



**KARYA ILHAM  
PUBLISHING**

CONNECTING MINDS, BRIDGING IDEAS, INSPIRING READERS

## Future Energy and Environment Letters

Journal homepage:

<https://karyailham.com.my/index.php/feel>

ISSN: 3083-8940



# Sel Surya Organik untuk Peranti Internet Benda (IoT) dalam Persekitaran Dalaman

## *Organic Solar Cells for Internet of Things (IoT) Devices in Indoor Environments*

Shafidah Shafian<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Solar Energy Research Institute (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi Selangor, Malaysia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 14 March 2026

Received in revised form 31 May 2026

Accepted 1 June 2026

Available online 8 June 2026

### ABSTRACT

Perkembangan pesat teknologi Internet Benda (Internet of Things, IoT) telah meningkatkan keperluan kepada sumber tenaga berskala kecil yang stabil, cekap dan mampan untuk menyokong operasi peranti elektronik berkuasa rendah. Walau bagaimanapun, kebanyakan peranti IoT masa kini masih bergantung kepada bateri konvensional yang mempunyai jangka hayat terhad serta memerlukan penyelenggaraan dan penggantian yang kerap. Oleh itu, teknologi penjanaan tenaga alternatif seperti sel suria organik untuk pencahayaan dalaman telah muncul sebagai penyelesaian yang berpotensi bagi sistem elektronik berkuasa rendah. Berbanding teknologi fotovoltaik konvensional, sel suria organik menawarkan kelebihan seperti, fleksibiliti mekanikal, kurang toksik, kos pembuatan rendah, kebolehsuaian spektrum serapan, serta kesesuaian untuk proses fabrikasi berskala besar menggunakan teknik larutan. Kajian terkini menunjukkan bahawa kecekapan penukaran tenaga bagi sel suria organik dalaman telah meningkat secara signifikan sehingga melebihi 30% di bawah pencahayaan LED dalaman. Walaupun begitu, beberapa cabaran masih wujud termasuk kestabilan jangka panjang, kehilangan tenaga, dan pengoptimuman struktur peranti untuk pencahayaan intensiti rendah. Artikel ulasan ini membincangkan prinsip asas sel suria organik, ciri-ciri pencahayaan dalaman, kemajuan terkini dalam pembangunan bahan aktif dan kejuruteraan peranti, aplikasi sel suria organik untuk sistem IoT, serta cabaran dan prospek masa hadapan teknologi ini.

*The rapid development of Internet of Things (IoT) technology has increased the need for stable, efficient, and sustainable small-scale power sources to support the operation of low-power electronic devices. However, most current IoT devices still rely on conventional batteries that have limited lifespans and require frequent maintenance and replacement. Therefore, alternative power generation technologies such as organic solar cells for indoor lighting have emerged as potential solutions for low-power electronic systems. Compared with conventional photovoltaic technologies, organic solar cells offer advantages such as mechanical flexibility, low toxicity, low manufacturing cost, tunability of absorption spectra, and suitability for large-scale fabrication processes using solution techniques. Recent studies have shown that the energy conversion efficiency of indoor organic solar cells has been significantly improved to over 30% under indoor LED illumination. However, several challenges still*

#### Keywords:

Fotovoltaik dalaman; sel suria organik; tenaga cahaya rendah; pencahayaan buatan; IoT

*Indoor photovoltaics; organic solar cells; low-light energy; artificial lighting; IoT*

\* Corresponding author.

E-mail address: [norshafidah@ukm.edu.my](mailto:norshafidah@ukm.edu.my)

---

*exist including long-term stability, energy loss, and optimization of device structures for low-intensity lighting. This review article discusses the basic principles of organic solar cells, indoor lighting characteristics, recent advances in active material development and device engineering, organic solar cell applications for IoT systems, and future challenges and prospects of this technology.*

---

## 1. Pengenalan

Dalam dekad kebelakangan ini, teknologi internet benda (Internet of Things, IoT) telah berkembang dengan pesat dan menjadi komponen penting dalam pelbagai sektor termasuk rumah pintar, sistem pemantauan alam sekitar, peranti kesihatan boleh pakai, serta automasi industri [1]. IoT merujuk kepada rangkaian peranti elektronik yang saling berhubung melalui internet untuk mengumpul, memproses dan berkongsi data secara autonomi [2]. Walaupun kebanyakan peranti IoT menggunakan tenaga yang sangat rendah, jumlah peranti yang semakin meningkat menjadikan isu bekalan tenaga sebagai cabaran utama. Secara tradisional, peranti IoT dikuasakan oleh bateri boleh cas semula atau bateri pakai buang [3]. Walau bagaimanapun, penggunaan bateri secara meluas menimbulkan beberapa masalah termasuk kos penyelenggaraan yang tinggi, keperluan penggantian bateri secara berkala, serta impak negatif terhadap alam sekitar akibat pelupusan bateri [4]. Laporan Global E-waste Monitor 2024 menunjukkan bahawa sebanyak 62 juta tan sisa elektronik dihasilkan pada tahun 2022 dan jumlah ini dijangka meningkat kepada 82 juta tan menjelang 2030, manakala hanya 22.3% direkodkan sebagai dikumpul dan dikitar semula secara formal. Walaupun angka ini merangkumi pelbagai kategori peralatan elektrik dan elektronik, ia memberikan konteks umum bahawa peningkatan peranti berkuasa bateri boleh menambah tekanan terhadap pengurusan sisa, kos penyelenggaraan dan keperluan penggantian komponen tenaga [5]. Oleh itu, pembangunan sistem tenaga sendiri yang boleh menjana elektrik secara berterusan tanpa bergantung kepada bateri menjadi satu bidang penyelidikan yang semakin penting [6].

Salah satu pendekatan yang menjanjikan ialah penggunaan teknologi fotovoltaiik dalaman (indoor photovoltaics) yang mampu menukar cahaya buatan seperti lampu diod pemancar cahaya (light-emitting diode, LED) dan lampu pendarfluor kepada tenaga elektrik [7]. Dalam konteks ini, sel suria organik (Organic Solar Cells, OSC) telah menarik perhatian besar kerana sifat optoelektroniknya yang boleh ditala serta keupayaan untuk beroperasi dengan cekap dalam keadaan cahaya rendah [8, 9].

Kemajuan dalam reka bentuk bahan penderma dan penerima telah meningkatkan kecekapan sel suria organik dengan ketara sejak beberapa tahun kebelakangan ini. Kecekapan sel suria organik di bawah pencahayaan dalaman dilaporkan mencapai lebih daripada 31%, menjadikannya teknologi yang sangat berpotensi untuk aplikasi IoT berkuasa rendah [10, 11]. Walau bagaimanapun, beberapa cabaran masih perlu ditangani termasuk pengoptimuman bahan aktif, kestabilan jangka panjang peranti serta keserasian spektrum antara bahan fotovoltaiik dan sumber pencahayaan dalaman.

Oleh itu, artikel ulasan ini membincangkan secara menyeluruh prinsip asas sel suria organik untuk aplikasi dalaman, kemajuan terkini dalam pembangunan bahan penderma dan penerima, strategi kejuruteraan peranti untuk meningkatkan prestasi, serta potensi aplikasi teknologi ini dalam sistem IoT. Selain itu, cabaran semasa dan prospek penyelidikan masa hadapan turut dibincangkan bagi memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan teknologi sel suria organik untuk aplikasi tenaga dalam persekitaran dalaman.

## 2. Prinsip Asas Sel Suria Organik

Sel suria organik merupakan peranti fotovoltaiik yang menggunakan bahan semikonduktor organik sebagai lapisan aktif untuk menyerap cahaya dan menjana pembawa cas [12, 13]. Berbeza dengan sel suria silikon konvensional yang menggunakan bahan kristal tak organik, sel suria organik biasanya terdiri daripada polimer konjugasi atau molekul kecil yang mempunyai struktur  $\pi$ -konjugasi yang membolehkan penyerapan cahaya dan pengangkutan cas [14]. Struktur asas sel suria organik biasanya terdiri daripada beberapa lapisan utama termasuk elektrod lutsinar seperti indium tin oxide (ITO), lapisan pengangkut caj lohong dan elektron, lapisan aktif penderma–penerima dan elektrod logam.

Lapisan aktif merupakan komponen paling penting dalam sel suria organik kerana di sinilah proses penukaran tenaga cahaya kepada tenaga elektrik berlaku. Lapisan ini biasanya terdiri daripada campuran bahan penderma dan bahan penerima yang membentuk struktur heterojunction pukal (bulk heterojunction, BHJ). Apabila cahaya diserap oleh bahan aktif, tenaga foton akan menghasilkan eksiton iaitu pasangan elektron dan lohong yang terikat oleh daya Coulomb. Eksiton ini kemudian meresap ke antara muka penderma-penerima, di mana pemisahan cas berlaku. Elektron akan dipindahkan ke bahan penerima manakala lohong kekal pada bahan penderma dalam struktur konvensional dan sebaliknya dalam struktur terbalik. Pembawa cas ini seterusnya diangkut ke elektrod masing-masing melalui lapisan pengangkut yang sesuai.

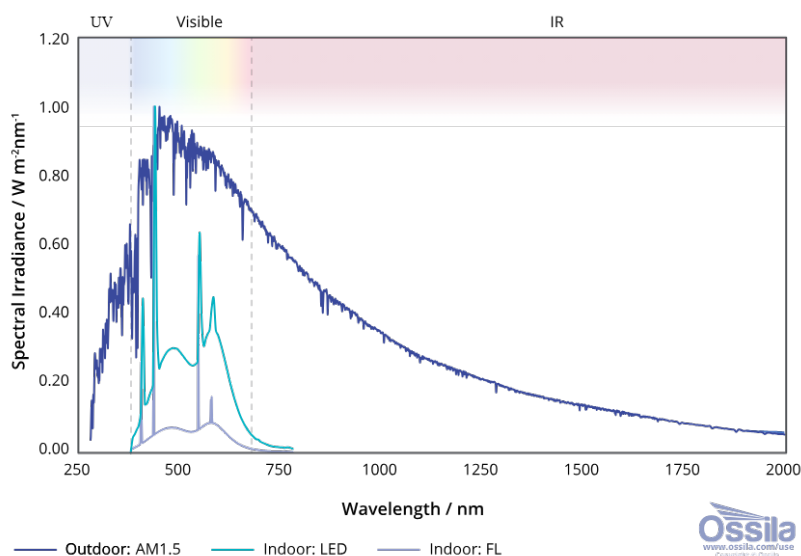
Prestasi sel suria organik biasanya dinilai berdasarkan beberapa parameter utama seperti arus litar pintas (short-circuit current,  $J_{sc}$ ), voltan litar terbuka (open-voltage current,  $V_{oc}$ ), faktor pengisi (fill factor, FF) dan kecekapan penukaran tenaga (power conversion efficiency, PCE). Nilai PCE yang tinggi bergantung kepada keseimbangan antara penyerapan cahaya yang cekap, pemisahan cas yang berkesan serta pengangkutan cas yang optimum dalam struktur peranti.

### 3. Ciri-ciri Pencahayaan Dalaman

Salah satu aspek penting dalam pembangunan sel suria organik untuk aplikasi dalaman ialah perbezaan ciri spektrum dan intensiti antara cahaya matahari dan cahaya buatan dalaman. Cahaya matahari biasanya diwakili oleh spektrum standard AM1.5G dengan intensiti kira-kira  $100 \text{ mW cm}^{-2}$ . Sebaliknya, pencahayaan dalaman seperti lampu LED dan lampu pendarfluor mempunyai intensiti yang jauh lebih rendah dan biasanya diukur dalam unit lux (Rajah 1). Pencahayaan dalaman di pejabat biasanya berada dalam julat 500–1000 lux, manakala persekitaran rumah lazimnya sekitar 200–500 lux, bergantung kepada reka bentuk sistem pencahayaan dan keperluan visual pengguna. Selain itu, spektrum pencahayaan dalaman juga lebih sempit dan kebanyakannya berada dalam julat panjang gelombang antara 350 hingga 750 nm [15].

Perbezaan ini menyebabkan bahan fotovoltai yang direka untuk cahaya matahari tidak semestinya berfungsi secara optimum di bawah pencahayaan dalaman. Oleh itu, bahan aktif sel suria organik perlu direka dengan spektrum serapan yang sepadan dengan spektrum pelepasan cahaya daripada sumber pencahayaan dalaman [16]. Penyesuaian spektrum ini sangat penting bagi memastikan penyerapan foton yang maksimum dan seterusnya meningkatkan prestasi peranti.

Tambahan pula, dalam keadaan pencahayaan intensiti rendah, faktor seperti rekombinasi pembawa cas dan kehilangan voltan menjadi lebih kritikal. Oleh itu, strategi reka bentuk bahan dan struktur peranti perlu dioptimumkan khusus untuk keadaan pencahayaan dalaman bagi mencapai prestasi yang lebih baik.



**Rajah 1.** Perbandingan spektrum cahaya dalaman (LED dan pendarfluor) dengan spektrum suria AM1.5G standard. Sumber imej: <https://www.ossila.com>

#### 4. Kemajuan Bahan Aktif untuk Sel Suria Organik Dalam

Kemajuan dalam pembangunan bahan semikonduktor organik memainkan peranan penting dalam peningkatan prestasi sel suria organik. Secara umum, bahan aktif sel suria organik boleh dibahagikan kepada dua kategori utama iaitu sistem berasaskan penerima fullerena dan sistem berasaskan penerima bukan fullerena (non-fullerene acceptor, NFA).

##### 4.1 Sel Suria Organik Berasaskan Fullerena

Pada peringkat awal pembangunan sel suria organik, bahan penerima berasaskan fullerena seperti PCBM digunakan secara meluas kerana mobiliti elektron yang tinggi serta keserasian yang baik dengan pelbagai polimer penderma [17, 18]. Dalam sistem ini, lapisan aktif biasanya terdiri daripada campuran polimer penderma dan derivatif fullerena yang membentuk struktur BHJ.

Walau bagaimanapun, bahan fullerena mempunyai beberapa kelemahan yang menghadkan prestasi peranti. Antaranya ialah spektrum serapan yang terhad dalam kawasan cahaya tampak serta tahap tenaga yang sukar ditala secara kimia [19]. Kekangan ini menyebabkan kehilangan tenaga yang agak tinggi dan menghadkan peningkatan voltan litar terbuka dalam peranti. Walaupun begitu, beberapa kajian telah menunjukkan bahawa prestasi sel suria organik berasaskan fullerena boleh dipertingkatkan melalui pengoptimuman morfologi lapisan aktif, pemilihan polimer penderma jalur lebar serta kejuruteraan antara muka peranti.

Beberapa sistem penderma–penerima berasaskan fullerena telah menunjukkan prestasi yang baik di bawah pencahayaan dalaman dengan kecekapan melebihi 20% dalam keadaan tertentu (Jadual 1). Walau bagaimanapun, perkembangan teknologi sel suria organik terkini menunjukkan bahawa bahan NFA mampu memberikan prestasi yang lebih tinggi dan fleksibiliti reka bentuk yang lebih baik.

##### Jadual 1

Prestasi fotovoltai sel suria organik dalaman berasaskan fullerena di bawah pencahayaan LED atau pendarfluor yang dilaporkan dalam literatur

Year	Lapisan Aktif	Jenis Cahaya/ Pencapaian (lux)	Intensiti Cahaya ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	Voc (V)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	PCE (%)	Rujukan
2018	BTR:PC71BM	FL / 1000	90	0.79	133.1	75.2	28.1	[20]
2018	P1:PC71BM	LED / 300	77.6	0.76	29.6	66.1	19.2	[21]
2019	WF3F:PC71BM	LED / 500	170	0.69	63.6	67.4	17.1	[22]
2020	PTB7-Th:PC71BM	LED / 1750	725	0.69	251.5	68.9	16.5	[23]
2021	P3HT:ICBA	LED / 1000	280	0.51	71.3	52.4	6.7	[24]
2022	PTQ10:PC61BM	LED / 500	-	0.79	62.5	73.0	19.9	[25]
2023	PM6:PC61BM	LED / 200	647	0.85	243.0	72.75	23.27	[26]
2023	PTB7:PC <sub>61</sub> BM	LED / 200	647	0.66	259.7	65.83	17.78	[26]
2023	PTB7:PC <sub>61</sub> BM	LED / 200	647	0.46	186.0	60.76	8.09	[26]
2024	PBTZT-stat- BDTT:PC61BM:PS	LED / 522	148	0.60	44.0	74.0	19.5	[27]

##### 4.2 Sel Suria Organik Berasaskan NFA

Dalam beberapa tahun kebelakangan ini, bahan NFA telah muncul sebagai alternatif yang lebih unggul kepada bahan fullerena dalam sel suria organik. NFA menawarkan beberapa kelebihan penting seperti spektrum serapan yang lebih luas, tahap tenaga orbital molekul berhuni tinggi (Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) dan orbital molekul letak berhuni rendah (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO) yang boleh ditala serta kehilangan tenaga yang lebih rendah semasa proses pemisahan cas [28].

Keupayaan untuk menala sifat optik dan elektronik bahan NFA membolehkan penyelidik mereka bentuk sistem penderma–penerima yang sepadan dengan spektrum pencahayaan dalaman. Selain itu, NFA juga menunjukkan kestabilan peranti yang lebih baik berbanding sistem berasaskan fulerena. Beberapa kombinasi bahan penderma dan NFA telah menunjukkan prestasi yang sangat baik bagi aplikasi pencahayaan dalaman dengan kecekapan penukaran tenaga melebihi 30% di bawah pencahayaan LED (Jadual 2).

Kemajuan ini menunjukkan bahawa pembangunan bahan NFA memainkan peranan penting dalam meningkatkan prestasi sel suria organik dan membuka peluang kepada aplikasi komersial dalam sistem tenaga berskala kecil seperti peranti IoT.

## Jadual 2

Prestasi Fotovoltaik Sel Suria Organik Dalaman Berasaskan NFA

Year	Lapisan Aktif	Jenis Cahaya/ Pencahayaannya (lux)	Intensiti Cahaya ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	Voc (V)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	PCE (%)	Rujukan
2019	CD1:PBN-10	FL / 1000	345	1.14	120	66.2	26.2	[29]
2019	CD1:PBN-10	LED / 1000	360	1.14	105	65.4	21.7	[29]
2019	PBDB-TF:IO-4Cl	LED / 1000	301	1.10	90.6	79	26.1	[30]
2020	TPD-3F:IT-4F	FL / 1000	185	0.75	99.3	65	26.2	[31]
2020	PBDB-TS-4Cl:IT-4F	FL / 500	143	0.64	64.9	73.9	21.7	[32]
2020	PBDB-T:IDICO1	LED / 1000	280	0.76	120	61	19.8	[33]
2022	PM6:Y6-O	LED / 1000	306.2	0.86	134.9	81.5	31.2	[11]
2022	PM6:IT-4F:ITIC-Th	LED / 500	144.36	0.75	74.73	77.10	30.11	[34]
2023	PTB7-Th:MCz	LED / 1000	250.6	0.74	111.95	68	22.14	[35]
2023	P(BdP-HT):DICTF	LED / 1000	256	0.93	88.43	68	21.84	[36]
2024	PB2:FCC-Cl	LED / 1000	310	0.93	126	80.7	30.4	[37]
2025	D18:GWQ20:Z5	LED / 2000		0.88	272	80.5	30.2	[38]

Berdasarkan Jadual 1 dan Jadual 2, prestasi sel suria organik dalaman boleh dibandingkan melalui jenis bahan aktif, sumber pencahayaan dalaman, intensiti cahaya dan parameter fotovoltaik utama seperti Voc, Jsc, FF dan PCE. Perbandingan ini menunjukkan bahawa pemilihan bahan aktif yang sesuai dengan spektrum cahaya dalaman memainkan peranan penting dalam menentukan prestasi peranti. Selain itu, perbezaan sumber cahaya seperti LED dan lampu pendarfluor turut mempengaruhi nilai arus, voltan dan kecekapan keseluruhan sel. Oleh itu, penilaian prestasi sel suria organik dalaman perlu mengambil kira hubungan antara bahan aktif, keadaan pencahayaan dan respons fotovoltaik peranti.

## 5. Kejuruteraan Peranti

Selain pembangunan bahan aktif, prestasi sel suria organik juga dipengaruhi secara signifikan oleh reka bentuk struktur peranti. Kejuruteraan peranti melibatkan pengoptimuman struktur lapisan, pemilihan bahan antara muka serta kawalan morfologi lapisan aktif bagi meningkatkan pengangkutan dan pengumpulan pembawa cas.

Salah satu strategi penting ialah pengoptimuman morfologi lapisan aktif bagi memastikan pembentukan domain penderma dan penerima yang sesuai untuk pemisahan cas yang cekap. Selain itu, penggunaan lapisan pengangkut elektron dan lubang yang sesuai dapat meningkatkan pengumpulan pembawa cas serta mengurangkan kehilangan tenaga dalam peranti [39].

Pendekatan lain yang semakin popular ialah penggunaan sistem aktif yang mengandungi tiga komponen atau lebih dikenali sebagai sel suria organik operasi tiga komponen (Ternary OSC), di mana komponen ketiga ditambah ke dalam lapisan aktif bagi memperluaskan spektrum penyerapan cahaya serta meningkatkan kestabilan morfologi filem aktif [40]. Dalam sistem ini, bahan penderma dan penerima utama digabungkan

dengan bahan tambahan yang mempunyai sifat optik atau elektronik yang saling melengkapi. Pendekatan ini membolehkan peningkatan penyerapan cahaya dalam julat panjang gelombang yang lebih luas serta mengurangkan kehilangan tenaga semasa pemisahan cas. Hasilnya, parameter peranti seperti Jsc, FF dan PCE dapat dipertingkatkan dengan ketara.

Pendekatan lain yang semakin mendapat perhatian ialah penggunaan struktur peranti bertindan (tandem solar cells) dan lapisan aktif berbilang komponen (multi-component active layers). Dalam struktur bertindan, dua atau lebih lapisan fotovoltaiik dengan jalur tenaga yang berbeza digabungkan bagi memanfaatkan spektrum cahaya yang lebih luas [41]. Pendekatan ini berpotensi meningkatkan prestasi keseluruhan peranti dengan memaksimumkan penyerapan foton pada pelbagai panjang gelombang. Selain itu, kejuruteraan antara muka dan penggunaan bahan lapisan pengangkut elektron serta lubang yang lebih efisien juga memainkan peranan penting dalam mengurangkan rekombinasi pembawa cas dan meningkatkan kestabilan peranti dalam operasi jangka panjang.

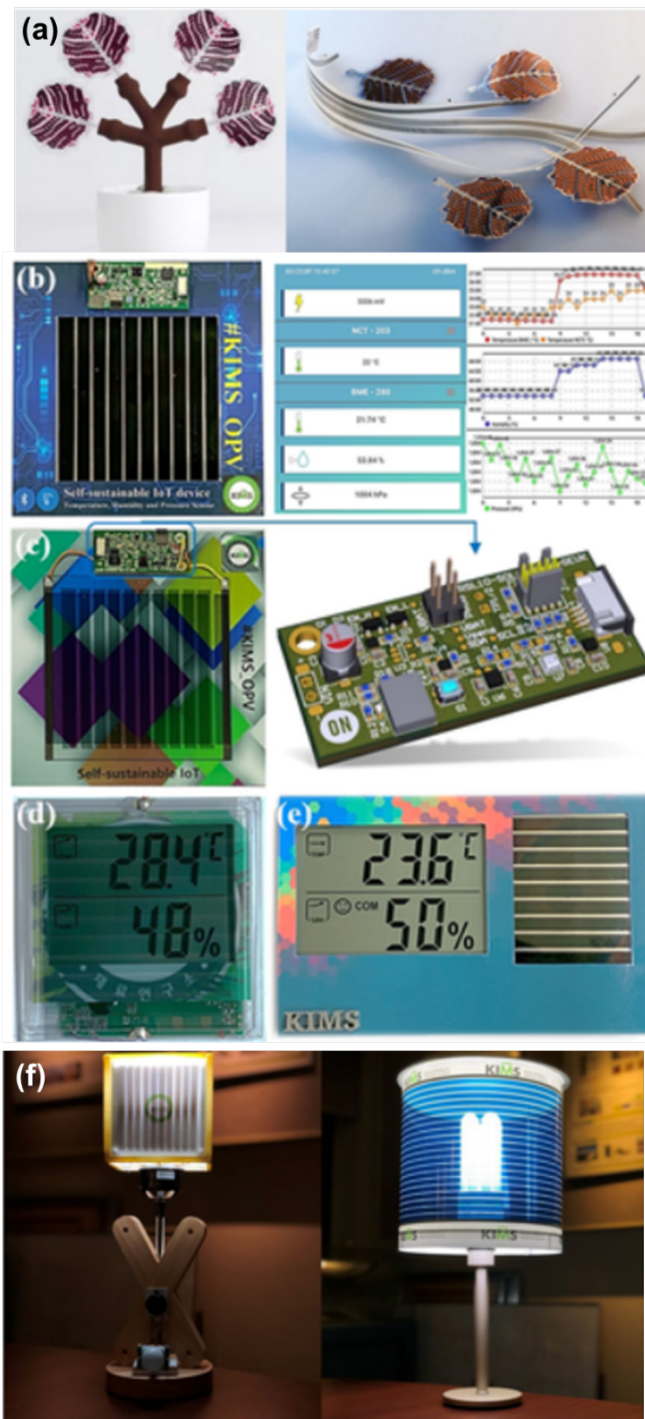
Selain pendekatan menggunakan bahan aktif organik, penyelidik juga meneroka penggantian bahan aktif kepada bahan perovskit. Bahan perovskit telah menunjukkan potensi yang sangat tinggi dalam aplikasi fotovoltaiik kerana sifat optoelektroniknya yang unggul seperti pekali penyerapan cahaya yang tinggi, mobiliti pembawa cas yang baik serta kehilangan tenaga yang rendah semasa proses pemisahan cas [42-49]. Berbanding bahan organik konvensional, perovskit mampu menyerap cahaya dengan lebih cekap walaupun pada intensiti cahaya yang rendah, menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi fotovoltaiik dalaman. Selain itu, tahap tenaga bahan perovskit juga boleh diubah suai melalui pengubahsuaian komposisi kimia bagi menyesuaikan spektrum serapan dengan spektrum pencahayaan dalaman seperti lampu LED dan lampu pendarfluor. Oleh itu, penggunaan bahan perovskit sebagai lapisan aktif dalam peranti fotovoltaiik dilihat sebagai satu pendekatan alternatif yang berpotensi untuk meningkatkan kecekapan penukaran tenaga bagi aplikasi peranti IoT berkuasa rendah.

## **6. Aplikasi Sel Suria Organik untuk Peranti IoT**

Sel suria organik dalaman mempunyai potensi besar sebagai sumber tenaga bagi pelbagai peranti IoT berkuasa rendah. Antara aplikasi yang berpotensi termasuk pengesan persekitaran tanpa wayar, sistem rumah pintar, peranti pemantauan kesihatan serta elektronik boleh pakai. Kebanyakan peranti ini memerlukan kuasa dalam julat mikro-watt hingga mili-watt, yang boleh dibekalkan oleh sel suria organik di bawah pencahayaan dalaman.

Penggunaan sel suria organik dalam sistem IoT juga berpotensi mengurangkan kebergantungan kepada bateri serta meningkatkan kebolehpercayaan sistem dalam jangka panjang. Dengan menggabungkan teknologi sel suria organik dengan sistem penyimpanan tenaga kecil seperti superkapasitor, sistem tenaga sendiri yang stabil boleh dibangunkan untuk pelbagai aplikasi pintar.

Rajah 2 menunjukkan beberapa contoh sel suria organik dalam IOT seperti Rajah 2a iaitu gambar fotografi pokok dan daun suria bercetak sepenuhnya yang dibangunkan oleh VTT Finland dan direka untuk aplikasi dalaman. Rajah 2b-c menunjukkan modul sel suria organik legap dan separa telus yang diintegrasikan dengan platform IoT multisensor RSL-10 serta antara muka aplikasi Android. Rajah 2d-e iaitu alat pengukur suhu dan kelembapan makmal yang dikuasakan oleh modul sel suria organik dalaman separa telus dan modul legap. Rajah 2f ialah gambar fotografi modul sel suria organik tegar dan modul fleksibel separa telus yang dipasang pada lampu untuk aplikasi dalaman bagi memanfaatkan semula cahaya dalaman untuk aplikasi IoT [50].



**Rajah 2.** (a) Gambar fotografi pokok dan daun suria bercetak sepenuhnya yang dibangunkan oleh VTT Finland dan direka untuk aplikasi dalaman (Sumber: <https://blog.drupa.com/de/printed-trees>). (b,c) Modul sel suria organik legap dan separa telus yang diintegrasikan dengan platform IoT multisensor RSL-10 serta antara muka aplikasi Android (Sumber lukisan skematik RSL-10: ON Semiconductors). (d,e) Alat pengukur suhu dan kelembapan makmal yang dikuasakan oleh modul sel suria organik dalaman separa telus ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) dan modul legap ( $5 \times 7 \text{ cm}^2$ ). (f) Gambar fotografi modul sel suria organik tegar dan modul fleksibel separa telus yang dipasang pada lampu untuk aplikasi dalaman bagi memanfaatkan semula cahaya dalaman untuk aplikasi IoT. [50]

## **7. Cabaran Teknologi**

Walaupun kemajuan yang signifikan telah dicapai dalam pembangunan sel suria organik dalaman, beberapa cabaran masih perlu diatasi sebelum teknologi ini dapat digunakan secara meluas untuk aplikasi IoT. Cabaran ini bukan sahaja berkaitan dengan peningkatan kecekapan, tetapi juga melibatkan kestabilan operasi, kesesuaian dengan pencahayaan dalaman, kebolehskalaan fabrikasi dan integrasi dengan sistem elektronik berkuasa rendah.

### *7.1 Kestabilan operasi jangka panjang*

Kestabilan jangka panjang merupakan salah satu cabaran utama bagi sel suria organik dalaman. Bahan organik lazimnya sensitif terhadap oksigen, kelembapan dan cahaya, yang boleh menyebabkan degradasi lapisan aktif serta penurunan prestasi peranti dari masa ke masa[51]. Untuk aplikasi IoT sebenar, peranti bukan sahaja perlu menunjukkan kecekapan awal yang tinggi, tetapi juga perlu mengekalkan output kuasa yang stabil dalam tempoh operasi yang panjang. Oleh itu, kajian lanjut diperlukan bagi meningkatkan kestabilan bahan aktif, lapisan antara muka dan strategi enkapsulasi peranti.

### *7.2 Kehilangan tenaga pada pencahayaan intensiti rendah*

Sel suria organik dalaman beroperasi di bawah intensiti cahaya yang jauh lebih rendah berbanding pencahayaan suria standard AM1.5G. Dalam keadaan ini, kehilangan tenaga akibat intensity cahaya yang tidak optimum menjadi lebih ketara. Kehilangan ini boleh menjejaskan nilai Voc, Jsc, FF dan seterusnya PCE peranti. Oleh itu, reka bentuk bahan aktif dan struktur peranti perlu dioptimumkan supaya dapat mengekalkan prestasi yang baik walaupun di bawah pencahayaan LED atau lampu pendarfluor berintensiti rendah.

### *7.3 Padanan spektrum dengan sumber cahaya dalaman*

Prestasi sel suria organik dalaman sangat bergantung kepada kesesuaian antara spektrum serapan bahan aktif dan spektrum sumber cahaya dalaman. Pencahayaan dalaman seperti LED dan lampu pendarfluor mempunyai spektrum yang lebih rendah berbanding cahaya matahari. Oleh itu, bahan aktif yang digunakan perlu mempunyai julat serapan yang sepadan dengan sumber cahaya tersebut bagi memastikan penyerapan foton yang lebih berkesan. Ketidakpadanan spektrum boleh menyebabkan sebahagian cahaya tidak dimanfaatkan dengan optimum, sekali gus menghadkan output kuasa peranti.

### *7.4 Fabrikasi berskala besar dan keseragaman peranti*

Walaupun banyak prestasi tinggi telah dilaporkan pada skala makmal, penghasilan sel suria organik dalaman secara berskala besar masih mencabar. Antara isu utama ialah keseragaman ketebalan lapisan aktif, kawalan morfologi filem, kebolehulangan prestasi dan kestabilan proses fabrikasi. Bagi aplikasi komersial, teknologi ini perlu dihasilkan dalam bentuk modul yang konsisten, fleksibel dan kos efektif. Oleh itu, pembangunan kaedah fabrikasi berskala besar seperti pencetakan larutan dan roll-to-roll processing masih memerlukan pengoptimuman lanjut.

### *7.5 Integrasi dengan sistem IoT*

Untuk digunakan dalam peranti IoT, sel suria organik dalaman perlu diintegrasikan dengan komponen elektronik lain seperti alat pengesan, litar pengurusan kuasa, bateri mikro atau superkapasitor. Integrasi ini penting kerana output tenaga daripada sel suria dalaman boleh berubah bergantung kepada intensiti cahaya dan keadaan persekitaran. Sistem penyimpanan tenaga kecil diperlukan bagi memastikan bekalan kuasa yang stabil apabila pencahayaan dalaman tidak mencukupi. Oleh itu, cabaran integrasi bukan sahaja melibatkan prestasi sel suria, tetapi juga kecekapan keseluruhan sistem tenaga sendiri bagi peranti IoT.

### 7.6 Keperluan piawaian pengujian dalaman

Perbandingan prestasi antara kajian masih sukar dilakukan kerana keadaan pengujian yang berbeza, termasuk jenis lampu, nilai lux, intensiti cahaya, keluasan peranti dan suhu operasi. Oleh itu, piawaian pengujian yang lebih seragam diperlukan bagi menilai prestasi sel suria organik dalaman secara lebih adil dan konsisten. Penyeragaman ini penting untuk membolehkan perbandingan yang lebih tepat antara bahan aktif, struktur peranti dan aplikasi IoT yang berbeza.

## 8. Kesimpulan

Sel suria organik merupakan teknologi fotovoltai yang sangat menjanjikan untuk aplikasi pencahayaan dalaman dan sistem IoT berkuasa rendah. Keupayaan untuk menala sifat optik dan elektronik bahan organik membolehkan pengoptimuman prestasi peranti dalam keadaan cahaya rendah. Kemajuan dalam pembangunan bahan NFA dan kejuruteraan peranti telah meningkatkan kecekapan sel suria organik secara signifikan dalam beberapa tahun kebelakangan ini. Walau bagaimanapun, beberapa aspek masih memerlukan perhatian lanjut, khususnya kestabilan operasi jangka panjang, kehilangan tenaga pada pencahayaan intensiti rendah, kebolehskalaan fabrikasi dan integrasi dengan sistem IoT. Oleh itu, kajian masa hadapan perlu menumpukan kepada pengujian yang lebih seragam, peningkatan kestabilan peranti dan demonstrasi aplikasi sebenar bagi menyokong penggunaan sel suria organik dalaman dalam sistem tenaga sendiri.

### Penghargaan

Penulis merakamkan penghargaan atas sokongan yang diberikan melalui Geran Translasi UKM, nombor geran UKM-TR2024-09, yang dibiayai oleh Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Malaysia.

### Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis mengisytiharkan bahawa tiada konflik kepentingan yang berkaitan dengan penerbitan manuskrip ini.

### Pernyataan Ketersediaan Data

Tiada set data dijana atau dianalisis semasa kajian ini dijalankan.

### Pernyataan Etika

Kajian ini tidak melibatkan peserta manusia, haiwan, atau data sensitif, oleh itu tidak memerlukan kelulusan etika.

### Rujukan

- [1] Yang, Heetae, Wonji Lee, and Hwansoo Lee. "IoT smart home adoption: the importance of proper level automation." *Journal of Sensors* 2018, no. 1 (2018): 6464036. DOI: 10.1155/2018/6464036.
- [2] Gokhale, Pradyumna, Omkar Bhat, and Sagar Bhat. "Introduction to IOT." *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 5, no. 1 (2018): 41-44.
- [3] Hasan, Kareeb, Neil Tom, and Mehmet Rasit Yuce. "Navigating battery choices in IoT: An extensive survey of technologies and their applications." *Batteries* 9, no. 12 (2023): 580. DOI: 10.3390/batteries9120580.
- [4] Mauger, AlainCM Julien. "Critical review on lithium-ion batteries: are they safe? Sustainable?" *Ionics* 23, no. 8 (2017): 1933-1947. DOI: 10.1007/s11581-017-2177-8.
- [5] Research, United Nations Institute for Training and. *Global e-Waste Monitor 2024: Electronic Waste Rising Five Times Faster than Documented E-waste Recycling*. 2024 [cited 2026; Available from: <https://unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling>].
- [6] Nath, Dhruv Chakravarty, Indranil Kundu, Ayushi Sharma, Pranav Shivhare, Asif Afzal, Manzoore Elahi M Soudagar, and Sung Goon Park. "Internet of Things integrated with solar energy applications: a state-of-the-art review." *Environment, development and sustainability* 26, no. 10 (2024): 24597-24652. DOI: 10.1007/s10668-023-03691-2.

- [7] Shafian, Shafidah. "Silicon Solar Cells for Indoor Photovoltaic Applications." *Future Energy and Environment Letters* 3, no. 1 (2025): 50-57. DOI: 10.37934/feel.3.1.5057.
- [8] Kim, Hyunkyung, Ye-Jin Kong, Won-Suk Kim, Shafidah Shafian, and Kyungkon Kim. "Enhancing Reproducibility in Organic Solar Cell Fabrication via Static Sequential Deposition with Cross-Linked Polymer Donor and Nonfullerene Acceptor." *ACS Applied Polymer Materials* 6, no. 10 (2024): 5814-5821. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c00477>.
- [9] Kim, Hyunkyung, Yuchan Heo, Yeji Na, Shafidah Shafian, BongSoo Kim, and Kyungkon Kim. "Cross-Linking-Integrated Sequential Deposition: A Method for Efficient and Reproducible Bulk Heterojunctions in Organic Solar Cells." *ACS Applied Materials & Interfaces* 16, no. 41 (2024): 55873-55880. DOI: 10.1021/acsami.4c13237.
- [10] Bi, Pengqing, Cunbin An, Tao Zhang, Zhihao Chen, Ye Xu, Yong Cui, Jianqiu Wang, Jiayao Li, Yafei Wang, and Junzhen Ren. "Achieving 31% efficiency in organic photovoltaic cells under indoor light using a low energetic disorder polymer donor." *Journal of Materials Chemistry A* 11, no. 2 (2023): 983-991. DOI: 10.1039/D2TA07506G.
- [11] Zhou, Xiaobo, Hongbo Wu, Urvashi Bothra, Xingze Chen, Guanyu Lu, Heng Zhao, Chao Zhao, Qun Luo, Guanghao Lu, and Ke Zhou. "Over 31% efficient indoor organic photovoltaics enabled by simultaneously reduced trap-assisted recombination and non-radiative recombination voltage loss." *Materials Horizons* 10, no. 2 (2023): 566-575. DOI: 10.1039/D2MH01229D.
- [12] Hong, Minjeong, Jiayae Youn, Ka Yeon Ryu, Shafidah Shafian, and Kyungkon Kim. "Improving the Stability of Non-fullerene-Based Organic Photovoltaics through Sequential Deposition and Utilization of a Quasi-orthogonal Solvent." *ACS Applied Materials & Interfaces* 15, no. 16 (2023): 20151-20158. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.3c02071>.
- [13] Hoppe, Harald Niyazi Serdar Sariciftci. "Organic solar cells: An overview." *Journal of materials research* 19, no. 7 (2004): 1924-1945. DOI: 10.1557/JMR.2004.0252.
- [14] Shafian, Shafidah, Fitri Norizatie Mohd Salehin, Sojeong Lee, Azlan Ismail, Shuhaida Mohamed Shuhidan, Lin Xie, and Kyungkon Kim. "Development of Organic Semiconductor Materials for Organic Solar Cells via the Integration of Computational Quantum Chemistry and AI-Powered Machine Learning." *ACS Applied Energy Materials* 8, no. 2 (2025): 699-722. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c02937>.
- [15] Islam, Mohammad Shahidul, Rajendra Dangol, Mikko Hyvärinen, Pramod Bhusal, Marjukka Puolakka, and Liisa Halonen. "User acceptance studies for LED office lighting: Lamp spectrum, spatial brightness and illuminance." *Lighting Research & Technology* 47, no. 1 (2015): 54-79. DOI: <https://doi.org/10.1177/147715351351442>.
- [16] Mori, Shigehiko, Takeshi Gotanda, Yoshihiko Nakano, Mitsunaga Saito, Kenji Todor, and Masahiro Hosoya. "Investigation of the organic solar cell characteristics for indoor LED light applications." *Japanese Journal of Applied Physics* 54, no. 7 (2015): 071602. DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.071602>.
- [17] Shafian, Shafidah. "Optical and Structural Analysis of Layer Thickness Effects on Transmission in Semitransparent Colorful Organic Photovoltaics." *PaperASIA* 41, no. 4b (2025): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.59953/paperasia.v41i4b.569>.
- [18] Salehin, Fitri Norizatie Mohd, Puvaneswaran Chelvanathan, Adamu Ahmed Goje, Norasikin Ahmad Ludin, Mohd Adib Ibrahim, and Shafidah Shafian. "Design of blue, green and red colorful semitransparent films using Ag/SnO<sub>2</sub>/Ag color filter for integrated into solar cells." *Results in Physics* 70 (2025): 108172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108172>.
- [19] Chidichimo, Giuseppe Luigi Filippelli. "Organic solar cells: problems and perspectives." *International journal of photoenergy* 2010, no. 1 (2010): 123534. DOI: 10.1155/2010/123534.
- [20] Lee, Harrison Ka Hin, Jiaying Wu, Jérémy Barbé, Sagar M Jain, Sebastian Wood, Emily M Speller, Zhe Li, Fernando A Castro, James R Durrant, and Wing Chung Tsoi. "Organic photovoltaic cells—promising indoor light harvesters for self-sustainable electronics." *Journal of Materials Chemistry A* 6, no. 14 (2018): 5618-5626. DOI: 10.1039/C7TA10875C.
- [21] Yin, Hang, Song Chen, Sin Hang Cheung, Ho Wa Li, Yuemin Xie, Sai Wing Tsang, Xunjin Zhu, and Shu Kong So. "Porphyrin-based thick-film bulk-heterojunction solar cells for indoor light harvesting." *Journal of Materials Chemistry C* 6, no. 34 (2018): 9111-9118. DOI: 10.1039/C8TC02838A.
- [22] Singh, Ranbir, Christos L Chochos, Vasilis G Gregoriou, Alkmini D Nega, Min Kim, Manish Kumar, Sang-Chul Shin, Sang Hyeon Kim, Jae Won Shim, and Jae-Joon Lee. "Highly efficient indoor organic solar cells by voltage loss minimization through fine-tuning of polymer structures." *ACS applied materials & interfaces* 11, no. 40 (2019): 36905-36916. DOI: 10.1021/acsami.9b12018.

- [23] Torimtubun, Alfonsina Abat Amelenan, José G Sánchez, Josep Pallares, and Lluís F Marsal. "A cathode interface engineering approach for the comprehensive study of indoor performance enhancement in organic photovoltaics." *Sustainable Energy & Fuels* 4, no. 7 (2020): 3378-3387. DOI: 10.1039/D0SE00353K.
- [24] You, Young-Jun, Muhammad Ahsan Saeed, Shafidah Shafian, Jisoo Kim, Sang Hyeon Kim, Sung Hyeon Kim, Kyungkon Kim, and Jae Won Shim. "Energy recycling under ambient illumination for internet-of-things using metal/oxide/metal-based colorful organic photovoltaics." *Nanotechnology* 32, no. 46 (2021): 465401. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac13e7>.
- [25] Rodríguez-Martínez, Xabier, Sergi Riera-Galindo, Jiayan Cong, Thomas Österberg, Mariano Campoy-Quiles, and Olle Inganäs. "Matching electron transport layers with a non-halogenated and low synthetic complexity polymer: fullerene blend for efficient outdoor and indoor organic photovoltaics." *Journal of Materials Chemistry A* 10, no. 19 (2022): 10768-10779. DOI: 10.1039/D2TA01205G.
- [26] Cai, Yuhang, Xinyu Zhu, Shaokun Ma, Tianhong Ye, Shaodong Sun, Dichun Chen, Baojun Li, Lingling Zheng, and Daqin Yun. "PC61BM-based organic solar cells for indoor applications with a power conversion efficiency exceeding 20%." *Optical Materials* 142 (2023): 113983. DOI: 10.1016/j.optmat.2023.113983.
- [27] Beket, Gulzada, Anton Zubayer, Qilun Zhang, Jochen Stahn, Fredrik Eriksson, Mats Fahlman, Thomas Österberg, Jonas Bergqvist, and Feng Gao. "Overcoming the voltage losses caused by the acceptor-based interlayer in laminated indoor OPVs." *SmartMat* 5, no. 3 (2024): e1237. DOI: 10.1002/smm2.1237.
- [28] Cheng, Pei, Gang Li, Xiaowei Zhan, and Yang Yang. "Next-generation organic photovoltaics based on non-fullerene acceptors." *Nature Photonics* 12, no. 3 (2018): 131-142. DOI: 10.1038/s41566-018-0104-9.
- [29] Ding, Zicheng, Ruyan Zhao, Yingjian Yu, and Jun Liu. "All-polymer indoor photovoltaics with high open-circuit voltage." *Journal of Materials Chemistry A* 7, no. 46 (2019): 26533-26539. DOI: 10.1039/C9TA10040G.
- [30] Cui, Yong, Yuming Wang, Jonas Bergqvist, Huifeng Yao, Ye Xu, Bawei Gao, Chenyi Yang, Shaoqing Zhang, Olle Inganäs, and Feng Gao. "Wide-gap non-fullerene acceptor enabling high-performance organic photovoltaic cells for indoor applications." *Nature Energy* 4, no. 9 (2019): 768-775. DOI: 10.1038/s41560-019-0448-5.
- [31] Liao, Chuang-Yi, Yao Chen, Chun-Chieh Lee, Gang Wang, Nai-Wei Teng, Chia-Hao Lee, Wei-Long Li, Yu-Kuang Chen, Chia-Hua Li, and Hsiuan-Lin Ho. "Processing strategies for an organic photovoltaic module with over 10% efficiency." *Joule* 4, no. 1 (2020): 189-206. DOI: 10.1016/j.joule.2019.11.006
- [32] Je, Hwan-Il, Eul-Yong Shin, Keun Jun Lee, Hyungju Ahn, Sungmin Park, Sang Hyuk Im, Yun-Hi Kim, Hae Jung Son, and Soon-Ki Kwon. "Understanding the performance of organic photovoltaics under indoor and outdoor conditions: effects of chlorination of donor polymers." *ACS applied materials & interfaces* 12, no. 20 (2020): 23181-23189. DOI: 10.1021/acsami.0c02712.
- [33] Ryu, Hwa Sook, Hyun Gyeong Lee, Sang-Chul Shin, Joocho Park, Sang Hyeon Kim, Eun Ji Kim, Tae Joo Shin, Jae Won Shim, Bumjoon J Kim, and Han Young Woo. "Terminal alkyl substitution in an A–D–A-type nonfullerene acceptor: simultaneous improvements in the open-circuit voltage and short-circuit current for efficient indoor power generation." *Journal of Materials Chemistry A* 8, no. 45 (2020): 23894-23905. DOI: 10.1039/D0TA07684H.
- [34] Lee, Chihyung, Jung-Hyun Lee, Hyun Hwi Lee, Minwoo Nam, and Doo-Hyun Ko. "Over 30% efficient indoor organic photovoltaics enabled by morphological modification using two compatible non-fullerene acceptors." *Advanced Energy Materials* 12, no. 22 (2022): 2200275. DOI: 10.1002/aenm.202200275.
- [35] Schlachter, Adrien, Gabriel Marineau-Plante, Daniel Fortin, Ganesh D Sharma, and Pierre D Harvey. "Rather Simple D–A Nonfullerene for High-Performance Indoor Photovoltaic Cells." *ACS Applied Energy Materials* 6, no. 9 (2023): 4961-4970. DOI: 10.1021/acsaem.3c00437.
- [36] Rajagopalan, Raman, Shyam Shankar S, Natarajan Balasubramaniyan, and Ganesh D Sharma. "Simple and efficient acceptor–donor–acceptor-type non-fullerene acceptors for a BODIPY–thiophene-backboned polymer donor for high-performance indoor photovoltaics." *ACS Applied Materials & Interfaces* 15, no. 10 (2023): 13405-13414. DOI: 10.1021/acsami.2c23048.
- [37] Wang, Wenxuan, Yong Cui, Yue Yu, Jianqiu Wang, Chaoyi Wang, Hao Hou, Qian Kang, Hui Wang, Shiyan Chen, and Shaoqing Zhang. "Indoor organic photovoltaic module with 30.6% efficiency for efficient wireless power transfer." *Nano Energy* 128 (2024): 109893. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.109893.
- [38] Xu, Shuai, Hao Wang, Ruijie Ma, Jiaming Huang, Yang Xu, Pai Peng, Tengying Ma, Nan Ye, Baicheng Wang, and Ninggui Ma. "High-performance indoor organic photovoltaics based on vertical acenaphthylene derivatives with halogen substitution: Suppressing energetic disorder and optimizing charge dynamics." *Materials Science and Engineering: R: Reports* 166 (2025): 101066. DOI: 10.1016/j.mser.2025.101066.
- [39] Shin, Solbi, Shafidah Shafian, Ka Yeon Ryu, Young-Kyo Jeon, Won-Suk Kim, and Kyungkon Kim. "Solution-Processed TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Functionalized with Catechol Derivatives as Electron Transporting Layer Materials

- for Organic Photovoltaics." *Advanced Materials Interfaces* 9, no. 14 (2022): 2200118. DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.202200118>.
- [40] Günther, Marcella, Negar Kazerouni, Dominic Blätte, Jose Dario Perea, Barry C Thompson, and Tayebah Ameri. "Models and mechanisms of ternary organic solar cells." *Nature Reviews Materials* 8, no. 7 (2023): 456-471. DOI: 10.1038/s41578-023-00545-1.
- [41] Zhai, Jia Xue, Lin Xie, and Shafidah Shafian. "Advancements in perovskite/CIGS tandem solar cells: Material synergies, device configurations, and economic viability for sustainable energy." *Nanotechnology Reviews* 14, no. 1 (2025): 20250196. DOI: 10.1515/ntrev-2025-0196.
- [42] Wang, Peng, Shafidah Shafian, Feng Qiu, Xiao Zhang, Yuping Zhao, Bin Wu, Kyungkon Kim, Yong Hua, and Lin Xie. "Improving redox reactions of Spiro-OMeTAD via p-type molecular scaffold to reduce energy loss at Ag-electrode in perovskite solar cells." *Journal of Energy Chemistry* 102 (2025): 151-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.10.027>.
- [43] Zhang, Xiao, Linqing Wang, Shafidah Shafian, Peng Wang, Yuping Zhao, Pengcheng Wang, Bin Wu, Jiaxue Zhai, Jiayan Chen, and Licheng Sun. "Crosslinking-Driven Chemical Homogeneity Enhances Performance of Pre-Seeded Perovskite Solar Cells." *Small* 21, no. 6 (2025): 2408362. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.202408362>.
- [44] Shafian, Shafidah. "A Review of Bifacial Perovskite Solar Cells." *Future Energy and Environment Letters* 3, no. 1 (2025): 36-49. DOI: <https://doi.org/10.37934/feel.3.1.3649>.
- [45] Shafian, Shafidah, Mohd Nizam Husen, Lin Xie, and Kyungkon Kim. "Predicting High-Performance Perovskite Solar Cells Using AI-based Machine Learning Models." *Materials Today Sustainability* (2025): 101176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101176>.
- [46] Lee, Sojeong, Young Seon Yoon, Shafidah Shafian, Jin Young Kim, and Kyungkon Kim. "Sequential Co-Deposition of Perovskite Film: An Effective Way of Tailoring Bandgap in All Vacuum Processed Perovskite Solar Cells." *Small Methods* (2025): 2500104. DOI: <https://doi.org/10.1002/smt.202500104>.
- [47] Qi, Shuwen, Chenghao Ge, Peng Wang, Bin Wu, Yuping Zhao, Rongjun Zhao, Shafidah Shafian, Yong Hua, and Lin Xie. "Improving Perovskite Solar Cell Performance and Stability via Thermal Imprinting-Assisted Ion Exchange Passivation." *ACS Applied Materials & Interfaces* 16, no. 38 (2024): 51037-51045. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.4c08538>.
- [48] Kim, Yerim, Hyunji Ryu, Won-Suk Kim, Shafidah Shafian, and Kyungkon Kim. "Improving Performance of Fully Vacuum-Evaporated Perovskite Photovoltaics via Dry Additive Strategy." *Small Methods* (2025): e01434. DOI: 10.1002/smt.202501434.
- [49] Zhai, Jiaxue, Huān Bì, Shiji Zhang, Lin Xie, Bin Wu, Peng Wang, Shifeng Ge, Shafidah Shafian, Jiayan Chen, and Wenhua Zhang. "Dynamic Reconfiguration of Hydrogen-Bonded Networks to Modulate Perovskite Crystallization." *Energy & Environmental Science* (2026): DOI: 10.1039/D5EE07159C.
- [50] Jahandar, Muhammad, Soyeon Kim, and Dong Chan Lim. "Indoor organic photovoltaics for self-sustaining IoT devices: progress, challenges and practicalization." *ChemSusChem* 14, no. 17 (2021): 3449-3474. DOI: 10.1002/cssc.202100981.
- [51] Ding, Pengfei, Daobin Yang, Shuncheng Yang, and Ziyi Ge. "Stability of organic solar cells: toward commercial applications." *Chemical Society Reviews* 53, no. 5 (2024): 2350-2387. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3CS00492A>.