

**GRAFIN SATU LAPISAN–POLIPIROL DISEDIAKAN
MELALUI TEKNIK KRONOAMPEROMETRI
SEBAGAI ELEKTROD LAWAN BAGI
SEL SURIA TERPEKA PEWARNA**

SYAZWANI AMIRAH BINTI SALLEH

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

GRAFIN SATU LAPISAN–POLIPIROL DISEDIAKAN MELALUI TEKNIK
KRONOAMPEROMETRI SEBAGAI ELEKTROD LAWAN BAGI
SEL SURIA TERPEKA PEWARNA

SYAZWANI AMIRAH BINTI SALLEH

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH
IJAZAH DOKTOR FALSAFAH

INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO DAN NANOELEKTRONIK
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2026

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/ DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN

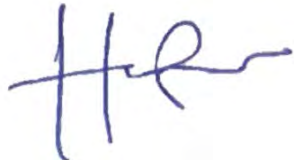
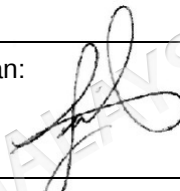
Bil. No	Perkara / Items	Senarai Semak (√) Check List
1.	Mematuhi Panduan Menulis Tesis Gaya UKM (Sila layari https://www.ukm.my/akademik/pelajar-pascasiswazah/) <i>Comply with the UKM Style Guide.</i> (Please visit https://www.ukm.my/akademik/pelajar-pascasiswazah/)	✓
2.	Borang Perakuan Tesis / Disertasi Sarjana / Doktor Falsafah dimasukkan bersama tesis akhir dalam bentuk salinan lembut <i>Insert the Certification of Master's/ Doctoral Thesis/ Dissertation with the final thesis/dissertation in soft copy form.</i>	✓
3.	Menyerahkan salinan tesis / disertasi versi akhir (salinan lembut) kepada Fakulti / Institut dan Perpustakaan mengikut keperluan masing-masing <i>Submit the final version of the thesis/ dissertation (soft copy) to the Faculty/Institute and Library according to their respective requirements.</i>	✓
4.	Menyerahkan salinan tesis / disertasi versi akhir kepada semua penyelia <i>Submit a copy of the final version of the thesis/ dissertation to all supervisors.</i>	✓
5.	Menyerahkan salinan syarat penerbitan <i>Submit the proof of publication requirements.</i>	✓

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

**BORANG PENYERAHAN TESIS/DISERTASI YANG TELAH DIBUAT PEMBETULAN
AMENDED THESIS/ DISSERTATION SUBMISSION**

A. MAKLUMAT PELAJAR (STUDENT DETAILS)		
Nama <i>Name</i>	SYAZWANI AMIRAH BINTI SALLEH	
No. Pendaftaran <i>Registration No.</i>	P130000	
Jabatan <i>Department</i>	-	
Fakulti / Institut <i>Faculty / Institute</i>	INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO & NANOELEKTRONIK	
Program Pengajian <i>Program of Study</i>	Sarjana (Master) ☐	Doktor Falsafah (Doctor of Philosophy) ☒
Alamat: <i>Address</i>	NO. 20, JALAN PERJIRANAN 15/18, BANDAR DATO ONN, 81100 JOHOR BAHRU, JOHOR.	
E-mel/ <i>Email</i> : syazwaniamirahsalleh@gmail.com	No. Telefon/ <i>Tel. No</i> : 016-7773745	
B. MAKLUMAT TESIS / DISERTASI (THESIS / DISSERTATION DETAILS)		
Tajuk Tesis/ <i>Disertasi</i> (Thesis / <i>Dissertation</i> Title): GRAFIN SATU LAPISAN-POLIPIROL DISEDIAKAN MELALUI TEKNIK KRONOAMPEROMETRI SEBAGAI ELEKTROD LAWAN BAGI SEL SURIA TERPEKA PEWARNA		
Tandatangan: <i>Signature</i> 	Tarikh: 13 OGOS 2026 <i>Date</i>	
C. PERAKUAN PENYELIA DAN PEMERIKSA DALAM ** (APPROVAL FROM SUPERVISORS AND INTERNAL EXAMINER) **		
Nama: PROF. DR. MOHD. YUSRI BIN ABD. RAHMAN <i>Name</i> (Penyelia Utama/Pengerusi Jawatankuasa Penyeliaan) (Main Supervisor/ Chairperson of The Supervisory Committee)	Tandatangan: <i>Signature</i> 	

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

Nama/Name: YM DR. TENGKU HASNAN BIN YM TENGKU AZIZ (Penyelia Bersama / Ahli Jawatankuasa Penyeliaan) (Co-Supervisor/ Member of Supervisory Committee)	Tandatangan: Signature 
Nama/Name: PROF. MADYA TS. DR. SALMIA BINTI BEDDU (Ahli Jawatankuasa Penyeliaan / Member of Supervisory Committee)	Tandatangan: Signature 
Nama/Name: DR. MUHAMMAD FIRDAUS BIN OMAR (Ahli Jawatankuasa Penyeliaan / Member of Supervisory Committee)	Tandatangan: Signature 
Nama/Name: PROF. YAP CHI CHIN (Pemeriksa Dalam / Internal Examiner)	Tandatangan: Signature 
**Potong yang tidak berkenaan / Delete where not appropriate	
D. PENGESAHAN FORMAT TESIS/DISERTASI / CONFIRMATION OF THESIS/DISSERTATION FORMAT COMPLIANCE	
Disahkan bahawa format tesis/disertasi adalah mengikut Gaya UKM dan calon dibenarkan menyerahkan tesis/disertasi dalam bentuk salinan lembut. This is to confirm that the thesis/dissertation format complies with the UKM Style Guide and is approved for submission in soft copy form.	
Tandatangan:  (Penyelia Utama / Pengerusi Jawatankuasa Penyeliaan) (Main Supervisor/ Chairperson of The Supervisory Committee)	Tarikh: 13 OGOS 2026 Date
E. PERAKUAN KETUA JABATAN / KETUA PROGRAM / PENERUSI PUSAT PENGAJIAN APPROVAL FROM HEAD OF DEPARTMENT / HEAD OF PROGRAM / SCHOOL CHAIRPERSON	
Tandatangan: Signature  Nama dan Cap Rasmi: Name and Official Stamp	Tarikh: Date 14 Ogos 2026
PROF. MADYA DR. MUHAMAD RAMOZAN BIN BUYONG Timbalan Pengerusi Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN) Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 UKM Bangi	

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

F. KELULUSAN DEKAN/PENGARAH / APPROVAL FROM DEAN/DIRECTOR			
Tandatangan: Signature		Tarikh: Date	
 PROF. IR. DR. AHMAD ASHRIF A. BAKAR Pengerah Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN) Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 UKM Bangi		17 Ogos 2026	
Nama dan Cap Rasmi: Name and Official Stamp			
G. PERAKUAN TESIS/ DISERTASI SARJANA / DOKTOR FALSAFAH (CERTIFICATION OF MASTER'S / DOCTORAL THESIS / DISSERTATION)			
Nama penuh pengarang (Author's Full Name)	SYAZWANI AMIRAH BINTI SALLEH		
No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.)	P130000	Sesi Akademik (Academic Session)	2/20252026
Tajuk Tesis / Disertasi (Thesis / Dissertation Title)	GRAFIN SATU LAPISAN-POLIPIROL DISEDIAKAN MELALUI TEKNIK KRONOAMPEROMETRI SEBAGAI ELEKTROD LAWAN BAGI SEL SURIA TERPEKA PEWARNA		
Semua tesis/disertasi dan penerbitan berkaitan hasil penyelidikan pelajar adalah tertakluk kepada Dasar Harta Intelek Universiti Kebangsaan Malaysia. <i>All theses/ dissertations and publications relating to the research work of a student are subject to the Intellectual Property Policy of Universiti Kebangsaan Malaysia.</i> Saya mengaku bahawa tahap akses tesis/disertasi ini sebagai (*Tandakan ✓ dalam kotak bagi maklumat yang berkaitan; tandakan satu (1) kotak di bawah sahaja): <i>I hereby declare the level of access for this thesis/dissertation as follows (tick ✓ the relevant box below; tick only one option).</i>			
Pilihan Tahap Akses Access Level Selection		Tafsiran Tahap Akses Tesis/Disertasi Definition of Thesis/Dissertation Access Level	
☐	RAHSIA (CONFIDENTIAL)	Mengandungi maklumat rahsia sepertimana yang diperuntukan bawah Akta Rahsia Rasmi 1972. <i>Contains classified information as stipulated under the Official Secrets Act 1972.</i>	
☒	TERHAD (RESTRICTED)	Mengandungi maklumat yang hanya boleh diakses oleh pihak yang mempunyai kebenaran atau keperluan tertentu untuk mengetahuinya yang ditentukan oleh organisasi/ badan di mana penyelidikan dijalankan. <i>Contains information that may only be accessed by parties with specific authorization or a defined need to know, as determined by the organization or body where the research is conducted.</i>	

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

☐	AKSES TERBUKA (OPEN ACCESS)	Tesis/disertasi versi akhir dalam format PDF yang boleh diakses secara percuma secara dalam talian dan bebas dari isu hak cipta dan pelesenan <i>The final version of the thesis/dissertation in PDF format that is freely accessible online and free from copyright and licensing issues.</i> Kementerian Pendidikan Tinggi melalui surat bertarikh 27 Mac 2025 memutuskan bahawa kebenaran akses tesis / disertasi dalam borang serahan akses terbuka ditentukan oleh penyelia (bukan pelajar). <i>The Ministry of Higher Education, through a letter dated 27 March 2025, has decided that permission for thesis / dissertation access in the open access submission form shall be determined by the supervisor (not the student).</i>
	EMBARGO	Tempoh masa di mana akses kepada tesis/disertasi disekat (ditutup) selama dua (2) tahun atas sebab-sebab tertentu sebagai contoh kerahsiaan atau hak cipta. Tesis/disertasi akan berstatus akses terbuka selepas tamat tempoh embargo. <i>The period during which access to the thesis/dissertation is restricted for two (2) years due to specific reasons, such as confidentiality or copyright. The thesis/dissertation will be granted open-access status upon the expiry of the embargo period.</i>
PENGESAHAN PELAJAR (STUDENT VERIFICATION)		PENGESAHAN PENYELIA (SUPERVISOR VERIFICATION)
 TANDATANGAN PELAJAR (STUDENT'S SIGNATURE)		 TANDATANGAN PENYELIA / Pengerusi JK Siswazah (SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON SUPERVISION COMMITTEE SIGNATURE)
Nama Pelajar (Student name): SYAZWANI AMIRAH No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.) BINTI SALLEH P130000		Nama Penyelia / Pengerusi JK Siswazah: PROF. DR. MOHD. YUSRI BIN ABD. RAHMAN (Supervisor's / Chairperson Supervision Committee Name)
Tarikh: 13 OGOS 2026 (Date)		Tarikh: 13 OGOS 2026 (Date)

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

13 Ogos 2026

SYAZWANI AMIRAH BINTI SALLEH
P130000

PENGHARGAAN

Alhamdulillah segala puji bagi Allah ke atas segala kekuatan dan limpah kurniaNya dalam menyiapkan penulisan tesis ini serta perjalanan dalam pengajian Ijazah Doktor Falsafah. Jutaan terima kasih diucapkan kepada penyelia utama saya, Prof. Dr. Mohd Yusri bin Abd. Rahman yang tidak jemu memberikan sokongan, ilmu serta bimbingan sepanjang pengajian saya di Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik, Universiti Kebangsaan Malaysia. Sekalung penghargaan juga diberikan kepada penyelia bersama, Prof. Madya Ts. Dr. Salmia binti Beddu, YM Dr. Tengku Hasnan bin YM Tengku Aziz dan Dr. Muhammad Firdaus bin Omar, serta penyelia saya di Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides (LRCS), Université de Picardie Jules Verne (UPJV), France, Dr. Frédéric SAUVAGE di atas setiap tunjuk ajar dan ilmu yang dicurahkan. Sokongan dan bantuan yang tidak ternilai dari segi komen dan cadangan yang membina sepanjang kerja-kerja eksperimental dan tesis telah menyumbang kepada kejayaan penyelidikan ini.

Saya ingin mengucapkan terima kasih kepada Kedutaan Perancis ke Malaysia di atas tajaan yang diberikan kepada saya untuk melakukan penyelidikan selama 4 bulan di Perancis. Tidak dilupakan juga kepada pihak Zamalah Universiti Kebangsaan Malaysia yang menaja pengajian saya sepanjang tempoh pengajian saya selama dua semester. Begitu juga kepada semua juruteknik dan kakitangan pejabat Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik atas kerjasama mereka. Ucapan terima kasih juga saya tujukan kepada pihak yang banyak menyumbang dalam menyiapkan tesis ini, secara langsung mahupun tidak langsung, khususnya Dr. Nur Aimi Syaqlah Aziz, Dr. Nihel Dib, Nur Amalina Nadiyah Basri dan Nur Fakhriah Mohd Noordin yang banyak meluangkan masa memberi bimbingan, berkongsi cadangan bagi menambah baik penyelidikan ini.

Akhir sekali, setinggi-tinggi penghargaan saya tujukan kepada kedua ibu bapa tercinta Hj. Salleh bin Mohamed Bahdrun dan Hj. Norhayati binti Ibrahim dan juga adik-beradik serta keluarga mertua saya di atas kasih sayang, doa dan dorongan yang tidak terhingga. Terima kasih juga kepada suami saya, Muhammad Syamel bin Omar atas motivasi, sokongan dan pemahaman yang tidak terhingga ke arah perjalanan PhD ini dan menyiapkan tesis ini serta anak-anak saya, Muhammad Syaqeef Arasy dan Muhammad Arisy Syazeef kerana sentiasa menyenangkan saya sepanjang penyediaan tesis ini. Tesis ini Bonda dedikasikan untuk suami dan anak-anakku.

ABSTRAK

Prestasi sel suria terpeka pewarna (DSSC) yang menggunakan polipirol (PPy) tunggal sebagai elektrod lawan didapati rendah dengan kecekapan penukaran kuasa (PCE) dalam julat 2% hingga 4%. Keaslian kerja ini ialah penyediaan grafin satu lapisan-polipirol (SLG-PPy) menerusi teknik kronoamperometri yang merupakan teknik yang mudah dan kos efektif. Sehubungan itu, kajian ini meneliti strategi peningkatan prestasi melalui pengoptimuman tempoh pemendapan, kepekatan monomer pirol (Py) serta penggabungan SLG ke dalam nanostruktur PPy. Filem PPy dan komposit SLG-PPy disediakan pada substrat FTO menggunakan kaedah pemendapan elektrokimia secara kronoamperometri dalam larutan yang mengandungi Py, asid sulfurik (H_2SO_4) dan natrium dodesil sulfat (SDS), dengan penambahan SLG bagi sampel komposit. Peningkatan tempoh pemendapan meningkatkan saiz dan kepadatan nanopartikel, dengan tempoh optimum 90 s menghasilkan kepadatan partikel tertinggi 135 partikel/ μm^2 serta rintangan pemindahan cas terendah 8.761 Ω . Analisis morfologi dan komposisi menunjukkan peningkatan kandungan karbon apabila tempoh dipanjangkan, manakala analisis struktur mengesahkan kewujudan ciri terkonjugasi dalam PPy. Sampel optimum merekodkan tenaga foton 2.63 eV dan memberikan PCE 2.924%, ketumpatan arus litar pintas (J_{sc}) 16.9 mA/cm^2 , voltan litar terbuka (V_{oc}) 0.561 V, dan faktor pengisian (FF) 0.309. Nilai peningkatan PCE dapat dihubungkait dengan penurunan tenaga foton. Variasi kepekatan monomer Py menunjukkan nilai optimum 0.2 M yang menghasilkan morfologi seragam tanpa pengaglomeratan, seterusnya meningkatkan PCE kepada 3.081% dengan peningkatan $V_{oc} = 0.625$ V dan $J_{sc} = 19.3$ mA/cm^2 . R_{ct} terendah juga diperoleh pada kepekatan ini iaitu 1.058 Ω . Penggabungan SLG memperbaiki homogeniti dan sifat elektrik filem, dengan kandungan optimum 10 wt% membentuk morfologi nanobunga kobis padat serta meningkatkan FF . Peranti berasaskan SLG-PPy mencapai PCE tertinggi 4.186% bersama $V_{oc} = 0.656$ V, $J_{sc} = 10.2$ mA/cm^2 , $FF = 0.627$, $R_{ct} = 3.758$ Ω dan kestabilan peranti yang lebih baik. Secara keseluruhannya, komposit SLG-PPy yang disintesis melalui kronoamperometri menunjukkan potensi besar sebagai alternatif elektrod lawan kos efektif dan berdaya saing untuk aplikasi DSSC berskala besar.

SINGLE GRAPEHENE LAYER-POLYPYRROLE PREPARED WITH CHRONOAMPEROMETRY TECHNIQUE AS COUNTER ELECTRODE FOR DYE-SENSITIZED SOLAR CELL

ABSTRACT

The performance of dye-sensitized solar cell (DSSCs) using single polypyrrole (PPy) as the counter electrode was found to be low with power conversion efficiency (PCE) between 2% to 4%. The originality of this work is the preparation of single-layer graphene-polypyrrole (SLG-PPy) via chronoamperometry technique which is a simple and cost-effective technique. Accordingly, this study investigates the performance improvement strategy by optimizing the deposition time, pyrrole (Py) monomer concentration and incorporation of SLG into PPy nanostructures. PPy films and SLG-PPy composites were prepared on FTO substrates using a chronoamperometric electrochemical deposition method in a solution containing Py, sulfuric acid (H_2SO_4), and sodium dodecyl sulfate (SDS), with the addition of SLG for the composite samples. Increasing the deposition time increased the size and density of the nanoparticles, with the optimal time of 90 s resulting in the highest particle density of 135 particle/ μm^2 and the lowest charge transfer resistance of 8.761 Ω . Morphological and compositional analyses showed an increase in carbon content as the time was extended, while structural analysis confirmed the existence of conjugated features in PPy. The optimum sample recorded a photon energy of 2.63 eV and gave a PCE of 2.924%, a short-circuit current density (J_{sc}) of 16.9 mA/cm^2 , an open-circuit voltage (V_{oc}) of 0.561 V, and a fill factor (FF) of 0.309. The increase in PCE can be attributed to the reduction in the photon energy. Variation of the Py monomer concentration showed an optimum value of 0.2 M which produced a uniform morphology without agglomeration, further increasing the PCE to 3.081% with an increase in $V_{\text{oc}} = 0.625$ V and $J_{\text{sc}} = 19.3$ mA/cm^2 . The lowest R_{ct} was also obtained at this concentration of 1.058 Ω . The incorporation of SLG improved the homogeneity and electrical properties of the film, with an optimum content of 10 wt% forming a dense nanocauliflower morphology and increasing the FF . The SLG-PPy based device achieved the highest PCE of 4.186% with $V_{\text{oc}} = 0.656$ V, $J_{\text{sc}} = 10.2$ mA/cm^2 , $FF = 0.627$, $R_{\text{ct}} = 3.758$ Ω and better device stability. Overall, the SLG-PPy composite synthesized by chronoamperometry shows great potential as a cost-effective and competitive counter electrode alternative for large-scale DSSC applications.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	ix
SENARAI ILUSTRASI	xi
SENARAI SINGKATAN	xiv
SENARAI SIMBOL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Permasalahan Kajian	5
1.3 Keaslian Kajian	5
1.4 Objektif Kajian	6
1.5 Organisasi Penulisan Tesis	6
BAB II KAJIAN LITERASI	
2.1 Pengenalan	8
2.2 Latar Belakang Sel Suria Terpeka Pewarna	8
2.3 Prinsip Kerja Sel Suria Terpeka Pewarna	12
2.4 Komponen Sel Suria Terpeka Pewarna	14
2.4.1 Fotoanod	14
2.4.2 Pewarna	15
2.4.3 Elektrolit	17
2.4.4 Elektrod Lawan	18
2.5 Polimer Konduktif Sebagai Elektrod Lawan	21
2.5.1 Sifat-Sifat dan Aplikasi Polipirol	23
2.5.2 Sifat-Sifat dan Aplikasi Grafin	24
2.6 Teknik-Teknik Penyediaan Elektrod Lawan Berasaskan Bahan Polimer Konduktif	26
2.6.1 Pempolimeran Pengoksidaan Kimia	27

2.6.2	Pempolimeran Elektrokimia	27
2.6.3	Pempolimeran Elektrokimia Secara Kronoamperometri	28
2.7	Teknik Kajian Prestasi	29
2.7.1	Pengukuran Arus Voltan (I - V)	29
2.7.2	Spektroskopi Impedans Elektrokimia (EIS)	31
2.7.3	Kitaran Voltametri (CV)	32

BAB III KAEDAH KAJIAN

3.1	Pengenalan	35
3.2	Bahan	35
3.3	Penyediaan dan Pencirian Sampel Filem Polipirol dan Grafin Satu Lapisan-Polipirol	37
3.3.1	Pencucian Substrat	38
3.3.2	Penyediaan Sampel Polipirol Pada Variasi Tempoh Pemendapan	39
3.3.3	Penyediaan Sampel Polipirol Pada Variasi Kepekatan Monomer Py	39
3.3.4	Penyediaan Sampel Grafin Satu Lapisan- Polipirol Pada Variasi Kandungan Grafin Satu Lapisan	40
3.4	Penyediaan Filem Titanium Dioksida	42
3.5	Fabrikasi Sel Suria Terpeka Pewarna	43
3.6	Pencirian Filem Polipirol dan Grafin Satu Lapisan- Polipirol Serta Peranti Sel Suria Terpeka Pewarna	45
3.6.1	Pencirian Morfologi	45
3.6.2	Pencirian Fasa Hablur	46
3.6.3	Spektroskopi UV-Vis	47
3.6.4	Spektroskopi Raman	48
3.6.5	Kajian Prestasi Peranti Sel Suria Terpeka Pewarna	48
3.6.6	Analisa Perpindahan Cas Di Dalam Peranti	50
3.6.7	Pencirian Fotokatalitik	51
3.6.8	Analisa Kestabilan Peranti	52

BAB IV HASIL KAJIAN DAN PERBINCANGAN

4.1	Pengenalan	53
4.2	Pengaruh Tempoh Pemendapan ke atas Sifat-Sifat Filem Polipirol dan Prestasi Sel Suria Terpeka Pewarna Menggunakan Elektrod Lawan Polipirol	53
4.2.1	Morfologi	53
4.2.2	Spektroskopi Raman	58

4.2.3	Sifat Optik	59
4.2.4	Analisis <i>J-V</i> Di Bawah Pencahayaan	62
4.2.5	Analisis EIS	64
4.2.6	Analisis Kitaran Voltametri	66
4.3	Pengaruh Kepekatan Monomer Pirol ke atas Sifat-Sifat Filem Polipirol dan Prestasi Sel Suria Terpeka Pewarna Menggunakan Elektrod Lawan Polipirol	69
4.3.1	Morfologi	69
4.3.2	Struktur	75
4.3.3	Sifat Optik	78
4.3.4	Analisis <i>J-V</i> Di Bawah Pencahayaan	80
4.3.5	Analisis EIS	81
4.3.6	Analisis Kitaran Voltametri	83
4.4	Pengaruh Kandungan Grafin Satu Lapisan ke atas Filem Grafin Satu Lapisan-Polipirol Terturun dan Prestasi Sel Suria Terpeka Pewarna Menggunakan Elektrod Lawan Grafin Satu Lapisan-Polipirol	86
4.4.1	Morfologi	86
4.4.2	Struktur	92
4.4.3	Sifat Optik	94
4.4.4	Analisis <i>J-V</i> Di Bawah Pencahayaan	96
4.4.5	Analisis EIS	97
4.5	Ujian Kestabilan Prestasi Peranti	99
BAB V	RUMUSAN DAN CADANGAN	
5.1	Rumusan	102
5.2	Cadangan	104
RUJUKAN		106
LAMPIRAN		
Lampiran A	Senarai Penerbitan	121

SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 2.1	Kaedah penyediaan dan kecekapan peranti oleh bahan polimer konduktif sebagai elektrod lawan DSSC	21
Jadual 2.2	Modifikasi polimer konduktif sebagai elektrod lawan DSSC	23
Jadual 2.3	Kaedah penyediaan dan kecekapan peranti oleh bahan PPy dengan bahan karbon sebagai elektrod lawan DSSC	27
Jadual 3.1	Senarai bahan yang digunakan semasa penyediaan sampel dan fabrikasi DSSC	36
Jadual 3.2	Senarai peralatan yang digunakan semasa penyediaan sampel, pencirian sampel, dan kajian prestasi DSSC	37
Jadual 3.3	Variasi parameter yang digunakan dalam penyediaan sampel filem PPy dan filem komposit SLG-PPy	49
Jadual 4.1	Diameter purata dan liputan PPy dengan variasi tempoh pemendapan	56
Jadual 4.2	Peratusan berat unsur dalam filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan	56
Jadual 4.3	Anjakan, kematian dan nisbah keamatan (I_D/I_G) bagi Raman spektrum dengan tempoh pemendapan pada 90 s	58
Jadual 4.4	Pantulan dan penyerapan serta tenaga foton bagi filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan	62
Jadual 4.5	Perubahan parameter-parameter fotovoltan dengan tempoh pemendapan	63
Jadual 4.6	Parameter-parameter spektroskopi impedans elektrokimia (EIS) sebagai fungsi tempoh pemendapan	66
Jadual 4.7	Perubahan parameter kitaran voltametri dengan tempoh pemendapan	67
Jadual 4.8	Perubahan parameter elektrokimia plot Tafel dengan variasi tempoh pemendapan	69
Jadual 4.9	Diameter purata dan liputan PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	72
Jadual 4.10	Peratusan berat unsur dalam filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	74

Jadual 4.11	Anjakan, kematan dan nisbah keamatan (I_D/I_G) bagi Raman spektrum dengan kepekatan monomer Py pada 0.2 M	75
Jadual 4.12	Kesan kepekatan monomer Py terhadap keamatan, FWHM dan saiz hablur	77
Jadual 4.13	Pantulan dan penyerapan serta tenaga foton bagi filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	80
Jadual 4.14	Parameter-parameter fotovoltan dengan variasi kepekatan monomer Py	81
Jadual 4.15	Parameter-parameter EIS sebagai fungsi untuk kepekatan monomer Py	83
Jadual 4.16	Perubahan parameter kitaran voltametri dengan kepekatan monomer Py	84
Jadual 4.17	Perubahan parameter elektrokimia plot Tafel dengan kepekatan monomer Py	86
Jadual 4.18	Diameter purata dan liputan SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG	87
Jadual 4.19	Peratusan berat unsur dalam filem SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG	90
Jadual 4.20	Anjakan, kematan dan nisbah keamatan (I_D/I_G) bagi Raman spektrum dengan kandungan SLG pada 10 wt%	91
Jadual 4.21	Kesan kandungan SLG terhadap keamatan, FWHM dan saiz hablur	94
Jadual 4.22	Pantulan dan penyerapan serta tenaga foton filem SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG	96
Jadual 4.23	Perubahan parameter-parameter fotovoltan dengan variasi kandungan SLG	97
Jadual 4.24	Parameter-parameter EIS sebagai fungsi untuk kandungan SLG	99
Jadual 4.25	Kestabilan peranti pada hari berbeza bagi peranti menggunakan elektrod lawan SLG-PPy dengan kepekatan 10 wt%	101

SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	Perkembangan generasi-generasi sel fotovoltaik	12
Rajah 2.2	Prinsip kerja bagi DSSC	13
Rajah 2.3	Struktur pewarna berasaskan rutenium	17
Rajah 2.4	Struktur molekul polimer konduktif a) PEDOT, b) PANI, c) PPy, dan d) PEDOT:PSS	23
Rajah 2.5	Struktur grafin satu lapisan berbentuk kekisi sarang lebah	26
Rajah 2.6	Lengkung <i>I-V</i> bagi DSSC	30
Rajah 2.7	a) Plot Nyquist dan b) plot Bode tipikal bagi DSSC	32
Rajah 2.8	Graf kitaran voltametri	33
Rajah 2.9	Plot Tafel polarisasi	34
Rajah 3.1	Carta alir penyediaan dan pencirian filem PPy dan filem komposit PPy/SLG	38
Rajah 3.2	Proses pemendapan PPy menggunakan teknik kronoamperometri	40
Rajah 3.3	Proses pemendapan SLG-PPy menggunakan teknik kronoamperometri	41
Rajah 3.4	Filem TiO ₂ selepas disepuhlindap	42
Rajah 3.5	Penyediaan filem fotoanod TiO ₂	43
Rajah 3.6	a) Fotograf peranti dan b) Skema peranti DSSC	44
Rajah 3.7	Sistem pengukuran UV-Vis	48
Rajah 3.8	Sistem pengukuran <i>I-V</i> dan EIS di bawah pencahayaan	51
Rajah 3.9	a) Filem PPy dan SLG-PPy direndam ke dalam larutan elektrolit dan b) sistem pengukuran pencirian fotokatalitik	51
Rajah 4.1	Pandangan atas imej FESEM filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, dan d) 120 s dengan pembesaran 50,000 $\times$. Skala bar: 200 nm	55

Rajah 4.2	Spektrum EDX filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, dan d) 120 s	57
Rajah 4.3	Spektrum Raman filem PPy dengan tempoh pemendapan pada 90 s	58
Rajah 4.4	Spektrum pantulan UV-Vis filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan	61
Rajah 4.5	Spektrum penyerapan UV-Vis filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan	61
Rajah 4.6	Lengkung <i>J-V</i> peranti di bawah pencahayaan 100 mW/cm^2 menggunakan filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan	63
Rajah 4.7	Plot Nyquist peranti dalam pencahayaan dengan variasi tempoh pemendapan	65
Rajah 4.8	Plot Bode peranti dalam pencahayaan dengan variasi tempoh pemendapan	65
Rajah 4.9	Lengkung kitaran voltametri bagi filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan	67
Rajah 4.10	Plot Tafel bagi filem PPy dengan variasi tempoh pemendapan	69
Rajah 4.11	Pandangan atas imej FESEM filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py a) 0.1 M, b) 0.2 M, c) 0.3 M, d) 0.4 M, dan e) 0.5 M dengan pembesaran 50,000 $\times$. Skala bar: 200 nm	71
Rajah 4.12	Spektrum EDX filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py a) 0.1 M, b) 0.2 M, c) 0.3 M, d) 0.4 M, dan e) 0.5 M	74
Rajah 4.13	Spektrum Raman filem PPy dengan kepekatan monomer Py pada 0.2 M	75
Rajah 4.14	Spektrum XRD filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	77
Rajah 4.15	Spektrum pantulan UV-Vis filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	79
Rajah 4.16	Spektrum penyerapan UV-Vis filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	79
Rajah 4.17	Lengkung <i>J-V</i> DSSC di bawah pencahayaan 100 mW/cm^2 menggunakan filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	81
Rajah 4.18	Plot Nyquist dalam pencahayaan dengan variasi kepekatan monomer Py	82

Rajah 4.19	Plot Bode dengan variasi kepekatan monomer Py	83
Rajah 4.20	Lengkung kitaran voltametri bagi filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	84
Rajah 4.21	Lengkung Tafel bagi filem PPy dengan variasi kepekatan monomer Py	85
Rajah 4.22	Pandangan atas imej FESEM filem SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG a) 5 wt%, b) 10 wt%, c) 15 wt% dan d) 20 wt% dengan pembesaran :50,000×. Skala bar: 200 nm	87
Rajah 4.23	Spektrum EDX filem SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG a) 5%, b) 10%, c) 15% dan d) 20%	89
Rajah 4.24	Spektrum Raman filem SLG-PPy dengan kandungan SLG pada 10 wt%	91
Rajah 4.25	Spektrum XRD filem SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG	93
Rajah 4.26	Spektrum pantulan filem SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG	95
Rajah 4.27	Spektrum penyerapan filem SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG	96
Rajah 4.28	Lengkung J - V dalam pencahayaan 100 mW/cm^2 bagi peranti menggunakan elektrod lawan SLG-PPy dengan variasi kandungan SLG	97
Rajah 4.29	Plot Nyquist dalam pencahayaan dengan variasi kandungan SLG	98
Rajah 4.30	Plot Bode dengan variasi kandungan SLG	99
Rajah 4.31	Lengkung J - V dalam pencahayaan 100 mW/cm^2 bagi peranti menggunakan elektrod lawan SLG-PPy pada hari berbeza	100
Rajah 4.32	Plot Nyquist dalam pencahayaan pada hari yang berbeza	100

SENARAI SINGKATAN

DSSC	Sel Suria Terpeka Pewarna
EIS	Spektroskopi Impedens Elektrokimia
FF	Faktor Pengisi
FTO	Timah Oksida Terdop Florin
HOMO	Orbital Molekul Terisi Tertinggi
J_{sc}	Ketumpatan Arus Litar Pintas
LUMO	Orbital Molekul Tidak Terisi Terendah
PCE	Kecekapan Penukaran Kuasa
Ppy	Polipirol
Pt	Platinum
Py	Pirol monomer
SDS	Natrium Dedoksil Sulfat
SLG	Grafir Satu Lapisan
TCO	Oksida Konduktif Telus
TiO ₂	Titanium Dioksida
V _{oc}	Voltan Litar Terbuka

SENARAI SIMBOL

$\%wt$	Peratusan berat
e^-	Elektron
λ	Panjang gelombang
M	Molar
η	Kecekapan
π	Pi
τ	Jangka hayat
f_{max}	Frekuensi maksimum
R_s	Rintangan siri
R_{ct}	Rintangan pemindahan cas antaramuka elektrod lawan/elektrolit

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 PENGENALAN

Populasi dunia yang semakin meningkat telah menyebabkan peningkatan ketara dalam penggunaan tenaga, sekali gus meletakkan dunia berhadapan dengan cabaran besar untuk memenuhi keperluan tenaga global yang semakin meningkat. Tenaga boleh diperbaharui berpotensi untuk memenuhi permintaan tenaga yang semakin meningkat ini, di samping membantu mengurangkan kesan pemanasan global serta masalah kekurangan sumber tenaga. Penggunaan bahan api fosil yang bersifat terhad, pelepasan gas rumah hijau akibat daripada pembakaran bahan api fosil, dan pertumbuhan ekonomi yang pesat memerlukan penggunaan sumber tenaga yang boleh diperbaharui, kos efektif, dan mesra alam (Alberi et al. 2026).

Dalam kalangan pelbagai sumber tenaga boleh diperbaharui yang telah diterokai seperti cahaya matahari, angin, tenaga geoterma, dan biobahan api, tenaga suria merupakan salah satu sumber tenaga untuk memenuhi keperluan tenaga global. Hal ini kerana tenaga suria mudah diperolehi di seluruh dunia, bersifat percuma, bersih, dan tidak kehabisan (Alberi et al. 2026). Antara kaedah penggunaan tenaga suria seperti teknologi haba suria dan kimia suria, penjanaan elektrik melalui tenaga suria merupakan teknologi yang paling pesat berkembang dan semakin mendapat perhatian. Cahaya matahari boleh ditukarkan kepada tenaga elektrik menggunakan sel suria yang kini digunakan secara meluas dalam pelbagai aplikasi seperti kalkulator, lampu suria, serta sistem tenaga untuk kapal angkasa dan satelit. Seiring dengan peningkatan permintaan terhadap tenaga boleh diperbaharui, pembangunan dan pengeluaran sel suria telah berkembang dengan sangat pesat sejak beberapa tahun kebelakangan ini (Haegel & Kurtz 2025).

Sel suria fotovoltaik diklasifikasikan kepada tiga generasi. Generasi pertama terdiri daripada sel suria silikon. Sel suria silikon pertama telah dibangunkan oleh Bell Telephone Laboratories, Amerika Syarikat pada tahun 1953 dengan kecekapan 4.5%, yang kemudiannya meningkat kepada 6% hasil daripada penyelidikan lanjut (Saito et al. 2004). Sel suria ini menggunakan struktur satu persimpangan (*single-junction*) untuk menukarkan tenaga foton kepada tenaga elektrik. Teknologi ini telah mencapai tahap kematangan yang tinggi dengan kecekapan sel makmal melebihi 27%. Namun begitu, nilai tersebut masih berada di bawah had teori iaitu sekitar 33.7% bagi sel suria satu persimpangan di bawah pencahayaan piawai (Kirk 2025). Perkembangan pesat industri semikonduktor berasaskan silikon seperti komputer dan elektronik telah menyebabkan sel suria silikon mendominasi pasaran fotovoltaik global (Green et al. 2025). Pada masa kini, kebanyakan teknologi fotovoltaik dunia berasaskan silikon. Panel suria monokristal diperbuat daripada silikon berkualiti tinggi dan mempunyai kecekapan tertinggi, lazimnya antara 20-25%. Sebaliknya, panel suria polikristal diperbuat daripada silikon dengan ketulenan lebih rendah dan menunjukkan kecekapan sekitar 18-21%, iaitu lebih rendah daripada panel sel suria monokristal yang mencapai sekitar 22-24% (Green et al. 2025).

Sel suria generasi kedua pula terdiri daripada sel suria filem nipis seperti silikon amorfus, kuprum indium galium diselenida (CIGS), kadmium tellurida (CdTe), dan $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (Green et al. 2025). Sel suria filem nipis direka bentuk dengan penggunaan bahan yang minimum, sekali gus mengurangkan kos pengeluaran. Walaupun sel suria ini menawarkan kos pengeluaran yang lebih rendah dan penggunaan bahan yang minimum, kecekapan penukaran kuasa (PCE) yang dihasilkan secara amnya masih lebih rendah berbanding sel suria silikon kristal, dengan kecekapan makmal sekitar 14.0–23.6% bergantung kepada teknologi yang digunakan (Green et al. 2025). Walau bagaimanapun, teknologi filem nipis membolehkan penghasilan modul yang fleksibel dan ringan. Kecekapan modul prototaip filem nipis telah mencapai nilai antara 7-15% bergantung kepada teknologi pembuatan (Green et al. 2025). Sel suria generasi ketiga pula merangkumi sel suria fotovoltaik organik (OPV), sel suria bintik kuantum, sel suria perovskit dan sel suria terpeka pewarna (DSSC). Sel suria generasi ketiga dibangunkan bagi mengatasi kekangan teknologi terdahulu dengan menggabungkan proses fabrikasi yang lebih mudah dan kos bahan yang rendah seperti

sel suria filem nipis, di samping berpotensi mencapai PCE yang tinggi seperti sel suria silikon kristal. Teknologi ini dijangka memainkan peranan penting dalam pasaran fotovoltaik yang sedang berkembang pesat disebabkan penggunaan bahan kos rendah dan proses fabrikasi yang mudah (Devadiga et al. 2021).

DSSC, yang juga dikenali sebagai sel Grätzel, tergolong dalam kategori sel suria generasi ketiga. Sel suria ini mendapat perhatian yang meluas kerana menawarkan keseimbangan antara PCE, kos fabrikasi yang rendah, proses penyediaan yang mudah serta prestasi yang baik di bawah keadaan pencahayaan rendah dan cahaya terserak. Kecekapan tertinggi bagi DSSC iaitu 14.3% telah dilaporkan oleh kumpulan Grätzel dengan menggunakan pewarna LEG4+ADEKA-1 serta elektrolit berasaskan pasangan redoks kobalt (Kakiage et al. 2015), dan rekod ini masih diiktiraf dalam jadual kecekapan sel suria terkini (Green et al. 2025). Disebabkan kos bahan yang rendah, DSSC berpotensi menjadi alternatif kepada sel suria generasi pertama pada masa hadapan. Selain itu, DSSC lazimnya menggunakan substrat oksida konduktif telus (TCO) sebagai lapisan konduktif lutsinar. TCO membenarkan cahaya memasuki lapisan fotoanod untuk diserap oleh molekul pewarna, sambil bertindak sebagai laluan pengangkutan elektron ke litar luar. Oleh sebab itu, TCO dipilih secara meluas kerana mempunyai ketelusan optik yang tinggi, kekonduksian elektrik yang baik, serta kestabilan kimia yang tinggi semasa proses fabrikasi dan operasi DSSC (Yelshibay et al. 2024).

Struktur asas DSSC terdiri daripada susunan berlapis yang merangkumi fotoanod berasaskan logam oksida yang diselaputi pewarna, elektrolit, serta elektrod lawan. Elektrod lawan merupakan komponen kritikal dalam peranti DSSC kerana fungsinya yang mengumpul elektron daripada litar luar dan memangkinkan tindak balas penurunan elektrolit redoks. Lazimnya, elektrod lawan dihasilkan dengan mendepositkan lapisan pemangkin nipis pada substrat pengalir. Sifat-sifat utama yang perlu dipenuhi oleh bahan elektrod lawan termasuk aktiviti elektrokatalitik yang tinggi, rintangan elektrik yang rendah untuk pemindahan cas yang cekap, serta kestabilan jangka panjang (Yelshibay et al. 2024). Logam seperti platinum (Pt), perak (Ag), dan emas (Au) sering digunakan sebagai bahan elektrod lawan kerana keupayaan elektrokatalitiknya yang sangat baik dalam menurunkan pasangan redoks dalam

elektrolit cecair atau memudahkan pengangkutan lohong dalam elektrolit keadaan pepejal (Yelshibay et al. 2024). Walau bagaimanapun, kos yang tinggi dan isu degradasi dalam elektrolit cecair menghadkan penggunaan logam ini secara meluas. Oleh itu, menghasilkan DSSC berkos rendah memerlukan kos bahan yang murah dan mudah diperolehi.

Pelbagai bahan alternatif telah diterokai sebagai elektrod lawan DSSC, termasuk bahan berasaskan karbon (Salleh et al. 2022), polimer pengalir (Yelshibay et al. 2024), dan bahan bukan organik berasaskan logam peralihan (Gnanasekar et al., 2019). Bahan-bahan ini telah menunjukkan prestasi penukaran kuasa yang setanding dengan elektrod lawan berasaskan platinum (Pt). Secara umumnya, bahan elektrod lawan yang ideal perlu mempunyai kos yang rendah dan pada masa yang sama mampu menghasilkan PCE yang tinggi. Kepentingan elektrod lawan ini adalah disebabkan oleh peranannya yang utama dalam mengumpul elektron daripada litar luar yang dijana oleh molekul pewarna yang teruja oleh cahaya serta memangkinkan tindak balas redoks elektrolit untuk menjana semula molekul pewarna teroksida (Li & Gao 2020).

Elektrod lawan berasaskan polimer memainkan peranan penting dalam DSSC kerana ia membolehkan pemindahan elektron yang cekap daripada litar luar serta menyokong proses penjanaan semula pewarna melalui sifat kekonduksian dan aktiviti pemangkin yang baik. Polimer konduktif seperti polianilina (PANI) (Hsu et al. 2025), polipirol (PPy) (Liu & Cheng 2021), dan poli(3,4-etilenadioksitiofena) (PEDOT) (Reddy et al. 2024) telah dikaji secara meluas sebagai alternatif kepada Pt kerana proses fabrikasi yang mudah, sifat katalitik yang baik, dan kestabilan yang tinggi (Liu & Cheng 2021). PANI mempunyai keadaan pengoksidaan yang boleh diubah serta morfologi berliang (satu dimensi) yang meningkatkan luas permukaan dan aktiviti elektrokatalitik terhadap penurunan ion triiodida. PPy juga menunjukkan potensi yang kukuh apabila teroksida terutamanya dalam bentuk nanopartikel, kepingan nano atau komposit. Luas permukaan dan tapak aktif yang tinggi menyumbang kepada PCE yang kompetitif serta ketelusan yang baik. PEDOT secara konsisten menunjukkan prestasi tertinggi, dengan kecekapan yang setanding atau melebihi Pt, terutamanya apabila disintesis secara kimia atau digabungkan dengan bahan hibrid berskala nano.

1.2 PERMASALAHAN KAJIAN

Bahan logam Pt acap kali digunakan sebagai elektrod lawan bagi DSSC kerana aktiviti elektrokatalitiknya yang tinggi terhadap pasangan redoks I_3^-/I^- . Namun begitu, penggunaan Pt adalah kurang sesuai untuk aplikasi DSSC berskala besar disebabkan oleh bahan Pt yang semakin kehabisan, ketersediaan bahan yang terhad serta isu kestabilan dalam persekitaran elektrolit. Kekangan ini telah mendorong kepada keperluan untuk menggunakan bahan elektrod lawan alternatif yang lebih mudah diperoleh dan mampan tanpa menjejaskan prestasi peranti DSSC. Grafin telah dikenal pasti sebagai bahan alternatif yang berpotensi untuk menggantikan Pt kerana mempunyai kekonduksian elektrik yang baik serta struktur dua dimensi dengan luas permukaan spesifik yang besar. Namun demikian, penggunaan bahan berasaskan grafin yang disediakan ke atas FTO secara tunggal menghasilkan prestasi peranti yang rendah serta tapak aktif yang rendah bagi tindak balas redoks I_3^-/I^- . Sebaliknya, polimer konduktif seperti PPy menghasilkan aktiviti elektrokatalitik yang baik dan kos yang rendah. Akan tetapi, penggunaan bahan PPy tunggal mengalami kekangan dari segi kekonduksian dan kestabilan. Oleh itu, penggabungan bahan berasaskan grafin dengan PPy dijangka dapat menggabungkan kelebihan kedua-dua bahan menggantikan bahan Pt sebagai elektrod lawan DSSC oleh kerana sifat fizik dan kimia yang unik dan seterusnya dapat meningkatkan kecekapan peranti.

1.3 KEASLIAN KAJIAN

Terdapat dua keaslian kajian di dalam kajian penyelidikan ini. Keaslian kajian yang pertama adalah bahan grafin satu lapisan (SLG) yang digabungkan dengan bahan PPy. Grafin tulen acap kali digunakan sebagai bahan asas untuk sintesis elektrod lawan yang digabungkan dengan polimer konduktif oleh kerana mempunyai konduktiviti yang bagus dan aktiviti elektropemangkin yang tinggi. Akan tetapi, SLG tidak pernah lagi dikaji oleh mana-mana penyelidik. SLG juga mempunyai konduktiviti setanding dengan bahan grafin yang lain yang membolehkan ia digunakan sebagai bahan yang digabungkan dengan PPy untuk meningkatkan konduktiviti elektrik serta kecekapan prestasi peranti.

Keaslian kajian kedua adalah teknik penyediaan filem SLG-PPy yang menggunakan kaedah pemendapan elektrokimia secara kronoamperometri. Kaedah ini merupakan teknik yang mudah, murah, dan berpotensi menghasilkan elektrod lawan dalam skala besar bagi aplikasi komersial dan perindustrian. Kaedah pemendapan elektrokimia secara kronoamperometri masih belum digunakan bagi mana-mana penyelidik, di mana kebanyakan penyelidik menggunakan kaedah polimerisasi *in-situ*, penggabungan larutan, dan elektropolimerisasi.

Secara keseluruhannya, kajian ini memberi sumbangan yang signifikan dalam meningkatkan kecekapan DSSC melalui pendekatan inovatif dalam teknik penyediaan filem. Keaslian kajian ini terletak pada penggunaan filem PPy dan filem komposit SLG-PPy sebagai elektrod lawan yang difabrikasi menggunakan kaedah pemendapan elektrokimia secara kronoamperometri. Pendekatan ini membuka ruang dalam pemilihan bahan serta teknik pembuatan bagi menghasilkan DSSC berkecekapan tinggi menggunakan polimer pengalir yang terubahsuai dengan kos efektif.

1.4 OBJEKTIF KAJIAN

Objektif utama kajian ini adalah seperti berikut:

- i. Menganalisis kesan masa pemendapan PPy ke atas sifat-sifat PPy dan parameter prestasi DSSC.
- ii. Mengoptimumkan pengaruh kepekatan PPy ke atas sifat-sifat PPy dan parameter prestasi DSSC.
- iii. Menganalisis hubungan kepekatan SLG ke atas sifat-sifat SLG-PPy dan parameter prestasi DSSC.
- iv. Menilai kestabilan prestasi peranti DSSC menggunakan SLG-PPy sebagai elektrod lawan.

1.5 ORGANISASI PENULISAN TESIS

Tesis ini terdiri daripada lima bab, iaitu Bab I hingga Bab V, yang disusun secara sistematik bagi menggambarkan keseluruhan perjalanan kajian ini. Bab I memberikan pengenalan umum berkaitan sumber tenaga sedia ada termasuk sel suria serta DSSC. Ia

turut membincangkan sorotan literatur polimer pengalir sebagai elektrod lawan DSSC, permasalahan kajian, keaslian penyelidikan yang dijalankan, serta objektif utama kajian. Di akhir bab ini, struktur dan organisasi keseluruhan penulisan tesis diterangkan dengan terperinci bagi memberi gambaran menyeluruh tentang kandungan tesis.

Bab II menghuraikan latar belakang teori berkaitan DSSC yang menggunakan komposit SLG-PPy sebagai elektrod lawan. Perbincangan meliputi asas dan komponen peranti, mekanisma pengangkutan cas, serta kaedah penyediaan elektrod lawan. Di samping itu, aspek teori berkaitan lengkung arus-voltan, parameter fotovoltan, serta ciri-ciri bahan PPy dan SLG turut dijelaskan.

Bab III menerangkan secara terperinci kaedah penyediaan filem PPy dan filem komposit SLG-PPy, termasuk perincian mengenai sampel yang disediakan dan proses fabrikasi peranti. Selain itu, kaedah yang digunakan untuk menilai prestasi peranti juga dihuraikan dalam bab ini.

Bab IV memfokuskan kepada analisis menyeluruh terhadap data kajian, meliputi pencirian sampel PPy dan komposit SLG-PPy serta prestasi peranti yang menggunakan PPy serta SLG-PPy sebagai elektrod lawan. Hasil-hasil kajian dibincangkan secara kritikal bagi menjawab objektif kajian yang telah ditetapkan.

Akhir sekali, Bab V merumuskan penemuan utama kajian berkaitan penggunaan komposit SLG-PPy sebagai elektrod lawan dalam DSSC. Ia turut mengemukakan cadangan bagi penyelidikan lanjutan, khususnya dalam usaha meningkatkan prestasi peranti dengan meneroka penggunaan elektrod lawan berasaskan grafin secara lebih meluas.

RUJUKAN

- Abdelhamid, M., O'Mullane, A., & Snook, G. 2015. Storing energy in plastics: a review on conducting polymers and their role in electrochemical energy storage. *Rsc Advances*, 5(15): 11611–11626.
- Adams R. E., W. G. & D. 1877. The Action of Light on Selenium. *The Royal Society* 25: 113–117.
- Ahmed, U., Shahid, M. M., Shahabuddin, S., Rahim, N. A., Alizadeh, M., Pandey, A. K., & Sagadevan, S. 2021. An efficient platform based on strontium titanate nanocubes interleaved polypyrrole nanohybrid as counter electrode for dye-sensitized solar cell. *Journal of Alloys and Compounds* 860: 158228.
- Ahn, S., Jeong, S., Han, T., & Lee, T. 2016. Conducting Polymers as Anode Buffer Materials in Organic and Perovskite Optoelectronics. *Advanced Optical Materials* 5(3): 1600512.
- 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.
- Alberi, K., Peters, I. M., Verlinden, P., Philipps, S., Koike, A., Barnes, T., Berry, J., Bertoni, M., Breyer, C., Burnham, L., Case, C., Chen, Y., de Wolf, S., Egan, R., Froitzheim, A., Gatz, S., Gloeckler, M., Goldschmidt, J. C., Gordon, I., & Bett, A. W. 2026. Historical and future learning for the new era of multi-terawatt photovoltaics. In *Nature Energy* 11(1): 38–46.
- Almuntaser, F. M. A., Majumder, S., Baviskar, P. K., Sali, J. v, & Sankapal, B. R. 2017. Synthesis and characterization of polypyrrole and its application for solar cell. *Applied Physics A* 123(8): 555.
- Aziz & Rahman M. Y. A., N. A. S. 2024. Influence of precursor concentration on surface morphology and phase structure of iridium-palladium binary alloy. *International Journal of Electroactive Materials* 12: 10–15.
- Baghel, N. S., & Chander, N. 2022. Performance comparison of mono and polycrystalline silicon solar photovoltaic modules under tropical wet and dry climatic conditions in east-central India. *Clean Energy* 6(1): 165–177.
- Baglio, V., Girolamo, M., Antonucci, V., & Aricò, A. S. 2011. Influence of TiO₂ Film Thickness on the Electrochemical Behaviour of Dye-Sensitized Solar Cells. *International Journal of Electrochemical Science* 6(8): 3375–3384.
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. 2008. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. *Nano Letters* 8(3): 902–907.

- Bang, H.-G., Chung, J.-K., Jung, R.-Y., & Park, S.-Y. 2012. Effect of acetic acid in TiO₂ paste on the performance of dye-sensitized solar cells. *Ceramics International* 38: S511–S515.
- Baptayev, B., Tashenov, Y., & Balanay, M. P. 2022. Conjugated polymers as organic electrodes for photovoltaics. *Organic Electrodes: Fundamental to Advanced Emerging Applications*: 137–153. Cham: Springer International Publishing.
- Barik, D., Narayanan, A. K., Utkarsh, U., Gupta, S., & Ghosh, K. B. 2026. Synergistic enhancement in electrodeposited inorganic-organic hybrid materials toward high energy-density asymmetric supercapacitors. *Journal of Energy Storage* 179: 123731.
- Becker, M., Bertrams, M.-S., Constable, E. C., & Housecroft, C. E. 2020. How Reproducible are Electrochemical Impedance Spectroscopic Data for Dye-Sensitized Solar Cells? *Materials* 13(7): 1547.
- Becquerel, E. 1839. Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière électrique, Comptes Rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences. *Paris* 11: 702–703.
- Bobo, M. v, Paul, A., Robb, A. J., Arcidiacono, A. M., Smith, M. D., Hanson, K., & Vannucci, A. K. 2020. Bis-Cyclometalated Iridium Complexes Containing 4,4'-Bis(phosphonomethyl)-2,2'-bipyridine Ligands: Photophysics, Electrochemistry, and High-Voltage Dye-Sensitized Solar Cells. *Inorganic Chemistry* 59(9): 6351–6358.
- Bonnet, D., & Rabenhorst, H. 1972. New results on the development of a thin-film p-CdTe-n-CdS heterojunction solar cell. *Photovoltaic Specialists Conference* 9: 129–132.
- Borland LM, Michael AC. 2007. An Introduction to Electrochemical Methods in Neuroscience: Chapter 1. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis.
- Bouclé, J., & Ackermann, J. 2011. Solid-state dye-sensitized and bulk heterojunction solar cells using TiO₂ and ZnO nanostructures: recent progress and new concepts at the borderline. *Polymer International* 61(3): 355–373.
- Brock, D. C. 2006. Useless no more: Gordon K. Teal, germanium, and single-crystal transistors. *Chemical Heritage Newsmagazine (Chemical Heritage Foundation)* 24(1).
- Bunch, J. S., van der Zande, A. M., Verbridge, S. S., Frank, I. W., Tanenbaum, D. M., Parpia, J. M., Craighead, H. G., & McEuen, P. L. 2007. Electromechanical Resonators from Graphene Sheets. *Science* 315(5811): 490–493.
- Calogero, G., Calandra, P., Irrera, A., Sinopoli, A., Citro, I., & di Marco, G. 2011. A new type of transparent and low-cost counter-electrode based on platinum nanoparticles for dye-sensitized solar cells. *Energy & Environmental Science*, 4(5): 1838-1844.

- Carlson, D. E., & Wronski, C. R. 1976. Amorphous silicon solar cell. *Applied Physics Letters* 28(11): 671–673.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. 1954. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics* 25(5): 676–677.
- Chen, J., Zhang, M., Gu, P., Yan, Z., Tang, C., Lv, B., Wang, X., Yi, Z., & Zhu, M. 2022. Broadband, wide-incident-angle, and polarization-insensitive high-efficiency absorption of monolayer graphene with nearly 100% modulation depth at communication wavelength. *Results in Physics* 40: 105833.
- Cho, S. il, Sung, H. K., Lee, S.-J., Kim, W. H., Kim, D.-H., & Han, Y. S. 2019. Photovoltaic Performance of Dye-Sensitized Solar Cells Containing ZnO Microrods. *Nanomaterials* 9(12): 1645.
- Dare-Edwards, M. P., Goodenough, J. B., Hamnett, A., Seddon, K. R., & Wright, R. D. 1980. Sensitisation of semiconducting electrodes with ruthenium-based dyes. *Faraday Discussions of the Chemical Society* 70: 285–298.
- Das, S., Kim, M., Lee, J., & Choi, W. 2014. Synthesis, Properties, and Applications of 2-D Materials: A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 39(4): 231–252.
- Dawo, C., Krishnan Iyer, P., & Chaturvedi, H. 2023. Carbon nanotubes/PANI composite as an efficient counter electrode material for dye sensitized solar cell. *Materials Science and Engineering: B* 297: 116722.
- Desilvestro, J., Graetzel, M., Kavan, L., Moser, J., & Augustynski, J. 1985. Highly efficient sensitization of titanium dioxide. *Journal of the American Chemical Society* 107(10): 2988–2990.
- Devadiga, D., Selvakumar, M., Shetty, P., & Santosh, M. S. 2021. Recent progress in dye sensitized solar cell materials and photo-supercapacitors: A review. *Journal of Power Sources* 493: 229698.
- Duonghong Serpone N. & Gratzel M., D. 1984. Integrated Systems for Water Cleavage by Visible Light; Sensitization of TiO₂ Particles by Surface Derivatization with Ruthenium Complexes. *Helvetica Chimica Acta* 67(4): 1012–1018.
- Einstein, A. 1917. On the quantum theory of radiation. *Physikalische Zeitschrift* 18(121): 167–183.
- Eizenberg J.M., M., & B. 1979. Carbon Monolayer Phase Condensation On Ni(111). *Surface Science* 82(1): 228–236.
- El-Banby, G. M., Moawad, N. M., Abouzalm, B. A., Abouzaid, W. F., & Ramadan, E. A. 2023. Photovoltaic system fault detection techniques: a review. *Neural Computing and Applications* 35(35): 24829–24842.

- Fang, X., Ma, T., Guan, G., Akiyama, M., Kida, T., & Abe, E. 2004. Effect of the thickness of the Pt film coated on a counter electrode on the performance of a dye-sensitized solar cell. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 570(2): 257–263.
- Farhana, K., Kadirgama, K., Noor, M. M., Rahman, M. M., Ramasamy, D., & Mahamude, A. S. F. 2019. CFD modelling of different properties of nanofluids in header and riser tube of flat plate solar collector. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 469(1): 12041.
- Farhana, K., Kadirgama, K., Rahman, M. M., Ramasamy, D., Noor, M. M., Najafi, G., Samykano, M., & Mahamude, A. S. F. 2019. Improvement in the performance of solar collectors with nanofluids — A state-of-the-art review. *Nano-Structures & Nano-Objects* 18: 100276.
- Farhana, K., Kadirgama, K., Subramonian, S., Ramasamy, D., Samykano, M., & Mahamude, A. S. F. 2021. Applications of Graphene Nanomaterials in Energy Storage—A State-of-Art Short Review. *International Conference on Mechanical Engineering Research*: 595–609.
- Farooq, S., Tahir, A. A., Krewer, U., Shah, A. ul H. A., & Bilal, S. 2019. Efficient photocatalysis through conductive polymer coated FTO counter electrode in platinum free dye sensitized solar cells. *Electrochimica Acta* 320: 134544.
- Ferrari & Robertson J., A. C. 2000. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B* 61(20): 14095.
- Fraas, L. M., & O'Neill, M. J. 2023. History of solar cell development. In *Low-Cost Solar Electric Power*: 1–12.
- Geacintov, N., Pope, M., & Kallmann, H. 1966. Photogeneration of charge carriers in tetracene. *The Journal of Chemical Physics* 45(7): 2639–2649.
- Gerischer, H., & Tributsch, H. 1968. Elektrochemische Untersuchungen zur spektralen Sensibilisierung von ZnO-Einkristallen. *Berichte Der Bunsengesellschaft Für Physikalische Chemie* 72(3): 437–445.
- Girish, K. H., Vishnumurthy, K. A., & Roopa, T. S. 2022. Role of conducting polymers in enhancing the stability and performance of perovskite solar cells: a brief review. *Materials Today Sustainability* 17: 100090.
- Gnanasekar, S., Kollu, P., Jeong, S. K., & Grace, A. N. 2019. Pt-free, low-cost and efficient counter electrode with carbon wrapped VO(2)(M) nanofiber for dye-sensitized solar cells. *Scientific Reports* 9(1): 5177.
- Green, M. A. 2002. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E* 14: 65–70.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefert, G., Hao, X., & Jiang, J. Y. 2025. Solar Cell Efficiency Tables (Version 66). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 33(7): 795–810.

- Haegel, N. M., & Kurtz, S. R. 2025. Global Progress Toward Renewable Electricity: Tracking the Role of Solar (Version 5). *IEEE Journal of Photovoltaics* 15(6): 740–751.
- Hao Wu J. Lin J. & Huang Y., S. 2006. Modification of photocathode of dye-sensitized nanocrystalline solar cell with platinum by vacuum coating, thermal decomposition and electroplating. *Composite Interfaces* 13(8–9): 899–909.
- Hauch & Georg A., A. 2001. Diffusion in the electrolyte and charge-transfer reaction at the platinum electrode in dye-sensitized solar cells. *Electrochimica Acta* 46(22): 3457–3466.
- Hočevar, M., Krašovec, U. O., Bokalič, M., Topič, M., Veurman, W., Brandt, H., & Hinsch, A. 2013. Sol-gel based TiO₂ paste applied in screen-printed dye-sensitized solar cells and modules. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19(5): 1464–1469.
- Hora, C., Santos, F., Pereira, A. M. V. M., Sales, M. G. F., Ivanou, D., & Mendes, A. 2022. PEDOT-graphene counter-electrode for solar and improved artificial light conversion in regular, bifacial and FTO-less cobalt mediated DSSCs. *Electrochimica Acta* 412: 140140.
- Hou, W., Xiao, Y., Han, G., & Lin, J. Y. 2019. The Applications of Polymers in Solar Cells: A Review. *Polymers (Basel)* 11(1): 143.
- Hsu, C.-Y., Elshafie, H., Diakina, E., Kareem, A. K., Kanjariya, P., Rajiv, A., Singh, A., & Jindal, P. K. 2025. Synergistic Enhancement of Dye-Sensitized solar cells with PANi/CZTS nanocomposite counter electrodes. *Inorganic Chemistry Communications* 178: 114635.
- Huang, K.-C., Wang, Y.-C., Dong, R.-X., Tsai, W.-C., Tsai, K.-W., Wang, C.-C., Chen, Y.-H., Vittal, R., Lin, J.-J., & Ho, K.-C. 2010. A high-performance dye-sensitized solar cell with a novel nanocomposite film of PtNP/MWCNT on the counter electrode. *Journal of Materials Chemistry* 20(20): 4067–4073.
- Jha Veerender P. Koiry S. P. Sridevi C. Chauhan A. K. Muthe K. P. & Gadkari S. C., P. 2018. Growth of aligned polypyrrole acicular nanorods and their application as Pt-free semitransparent counter electrode in dye-sensitized solar cell. *Polymers for Advanced Technologies* 29(1): 401–406.
- Jia, X., Campos-Delgado, J., Terrones, M., Meunier, V., & Dresselhaus, M. S. 2011. Graphene edges: a review of their fabrication and characterization. *Nanoscale* 3(1): 86–95.
- Jiang, R., & Boschloo, G. 2018. The impact of non-uniform photogeneration on mass transport in dye-sensitised solar cells. *Journal of Materials Chemistry A* 6(22): 10264–10276.
- Jiang, X., Yu, Z., Zhang, Y., Lai, J., Li, J., Gurzadyan, G. G., Yang, X., & Sun, L. 2017. High-Performance Regular Perovskite Solar Cells Employing Low-Cost

- Poly(ethylenedioxythiophene) as a Hole-Transporting Material. *Scientific Reports* 7: 42564.
- Johra, F. T., Lee, J.-W., & Jung, W.-G. 2014. Facile and safe graphene preparation on solution-based platform. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20(5): 2883–2887.
- Kakiage, K., Aoyama, Y., Yano, T., Oya, K., Fujisawa, J., & Hanaya, M. 2015. Highly efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes. *Chemical Communications* 51(88): 15894–15897.
- Kalyanasundaram, K. 2010. *Dye-sensitized solar cells*.
- Kanjana, N., Maiaugree, W., Laokul, P., Chaiya, I., Lunnoo, T., Wongjom, P., Infahsaeng, Y., Thongdang, B., & Amornkitbamrung, V. 2023. Fly ash boosted electrocatalytic properties of PEDOT:PSS counter electrodes for the triiodide reduction in dye-sensitized solar cells. *Scientific Reports* 13(1): 6012.
- Kant, N., & Singh, P. 2022. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Materials Today: Proceedings* 56: 3460–3470.
- Keothongkham Samuk; Maiaugree Wasan; Saekow Saman; Jareenboon Wirat; & Amornkitbamrung Vittaya, K. P. 2012. Electrochemically Deposited Polypyrrole for Dye-Sensitized Solar Cell Counter Electrodes. *International Journal of Photoenergy* 2012(1): 671326.
- Khan, I. M., Nazar, R., & Mehmood, U. 2022. Development of polypyrrole/graphene (PPY/graphene) based electrocatalyst for platinum free dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Materials Letters* 320: 132331.
- Khenkin, M. v, Katz, E. A., Abate, A., Bardizza, G., Berry, J. J., Brabec, C., Brunetti, F., Bulović, V., Burlingame, Q., di Carlo, A., Cheacharoen, R., Cheng, Y.-B., Colmann, A., Cros, S., Domanski, K., Dusza, M., Fell, C. J., Forrest, S. R., Galagan, Y., & Lira-Cantu, M. 2020. Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures. *Nature Energy* 5(1): 35–49.
- Kirk, A. P. 2025. What is the efficiency limit of a single-junction silicon solar cell? *Applied Physics Letters* 127(18).
- Kladkaew, M., Lin, J.-Y., Chanlek, N., Vailikhit, V., & Hasin, P. 2022. Well-dispersive polypyrrole and MoSe₂ embedded in multiwalled carbon nanotube@ reduced graphene oxide nanoribbon electrocatalysts as the efficient counter electrodes in rigid and plastic dye-sensitized solar cells. *ACS Applied Energy Materials* 6(1): 397–415.
- Kumar, N. S., & Naidu, K. C. B. 2021. A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. *Journal of Materiomics* 7(5): 940–956.

- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. 2008. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science* 321(5887): 385–388.
- Lee, G.-W., Kim, D., Ko, M. J., Kim, K., & Park, N.-G. 2010. Evaluation on over photocurrents measured from unmasked dye-sensitized solar cells. *Solar Energy* 84(3): 418–425.
- Lee, Y.-L., Chen, C.-L., Chong, L.-W., Chen, C.-H., Liu, Y.-F., & Chi, C.-F. 2010. A platinum counter electrode with high electrochemical activity and high transparency for dye-sensitized solar cells. *Electrochemistry Communications* 12(11): 1662–1665.
- Lei, C., Irfan, M., Abbas, W., Alzahrani, F. M. A., Alamri, S., & Imran, M. 2026. Structural, electrical, and optical characteristics of polypyrrole-doped DBSA/ZrO₂ nanocomposites. *Discover Materials* 6(1): 89.
- Li, G., & Gao, X. 2020. Low-cost counter-electrode materials for dye-sensitized and perovskite solar cells. *Advanced Materials* 32(3): 1806478.
- Li, K., Zhang, H., Tang, T., Tang, Y., Wang, Y., & Jia, J. 2016. Facile electrochemical polymerization of polypyrrole film applied as cathode material in dual rotating disk photo fuel cell. *Journal of Power Sources* 324: 368–377.
- Liang, C., Yang, C., Zang, L., Liu, Q., Qiu, J., Li, Y., Zuo, W., & Liu, X. 2021. UV-Assisted One-Step Synthesis of Ternary Graphene/Polypyrrole/Silver Nanocomposites for Supercapacitors. *Energy Technology* 9(3): 2000966.
- Lin Ching-Lun; Chen Pin-Hung; han Hsieh-Cheng; Chiu Kuo-Yuan; & Su Yuhlong Oliver, C.-F. C. 2016. Dye sensitized solar cells with carbon mixed conducting polymer counter electrodes. In *23rd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD)*: 232-235. IEEE.
- Liu, B., Tang, C., Chen, J., Wang, Q., Pei, M., & Tang, H. 2017. Dual-band light absorption enhancement of monolayer graphene from surface plasmon polaritons and magnetic dipole resonances in metamaterials. *Opt Express* 25(10): 12061–12068.
- Liu, Q., & Cheng, C. 2021. Facile construction of a polypyrrole-cobalt sulfide counter electrode for low-cost dye-sensitized solar cells. *RSC Adv* 11(60): 38146–38151.
- Loryuenyong, V., Khadthiphong, A., Phinkratok, J., Watwittayakul, J., Supawattanakul, W., & Buasri, A. 2019. The fabrication of graphene-polypyrrole composite for application with dye-sensitized solar cells. *Materials Today: Proceedings* 17: 1675–1681.
- Lu, S., Wang, S., Han, R., Feng, T., Guo, L., Zhang, X., Liu, D., & He, T. 2014. The working mechanism and performance of polypyrrole as a counter electrode for dye-sensitized solar cells. *J. Mater. Chem. A* 2(32): 12805–12811.

- Luhakhra, N., & Tiwari, S. K. 2023. Polaron and bipolaron mediated photocatalytic activity of polypyrrole nanoparticles under visible light. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 667: 131380.
- Luo, P., Niu, H., Zheng, G., Bai, X., Zhang, M., & Wang, W. 2010. Enhancement of photoelectric conversion by high-voltage electric field assisted crystallization of a novel ternary-encapsulated spherical TiO₂ aggregate for solar cells. *Electrochimica Acta* 55(8): 2697–2705.
- Ma, T., Fang, X., Akiyama, M., Inoue, K., Noma, H., & Abe, E. 2004. Properties of several types of novel counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 574(1): 77–83.
- Machida, K., Koseki, K., & Takeuchi, S. 2022. Electrochemical Investigation of PEDOT Counter Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells. *Electrochemistry* 90(1): 17003.
- Madan, A. (1985). Amorphous Silicon Solar Cells. *Materials Processing: Theory and Practices* 5: 331–375.
- Mahamude, A., Harun, W., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Farhana, K., Saleh, K., & Yusaf, T. 2022. Experimental Study on the Efficiency Improvement of Flat Plate Solar Collectors Using Hybrid Nanofluids Graphene/Waste Cotton. *Energies* 15(7): 2309.
- Mahamude, A. S. F., Harun, W. S. W., Kadirgama, K., Farhana, K., Ramasamy, D., Samyalingam, L., & Aslfattahi, N. 2021. Thermal performance of nanomaterial in solar collector: State-of-play for graphene. *Journal of Energy Storage* 42: 103022.
- Maruthamuthu, S., Chandrasekaran, J., Manoharan, D., Karthick, S. N., & Kim, H. 2015. Multilayer photoactive nanocolloidal PPy:PSS as a novel substitute for Pt free counter electrode in DSSC. *Journal of Applied Polymer Science* 133(10).
- Masud, & Kim, H. K. 2023. Redox Shuttle-Based Electrolytes for Dye-Sensitized Solar Cells: Comprehensive Guidance, Recent Progress, and Future Perspective. *ACS Omega* 8(7): 6139–6163.
- Matsumura, M., Matsudaira, S., Tsubomura, H., Takata, M., & Yanagida, H. 1980. Dye sensitization and surface structures of semiconductor electrodes. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development* 19(3): 415–421.
- Mauri, L., Colombo, A., Dragonetti, C., & Fagnani, F. 2022. A Fascinating Trip into Iron and Copper Dyes for DSSCs. *Inorganics* 10(9): 137.
- Mayo, J. S., Mann, H., Witt, F. J., Peck, D. S., Gummel, H. K., & Brown, W. L. 1963. The command system malfunction of the Telstar satellite. *Bell System Technical Journal* 42(4): 1631–1657.
- Mazlan, N. A., Shahabuddin, S., Baharin, S. N. A., Pandey, A. K., & Saidur, R. 2018. Conducting polymers: New Arena in dye-sensitized solar cells. *5th IET*

International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT 2018). Stevenage UK: IET.

Mehmood, U. 2017. Efficient and economical dye-sensitized solar cells based on graphene/TiO₂ nanocomposite as a photoanode and graphene as a Pt-free catalyst for counter electrode. *Organic Electronics* 42: 187–193.

Mette, H., & Pick, H. 1953. Elektronenleitfähigkeit von anthracen-einkristallen. *Zeitschrift Für Physik* 134(5): 566–575.

Miao, X., Tongay, S., Petterson, M. K., Berke, K., Rinzler, A. G., Appleton, B. R., & Hebard, A. F. 2012. High efficiency graphene solar cells by chemical doping. *Nano Lett* 12(6): 2745–2750.

Mohammadian, J., Osfour, S., Jalali, T., & Jamekhorshid, A. 2024. Electrochemical impedance spectroscopy analysis of dye-sensitized solar cells composed of electrospun composite photoanodes: A comparative study of natural and synthetic sensitizers. *Optik* 303: 171730.

Mondal, B., Usha, K., Mahata, S., Kumbhakar, P., & Nandi, M. M. 2011. Synthesis and Characterization of Nanocrystalline TiO₂ Thin Films for Use as Photoelectrodes in Dye Sensitized Solar Cell Application. *Transactions of the Indian Ceramic Society* 70(3): 173–177.

Moser, J. 1887. Notiz über Verstärkung photoelektrischer Ströme durch optische Sensibilisierung. *Monatshefte Für Chemie Und Verwandte Teile Anderer Wissenschaften* 8(1): 373.

Motlagh, M. S., Mottaghitalab, V., Rismanchi, A., Chirani, M. R., & Hasanzadeh, M. 2022. Performance modelling of textile solar cell developed by carbon fabric/polypyrrole flexible counter electrode. *International Journal of Sustainable Energy* 41(8): 1106–1126.

Murakami, T. N., & Grätzel, M. 2008. Counter electrodes for DSC: Application of functional materials as catalysts. *Inorganica Chimica Acta* 361(3): 572–580.

Namba, S., & Hishiki, Y. 1965. Color Sensitization of Zinc Oxide with Cyanine Dyes. *The Journal of Physical Chemistry* 69(3): 774–779.

Nan, D., Fan, H., Bolag, A., Liu, W., & Bao, T. 2023. Enhanced electrocatalytic properties in dye-sensitized solar cell via Pt/SBA-15 composite with optimized Pt constituent. *Heliyon* 9(11): e22403.

Narayan, M. R. 2011. Review: Dye sensitized solar cells based on natural photosensitizers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(1): 208–215.

Nath, N. C. D., & Lee, J.-J. 2019. Binary redox electrolytes used in dye-sensitized solar cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 78: 53–65.

Nawarathna, H. M. C. P., Abeysingha, D. U. S. N., Wickramasinghe, W. M. T. N., & Gunathilake, W. S. S. 2018. Conducting polymer blends

(polyaniline/polypyrrole) as counter electrode materials in dye sensitized solar cells. *Ceylon Journal of Science* 47(3).

- Noorani, B., Ghasemi, S., & Hosseini, S. R. 2021. Nanostructured nickel sulfide/graphene oxide-polypyrrole as platinum-free counter electrode for dye-sensitized solar cell. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 405: 112966.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. v, Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. v, Dubonos, S. v, & Firsov, A. A. 2005. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature* 438(7065): 197–200.
- Ohtani, Y., Kumano, K., Saneshige, M., Takami, K., & Hoshi, H. 2021. Effect of electropolymerization duration on the structure and performance of polypyrrole/graphene nanoplatelet counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Journal of Solid State Electrochemistry* 25(7): 2107–2113.
- O'Regan, B., & Grätzel, M. 1991. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* 353(6346): 737–740.
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. 2015. Graphene/elastomer nanocomposites. *Carbon* 95: 460–484.
- Papageorgiou, N. 2004. Counter-electrode function in nanocrystalline photoelectrochemical cell configurations. *Coordination Chemistry Reviews* 248(13–14): 14 (Patent No. US2780765, 1957)21–1446.
- Pastuszak, J., & Wegierek, P. 2022. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. *Materials* 15(16): 5542.
- Patchkovskii, S., Tse, J. S., Yurchenko, S. N., Zhechkov, L., Heine, T., & Seifert, G. 2005. Graphene nanostructures as tunable storage media for molecular hydrogen. *Proc Natl Acad Sci U S A* 102(30): 10439–10444.
- Patni, N., & Pillai, S. G. 2020. Optimization of the doping of polyaniline via response surface method to prepare polymer electrolytes for dye sensitized solar cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(2): 103709.
- Pearson D.M. & Fuller C.S. 1957. Solar Energy Converting Apparatus. *AT&T Receive Patent* US2780765.
- Pochettino, A., & Sella, A. 1906. Photoelectric behavior of anthracene. *Acad. Lincei Rend* 15: 355–363.
- Pradhan, S. C., & Soman, S. 2021. Effect of thickness on charge transfer properties of conductive polymer based PEDOT counter electrodes in DSSC. *Results in Surfaces and Interfaces* 5: 100030.
- Rafiee, M., Abrams, D. J., Cardinale, L., Goss, Z., Romero-Arenas, A., & Stahl, S. S. 2024. Cyclic voltammetry and chronoamperometry: mechanistic tools for organic electrosynthesis. *Chemical Society Reviews* 53(2): 566–585.

- Rafique, S., Rashid, I., & Sharif, R. 2021. Cost effective dye sensitized solar cell based on novel Cu polypyrrole multiwall carbon nanotubes nanocomposites counter electrode. *Sci Rep* 11(1): 14830.
- Rahman, M. S., Hammed, W. A., Yahya, R. B., & Mahmud, H. N. M. E. 2016. Prospects of conducting polymer and graphene as counter electrodes in dye-sensitized solar cells. *Journal of Polymer Research* 23(9): 192.
- Rahman, M. S., Hammed, W. A., Yahyah, R., & Mahmud, H. N. M. E. 2017. Optoelectrical and photoluminescence quenching properties of poly(N-vinyl carbazole)-polypyrrole/reduced graphene oxide nanocomposites. *Synthetic Metals* 226: 188–194.
- Raju, A. P. A., Lewis, A., Derby, B., Young, R. J., Kinloch, I. A., Zan, R., & Novoselov, K. S. 2014. Wide-Area Strain Sensors based upon Graphene-Polymer Composite Coatings Probed by Raman Spectroscopy. *Advanced Functional Materials* 24(19): 2865–2874.
- Ratke Peter W., L. & V. 2002. Ostwald Ripening in Material Processing. In *Growth and Coarsening*: 127–165. Springer Berlin, Heidelberg.
- Reddy, A. C. K., Neeraja, V., Meenakshamma, A., Gurulakshmi, M., Gurubhasker, M., Raghavender, M., & Subbaiah, Y. P. V. 2024. Efficient counter electrode of MoS₂-GO/PEDOT: PSS for platinum-free, high-performance dye sensitized solar cells, *Chemistry Select* 9(10): e202305200.
- Reese, M. O., Gevorgyan, S. A., Jørgensen, M., Bundgaard, E., Kurtz, S. R., Ginley, D. S., Olson, D. C., Lloyd, M. T., Morvillo, P., Katz, E. A., Elschner, A., Haillant, O., Currier, T. R., Shrotriya, V., Hermenau, M., Riede, M., R. Kirov, K., Trimmel, G., Rath, T., & Krebs, F. C. 2011. Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95(5): 1253–1267.
- Richhariya Kumar A. Shukla A. K. Shukla K. N. & Meikap B. C., G. 2023. Effect of Different Counter Electrodes on Power Conversion Efficiency of DSSCs. *Journal of Electronic Materials* 52(1): 60–71.
- Sahmer, A. Z., Mohamed, N. M., & Zaine, S. N. A. 2015. Effectiveness of dye sensitised solar cell under low light condition using wide band dye. *AIP Conference Proceedings* 1669(1): 020068.
- Sahu Patel M. Verma A. K. & Tiwari S., S. 2017. Analytical Study of Current Density-Voltage Relation in Dye-Sensitized Solar Cells using Equivalent Circuit Model. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*: 1489–1493. IEEE.
- Saito, Y., Fukuri, N., Senadeera, R., Kitamura, T., Wada, Y., & Yanagida, S. 2004. Solid state dye sensitized solar cells using in situ polymerized PEDOTs as hole conductor. *Electrochemistry Communications* 6(1): 71–74.

- Salleh, S. A., Rahman, M. Y. A., & Aziz, T. H. T. 2022. Dye-sensitized solar cell using nickel sulfide-reduced graphene oxide counter electrode: Effect of sulphur content. *Inorganic Chemistry Communications* 135: 109086.
- Sariciftci, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J., & Wudl, F. 1992. Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene. *Science* 258(5087): 1474–1476.
- Shahat, M. A., Ghitas, A., Almutairi, F. N., & Alresheedi, N. M. 2024. Oxygen enriched PANi-based counter electrode network toward efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Sci Rep* 14(1): 25977.
- Shahriary Anjali A., L. & A. 2014. Graphene oxide synthesized by using modified hummers approach. *International Journal of Renewable Energy and Environmental Engineering* 2(1): 58–63.
- Shen, J., Zhu, Y., Yang, X., & Li, C. 2012. Graphene quantum dots: emergent nanolights for bioimaging, sensors, catalysis and photovoltaic devices. *Chem Commun (Camb)* 48(31): 3686–3699.
- Shin, H.-J., Jeon, S. S., & Im, S. S. 2011. CNT/PEDOT core/shell nanostructures as a counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Synthetic Metals* 161(13–14): 1284–1288.
- Siddique, S. A., Arshad, M., Naveed, S., Mehboob, M. Y., Adnan, M., Hussain, R., Ali, B., Siddique, M. B. A., & Liu, X. 2021. Efficient tuning of zinc phthalocyanine-based dyes for dye-sensitized solar cells: a detailed DFT study. *RSC Adv* 11(44): 27570–27582.
- Siu, C. H., Lee, L. T., Yiu, S. C., Ho, P. Y., Zhou, P., Ho, C. L., Chen, T., Liu, J., Han, K., & Wong, W. Y. 2016. Synthesis and Characterization of Phenothiazine-Based Platinum (II)-Acetylide Photosensitizers for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells. *Chemistry* 22(11): 3750–3757.
- Soonmin, H., Nandi, P., Mwankemwa, B. S., Malevu, T. D., & Malik, M. I. 2023. Overview on Different Types of Solar Cells: An Update. *Applied Sciences* 13(4): 2076–3417.
- Srinivasu, P., Singh, S. P., Islam, A., & Han, L. 2011. Metal-Free Counter Electrode for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells through High Surface Area and Large Porous Carbon. *International Journal of Photoenergy* 2011: 1–4.
- Su'ait, M. S., Rahman, M. Y. A., & Ahmad, A. 2015. Review on polymer electrolyte in dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Solar Energy* 115: 452–470.
- Suranshe, S. S., Patil, A., Deshmukh, T., & Chavhan, J. 2023. One step electrode fabrication of thin film graphene oxide-polypyrrole composite by electrodeposition using cyclic voltammetry for hybrid type supercapacitor application. *Electrochimica Acta* 450: 142277.

- Standard, A. S. T. M. 2020. *E948–16, Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using Reference Cells Under Simulated Sunlight*. ASTM International technical report.
- Tang, C. W. 1986. Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters* 48(2): 183–185.
- Tang, Q., Muller, M., Li, C. Y., & Hu, W. 2019. Anomalous Ostwald Ripening Enables 2D Polymer Crystals via Fast Evaporation. *Phys Rev Lett* 123(20): 207801.
- Thombare Vijay J., Rath Madhab C., & Han Sung H., J. V. F. 2012. Optical absorption study of electrochemically synthesized polypyrrole (Ppy) thin films. *International Conference on Optical Engineering (ICOE)*: 1–4.
- Tobin, L. L., O'Reilly, T., Zerulla, D., & Sheridan, J. T. 2011. Characterising dye-sensitised solar cells. *Optik* 122(14): 1225–1230.
- Tomar, N., Agrawal, A., Dhaka, V. S., & Surolia, P. K. 2020. Ruthenium complexes-based dye sensitized solar cells: Fundamentals and research trends. *Solar Energy* 207: 59–76.
- Tributsch, H., & Calvin, M. 1971. Electrochemistry of excited molecules: photo-electrochemical reactions of chlorophylls. *Photochemistry and Photobiology* 14(2): 95–112.
- Tsubomura, H., Matsumura, M., Nomura, Y., & Amamiya, T. 1976. Dye sensitised zinc oxide: aqueous electrolyte: platinum photocell. *Nature* 261(5559): 402–403.
- Tyagi, V. v, Rahim, N. A. A., Rahim, N. A., & Selvaraj, J. A. L. 2013. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20: 443–461.
- Venkatesan, S., Manurung, D., Teng, H., & Lee, Y.-L. 2022. Efficiency and stability improvements for room light dye-sensitized solar cells in the presence of electrochemically fabricated composite counter electrodes. *Journal of Power Sources* 518: 230781.
- Wang, G., Zhuo, S., & Xing, W. 2012. Graphene/polyaniline nanocomposite as counter electrode of dye-sensitized solar cells. *Materials Letters* 69: 27–29.
- Wang, M., Tang, Q., Xu, P., He, B., Lin, L., & Chen, H. 2014. Counter electrodes from polyaniline–graphene complex/graphene oxide multilayers for dye–sensitized solar cells. *Electrochimica Acta* 137: 175–182.
- Wang, P., Zakeeruddin, S. M., Moser, J. E., Nazeeruddin, M. K., Sekiguchi, T., & Gratzel, M. 2003. A stable quasi-solid-state dye-sensitized solar cell with an amphiphilic ruthenium sensitizer and polymer gel electrolyte. *Nat Mater* 2(6): 402–407.
- Wang, X., Zhi, L., & Müllen, K. 2007. Transparent, Conductive Graphene Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells. *Nano Letters* 8(1): 323–327.

- Weber, D. (1978). $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, ein Pb(II)-System mit kubischer Perowskitstruktur. *Zeitschrift Für Naturforschung B* 33(12): 1443–1445.
- West, W. 1974. The First Hundred Years of Spectral sensitization. *Photographic Science and Engineering* 18(1): 35–48.
- Wu, C. 2022. Ruthenium-based complex dyes for dye-sensitized solar cells. *Journal of the Chinese Chemical Society* 69(8): 1242–1252.
- Wu, J., Li, Q., Fan, L., Lan, Z., Li, P., Lin, J., & Hao, S. 2008. High-performance polypyrrole nanoparticles counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources* 181(1): 172–176.
- Wu, Z. S., Sun, Y., Tan, Y. Z., Yang, S., Feng, X., & Mullen, K. 2012. Three-dimensional graphene-based macro- and mesoporous frameworks for high-performance electrochemical capacitive energy storage. *J Am Chem Soc* 134(48): 19532–19535.
- Xu, Y., Sheng, K., Li, C., & Shi, G. 2010. Self-Assembled Graphene Hydrogel via a One-Step Hydrothermal Process. *ACS Nano* 4(7): 4324–4330.
- Xue, Y., Liu, J., Chen, H., Wang, R., Li, D., Qu, J., & Dai, L. 2012. Nitrogen-doped graphene foams as metal-free counter electrodes in high-performance dye-sensitized solar cells. *Angew Chem Int Ed Engl* 51(48): 12124–12127.
- Yahya, M., Bouziani, A., Ocak, C., Seferoğlu, Z., & Sillanpää, M. 2021. Organic/metal-organic photosensitizers for dye-sensitized solar cells (DSSC): Recent developments, new trends, and future perceptions. *Dyes and Pigments* 192: 109227.
- Ye, M., Wen, X., Wang, M., Iocozzia, J., Zhang, N., Lin, C., & Lin, Z. 2015. Recent advances in dye-sensitized solar cells: from photoanodes, sensitizers and electrolytes to counter electrodes. *Materials Today* 18(3): 155–162.
- Yelshibay, A., Bukari, S. D., Baptayev, B., & Balanay, M. P. 2024. Conducting Polymers in Solar Cells: Insights, Innovations, and Challenges. *Organics* 5(4): 640–669.
- Yen, M.-Y., Teng, C.-C., Hsiao, M.-C., Liu, P.-I., Chuang, W.-P., Ma, C.-C. M., Hsieh, C.-K., Tsai, M.-C., & Tsai, C.-H. 2011. Platinum nanoparticles/graphene composite catalyst as a novel composite counter electrode for high performance dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry* 21(34): 12880–12888.
- Yildiz, A., Chouki, T., Atli, A., Harb, M., Verbruggen, S. W., Ninakanti, R., & Emin, S. 2021. Efficient Iron Phosphide Catalyst as a Counter Electrode in Dye-Sensitized Solar Cells. *ACS Applied Energy Materials* 4(10): 10618–10626.
- Yoo, J. J., Balakrishnan, K., Huang, J., Meunier, V., Sumpter, B. G., Srivastava, A., Conway, M., Reddy, A. L., Yu, J., Vajtai, R., & Ajayan, P. M. 2011. Ultrathin planar graphene supercapacitors. *Nano Lett* 11(4): 1423–1427.

- Yun Mingxing; Wang Yudi; Shi Jing; Lin Xiao; Hagfeldt Anders; & Ma Tingli, S. W. 2013. Pt-like Behavior of High-Performance Counter Electrodes Prepared from Binary Tantalum Compounds Showing High Electrocatalytic Activity for Dye-Sensitized Solar Cells. *ChemSusChem* 6(3): 411–416.
- Yun, S., Freitas, J. N., Nogueira, A. F., Wang, Y., Ahmad, S., & Wang, Z.-S. 2016. Dye-sensitized solar cells employing polymers. *Progress in Polymer Science* 59: 1–40.
- Zeng, K., Chen, Y., Zhu, W. H., Tian, H., & Xie, Y. 2020. Efficient Solar Cells Based on Concerted Companion Dyes Containing Two Complementary Components: An Alternative Approach for Cosensitization. *J Am Chem Soc* 142(11): 5154–5161.
- Zhang, D. W., Li, X. D., Li, H. B., Chen, S., Sun, Z., Yin, X. J., & Huang, S. M. 2011. Graphene-based counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Carbon* 49(15): 5382–5388.
- Zhang, Y., Wang, P., Zhang, T., & Gou, B. 2020. High-Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells Based on Kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Inlaid on a Flexible Carbon Fabric Composite Counter Electrode. *ACS Omega* 5(38): 24898–24905.
- Zhang, Y., Wu, L., Xie, E., Duan, H., Han, W., & Zhao, J. 2009. A simple method to prepare uniform-size nanoparticle TiO_2 electrodes for dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources* 189(2): 1256–1263.
- Zheng, H., Tachibana, Y., & Kalantar-Zadeh, K. 2010. Dye-sensitized solar cells based on WO_3 . *Langmuir* 26(24): 19148–19152.
- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. 2010. Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Adv Mater* 22(35): 3906–3924.
- Zou, J., Wang, Y., Baryshnikov, G., Luo, J., Wang, X., Agren, H., Li, C., & Xie, Y. 2022. Efficient Dye-Sensitized Solar Cells Based on a New Class of Doubly Concerted Companion Dyes. *ACS Appl Mater Interfaces* 14(29): 33274–33284.

LAMPIRAN A**SENARAI PENERBITAN**

Salleh, S.A, Rahman. M.Y.A, Aziz, T.H.T, Sauvage, F dan Beddu, S. 2025. Influence of Number of Layer of Graphene Films as Counter Electrode for Efficient Dye-Sensitized Solar Cell in Indoor Application. *Chemical Papers* 79(2):723 -731.

Salleh, S.A, Rahman, M.Y.A, Aziz T.H.T, Omar, M.F, Beddu, S, Ahdaliza, A.Z. Ludin, N.A. 2026. Polypyrrole films prepared by chronoamperometry technique as counter electrode for dye-sensitized solar cell. *Applied Physics A* 132(6):476.

Salleh, S.A, Rahman, M.Y.A, Aziz T.H.T, Omar, M.F, Beddu S dan Mohamad, D. 2026. Conductive polymer and its modification as counter electrode in dye-sensitized solar cell: a brief review. *Ionics* 32: 5875-5888.

