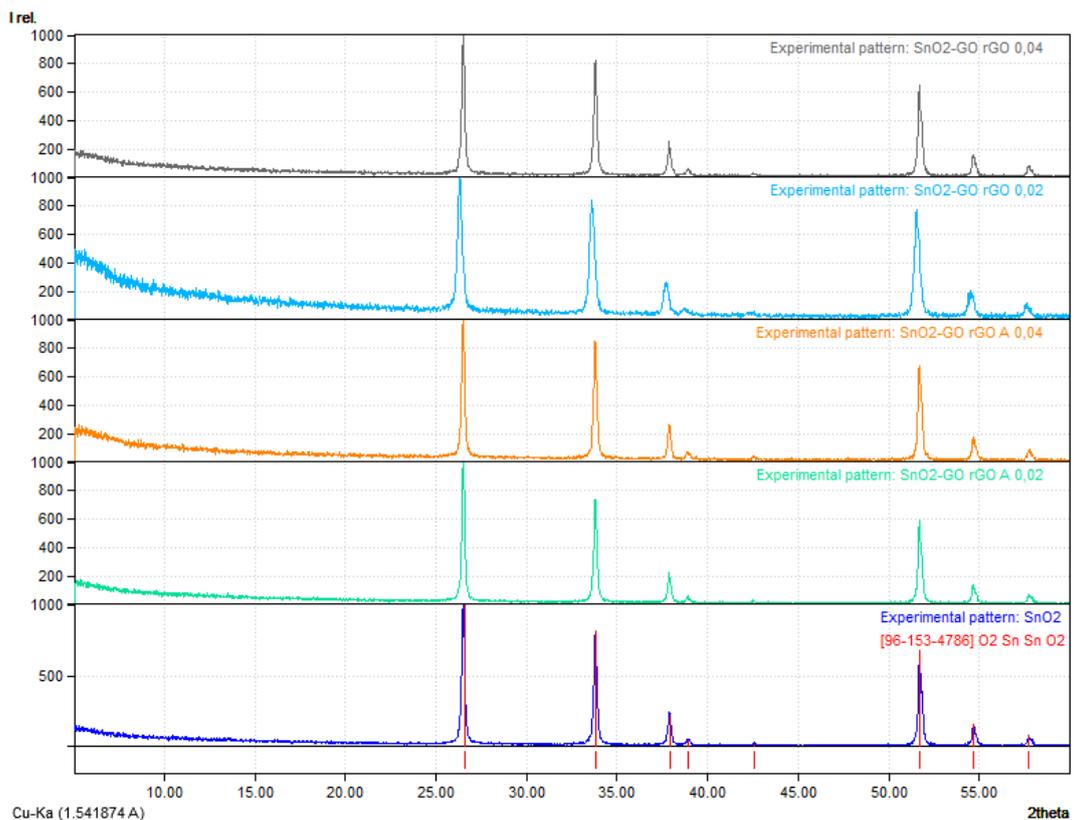
Sampel GO/rGO dibuat dari limbah bulu ayam yang dipanaskan melalui dua tahap karbonisasi yaitu temperature 250 °C selama 2 jam dan 400 °C selama 5 jam. Karbon yang didapatkan kemudian deksfoliasi dengan proses sonikasi menggunakan aquades dan H₂SO₄ dengan konsentrasi 1,5 M. Hasil uji menggunakan difraksi sinar X sampel GO/rGO ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Spektra difraksi sinar X sampel GO/rGO

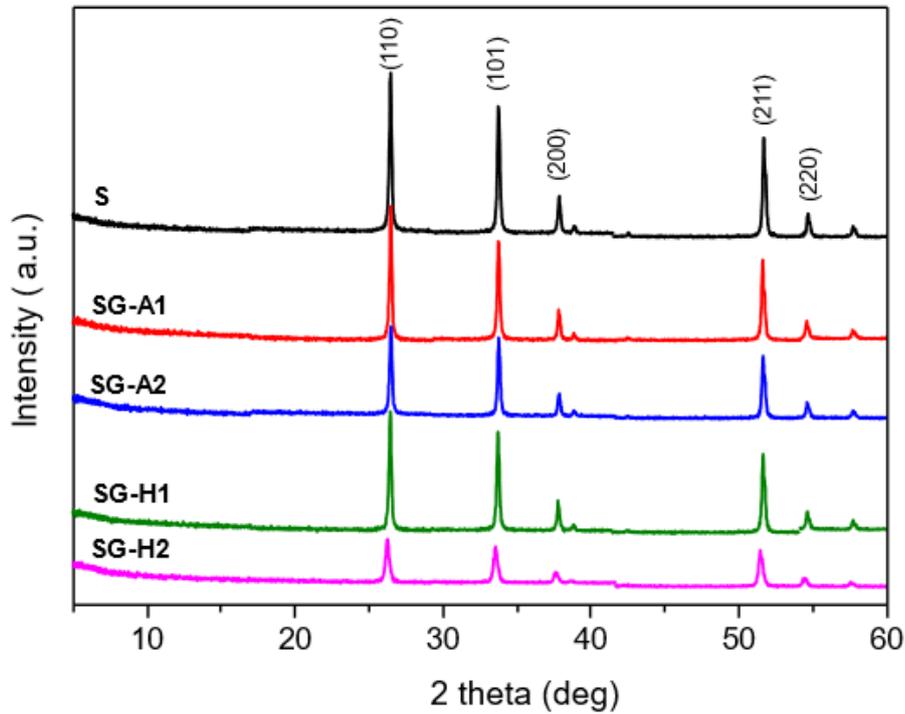
Proses pembuatan sel surya tersensitisasi pewarna dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu sintesis komposit SnO₂-GO/rGO, pen deposisian pasta komposit pada kaca konduktif, pembuatan elektroda karbon dan elektrolit gel. SnO₂ ditambahkan dengan GO/rGO yang dieksfoliasi menggunakan H₂O (0 M) dan H₂SO₄ (1,5 M) dengan variasi penambahan 1 dan 2 (%wt). Pasta hasil pencampuran kemudian dianealing pada temperature 400 °C selama 1 jam. Serbuk komposit kemudian diuji menggunakan difraksi sinar x (XRD).

Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh November. Gelombang yang digunakan yaitu Cu_K-alpha 1,54 Å dengan rentang pengukuran 2θ 5°-60°. Hasil pengujian XRD berupa grafik intensitas terhadap sudut difraksi 2θ . Spektra difraksi kemudian dianalisis menggunakan software Match untuk mengetahui fasa komposit yang terbentuk. Grafik XRD komposit SnO₂-GO/rGO dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil analisis spectra XRD menggunakan software Match

Dari hasil analisis, didapatkan bahwa seluruh puncak difraksi menunjukkan SnO₂ dengan fasa rutil, dengan struktur kristal tetragonal, Space Group: P 42/mnm dimana parameter kisi $a = 4,738 \text{ \AA}$, $b = 4,738 \text{ \AA}$, $c = 3.186 \text{ \AA}$ dan $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Puncak difraksi terbentuk pada $2\theta \sim 26^\circ, 33^\circ, 37^\circ, 51^\circ, 54^\circ$ dan 57° dengan indeks bidang (110), (101), (200), (211), (220) dan (002) yang secara detail ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil analisis puncak difraksi sinar X

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa penambahan GO/rGO pada SnO₂ tidak menyebabkan perubahan fasa, dan menyebabkan penurunan intensitas pada puncak-puncak SnO₂. Puncak GO/rGO tidak muncul dalam pola difraksi karena memiliki struktur yang amorf. Untuk mendapatkan informasi lebih lanjut tentang pengaruh penambahan GO/rGO pada SnO₂, ukuran kristal dari semua sampel dihitung menggunakan persamaan Debye-Scherrer, dari pola difraksi yang sesuai sebagai berikut:

$$D_{(hkl)} = \frac{K\lambda}{\beta_{hkl} \cos\theta}$$

Sedangkan nilai microstrain dihitung menggunakan persamaan :

$$\varepsilon = \frac{\beta_{hkl} \times \cos\theta}{4}$$

Perhitungan densitas dislokasi (δ) yang menunjukkan jumlah cacat pada sampel, didefinisikan sebagai panjang garis dislokasi per volume unit kristal dan telah dihitung menggunakan persamaan:

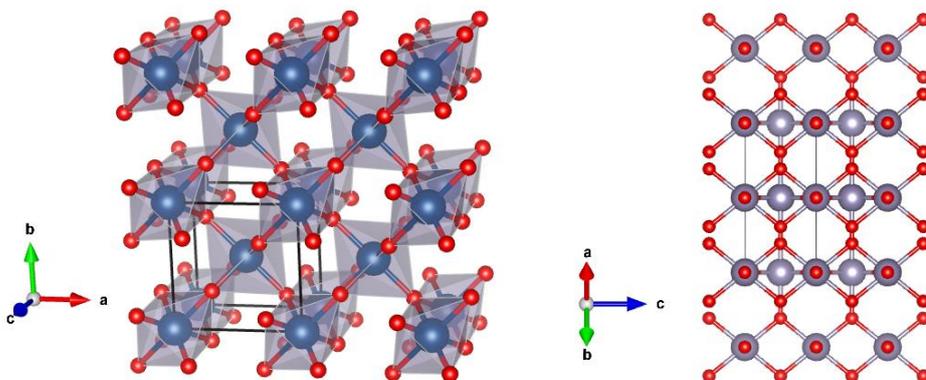
$$\delta = \frac{1}{D^2}$$

Dimana D adalah ukuran kristal, λ adalah panjang gelombang sinar Cu-K yang datang ($\lambda = 0,154$ nm), θ adalah sudut Bragg yang sesuai, β_{hkl} adalah lebar setengah tinggi puncak (hkl) yang dikoreksi (FWHM), dan K adalah faktor bentuk dengan nilai konstanta 0,9. Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil analisis data spectra XRD pada bidang (110)

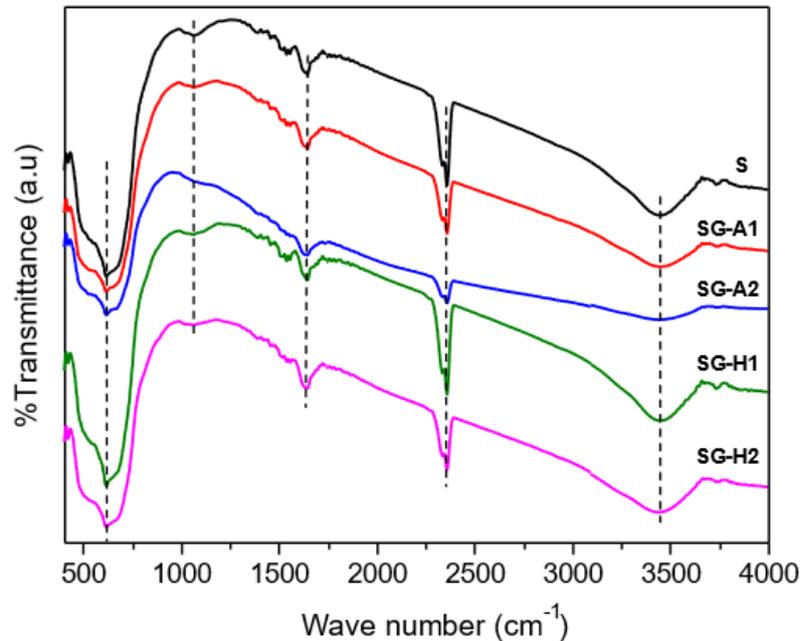
Sampel	D (nm)	$d_{(110)}$ (Å)	Mikrostrain (ϵ) (10^{-3})	Densitas dislokasi (δ) (garis/nm ²)
S	41,805	3,365	1,105	0,000572
SG-A1	39,594	3,364	1,158	0,000637
SG-A2	35,543	3,366	1,308	0,000791
SG-H1	41,806	3,362	1,078	0,000572
SG-H2	39,576	3,392	1,458	0,000638

Dari tabel 4.1, didapatkan nilai ukuran kristal yang menurun dengan penambahan GO/rGO, dengan terkecil pada SG-A2 yaitu 35,543 nm. Sedangkan jarak antar bidang tertinggi ditunjukkan pada sampel SG-H2 yang menyebabkan dilai mikrostrain juga paling besar, yaitu $1,458 \times 10^{-3}$. Hal ini menunjukkan bahwa defect atau cacat di dalam sampel lebih banyak akibat penambahan GO/rGO. Struktur kristal SnO₂ dalam polihedra 3 dimensi dan bidang (110) ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Struktur kristal SnO₂

Analisis gugus fungsi sampel menggunakan FTIR spektrometri pada rentang bilangan gelombang 400-4000 cm^{-1} . Dari gambar 4.5, didapatkan pola puncak transmitansi pada sampel SnO_2 dan komposit $\text{SnO}_2\text{-GO/rGO}$.



Gambar 4.5 Spektra FTIR SnO_2 dan komposit $\text{SnO}_2\text{-GO/rGO}$

Pada karakterisasi Inframerah, interaksi di antara ion/molekul pada permukaan dengan nanostruktur menyebabkan perubahan frekuensi getaran. Data yang didapatkan kemudian dibandingkan dengan vibrasi molekul atau nanostruktur murni. Gambar 4.4 menunjukkan spektra FTIR sampel komposit $\text{SnO}_2\text{-GO/rGO}$. Mode frekuensi tinggi sekitar 615 cm^{-1} menunjukkan adanya getaran peregangan (stretching vibration) Sn-O. Peningkatan jumlah GO/rGO dalam sampel SnO_2 menyebabkan penurunan intensitas transmisi pada 615 cm^{-1} . Munculnya puncak pada daerah 2361 cm^{-1} menunjukkan ada interaksi permukaan sampel dengan CO_2 di udara. Penetapan puncak pada spectra FTIR ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 SnO₂ dan komposit SnO₂-GO/rGO

Puncak FT-IR (cm ⁻¹)					Mode getaran
S	SG-A1	SG-A2	SG-H1	SG-H2	
616,828	616,456	615,747	616,047	616,389	Peregangan getaran Sn-O-Sn
1065,151	1064,128		1063,083		peregangan getaran Sn-O
1545,079	1568,210		1543,066	1560,753	getaran O-H dikombinasikan dengan Sn
1648,894	1648,914	1647,407	1649,160	1648,282	Peregangan getaran C - H
2361,108	2361,357	2361,365	2361,142	2361,347	Peregangan O=C=O
3446,985	3448,039	3444,965	3445,709	3444,059	O-H peregangan getaran air permukaan
			3868,294	3903,752	Getaran C-OH

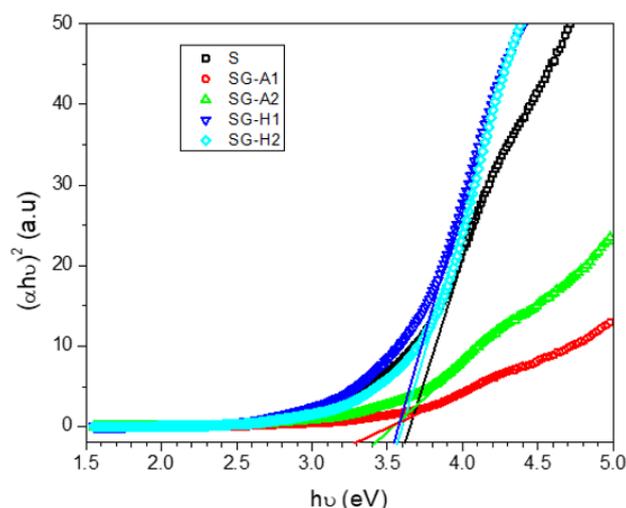
Kualitas elektroda semikonduktor dipengaruhi oleh energi gap. Pada penelitian ini, digunakan spektrofotometri UV-Vis untuk menentukan nilai band gap. Data yang diperoleh dari pengujian UV-Vis ini berupa nilai absorbansi (A) dan panjang gelombang (λ). Metode tauc plot digunakan untuk menentukan nilai band gap direct dan indirect dengan memasukkan nilai absorbansi (A) dan panjang gelombang (λ) dalam persamaan :

$$hv = \frac{1240}{\lambda}$$

$$\alpha = 2,303 A$$

$$\text{band gap direct} = (\alpha hv)^2$$

Data yang didapatkan kemudian dibuat plot grafik hubungan antara hv dan energi gap *direct*. Nilai energi gap didapatkan dengan membuat garis ekstrapolasi yang memotong sumbu x. Hasil plot energi gap *direct* ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Plot grafik band gap *direct* komposit SnO₂-GO/rGO

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa dari hasil ekstrapolasi, didapatkan nilai energi gap tiap sampel berbeda. Nilai energi gap *direct* ditunjukkan pada tabel 4.3. Energi gap pada SnO₂ didapatkan nilai 3,62 eV. Penambahan GO/rGO pada SnO₂ menyebabkan nilai energi gap menurun, dengan nilai terkecil didapatkan pada sampel SGA-1 dengan $E_g = 3,3$ eV.

Tabel 4.3 Nilai energi gap direct material komposit SnO₂-GO/rGO.

Nama Sampel	Energi gap <i>Direct</i> (eV)
S	3.62
SG-A1	3.3
SG-A2	3.4
SG-H1	3.54
SG-H2	3.56

Salah satu yang mempengaruhi kualitas elektroda kerja pada DSSC adalah konduktivitas material. Pada penelitian ini, pengukuran konduktivitas dilakukan pada sampel dengan menggunakan kethley dengan tegangan DC. Didapatkan nilai arus (I) dan tegangan (V), kemudian dihitung nilai R (hambatan), ρ (hambatan jenis) dan σ (konduktivitas). Persamaan yang digunakan yaitu:

$$R = \frac{V}{I}$$

$$\rho = \frac{RA}{t}$$

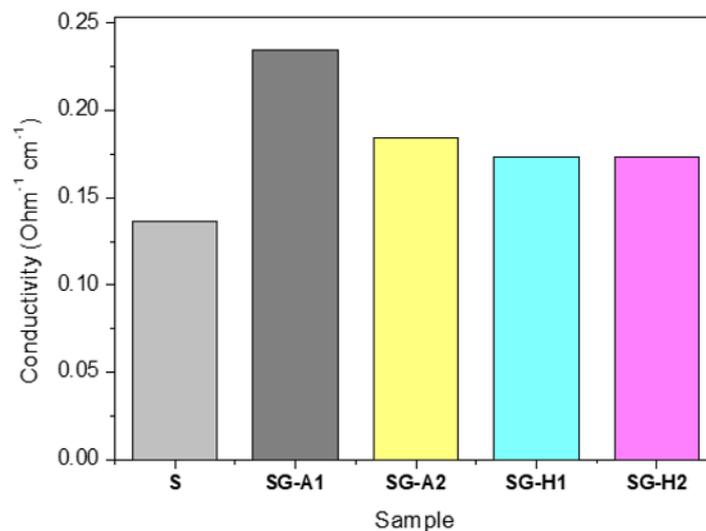
$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Dimana, V adalah tegangan, I adalah arus, R adalah hambatan, ρ adalah hambatan jenis dan σ adalah konduktivitas. Nilai hasil pengukuran dan perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai hasil pengukuran dan perhitungan sifat listrik komposit

Sampel	I (mA)	V (Volt)	R (Ω)	ρ (Ω .cm)	σ (Ω .cm) ⁻¹
S	70	186,98	2,671143	7,340192	0,136236
SG-A1	70	108,6	1,551429	4,265087	0,234462
SG-A2	70	138,2	1,974286	5,427579	0,184244
SG-H1	70	146,86	2,098	5,76533	0,173451
SG-H2	70	147,02	2,100286	5,769257	0,173333

Nilai konduktivitas listrik tiap sampel berbeda, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik konduktivitas material komposit SnO_2 -GO/rGO.

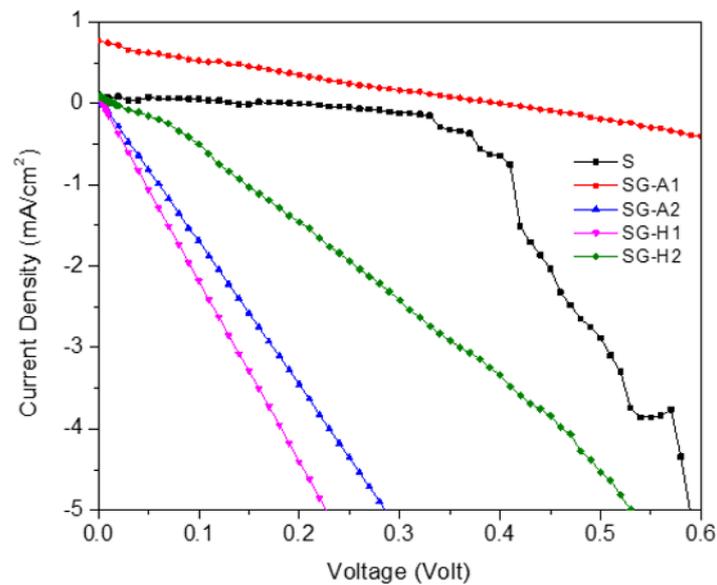
Gambar 4.7 menunjukkan bahwa penambahan GO/rGO meningkatkan nilai konduktivitas, dengan nilai paling tinggi adalah pada sampel SG-A1 (SnO_2 -GO/rGO aquadest 1%) yaitu sebesar 0,234 S/cm.

Karakterisasi performa DSSC dilakukan dengan pengujian Solar Simulator di Laboratorium Material Bersama Universitas Negeri Malang. Data yang diperoleh dari pengujian ini diantaranya adalah nilai I_{SC} , V_{OC} , I_{MPP} , dan V_{MPP} dengan luas penampang sel surya adalah 1 cm^2 . Dari pengujian tersebut didapatkan nilai I-V yang ditunjukkan pada gambar 4.8. Selanjutnya data akan diolah untuk mendapatkan nilai *Fill factor* (FF) dan efisiensi sampel. Untuk menentukan nilai FF dan efisiensi sampel dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$P_{\max} = V_m \cdot I_m$$

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \times 100\%$$

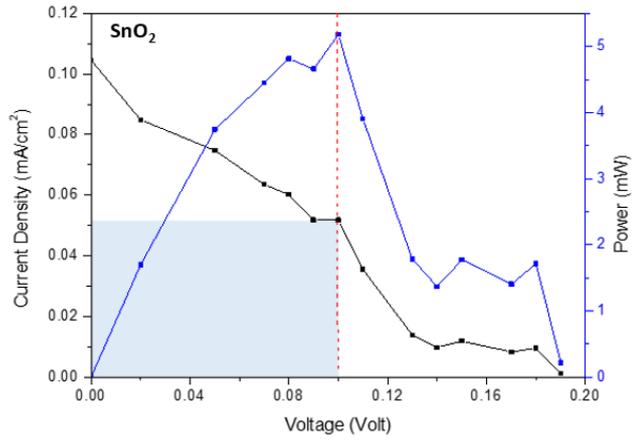
$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{cahaya}} \cdot A} \times 100\%$$



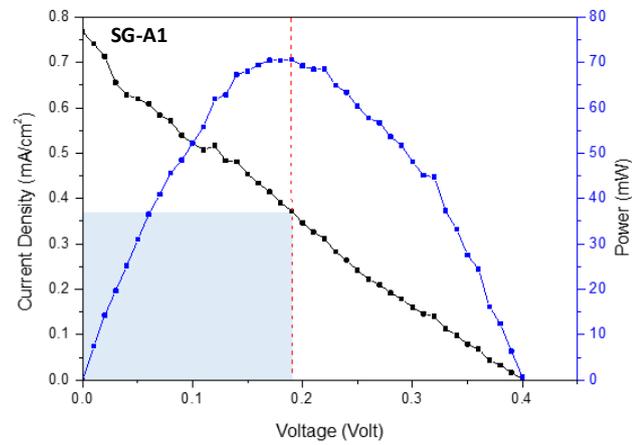
Gambar 4.8 Plot Grafik I-V DSSC

Berikutnya, dibuat grafik fungsi I-V arus dan daya untuk menentukan nilai P_{\max} dan V_{OC} di dalam sampel yang ditunjukkan pada gambar 4.9.

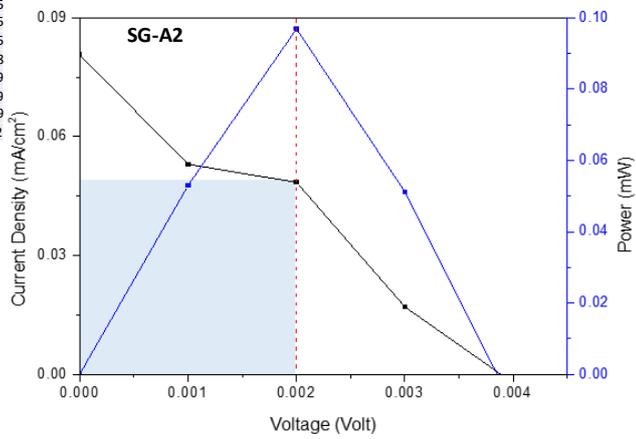
Isc / mA	0,1045772
Jsc / mA cm ⁻²	0,1045772
Voc / V	0,191821521
Fill Factor	0,25829164
Efficiency / %	0,005181371
Pmax / mW	0,005181371
Imax / mA	0,05181371
Vmax / V	0,1

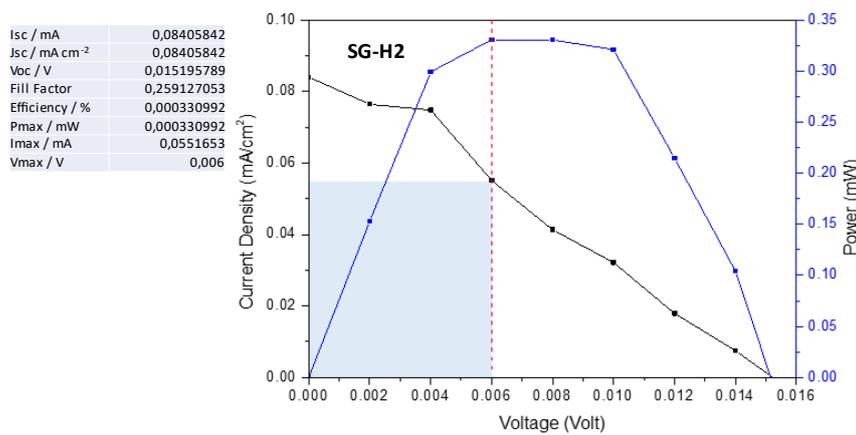
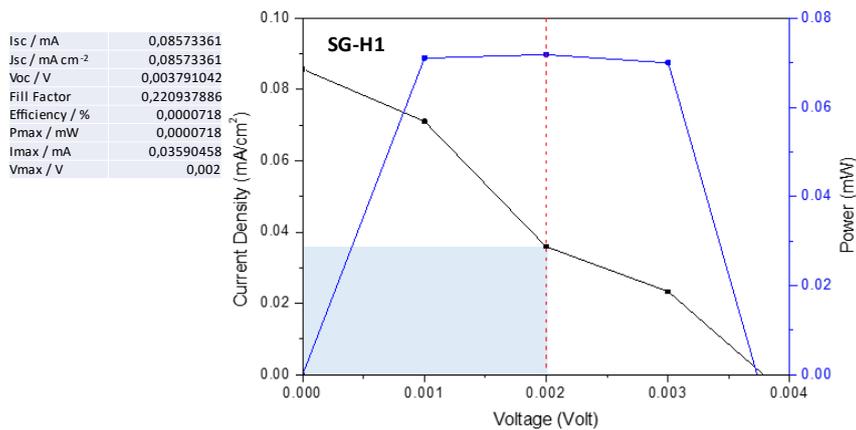


Isc / mA	0,7670816
Jsc / mA cm ⁻²	0,7670816
Voc / V	0,400760685
Fill Factor	0,230024391
Efficiency / %	0,070713212
Pmax / mW	0,070713212
Imax / mA	0,3721748
Vmax / V	0,19



Isc / mA	0,08070905
Jsc / mA cm ⁻²	0,08070905
Voc / V	0,003899015
Fill Factor	0,308035468
Efficiency / %	0,0000969
Pmax / mW	0,0000969
Imax / mA	0,04846719
Vmax / V	0,002





Gambar 4.9 Plot Grafik I-V dan daya DSSC

Dari hasil perhitungan pada tiap gambar, kemudian dirangkum nilai yang didapatkan pada analisis performa DSSC, yang dituliskan pada table 4.6.

Tabel 4.1 Performa DSSC komposit SnO₂-GO/rGO

Sampel	I _{sc} (mA)	V _{oc} (V)	P _{max} (mW)	FF (%)	η (%)
S	0,104	0,192	0,0052	0,258	0,0052
SG-A1	0,767	0,401	0,0707	0,230	0,0707
SG-A2	0,081	0,004	0,0001	0,308	0,0001
SG-H1	0,086	0,004	0,0001	0,221	0,0001
SG-H2	0,084	0,015	0,0003	0,259	0,0003

Pada tabel 4.6 menunjukkan bahwa DSSC dengan elektroda kerja komposit SnO₂-GO/rGO mempunyai kinerja yang lebih baik dari pada DSSC dengan elektroda SnO₂ murni.

4.2 Pembahasan

DSSC atau *Dye Sensitized Solar Cell* merupakan teknologi konversi yang mudah dalam fabrikasi dan fitur yang dapat dimodifikasi seperti warna dan transparansinya. Dalam pembuatan DSSC, material komposit SnO₂-GO/rGO digunakan sebagai elektroda kerja. Material komposit SnO₂-GO/rGO dibuat dalam bentuk serbuk dan pasta. Karakterisasi material komposit dalam bentuk serbuk dilakukan menggunakan XRD, FTIR, UV-Vis, dan sifat listrik. Sedangkan pada uji performa DSSC, komposit dalam bentuk pasta dilapiskan pada kaca konduktif sebagai elektroda kerja. Hasil spektra XRD menunjukkan bahwa seluruh puncak yang terbentuk merupakan fasa SnO₂ tetragonal. Penambahan GO/rGO tidak menunjukkan terbentuknya puncak baru, namun intensitas puncaknya berkurang seiring dengan bertambahnya komposisi GO/rGO. Hal ini berpengaruh terhadap rata-rata ukuran kristal (D), mikrostrain dan densitas dislokasi yang didapatkan.

Fasa GO/rGO tidak terlihat apabila hanya menggunakan uji XRD karena termasuk material yang amorf, sehingga dilakukan pengujian gugus fungsi menggunakan FTIR. Analisa data FTIR menunjukkan pada sampel SnO₂ gugus fungsi yang terbentuk adalah O-H, S=O, Sn-O, dan O-Sn-O. gugus fungsi S=O, Sn-O, dan O-Sn-O menunjukkan material SnO₂. Sedangkan pada material komposit SnO₂-GO/rGO terbentuk gugus fungsi O-H, C=O, C=O, C-H, dan O-Sn-O. Gugus fungsi C=C pada menunjukkan adanya rGO di dalamnya, gugus fungsi C-H menunjukkan adanya keratin pada sampel, dan gugus fungsi O-Sn-O menunjukkan adanya SnO₂.

Hasil analisis UV-Vis menunjukkan bahwa penambahan GO/rGO pada SnO₂ menyebabkan penurunan nilai energi gap sampel, dari 3,62 eV (SnO₂). Energi gap terkecil pada sampel SG-A1 yaitu 3,3 eV. Nilai energi gap ini mempengaruhi nilai konduktivitas listrik sampel. Semakin kecil nilai energi gap, akan menyebabkan electron lebih mudah berpindah dari pita valensi ke pita konduksi sehingga konduktivitas listriknya semakin meningkat.

Performa DSSC menunjukkan kinerja yang baik pada material komposit SnO₂-GO/rGO. Hal ini disebabkan oleh penyerapan *dye* oleh elektroda komposit SnO₂-GO/rGO lebih banyak dan SnO₂ dapat mengurangi rekombinasi elektron yang ada. SnO₂ membantu untuk mengoptimalkan proses transfer dan pemisahan muatan sehingga arus yang dihasilkan semakin besar. Selain itu, permukaan yang berpori mempengaruhi banyaknya *dye* yang terserap. Sedangkan penambahan GO/rGO dapat meningkatkan konduktivitas listrik sehingga dapat meningkatkan efisiensi pada sampel.

Secara keseluruhan, efisiensi DSSC masih dibawah 1%. Hal ini dikarenakan kecilnya arus keluaran yang dihasilkan salah satunya disebabkan oleh belum optimalnya fungsi *dye* dalam pembangkitan dan injeksi elektron ke lapisan elektroda komposit SnO₂-GO/rGO, karena konsentrasi *dye* yang menempel pada permukaan partikel semikonduktor SnO₂ sangat kecil sehingga jumlah elektron yang dibangkitkan juga sedikit. Adsorpsi zat warna pada permukaan partikel SnO₂-GO/rGO tidak maksimal sehingga menyebabkan proses transfer elektron dari *dye* tidak teroksidasi secara optimal. Arus yang dihasilkan oleh DSSC terkait langsung dengan jumlah elektron yang terlibat dalam proses konversi dan bergantung pada intensitas penyinaran serta kinerja *dye* yang digunakan (Li B *et al*, 2006).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan :

1. Penambahan GO/rGO pada SnO₂ berpengaruh terhadap sifat fisis sampel. Fasa nanokomposit SnO₂-GO/rGO tidak berubah, tetapi intensitas spektra XRD, ukuran kristal menurun sedangkan mikrostrain dan densitas dislokasi menurun. Adanya GO/rGO didalam komposit ditunjukkan dari gugus fungsi C-H dan O=C=O pada bilangan gelombang sekitar 1468 cm⁻¹ dan 2361 cm⁻¹.
2. Pada hasil analisis data UV Vis, didapatkan nilai energi gap sampel menurun dan nilai terkecil didapatkan pada sampel SG-A1 yaitu 3,3 eV dan terbesar pada S dengan nilai 3,62 eV. Nilai ini konsisten dengan nilai pengukuran sifat listrik, dengan konduktivitas terbesar yaitu 0,234 S/cm pada SG-A1 (SnO₂ dan GO/rGO dengan eksfoliasi akuades (1%)) dan terkecil yaitu 0,136 S/cm pada S (SnO₂).
3. Performa DSSC ditunjukkan dari nilai efisiensi devais. Efisiensi tertinggi sebesar 0,7 % pada sampel SG-A1.

5.2 Saran

Nilai efisiensi DSSC masih terlalu kecil, yang kemungkinan dipengaruhi oleh beberapa factor, diantaranya jenis dye, elektrolit dan elektroda pembanding. Penelitian selanjutnya diharapkan lebih mengeksplorasi komponen DSSC untuk mendapatkan hasil dan performa DSSC yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, S. N., Sharma, N., & Kumar, L. (2017). Synthesis of Graphene Oxide (GO) by Modified Hummers Method and Its Thermal Reduction to Obtain Reduced Graphene Oxide (rGO)*. *Graphene*, 06(01), 1–18. <https://doi.org/10.4236/graphene.2017.61001>
- Ammar, A., Al-Enizi, A. M., AlMaadeed, M. A., & Karim, A. (2016). Influence of graphene oxide on mechanical, morphological, barrier, and electrical properties of polymer membranes. *Arabian Journal of Chemistry*, 9(2), 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.07.006>
- Banik, A., Ansari, M. S., & Qureshi, M. (2018). Efficient Energy Harvesting in SnO₂-Based Dye-Sensitized Solar Cells Utilizing Nano-Amassed Mesoporous Zinc Oxide Hollow Microspheres as Synergy Boosters. *ACS Omega*, 3(10), 14482–14493. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02520>
- Bykkam, S., Prasad, D., Maurya, M., Sadasivuni, K., & Cabibihan, J.-J. (2021). Comparison Study of Metal Oxides (CeO₂, CuO, SnO₂, CdO, ZnO and TiO₂) Decked Few Layered Graphene Nanocomposites for Dye-Sensitized Solar Cells. *Sustainability*, 13(14), 7685. <https://doi.org/10.3390/su13147685>
- Du, F., Yang, B., Zuo, X., & Li, G. (2015). Dye-sensitized solar cells based on low-cost nanoscale SnO₂@RGO composite counter electrode. *Materials Letters*, 158, 424–427. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.06.012>
- Ellis-Gibbings, L., Johansson, V., Walsh, R. B., Kloo, L., Quinton, J. S., & Andersson, G. G. (2012). Formation of N719 Dye Multilayers on Dye Sensitized Solar Cell Photoelectrode Surfaces Investigated by Direct Determination of Element Concentration Depth Profiles. *Langmuir*, 28(25), 9431–9439. <https://doi.org/10.1021/la300077g>
- Gao, X., Tang, Z., Meng, M., Yu, Q., Zhu, Y., Shen, S., & Yang, J. (2020). Synthesis of crumpled SnO₂/rGO nanocomposites with 2D-in-3D structure and high performance. *Materials Chemistry and Physics*, 253, 123298. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123298>

- Hug, H., Bader, M., Mair, P., & Glatzel, T. (2014). Biophotovoltaics: Natural pigments in dye-sensitized solar cells. *Applied Energy*, *115*, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.055>
- Ibn-Mohammed, T., Koh, S. C. L., Reaney, I. M., Acquaye, A., Schileo, G., Mustapha, K. B., & Greenough, R. (2017). Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*, 1321–1344. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>
- Kawade, A. N., Bhujbal, P. K., Supekar, A. T., Pathan, H. M., & Sonawane, K. M. (2020). Eosin-Y sensitized tin oxide (SnO₂): Fabrication and its analysis. *Optik*, *216*, 164968. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164968>
- Mansa, R. F., Yugis, A. R. A., Liow, K. S., Chai, S. T. L., Ung, M. C., Dayou, J., & Sipaut, C. S. (2013). A Brief Review on Photoanode, Electrolyte, and Photocathode Materials for Dye-Sensitized Solar Cell Based on Natural Dye Photosensitizers. In R. Pogaku, A. Bono, & C. Chu (Eds.), *Developments in Sustainable Chemical and Bioprocess Technology* (pp. 313–319). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6208-8_37
- Portillo-Cortez, K., Martínez, A., Dutt, A., & Santana, G. (2019). N719 Derivatives for Application in a Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC): A Theoretical Study. *The Journal of Physical Chemistry A*, *123*(51), 10930–10939. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.9b09024>
- Radziuk, D., & Möhwald, H. (2016). Ultrasonically treated liquid interfaces for progress in cleaning and separation processes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *18*(1), 21–46. <https://doi.org/10.1039/C5CP05142H>
- Sasikumar, R., Chen, T.-W., Chen, S.-M., Rwei, S.-P., & Ramaraj, S. K. (2018). Developing the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells (DSSCs) using a SnO₂-doped graphene oxide hybrid nanocomposite as a photo-anode. *Optical Materials*, *79*, 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.03.059>
- Smith, A. T., LaChance, A. M., Zeng, S., Liu, B., & Sun, L. (2019). Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and

their nanocomposites. *Nano Materials Science*, 1(1), 31–47.

<https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.004>

Wali, Q., & Jose, R. (2019). SnO₂ dye-sensitized solar cells. In *Nanomaterials for Solar Cell Applications* (pp. 205–285). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813337-8.00007-2>

Xiong, L., Guo, Y., Wen, J., Liu, H., Yang, G., Qin, P., & Fang, G. (2018). Review on the Application of SnO₂ in Perovskite Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 28(35), 1802757. <https://doi.org/10.1002/adfm.201802757>

<https://doi.org/10.1002/adfm.201802757>

Zainudin, S. N. F., Abdullah, H., & Markom, M. (2019). Electrochemical studies of tin oxide based-dye-sensitized solar cells (DSSC): A review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(6), 5342–5356.

Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 30(6), 5342–5356.

<https://doi.org/10.1007/s10854-019-00929-6>

Zhang, Y., Qi, T., Wang, Q., Zhang, Y., Wang, D., & Zheng, W. (2017). Preparation of SnO₂/rGO Photoanode and Its Effect on the Property of Dye-Sensitized Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(1), 399–403.

IEEE Journal of Photovoltaics, 7(1), 399–403.

<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2627620>

LAMPIRAN

