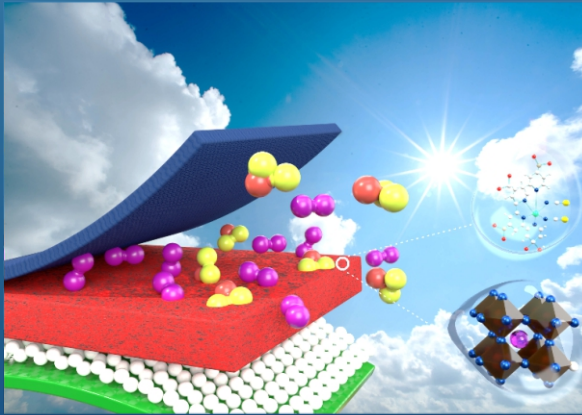




BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF MASA DEPAN

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
KEPAKARAN TEKNOLOGI SEL SURYA**



OLEH:

NATALITA MAULANI NURSAM

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA
SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF MASA DEPAN**

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF MASA DEPAN

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET KEPAKARAN TEKNOLOGI SEL SURYA

OLEH:

NATALITA MAULANI NURSAM

Reviewer:

Prof. Dr. Goib Wiranto

Prof. Dr. Ratno Nuryadi, M.Eng

Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si

Penerbit BRIN

© 2024 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Elektronika, Organisasi Riset Elektronika dan Informastika,

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Teknologi Sel Surya Generasi Ketiga sebagai Energi Alternatif Masa Depan/Natalita Maulani
Nursam. Jakarta: Penerbit BRIN, 2024.

vii + 103 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-602-6303-24-0 (PDF)

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. Sel surya | 2. Fotovoltaik |
| 3. Energi | 4. Non-silikon |




523.7

Copy editor : Mulyani
Proofreader : S. Imam Setyawan
Penata Isi : S. Imam Setyawan
Desainer Sampul : Erdin Almuqoddas dan S. Imam Setyawan

Edisi pertama : Agustus 2024



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B. J. Habibie, Jl. M. H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR.....	vii
BIODATA RINGKAS.....	1
PRAKATA PENGUKUHAN.....	7
I. PENDAHULUAN.....	9
II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI SEL SURYA.....	15
A. Sel Surya Generasi Pertama	15
B. Sel Surya Generasi Kedua	17
C. Sel Surya Generasi Ketiga	18
III. TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA BERBASIS MATERIAL NON SILIKON.....	21
A. Sel Surya Berbasis Pewarna Tersensitasi (DSSC).....	21
B. Sel Surya Berbasis Perovskite (PSC).....	35
IV. PROSPEK PENGEMBANGAN DAN PEMANFAATAN TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA	43
A. Tantangan dan Proyeksi Pengembangan Teknologi Sel Surya ..	43
B. Kolaborasi Multidisiplin	46
C. Peluang Pemanfaatan Sel Surya Generasi Ketiga di Indonesia ..	48
V. KESIMPULAN.....	51
VI. PENUTUP.....	53
VII. UCAPAN TERIMA KASIH	55
DAFTAR PUSTAKA.....	59
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	71
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Scanning electron microscopy (SEM) yang menunjukkan morfologi: a) TiO ₂ dengan makropori dan mesopori hasil templating menggunakan surfaktan dan phase separation, b) TiO ₂ berpori yang terbentuk melalui teknik soft- dan hard-templating, dan c) TiO ₂ dengan nanostruktur 1D yang dihasilkan melalui reaksi hidrotermal.	23
Gambar 3.2 Perbandingan struktur DSSC dengan konfigurasi (a) sandwich (dua substrat) dan (b) monolitik (satu substrat).....	29
Gambar 3.3 DSM dengan arsitektur (a) tipe-Z, (b) tipe-W, dan (c) monolitik.	33
Gambar 3.4. (a) Foto dye-sensitized solar module untuk aplikasi solar window dan (b) kurva karakteristik arus-tegangan beserta parameter output yang dihasilkan.	34
Gambar 3.5 Skematik struktur sel surya perovskite dengan konfigurasi (a) n-i-p dan (b) p-i-n (inversi).....	36
Gambar 3.6 (a) Elektroda karbon laminasi dan (b) PSC dengan elektroda karbon laminasi pada substrat konduktif.....	42

BIODATA RINGKAS



Natalita Maulani Nursam lahir di Lamongan, Jawa Timur, 27 Desember 1982, adalah putri pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Sam Roekajat (alm.) dan Ibu Hj. Nur Fadhilah. Menikah dengan Dedi Cahyadi, S.Hut, M.Hum., dan dikaruniai dua orang anak, yaitu Muhammad Habibi Kasyf Al Mulk dan Amarasuli Maulana Al Mulk.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2/M Tahun 2023 tanggal 9 Januari 2023 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 1 Februari 2023.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 179/I/HK/2024 tanggal 12 Juli 2024 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset (MPPR), yang bersangkutan dapat melakukan pidato Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Tumenggungan 1 Lamongan, tahun 1994, Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Lamongan, tahun 1997, dan Sekolah Menengah Atas Negeri

2 Lamongan, tahun 2000. Memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Indonesia tahun 1994, gelar Magister Master of Philosophy in Engineering dari The Australian National University tahun 2011, dan gelar Doktor bidang Chemistry dari The University of Melbourne tahun 2016.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: Pelatihan ISO 9001:2005 di PT. Sharp Semikonduktor Indonesia Karawang (2005), Diklat Fungsional Peneliti Tingkat Pertama di Cibinong (2007), Pelatihan Pre-Departure Training Course for Australian Development Scholarship Postgraduate Awardees di Jakarta (2008), Pelatihan Introductory Academic Skills di Canberra (2008), Tailor Made Course on the Fabrication of Solar Module Based on Dye-Sensitized Solar Cells di Swedia (tahun 2016), Diklat Peneliti Tingkat Lanjut di Cibinong (2017), Pelatihan Penyamaan Persepsi Asesor Akreditasi Jurnal Nasional ARJUNA Kemristekdikti (2018 dan 2020).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Muda golongan III/c tahun 2011, Peneliti Ahli Muda golongan III/d tahun 2016, Peneliti Ahli Madya golongan IV/a tahun 2018, Peneliti Ahli Madya golongan IV/c tahun 2021, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/d bidang Teknologi Sel Surya tahun 2023.

Menghasilkan 9 hak kekayaan intelektual berupa paten dan 85 karya tulis ilmiah (KTI) dalam bentuk jurnal dan prosiding yang ditulis bersama penulis lain. Sebanyak 77 KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 8 KTI dalam bahasa Indonesia.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai Ketua Kelompok Riset *Advanced Photovoltaic and Functional Electronic Devices* di Pusat Riset Elektronika BRIN, pembimbing skripsi (S1) di Institut Teknologi Bandung, Telkom University, Universitas Surya, Swiss-German University, Universitas Hasanuddin, pembimbing tesis (S2) di Institut Teknologi Bandung (ITB), serta pembimbing disertasi (S3) di Institut Teknologi Bandung (ITB), Universitas Gadjah Mada (UGM), dan Universiti Teknologi Malaysia (UTM).

Aktif dalam kegiatan ilmiah, antara lain sebagai *Editor-in-Chief* Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi, anggota Majelis Asesor Peneliti Pusat (MAPP) BRIN, ketua tim penilai peneliti unit (TP2U) PR Elektronika BRIN, asesor ARJUNA, dan menjadi ketua panitia International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET) 2017. Menjadi mitra bestari di beberapa jurnal internasional dari penerbit Elsevier (*Applied Surface Science*, *Thin Solid Films*), Springer (*Ionics*, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*), Taylor & Francis (*International Journal of Ambient Energy*), *Journal of Nano Research*, dan *Open Physics*

Journal, serta jurnal nasional yaitu Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi dan Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota Australian Nanotechnology Network (2012–2016), anggota Royal Australian Chemical Institute (2012–2016), anggota Materials Research Society of Indonesia MRS-Id (2016–sekarang), anggota Masyarakat Energi Terbarukan Indonesia METI (2016–sekarang), anggota Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE (2018–2019), anggota Council of Asian Science Editor CASE (2020–sekarang), anggota Himpunan Peneliti Indonesia HIMPENINDO (2019–2021), dan anggota Perhimpunan Periset Indonesia PPI (2022–sekarang).

Menerima tanda penghargaan berupa International Community Activity Center Undergraduate Scholarship (tahun 2003), Australian Development Postgraduate Scholarship Award dari AusAID (tahun 2008), Melbourne International Research Scholarship (tahun 2012), CSIRO-Melbourne Materials Institute Top-up Scholarship for PhD in Materials Science (tahun 2012), David Hay Thesis Writing Award dari University of Melbourne (2016), Satyalencana Karya Satya 10 Tahun dari Presiden RI (tahun 2016), Riset-PRO Non-Degree Travel Award dari Kemenristekdikti (tahun 2016), Selected Participant pada 7th American-Indonesian Kavli Frontiers of Science Meeting

(tahun 2017), Peneliti Terbaik di Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi LIPI (tahun 2017 & 2018), dan APEC–Australia Women in Research Award (tahun 2019).

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya, sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 14 Agustus 2024, menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA
SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF MASA DEPAN”

Pada orasi ini akan disampaikan *state-of-the art* perkembangan teknologi sel surya generasi ketiga yang berbasis material pewarna tersensitasi (*dye-sensitized*) dan perovskite. Kedua jenis sel surya generasi ketiga tersebut memiliki keunggulan berupa harga material yang rendah, proses fabrikasi yang sederhana, serta mampu bekerja secara efisien pada berbagai kondisi cahaya. Sel surya generasi ketiga ini juga memiliki potensi pemanfaatan pada berbagai aplikasi elektronik yang selama ini belum mampu dipenuhi oleh sel surya berbasis silikon dengan keterbatasan karakteristiknya.

Orasi ini memaparkan serangkaian hasil riset dan inovasi yang telah dilakukan dalam mengoptimasi performa sel surya generasi ketiga tersebut, termasuk upaya *scale-up* yang menjadi suatu urgensi untuk mendorong pemanfaatan dan komersialisasinya di masa depan. Dengan demikian, hasil riset dan inovasi yang telah dihasilkan memiliki prospek yang sangat baik untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi masa depan dan diharapkan dapat berkontribusi dalam mendukung akselerasi kemandirian energi bangsa Indonesia menuju *net zero emission*.

I. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya teknologi, kebutuhan akan energi, khususnya energi listrik, menjadi suatu kebutuhan primer yang tidak dapat dilepaskan dari kehidupan manusia sehari-hari. Pemanfaatan sumber energi yang bersih, murah dan berkelanjutan merupakan tantangan utama yang dihadapi dalam rangka pemenuhan kebutuhan energi global. Selain itu, berkurangnya produksi energi fosil terutama minyak bumi serta komitmen global dalam pengurangan emisi gas rumah kaca, mendorong pemerintah Indonesia untuk meningkatkan peran energi baru dan terbarukan secara terus menerus sebagai bagian dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan di Indonesia pada tahun 2025 adalah paling sedikit 23% dan ditargetkan mencapai 31% pada tahun 2050.

Diantara berbagai jenis sumber energi terbarukan, sumber energi yang berasal dari cahaya matahari merupakan energi alternatif yang sangat menjanjikan. Hal ini dikarenakan matahari mampu menghasilkan energi sebesar 3×10^{24} joule per tahun atau 10 ribu kali lebih besar dibanding jumlah total energi yang dikonsumsi oleh penduduk dunia (Li dkk., 2006). Indonesia

sendiri sendiri memiliki potensi energi surya yang cukup besar, yaitu sebesar 208 GW (Dewan Energi Nasional dkk., 2022). Nilai tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya, seperti angin (60,6 GW), biomasa (32,6 GW), mikrohidro (19,4 GW).

Sel surya adalah suatu perangkat yang dapat secara langsung mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui mekanisme fotovoltaik (*photovoltaic* atau PV). Efek fotovoltaik sendiri adalah suatu fenomena munculnya tegangan listrik akibat adanya hubungan atau kontak dua elektroda yang melalui sistem padatan atau cairan saat mendapatkan energi cahaya. Penggunaan sel surya sebagai pembangkit listrik di dunia saat ini mengalami lonjakan yang signifikan, yaitu rata-rata sebesar 40% setiap tahunnya sebagaimana dilaporkan pada laporan tahunan “*PV Status Report*” oleh *European Commission*. Selain itu, teknologi PV juga disebut sebagai teknologi kunci dalam upaya dekarbonisasi global, dimana investasi globalnya mencapai 42,5% atau investasi tertinggi dibanding semua jenis energi terbarukan (Jaeger-Waldau dkk., 2019). Tingginya permintaan akan instalasi sel surya di seluruh dunia diyakini akan terus meningkat di masa yang akan datang. Hal ini mengindikasikan pentingnya penguasaan teknologi pembuatan sel surya.

Berdasarkan perkembangannya, jenis teknologi sel surya dapat dikategorikan menjadi tiga generasi. Sel surya generasi pertama didominasi oleh sel surya inorganik berbahan silikon kristal yang umumnya membutuhkan proses pemurnian bahan baku yang rumit dan mahal, sehingga *energy payback time* (EPBT)-nya cukup lama yaitu sekitar 3 hingga 4 tahun. Sedangkan sel surya generasi kedua ditandai dengan penggunaan lapisan tipis berbasis material *chalcogenide* yang diantaranya menggunakan material beracun dan tidak ramah lingkungan seperti logam berat. Sel surya generasi ketiga kemudian muncul untuk mengatasi permasalahan yang dihadapi oleh generasi pendahulunya, yaitu terkait aspek performa dan biaya. Sel surya generasi ketiga umumnya dapat difabrikasi secara langsung menggunakan teknik yang sederhana seperti *solution process* dan *screen printing* (Nursam, Hidayat, Muliani dkk., 2017).

Jenis sel surya generasi ketiga yang sangat potensial untuk dikembangkan diantaranya adalah *dye-sensitized solar cell* (DSSC) dan *perovskite solar cell* (PSC). DSSC dan PSC adalah sel surya generasi ketiga yang sama-sama menggabungkan konsep inorganik dan organik sehingga dapat dikategorikan sebagai sel surya berjenis hibrida. Biaya fabrikasi sel surya DSSC dan PSC relatif lebih rendah dibanding sel surya berbasis silikon karena prosesnya yang lebih sederhana dan harga materialnya yang lebih murah. Kelebihan utama lainnya dari kedua sel surya tersebut adalah mampu beroperasi pada intensitas

cahaya rendah, sehingga dapat diaplikasikan baik di bawah sinar matahari langsung maupun di dalam ruangan (*indoor*) dibawah sinar matahari terdifusi maupun sinar lampu (Saeed dkk., 2021). Oleh karena itu, sel surya generasi ketiga memiliki potensi pemanfaatan pada berbagai aplikasi yang selama ini belum mampu dipenuhi oleh sel surya berbasis silikon dengan keterbatasan karakteristiknya.

Dari aspek material, DSSC maupun PSC memiliki keunggulan dalam hal penggunaan logam oksida yang sumber mineralnya mudah diperoleh di Indonesia serta dapat dimurnikan melalui proses yang sederhana (Wijayanti dkk., 2022). Potensi penggunaan kandungan lokal ini, menjadikan sel surya generasi ketiga memiliki keunggulan ekonomi untuk mengurangi ketergantungan impor pasokan dari luar negeri.

Meskipun demikian, tantangan yang dihadapi oleh komersialisasi sel surya DSSC dan PSC saat ini di Indonesia adalah dalam hal efisiensi dan kestabilan. Sel surya berbasis perovskite yang dikombinasikan dengan elektroda karbon telah dikembangkan melalui berbagai modifikasi, baik dari aspek material maupun rekayasa fabrikasi (Widianto dkk., 2021a). Namun, berbagai upaya penelitian masih perlu terus dilakukan untuk meningkatkan performa sel surya tersebut. Selain itu, riset yang secara khusus fokus pada upaya *scale-up* modul DSSC dan PSC termasuk untuk menjawab isu kestabilan yang berpengaruh

terhadap umur pakai, saat ini masih jarang sekali dilakukan di Indonesia.

Pengembangan teknologi sel surya generasi ketiga menjadi suatu kebutuhan untuk mendorong pemanfaatannya di masa depan. Pada naskah orasi ini dipaparkan perkembangan riset dan inovasi terkait sel surya generasi ketiga. Pembahasan diawali dengan uraian latar belakang perjalanan perkembangan teknologi sel surya, mulai dari generasi pertama hingga ketiga. Selanjutnya, naskah orasi ini menjabarkan berbagai kontribusi penelitian yang telah dilakukan dalam optimasi performa sel surya generasi ketiga, mulai level material hingga fabrikasi sel dan modul. Di bagian akhir, naskah orasi ini ditutup dengan identifikasi tantangan dan potensi pengembangan dan pemanfaatan lebih lanjut serta rekomendasi strategi yang perlu dilakukan untuk menjawab berbagai permasalahan yang ada.

II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI SEL SURYA

Pada bab ini disampaikan intisari dari perkembangan teknologi sel surya dari mulai generasi pertama hingga ketiga beserta potensi pengembangannya.

A. Sel Surya Generasi Pertama

Sel surya generasi pertama yang berbasis *wafer* silikon kristal pertama kali dilaporkan oleh Bell *laboratories* pada tahun 1954. Namun, baru pada tahun 1958 implementasi panel surya mulai mengundang perhatian publik pada saat digunakan pertama kali pada satelit *Vanguard I*. Saat terjadi krisis energi akibat kenaikan harga minyak di tahun 1970an, minat masyarakat terhadap sel surya generasi pertama ini semakin tinggi. Selain silikon, sel surya lainnya yang termasuk generasi pertama adalah sel surya berbasis material semikonduktor golongan III-V, seperti gallium arsenide (GaAs). Sel surya GaAs dengan konfigurasi *multijunction* dapat menghasilkan efisiensi tinggi, dan umumnya diaplikasikan sebagai sumber energi di luar angkasa (Poespawati & Nursam dkk., 2006).

Pada dasarnya, tantangan yang dihadapi oleh sel surya generasi pertama terletak pada aspek biaya dan karakteristik materialnya. Untuk memperoleh *wafers* silikon mono- maupun polikristal dengan spesifikasi tinggi (*electronic grade*), dibutuhkan proses pemurnian yang panjang dan rumit dari bahan baku asalnya, yaitu pasir kuarsa. Proses fabrikasi sel surya silikon juga rentan terhadap kontaminasi, sehingga prosesnya harus dilakukan di ruangan yang sangat bersih (*clean room*) serta membutuhkan proses *annealing* pada suhu rata-rata di atas 900 °C. Dalam hal karakteristik fisik, panel surya silikon bersifat kaku dan hanya mampu menyerap cahaya dengan intensitas tinggi, yaitu rata-rata di atas 200 mW/cm², sehingga sulit digunakan untuk berbagai aplikasi dengan kondisi cahaya redup atau yang membutuhkan fleksibilitas.

Peningkatan efisiensi sel surya silikon umumnya lebih didominasi dari sisi *device engineering*. Hal ini berbeda dengan tren pengembangan pada sel surya generasi berikutnya yang lebih fokus pada pengembangan material. Beberapa inovasi riset terhadap sel surya silikon telah dilaporkan melalui penggunaan *emitter* tipe-p yang lebih resistan terhadap kontaminan (Nursam, Weber, & Ren dkk., 2010) maupun pasivasi permukaan menggunakan *silicon dioxide* (Nursam, Weber, Jin dkk., 2010) dan *silicon nitride* (Nursam, Ren dkk., 2010).

Saat ini di pasaran terdapat dua struktur sel surya silikon berefisiensi tinggi, yaitu aluminium *back surface field* (Al-BSF) dan *passivated emitter rear contact* (PERC) yang merupakan modifikasi lebih lanjut dari Al-BSF. Improvisasi panel surya silikon tersebut diantaranya ditandai dengan pembentukan struktur *heterojunction* (HJT) melalui penambahan lapisan tipis silikon terhidrogenasi amorf, dimana efisiensi tertinggi yang dihasilkan mencapai 26,81% (Green, 2023). Selain itu, dikarenakan efisiensinya yang sudah hampir mencapai titik jenuh dan sampai pada masa habis pakai atau *end-of-life*, maka arah riset sel surya generasi pertama juga mulai beralih pada aspek daur ulang panel surya (Deng dkk., 2022).

B. Sel Surya Generasi Kedua

Salah satu target utama pada sel surya generasi kedua adalah penggunaan material aktif *absorber* setipis mungkin untuk mengurangi biaya produksi. Contoh sel surya kategori ini adalah sel surya film tipis berbahan silikon amorf. Sel surya ini umumnya dibuat menggunakan metode penguapan kimia berbasis plasma atau *plasma-enhanced chemical vapour deposition*. Lapisan silikon amorf yang dihasilkan rata-rata memiliki celah energi yang lebih tinggi dibanding silikon kristal, yaitu sebesar 1,7 eV, sehingga mampu menyerap cahaya yang lebih baik di rentang cahaya tampak.

Selain silikon amorf, sel surya generasi kedua yang sudah banyak diproduksi adalah sel surya berbahan *cadmium telluride* (CdTe) dan *copper indium gallium selenide* (CIGS) dengan efisiensi tertinggi masing-masing mencapai 22,1% dan 23,4%. Sel surya CdTe hingga saat ini adalah satu-satunya sel surya film tipis yang sudah mampu bersaing dengan sel surya silikon kristal dalam hal biaya per watt (Bosio dkk., 2020). Namun, sel surya CdTe memiliki kelemahan dari sisi material karena ketersediaannya yang terbatas dan bersifat beracun, sehingga menimbulkan kekhawatiran terhadap aspek pencemaran lingkungan dan keselamatan pada saat diimplementasikan.

Tren riset ke depan dari sel surya generasi kedua diprediksi fokus pada pemilihan jenis material *absorber* yang murah, ramah lingkungan dan banyak tersedia di alam, seperti kesterite yang berbasis Sn, Se, Sb, S, Cu, Zn, dan Fe (Wang dkk., 2023). Upaya peningkatan performa sel surya ini umumnya difokuskan pada rekayasa stoikiometri dan antarmuka lapisan.

C. Sel Surya Generasi Ketiga

Karakteristik sel surya generasi ketiga ditandai dengan penggunaan material *absorber* yang lebih beragam, seperti material organik pada *organic photovoltaic* (OPV) dan gabungan antara material organik dan anorganik atau yang disebut hibrida. Berbeda dengan OPV yang murni menggunakan

material organik saja, sel surya berbasis *dye-sensitized* dan perovskite dapat dikategorikan sebagai sel surya jenis hibrida.

Dye-sensitized solar cell (DSSC) adalah sel surya generasi ketiga berbasis material hibrida yang menggunakan prinsip kerja dasar berbasis fotoelektrokimia. Sel surya DSSC ini pertama kali ditemukan oleh Brian O'Regan dan Michael Grätzel pada tahun 1991 (O'Regan & Grätzel, 1991). Keduanya menemukan bahwa lapisan titanium dioksida (TiO_2) yang disensitasi dengan zat pewarna atau *dye* dalam larutan elektrolit dapat menghasilkan arus listrik dengan efisiensi 7,1%. Penggunaan partikel metal oksida transparan dan zat pewarna menjadi salah satu kelebihan DSSC karena menjadikan panel surya DSSC terlihat estetik secara visual. Proses pembuatan DSSC pun relatif lebih sederhana karena tidak membutuhkan proses vakum maupun *annealing* pada suhu tinggi. Hingga saat ini, DSSC menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 15,20% (Ren dkk., 2023).

Sebagai pengembangan lebih lanjut dari DSSC, pada tahun 2009 dilaporkan penggunaan material perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ dan $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ sebagai substitusi zat pewarna, dimana efisiensi yang dihasilkan baru sebesar 3,8% (Kojima dkk., 2009). Menariknya, melalui berbagai optimasi dan modifikasi, sel surya berbasis perovskite (PSC) tersebut kemudian mengalami lonjakan efisiensi yang signifikan dalam waktu singkat, hingga saat ini mencapai 25,73% (J. Park dkk., 2023). Menurut teori

Shockley–Queisser limit, PSC diprediksi dapat mencapai efisiensi teoritik tertinggi sebesar 31%, hampir menyamai GaAs (Ehrler dkk., 2020). Dengan karakteristik elektriknya yang dapat diatur melalui variasi komposisi komponen materialnya, sel surya berbasis perovskite menunjukkan potensi yang luar biasa sebagai pemain kunci di masa depan dalam teknologi PV pada khususnya, dan teknologi energi alternatif terbarukan pada umumnya.

III. TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA BERBASIS MATERIAL NON SILIKON

Pada bab ini dipaparkan beberapa hasil riset terkait pengembangan sel surya generasi ketiga berupa *dye-sensitized solar cell* (DSSC) dan *perovskite solar cell* (PSC) yang telah dilakukan oleh penulis.

A. Sel Surya Berbasis Pewarna Tersensitasi (DSSC)

1. Riset Material Komponen Penyusun DSSC

Komponen utama DSSC terdiri dari: (i) fotoanoda yang berfungsi untuk menyerap cahaya dan membangkitkan muatan; (ii) elektroda lawan yang berperan sebagai katalis untuk meningkatkan laju elektron menuju elektrolit; dan (iii) elektrolit yang mengandung mediator reduksi-oksidasi (redoks) yang berfungsi untuk meregenerasi elektron untuk kemudian diinjeksikan kembali ke *ground state* molekul pewarna. Peningkatan performa DSSC dapat dicapai melalui optimasi ketiga komponen utama tersebut.

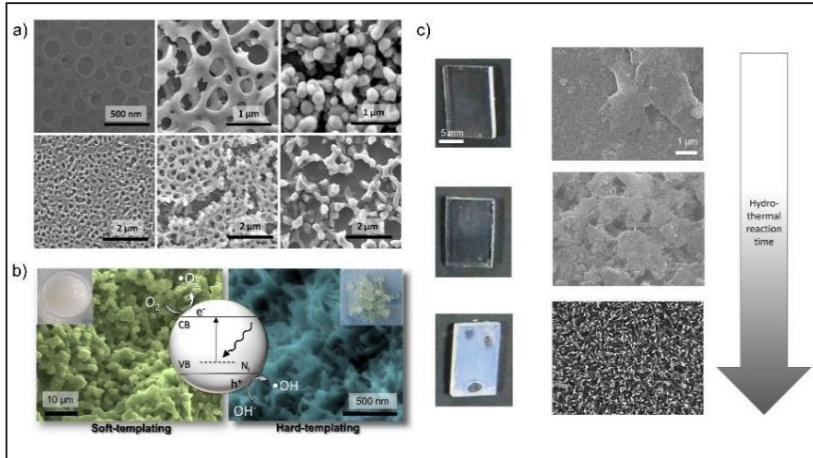
Fotoanoda

Struktur fotoanoda umumnya terdiri dari kaca konduktif transparan yang dilapisi semikonduktor dengan celah pita lebar

seperti titanium dioksida (TiO_2). Diatasnya, terdapat molekul pewarna (*dye*) yang terikat secara kovalen yang berfungsi sebagai komponen penyerap cahaya dan menghasilkan muatan bebas. Salah satu faktor penentu performa DSSC adalah kualitas fotoanoda yang dipengaruhi oleh porositas dari semikonduktor nanokristal dan respon spektral dari molekul pewarna.

Pada penelitian penulis, lapisan TiO_2 berpori dengan hirarki ukuran makro dan meso telah dibuat dan dapat dikendalikan morfologinya melalui teknik *templating*. *One-pot templating* menggunakan surfaktan seperti *block co-polymer* Pluronic[®] F127 telah digunakan sebagai *templating agent* untuk membentuk mesopori, sedangkan *poly(ethylene glycol)* dan *poly(vinyl pyrrolidone)* masing-masing digunakan untuk mengatur ketebalan lapisan sekaligus menginduksi *phase separation* agar diperoleh struktur makropori (Nursam dkk., 2015). Gambar 3.1a menunjukkan contoh beberapa morfologi lapisan TiO_2 berpori yang diperoleh melalui variasi rasio komposisi polimer. Selain *soft-templating* menggunakan surfaktan, teknik lain menggunakan *sacrificial template* atau *hard-templating* juga dilakukan dengan agarose (Nursam dkk., 2016). Pori yang terbentuk menggunakan teknik ini dilaporkan dipengaruhi oleh proses infiltrasi prekursor. Perbandingan morfologi TiO_2 yang dihasilkan oleh metode *soft* dan *hard templating* disajikan pada Gambar 3.1b. Dari pengukuran luas area permukaan spesifik menggunakan teknik *Brunauer–Emmett–Teller* (BET)

didapatkan hasil bahwa luas permukaan yang lebih tinggi diperoleh dari metode *hard-templating*.



Sumber: (Nursam dkk., 2015, 2016; Nursam, Shobih, Pandanga, dkk., 2020)

Gambar 3.1. Scanning electron microscopy (SEM) yang menunjukkan morfologi: a) TiO₂ dengan makropori dan mesopori hasil templating menggunakan surfaktan dan phase separation, b) TiO₂ berpori yang terbentuk melalui teknik soft- dan hard-templating, dan c) TiO₂ dengan nanostruktur 1D yang dihasilkan melalui reaksi hidrotermal.

Meskipun nanomaterial TiO₂ memiliki kelebihan berupa luas permukaan yang tinggi, namun terdapat kelemahan dari struktur tersebut, yaitu banyaknya *grain boundaries* yang dapat menghambat laju perpindahan elektron, sehingga meningkatkan peluang terjadinya rekombinasi pembawa muatan elektron-hole. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka telah dilakukan modifikasi morfologi material menggunakan struktur satu dimensi

(1D) seperti TiO_2 *nanorods* melalui teknik *nanostructuring*. Sintesis TiO_2 *nanorods* telah dilaporkan menggunakan metode hidrotermal, dimana ukuran panjang dan diameter *rods* dapat direkayasa melalui variasi konsentrasi prekursor titanium diisopropoksida (TTIP) (Pandanga dkk., 2019). Gambar 3.1c menunjukkan foto morfologi TiO_2 *nanorods* yang dihasilkan. Selain berperan sebagai lapisan fotoanoda penyerap molekul pewarna, TiO_2 *nanorods* juga dapat difungsikan sebagai *blocking layer* yang bila dikombinasikan dengan TiO_2 mesopori di atas lapisannya, mampu menghasilkan DSSC dengan performa lebih baik dengan peningkatan efisiensi sebesar 8% lebih tinggi dibandingkan DSSC serupa tanpa TiO_2 *nanorods* (Nursam dkk., 2020).

Selain dari aspek morfologi, upaya peningkatan performa sel surya juga dapat dilakukan melalui modifikasi sifat elektronik material. Pada penelitian penulis, *doping* terhadap TiO_2 menggunakan karbon (C) serta *co-doping* menggunakan karbon-zinc (C-Zn) dan karbon-timah (C-Sn) telah dilakukan melalui teknik sol-gel dengan penambahan anilin dan logam klorida sebagai prekursor dopan (Novianti dkk., 2023). Modifikasi dopan C dilaporkan dapat menurunkan *bandgap* anatase TiO_2 dari yang semula sebesar 3,03 eV menjadi 2,91 eV. Meskipun *co-doping* dengan C-Zn dan C-Sn mampu menurunkan *bandgap* lebih signifikan, namun peningkatan efisiensi DSSC terbaik diperoleh dari *doping* tunggal menggunakan C saja.

Hal ini dikarenakan *co-doping* menyebabkan turunnya *surface wettability* permukaan TiO_2 yang berakibat pada terhambatnya infiltrasi elektrolit.

Elektroda Lawan

Platina merupakan material yang paling banyak digunakan sebagai katalis pada elektroda lawan atau *counter electrode* (CE). Dikarenakan harga material platina yang tinggi serta proses deposisi yang biasanya menggunakan teknik *sputtering*, maka penelitian ini telah dilakukan menggunakan material berbasis karbon sebagai bahan pengganti platina (Oktaviani & Nursam, 2019). Meskipun harganya lebih terjangkau, performa yang dihasilkan oleh DSSC dengan material berbasis karbon pada CE memang masih lebih rendah dibandingkan platina dikarenakan konduktivitasnya yang lebih rendah (Oktaviani dkk., 2020). Menariknya pada DSSC berkonfigurasi monolitik, CE berbasis karbon ternyata dilaporkan lebih unggul dibandingkan platina dikarenakan sifat porositasnya yang lebih tinggi yang memungkinkan infiltrasi molekul pewarna serta elektrolit yang lebih baik (Nursam, Istiqomah, dkk., 2017). Hasil penelitian penulis menemukan bahwa komposisi material karbon sangat berpengaruh terhadap karakteristik CE dan performa sel surya yang dihasilkan (Arif dkk., 2019; Mubarak dkk., 2018).

Elektrolit

Elektrolit merupakan salah satu elemen yang berpengaruh terhadap performa DSSC, salah satunya dalam menentukan nilai *open-circuit voltage* atau V_{oc} . Pada dasarnya, terdapat tiga faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan jenis material elektrolit yang handal untuk DSSC, yaitu nilai potensial redoks, konduktivitas, dan jenis pelarut. Elektrolit berbasis I^-/I_3^- merupakan jenis elektrolit yang paling banyak digunakan karena sifat elektrokimianya yang baik dan kompatibel dengan katalis metal pada CE (Nursam dkk., 2011). Modifikasi elektrolit berbasis I^-/I_3^- telah dilakukan dengan mencampurkan jenis pelarut yang berbeda (Anggraini dkk., 2021; Rosa dkk., 2024). Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil terbaik dan performa yang stabil diperoleh menggunakan pelarut berbahan *dimethylformamide* yang memiliki viskositas dan jumlah donor yang tinggi.

Salah satu upaya untuk mengatasi penurunan performa DSSC yang disebabkan oleh kebocoran elektrolit cair, maka digunakan substitusi cairan elektrolit dengan gel (*quasi-solid state* atau QSS-DSSC) atau padatan (*solid state* SS-DSSC). Elektrolit gel berbasis I^-/I_3^- pada QSS-DSSC telah dilaporkan pada penelitian ini melalui penambahan polyvinylidene fluoride (PVDF) dan Degussa P25 (Anggraini dkk., 2019). Studi tersebut melaporkan bahwa semakin tinggi konsentrasi PVDF, maka semakin tinggi

dan stabil performa DSSC yang dihasilkan akibat berkurangnya kontak langsung antara elektrolit dan *sealant*. Untuk SS-DSSC, tren riset yang ada adalah dengan mengganti elektrolit dengan material pembawa muatan *hole* (*hole transport layer* atau HTL) baik berupa material berbasis polimer konduktif, *small molecules*, maupun semikonduktor inorganik tipe-p. Skema inilah yang kemudian menjadi cikal bakal pengembangan DSSC lebih lanjut ke sel surya berbasis perovskite yang nantinya akan dibahas lebih lanjut di sub-bab III.B.

Light Harvesting

Selain langkah optimasi pada ketiga komponen utama DSSC, peningkatan performa juga dapat dilakukan melalui modifikasi sifat optik yang bertujuan untuk meningkatkan penyerapan cahaya. Salah satu modifikasi optik yang dilakukan pada fotoanoda adalah penambahan lapisan penghambur (*scattering layer*). Penelitian penulis menunjukkan bahwa penambahan lapisan penghambur berupa TiO_2 atau ZrO_2 dengan ukuran partikel pada rentang ratusan mikrometer dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan rapat arus atau J_{sc} (Nursam dkk., 2018).

Peningkatan penyerapan cahaya juga dapat dilakukan melalui penambahan elemen pengkonversi cahaya untuk menyerap cahaya diluar respon spektral dari zat pewarna. Konversi penurunan energi cahaya ultraviolet (UV) dapat

dilakukan melalui proses *down-conversion* (DC), dan sebaliknya energi cahaya infrared (IR) dapat dinaikkan melalui proses *up-conversion* (UC) (Yuliantini dkk., 2022). Skema UC telah dilaporkan melalui penggunaan kaca dengan *doping* erbium (Er^{3+}) yang sifat luminesensinya sesuai dengan penyerapan molekul pewarna Z907, sehingga dapat meningkatkan efisiensi DSSC sebesar 7,21% (Yuliantini dkk., 2023).

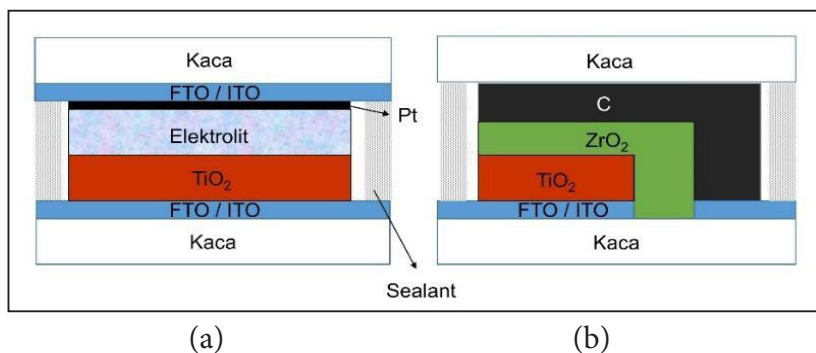
Upaya lain untuk meningkatkan penyerapan cahaya adalah dengan menambahkan lapisan anti-refleksi diluar struktur DSSC dengan indeks bias yang sesuai. Material berbasis koloidal SiO_2 yang dilapiskan pada sisi luar fotoanoda telah dipatenkan untuk meningkatkan penyerapan cahaya pada DSSC (Nursam, Shobih, Hidayat, dkk., 2020). Selain bermanfaat dari sisi optik, penambahan SiO_2 juga dapat membantu mempertahankan performa DSSC pada kondisi basah dikarenakan sifat hidrofilik material SiO_2 .

2. DSSC dengan Konfigurasi Monolitik

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2a, sel surya DSSC dengan konfigurasi *sandwich* memiliki struktur berlapis menggunakan dua substrat kaca konduktif. Dari segi biaya, rata-rata 60 hingga 80% dari biaya material yang dibutuhkan untuk membuat satu sel DSSC dialokasikan untuk biaya kaca konduktif tersebut (Syed & Wei, 2022). Konfigurasi DSSC, atau dalam

hal ini sel surya jenis apapun, yang disusun dalam satu substrat disebut dengan konfigurasi monolitik. Pengembangan DSSC monolitik merupakan terobosan baru yang tidak hanya memiliki keuntungan dari sisi pengurangan biaya, namun juga dalam hal proses fabrikasi yang lebih mudah dan dapat diadaptasikan pada proses manufaktur di industri, seperti contohnya proses *roll-to-roll*.

Gambar 3.2b menunjukkan struktur DSSC monolitik yang umumnya terdiri dari tiga lapisan, yaitu (i) TiO_2 sebagai lapisan penyerap molekul warna pada fotoanoda, (ii) lapisan ZrO_2 sebagai pemisah (*spacer*) dua elektroda kerja, dan (iii) lapisan elektroda lawan yang berfungsi sebagai katalis sekaligus pengumpul arus listrik untuk kemudian dialirkan menuju sirkuit eksternal (Nursam, Hidayat, Istiqomah, dkk., 2017).



Sumber: Gambar pribadi

Gambar 3.2 Perbandingan struktur DSSC dengan konfigurasi (a) sandwich (dua substrat) dan (b) monolitik (satu substrat).

Dibandingkan DSSC berstruktur *sandwich*, performa yang dihasilkan oleh DSSC monolitik memang masih lebih rendah, utamanya disebabkan oleh tingginya nilai resistansi parasitik. Oleh sebab itu telah dilakukan studi yang bertujuan untuk mendapatkan ketebalan ZrO_2 yang optimum pada DSSC monolitik (Nursam, Anggraini, Shobih, dkk., 2017). Hasil studi tersebut menunjukkan bahwa nilai efisiensi fotokonversi DSSC monolitik sangat dipengaruhi oleh ketebalan ZrO_2 , dengan nilai ketebalan optimal sebesar $4 \mu m$ untuk mendapatkan nilai J_{SC} dan efisiensi tertinggi.

Selain elemen *spacer*, material yang digunakan pada CE juga berpengaruh signifikan terhadap performa DSSC monolitik. Pada CE berbasis material karbon campuran, komposisi dan jenis material menjadi penentu keempat faktor tersebut (Nursam, Hidayat, Shobih, Rosa, Retnaningsih, dkk., 2018). Penggunaan CE dari campuran material grafit dan karbon aktif dengan komposisi 1:4 menghasilkan DSSC dengan performa yang lebih baik dibandingkan grafit dan karbon nanopowder (Arif dkk., 2019). Sementara itu, studi lain menunjukkan bahwa performa yang lebih baik dapat dihasilkan dengan penggunaan poly (3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) dikarenakan sifatnya yang jauh lebih konduktif dan nilai resistansi transfer muatan pada antar muka CE/elektrolit yang lebih rendah (Oktaviani dkk., 2021). Konduktivitas CE juga berpengaruh signifikan terhadap performa DSSC,

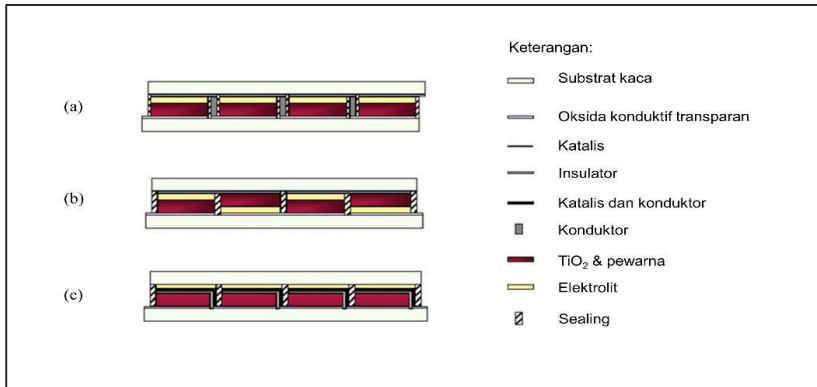
khususnya pada DSSC monolitik. Hal ini disebabkan DSSC monolitik memiliki jalur transfer elektron pada CE yang lebih panjang dibandingkan DSSC *sandwich*. Salah satu upaya untuk mengatasi hal tersebut telah dilakukan melalui penambahan material *interlayer* pada CE (Shobih dkk., 2019).

Beberapa upaya yang dapat dilakukan kedepannya untuk meningkatkan performa DSSC monolitik antara lain: meningkatkan konsentrasi zat pewarna yang digunakan karena proses penyerapan pada DSSC monolitik lebih lambat dibandingkan *sandwich*; meningkatkan konduktivitas material katalis melalui peningkatan ketebalan, penggunaan lapisan *intermediate*, maupun *doping*; dan mencari metode infiltrasi elektrolit yang tepat untuk memastikan penetrasi elektrolit yang optimal pada lapisan *spacer*.

3. Modul Surya *Dye-sensitized*: Potensi Menuju *Upscaling*

Riset yang berfokus pada fabrikasi modul surya *dye-sensitized* (*dye-sensitized solar module* atau DSM) merupakan langkah logis untuk menjembatani riset skala lab dan industri. Efisiensi modul pada umumnya tidak setinggi efisiensi yang diperoleh pada sel dikarenakan kenaikan resistansi seri secara lateral akibat bertambahnya luas area (Nursam, Hidayat, Pranoto, dkk., 2017). Namun demikian, efek negatif tersebut dapat diminimalisir melalui rekayasa dan optimasi disain modul.

DSM umumnya difabrikasi melalui interkoneksi yang dapat dibuat dalam tiga tipe, yaitu tipe-Z, tipe-W dan monolitik (Gambar 3.3). DSM dengan interkoneksi tipe-Z dan W umumnya menghubungkan DSSC secara seri. Perbedaan keduanya terdapat pada pola interkoneksi antar sel-nya, dimana pada tipe-Z terdapat interkoneksi vertikal yang menghubungkan antar sel yang bersebelahan. DSM dengan interkoneksi tipe-Z berukuran $10 \times 10 \text{ cm}^2$ telah dibuat dengan interkoneksi paralel (Nursam, Hidayat, Pranoto, dkk., 2017) dan seri (Anggraini dkk., 2018) dengan efisiensi hampir sekitar 1%. Pada DSM tipe-W, interkoneksi sel terhubung secara langsung pada substrat yang sama, sehingga cenderung menghasilkan *fill factor* yang lebih tinggi. Namun demikian, DSM tipe-W memiliki kelemahan yaitu semua materialnya harus bersifat transparan agar dapat disinari dari dua arah dan nilai J_{SC} dari tiap sel sebaiknya tidak selisih jauh untuk meminimalisir *loss* yang signifikan. Tipe ketiga yaitu DSM tipe monolitik memiliki konfigurasi serupa dengan pembahasan pada sub-bab sebelumnya, dimana modul tipe monolitik ini membutuhkan biaya produksi yang paling rendah, namun dengan performa yang paling rendah pula dibanding tipe-Z dan W (Pranoto dkk., 2021; Nursam, Hidayat, Shobih, dkk., 2020).



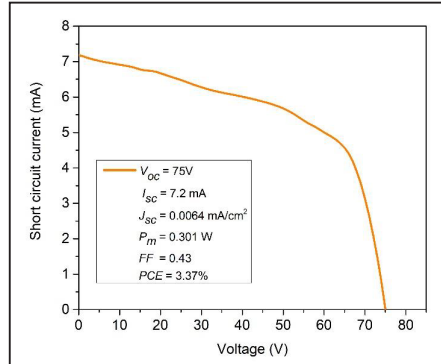
Sumber: (Nursam, Hidayat, Pranoto, dkk., 2017)

Gambar 3.3 DSM dengan arsitektur (a) tipe-Z, (b) tipe-W, dan (c) monolitik.

Dalam hal penggunaan, DSM sangat berpotensi untuk diaplikasikan pada *building* maupun *automobile-integrated photovoltaic* (BIPV dan AIPV). Hingga saat ini BIPV merupakan target pasar utama dari DSM, khususnya untuk difungsikan sebagai jendela maupun *smart electrochromic window*. Fabrikasi *solar window* menggunakan teknologi DSM telah dibuat dan diuji performanya (Muliani dkk., 2021). *Solar window* tersebut dibuat dengan mengkoneksikan 16 buah DSM secara seri yang masing-masing dibuat pada substrat berukuran $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Tiap DSM terdiri atas 7 buah DSSC dengan pola *grid* yang juga terinterkoneksi secara seri dengan koneksi tipe-Z. Secara keseluruhan, *solar window* yang dibuat menghasilkan daya $P_{max} = 0,3 \text{ W}$, $V_{OC} = 75 \text{ V}$, $J_{SC} = 6,4 \text{ A/cm}^2$, dan efisiensi sebesar 3,37% (Gambar 3.4).



(a)



(b)

Sumber: (Muliani dkk., 2021)

Gambar 3.4. (a) Foto dye-sensitized solar module untuk aplikasi solar window dan (b) kurva karakteristik arus-tegangan beserta parameter output yang dihasilkan.

Untuk membuat DSM berukuran besar, metode fabrikasi menjadi salah satu faktor yang harus dipertimbangkan. Teknologi ramah industri berupa *screen-printing* telah digunakan untuk deposisi kontak konduktif dan *sealant* baik untuk batas antar sel maupun enkapsulasi modul secara keseluruhan (Hidayat dkk., 2018). Selain metode deposisi, pada penelitian ini juga telah dilakukan rekayasa terhadap pengisian elektrolit pada DSM melalui metode infiltrasi tanpa menggunakan teknik *drilling* (Hidayat dkk., 2017).

B. Sel Surya Berbasis Perovskite (PSC)

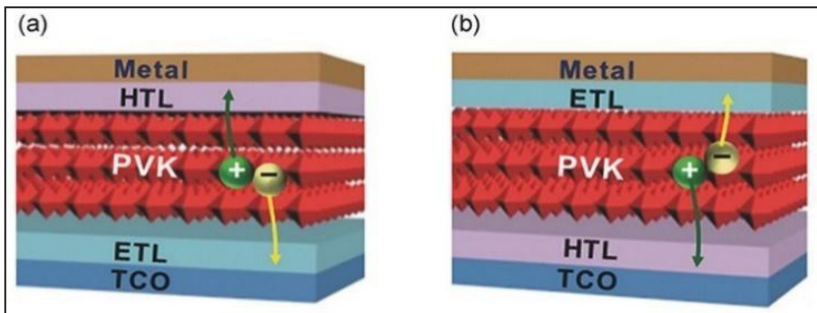
Sel surya berbasis perovskite atau *perovskite solar cell* (PSC) pertama kali dilaporkan pada tahun 2009 sebagai bentuk pengembangan dari pensensitasi pada sel surya DSSC melalui penggantian molekul pewarna dengan perovskite jenis $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ dan $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ (Kojima dkk., 2009). Sejak saat itu, terjadi lonjakan jumlah riset yang melaporkan perkembangan kenaikan efisiensi PSC yang signifikan dalam kurun waktu singkat, dimana improvisasi dilakukan melalui optimasi komponen utama yang terdiri atas lapisan pembawa muatan, *absorber* dan *back contact*.

1. Lapisan Pembawa Muatan pada Sel Surya Perovskite

Sesuai dengan namanya, *electron transport layer* (ETL) maupun *hole transport layer* (HTL) masing-masing berfungsi untuk memindahkan elektron dan *hole* menuju kontak. Berdasarkan penempatan ETL dan HTL sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.5 konfigurasi PSC dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu n-i-p dan p-i-n (yang disebut juga dengan struktur inversi) (Rajagopal dkk., 2018). ETL maupun HTL dapat berupa material inorganik maupun organik. PSC dengan efisiensi tinggi diatas 15% umumnya dilaporkan menggunakan TiO_2 sebagai ETL. Selain digunakan pada ETL dalam bentuk lapisan mesopori, TiO_2 juga digunakan sebagai *blocking layer*. Ketebalan lapisan

TiO₂ *blocking layer* yang dilapiskan melalui *chemical bath deosition* dalam larutan TiCl₄ dilaporkan berpengaruh terhadap performa PSC, dimana semakin tipis lapisannya semakin tinggi efisiensi yang dihasilkan (Rosa dkk., 2018).

Guna mengatasi berbagai kelemahan TiO₂, maka saat ini banyak penelitian yang beralih ke penggunaan material lain seperti ZnO, In₂O₃, Zn₂SnO₄, dan SnO₂ (Foo dkk., 2022). Di antara material-material tersebut, material SnO₂ saat ini terlihat paling menjanjikan dan paling banyak digunakan sebagai pengganti TiO₂ karena telah mampu menghasilkan efisiensi >20%. Selain material inorganik, penggunaan material organik, seperti phenyl-C61-butyric acid methyl ester atau PCBM, C₆₀, dan turunan fullerene lainnya, juga dapat digunakan sebagai ETL, khususnya pada PSC berkonfigurasi p-i-n. Namun demikian, hingga saat ini efisiensi tertinggi dari PSC dengan material organik sebagai ETL rata-rata masih dibawah 20%.



Sumber: (Rajagopal dkk., 2018)

Gambar 3.5 Skematik struktur sel surya perovskite dengan konfigurasi (a) n-i-p dan (b) p-i-n (inversi).

Untuk HTL material yang paling sering digunakan umumnya berupa material organik dan polimer. Konduktivitas dan mobilitas *hole* yang rendah menyebabkan perlunya penggunaan bahan aditif pada beberapa polimer. Pada penelitian ini telah dilaporkan penggunaan *graphene oxide* atau GO sebagai HTL (Widianto dkk., 2023). Selain itu, telah dilakukan studi pemodelan yang menemukan bahwa penggunaan GO sebagai HTL diestimasi dapat mencapai efisiensi sebesar 16,51% (Widianto dkk., 2021b, 2022). Perbandingan performa PSC dengan berbagai jenis HTL –yaitu spiro-OMeTAD, CuSCN dan *graphene oxide*– melalui studi numerik juga telah dilakukan, dimana HTL inorganik berupa CuSCN diestimasi menghasilkan performa yang terbaik (Nursam dkk., 2021).

Alternatif lain dalam arsitektur PSC yang bersifat ekonomis adalah penggunaan salah satu lapisan pembawa muatan saja. PSC tanpa menggunakan HTL sejauh ini lebih banyak dilaporkan terutama pada PSC berkonfigurasi n-i-p dengan elektroda karbon (Sova dkk., 2022).

2. Lapisan Perovskite sebagai *Absorber*

Jenis material perovskite yang umumnya digunakan sebagai lapisan *absorber* pada sel surya adalah perovskite berstruktur 3D, yaitu ABX_3 , dimana A adalah kation monovalent (organik atau Cs^+), B adalah logam divalen (Pb, Sn), dan X adalah halogen (I,

Br, atau Cl). Jenis perovskite untuk sel surya umumnya dipilih dengan pertimbangan panjang difusi dan mobilitas muatan yang tinggi, serta *bandgap* yang dapat diatur dalam kaitannya dengan penyerapan cahaya. Ketiga faktor tersebut umumnya dapat dipenuhi oleh material perovskite jenis $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (*methylammonium lead iodide*) beserta variasi kation, logam maupun halogenya. Meskipun mampu menghasilkan efisiensi tinggi, penggunaan material perovskite berbasis organometal halida memiliki kekurangan dalam hal stabilitas. Oleh sebab itu, riset yang telah dilakukan salah satunya adalah pengembangan perovskite jenis inorganik seperti CsPbX_3 (Yandri dkk., 2023).

Proses deposisi lapisan perovskit pada temperatur rendah menghasilkan lapisan kristal perovskit tanpa relaksasi termal yang cukup dan ketidak setimbangan termodinamika, sehingga terbentuklah *lattice mismatches* dan vakansi yang menghasilkan *defect* (Nurunnizar dkk., 2023). *Defect* yang seringkali ditemukan pada material perovskite diantaranya berupa: $\text{Pb}^{2+}/\text{Sn}^{2+}$ *vacancies*, X^- *vacancies*, $\text{MA}^+/\text{FA}^+/\text{Cs}^+$ *vacancies*, *interstitial* $\text{Pb}^{2+}/\text{Sn}^{2+}$, *interstitial* X^- , *Pb-X antisite substitution*, *uncoordinated* ion Pb/Sn , dan ion X di antarmuka (Shen dkk., 2021). *Defect* yang terbentuk pada antarmuka lapisan dapat berimbas pada ekstraksi muatan, sehingga dapat menurunkan performa sel surya secara signifikan.

Melalui teknik pengukuran *transient photovoltage*, telah dilaporkan bahwa morfologi TiO₂ ETL yang berbeda dapat mempengaruhi pembentukan *defect* pada antarmuka perovskite/ETL (Hidayat dkk., 2020). Salah satu upaya rekayasa antarmuka yang telah dilakukan untuk mengurangi *defect* adalah melalui teknik pasivasi menggunakan molekul pasivasi berbasis organofluorine (Nurunnizar dkk., 2023). Selain itu, upaya pasivasi pada penelitian ini juga telah dilakukan melalui interaksi gugus hidroksil yang diperoleh dari penambahan selulosa nanokristal terhadap prekursor perovskite CH₃NH₃PbI₃ (Sova, Budiawan, dkk., 2024).

3. Sel Surya Perovskite Berbasis Karbon

Penggunaan material karbon sebagai *back contact* pada sel surya perovskite semakin banyak menarik minat para peneliti. Selain harganya yang lebih murah dibandingkan kontak berbasis logam mulia seperti emas dan perak, PSC dengan elektroda karbon juga terbukti lebih stabil. Ion iodida pada material perovskite MAPbI₃ dalam jangka panjang dapat terdifusi lalu terakumulasi pada bagian elektroda sehingga mengakibatkan korosi pada elektroda logam (Fagiolari dkk., 2019). Hal tersebut dapat dihindari dengan penggunaan elektroda berbasis karbon.

Berdasarkan suhu pemanasan elektrodanya, PSC dengan elektroda karbon terbagi menjadi dua, yaitu *low-temperature* (LT) PSC dan *high-temperature* (HT) PSC. Pada literatur, LT-PSC umumnya lebih banyak digunakan karena mampu menghasilkan sel surya dengan efisiensi tinggi. Deposisi elektroda karbon pada LT-PSC dilakukan pada tahap akhir dan pada suhu rendah ($<150^{\circ}\text{C}$) agar tidak merusak lapisan perovskite dibawahnya. Salah satu tantangan pengembangan elektroda karbon pada LT-PSC adalah mencari komposisi prekursor pasta karbon yang mengandung *binder* serta pelarut yang kompatibel dengan perovskite. Pada penelitian ini telah dilakukan invensi berupa penambahan karbon *nanotube* pada pasta karbon temperatur rendah yang dapat menghasilkan konduktivitas tinggi (Rosa dkk., 2021).

Konfigurasi HT-PSC (atau disebut juga dengan *mesoscopic* PSC) sedikit berbeda dengan LT-PSC karena strukturnya menyerupai DSSC monolitik yang dicirikan dengan adanya tambahan lapisan *spacer* berpori seperti ZrO_2 . Kelebihan HT-PSC ada pada proses fabrikasinya yang lebih mudah untuk *upscaling* menggunakan teknik *screen-printing*. Namun kelemahannya terdapat pada performanya yang lebih rendah dibanding HT-PSC. Hal tersebut salah satunya disebabkan karena proses kristalisasi perovskite yang terjadi pada ruang sempit (*confined space*) diantara partikel pada lapisan *spacer*, sehingga pembentukan kristalnya lebih rumit untuk dikontrol.

Selain elektroda karbon temperatur rendah dan tinggi, terdapat juga modifikasi baru berupa karbon laminasi yang bersifat *free-standing* (Gambar 3.6). Kelebihan dari elektroda karbon jenis ini adalah adanya fleksibilitas untuk memproses elektroda pada suhu tinggi karena pemanasannya dapat dilakukan secara terpisah dari lapisan perovskite. Kendala utama pada elektroda karbon laminasi ada pada penempelan serta kualitas kontak antarmuka antara karbon dan lapisan dibawahnya. Penempelan elektroda karbon yang optimum dapat dilakukan melalui proses *hot-pressing* yang dikombinasikan dengan *solvent exchange* (Sova dkk., 2022). Selain itu, peningkatan performa juga telah dapat diperoleh melalui penambahan klorobenzena sebagai *surface treatment* pada permukaan perovskite dan penggunaan lembaran konduktif sebagai substrat elektroda karbon untuk membantu meminimalisir resistansi elektrik (Sova dkk., 2024).



(a)



(b)

Sumber: Dokumentasi pribadi

Gambar 3.6 (a) Elektroda karbon laminasi dan (b) PSC dengan elektroda karbon laminasi pada substrat konduktif.

IV. PROSPEK PENGEMBANGAN DAN PEMANFAATAN TEKNOLOGI SEL SURYA GENERASI KETIGA

Pada bab ini akan disarikan prospek pengembangan dan pemanfaatan sel surya generasi ketiga yang dirangkum melalui identifikasi tantangan dan proyeksi pengembangan teknologi sel surya generasi ketiga di masa depan, upaya pendukung yang diperlukan berupa kolaborasi multidisiplin, serta diakhiri dengan pembahasan terkait peluang pemanfaatan sel surya generasi ketiga di Indonesia.

A. Tantangan dan Proyeksi Pengembangan Teknologi Sel Surya

Implementasi sel surya generasi ketiga pada level aplikasi dan komersialisasi masih menyisakan banyak tantangan. Salah satu permasalahan utama yang dihadapi adalah kestabilan. Untuk DSSC, faktor kestabilan lebih erat kaitannya dengan penggunaan elektrolit cair dan enkapsulasi. Konsekuensi dari substitusi elektrolit cair dengan gel maupun elektrolit padat atau HTM adalah menurunnya efisiensi, sehingga dilakukan beberapa upaya modifikasi terhadap DSSC dengan elektrolit gel (Anggraini dkk., 2019; Nursam, Shobih, Hidayat, & Ilman dkk., 2018). Selain itu, enkapsulasi merupakan salah satu faktor krusial

dalam memperoleh kestabilan yang baik. Pada DSSC, material yang umumnya digunakan sebagai enkapsulan adalah berbagai jenis *thermoplastic sealant*, *polymer films*, *glass frit*, atau *UV-curable epoxy*. Untuk enkapsulasi, inovasi berupa penggunaan material *silicon rubber* yang murah dan banyak ditemukan di pasaran juga dilaporkan dapat mempertahankan performa DSSC (Hidayat dkk., 2018). Aplikasi semua jenis enkapsulan tersebut pada DSSC dan PSC rata-rata masih memerlukan optimasi serta evaluasi jangka panjang, khususnya agar dapat bersaing dengan stabilitas modul surya silikon maupun *thin film* yang kebanyakan menggunakan laminasi dengan EVA.

Pada PSC, permasalahan kestabilan lebih berkaitan dengan karakteristik material perovskite yang mudah terdegradasi. Hal ini salah satunya menjadi penyebab utama rendahnya performa PSC yang difabrikasi di Indonesia karena tingginya kelembaban udara (>70%). Material perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, misalnya, mudah bereaksi dengan uap air pada udara bebas dan terdekomposisi kembali menjadi PbI_2 . Oleh sebab itu, tantangan utama dalam peningkatan kestabilan PSC ada pada rekayasa material, baik material perovskite sebagai *absorber* maupun lapisan penghantar muatan yang menjadi pembatas luar antara perovskite dan komponen eksternal seperti kontak. Penggunaan material perovskite inorganik maupun elektroda karbon yang bersifat hidrofobik dapat membantu mengatasi permasalahan ketidakstabilan tersebut (Sova dkk., 2024).

Tantangan berikutnya yang dihadapi sel surya generasi ketiga adalah imbas terhadap lingkungan. PSC banyak mendapat sorotan negatif terkait kandungan logam berat timbal (Pb) dalam komponen material *absorber*-nya. Meskipun secara kuantitas kandungan Pb pada PSC tergolong sangat sedikit, hal ini masih menjadi salah satu isu utama pada saat *upscaling* nantinya. Salah satu penelitian yang telah dilakukan untuk mengatasi hal ini adalah dengan melakukan substitusi Pb pada material perovskite dengan logam lain seperti Sn (Widianto dkk., 2024).

Selain meminimalisir material yang berbahaya terhadap lingkungan, riset PSC dan DSSC kedepan juga diarahkan pada pemanfaatan bahan alam. Pembuatan lapisan ETL TiO_2 , contohnya, dapat diekstraksi dari mineral alam berupa ilmenite yang banyak diperoleh sebagai limbah buangan proses tambang timah yang banyak dilakukan di pulau Bangka. Ekstraksi TiO_2 dapat dilakukan melalui proses pelindian berbasis reaksi fusi kaustik (Wijayanti, 2020). Partikel TiO_2 yang dihasilkan juga dapat difungsikan sebagai elektroda, baik pada DSSC maupun PSC (Wijayanti dkk., 2022; Yustiani dkk., 2023).

Selanjutnya, pengembangan riset sel surya generasi ketiga kedepan diprediksi akan semakin banyak bersinergi dengan bidang *artificial intelligence* (AI) dan *machine learning*. Keduanya akan banyak dibutuhkan untuk mempercepat penemuan material-material baru, khususnya perovskite, yang dirasa kurang efisien

jika hanya dilakukan berbasis eksperimental. Penggunaan AI juga dapat dimanfaatkan untuk mengakselerasi proses evaluasi sel surya generasi ketiga dalam proses manufaktur di skala industri yang melibatkan banyak variabel (F. Li dkk., 2019).

Terakhir, sebelum bertransformasi menuju level aplikasi dan komersialisasi, kondisi uji performa dan kestabilan sel surya generasi ketiga perlu mendapat perhatian karena harus sesuai dengan standar *international electrotechnical commission* (IEC) 61215:2021. Pada tahap pengembangan, uji protokol lain seperti protokol *the International Summit on Organic Photovoltaic Stability* (ISOS) juga dapat diadaptasi untuk mendemonstrasikan kestabilan sel surya generasi ketiga.

B. Kolaborasi Multidisiplin

Dengan berkembangnya teknologi sel surya dari generasi pertama hingga ketiga, tidak dapat dipungkiri bahwa penguasaan teknologinya semakin meluas sehingga membutuhkan kepakaran dari berbagai disiplin ilmu. Seiring dengan perkembangan teknologi sel surya yang lebih banyak dimotori oleh perkembangan dari sisi material, saat ini terdapat kebutuhan akan pemahaman dari disiplin ilmu yang lebih luas, yaitu ilmu fisika, material, kimia, biologi, informatika, bahkan ilmu ekonomi dan sosial juga dibutuhkan untuk memperkuat analisa dari sudut tekno ekonomi.

Oleh sebab itu, dibutuhkan keterlibatan komprehensif serta peningkatan kapasitas sumber daya manusia dengan bidang ilmu yang berbeda untuk menguatkan riset sel surya generasi ketiga. Salah satu contoh realisasi *capacity building* yang telah dilakukan berupa *tailor-made course on the fabrication of solar module based on dye-sensitized solar cells* yang diselenggarakan pada tahun 2016 oleh sebuah industri sel surya Dyenamo AB di Stockholm, Swedia. Program tersebut diikuti oleh para pelaku riset sel surya dari multi-instansi, yaitu LIPI, Universitas Negeri Sebelas Maret (UNS), Universitas Gadjah Mada (UGM), dan Institut Teknologi Bandung (ITB). Dari kegiatan *capacity building* tersebut kemudian lahirlah berbagai kolaborasi riset antar instansi tersebut, baik berupa pembimbingan mahasiswa maupun kegiatan riset bersama.

Selain kolaborasi riset dan *training*, pelaksanaan *workshop* atau simposium yang dilakukan secara rutin juga dapat menjadi salah satu bentuk *update* informasi seputar perkembangan teknologi sel surya. Pada tahun 2018, LIPI pertama kalinya menyelenggarakan *workshop on Advanced Photovoltaic Technology*, yang kemudian dilaksanakan kembali pada tahun 2020 dan berlanjut pada tahun 2023 yang digelar pertama kalinya oleh BRIN bertajuk *Symposium on Advanced Photovoltaic 2023*. Kegiatan tersebut menjadi wadah pertemuan antara para periset sel surya baik di Indonesia maupun diaspora di luar negeri. Dari kegiatan tersebut lalu muncul inisiatif pembentukan komunitas

periset PV yang kedepannya diharapkan dapat semakin memperkuat kolaborasi riset PV di Indonesia.

C. Peluang Pemanfaatan Sel Surya Generasi Ketiga di Indonesia

Pemanfaatan sel surya generasi ketiga saat ini memang tidak secara langsung dapat bersanding atau bahkan menggantikan panel surya silikon yang banyak digunakan dalam sistem pembangkit tenaga listrik tegangan tinggi. Hal ini disebabkan DSSC dan PSC memiliki karakteristik respon spektral yang berbeda dengan silikon, sehingga aplikasinya lebih sesuai diperuntukkan pada lingkungan *indoor* yang memiliki intensitas cahaya rendah dan didominasi oleh cahaya tampak. Aplikasi DSSC dan PSC umumnya digunakan pada perangkat elektronika berdaya rendah.

Dalam sektor industri, peluang komersialisasi sel surya generasi ketiga cenderung lebih terbuka luas karena tidak hanya menasar industri pada sektor energi, sebagaimana sel surya silikon. Tren yang ada adalah mengintegrasikan sel surya generasi ketiga dengan produk perangkat elektronika tertentu dalam satu paket, contohnya seperti pengisi daya yang menempel pada telepon seluler, buku elektronik, meja perkantoran, tas punggung, mini-antena, maupun sensor nirkabel. Selain itu, terdapat juga potensi aplikasi pada bidang arsitektur (BIPV) dan otomotif.

Indonesia yang merupakan negara kepulauan memerlukan infrastruktur jaringan *internet-of-things* (IoT) yang didukung oleh sumber energi independen, khususnya pada area-area terpencil. Dalam hal ini sel surya generasi ketiga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pada IoT *nodes* seperti WiFi, LoRa, Zigbee, dan lainnya yang kecenderungannya digunakan pada lokasi yang jauh dari sumber listrik serta pada kondisi cahaya dengan intensitas rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan sel surya generasi ketiga dapat turut andil dalam membantu mendorong konektivitas digital di Indonesia.

V. KESIMPULAN

Konversi energi matahari melalui sel surya merupakan salah satu bentuk produksi energi yang paling mudah dan sederhana karena ketersediaan sinar matahari yang tidak terbatas dan terjamin ketersediaannya dimana saja. Beberapa tantangan utama yang dihadapi oleh riset sel surya adalah dihasilkannya sel surya berefisiensi tinggi, namun dengan harga yang serendah mungkin. Kedua permasalahan tersebut dapat terjawab melalui penggunaan sel surya generasi ketiga berbasis material hibrida, berupa *dye-sensitized solar cell* (DSSC) dan *perovskite solar cell* (PSC). Dibandingkan sel surya generasi pertama maupun kedua, sel surya generasi ketiga tersebut memiliki proses fabrikasi yang lebih sederhana, membutuhkan material yang murah dan melimpah, serta mampu bekerja pada intensitas cahaya yang bervariasi.

Penelitian yang telah penulis lakukan dalam upaya peningkatan efisiensi DSSC dan PSC berfokus pada peningkatan performa yang dapat diperoleh melalui optimasi proses fabrikasi *device* maupun modifikasi terhadap material penyusun, seperti fotoanoda, *counter electrode*, lapisan pembawa elektron dan *hole*, serta lapisan *absorber*. Pada aspek material, pemilihan material yang murah, stabil dan ketersediaan mineralnya melimpah di

Indonesia menjadi fokus utama dalam pengembangan DSSC serta PSC. Dalam hal fabrikasi, metode yang digunakan pada penelitian ini telah dipilih dengan mempertimbangkan kemungkinan untuk adaptasi ke manufaktur skala industri. Melalui pemilihan proses fabrikasi serta material yang tepat, pada penelitian ini telah berhasil didemonstrasikan fabrikasi prototipe modul surya *dye-sensitized* berukuran besar untuk aplikasi *solar window*.

Upaya menuju komersialisasi sel surya generasi ketiga juga tak lepas dari aspek keterjangkauan harga. Pada penelitian ini telah dilakukan inovasi berupa sel surya DSSC dan PSC berstruktur monolitik yang dapat mengurangi biaya produksi melalui pengurangan penggunaan substrat konduktif. Selain unggul dari sisi harga, sel surya DSSC monolitik juga terbukti telah menghasilkan performa yang lebih stabil dibandingkan DSSC *sandwich*. Penelitian PSC menggunakan elektroda berbasis material karbon juga telah dilakukan sebagai salah satu upaya untuk menurunkan biaya produksi, memudahkan proses *upscaling*, sekaligus meningkatkan kestabilan performa sel surya dalam jangka panjang.

VI. PENUTUP

Belajar dari sejarah, turunnya harga panel surya silikon yang signifikan, dari US\$76/watt pada tahun 1977 menjadi US\$0,18/watt pada tahun 2020, dapat terjadi berkat berkembangnya teknologi fotovoltaik. Teknologi sel surya generasi ketiga berbasis material non-silikon dengan biaya material dan proses fabrikasi yang lebih terjangkau telah berkembang lebih cepat dan dinamis dibanding generasi pendahulunya. Hal ini diharapkan dapat menjadi pemicu perwujudan komersialisasi dan pemanfaatan sel surya generasi ketiga di masa depan pada sektor yang lebih luas.

Penulis berharap agar rangkaian kegiatan pengembangan sel surya di Indonesia dapat berlangsung secara berkesinambungan dan terintegrasi antara BRIN, akademisi, pemerintah, dan juga industri. Diperlukan adanya upaya dukungan terhadap pembentukan konsorsium riset sel surya yang komprehensif. Selain itu, diperlukan juga penciptaan kebijakan dari pemerintah yang ramah riset dan inovasi. Inisiatif pemerintah juga diperlukan untuk mendorong munculnya industri baru yang inovatif, karena salah satu kendala utama komersialisasi sel surya generasi ketiga di Indonesia adalah relatif kurang tersedianya pelaku industri.

Dukungan dan sinergitas yang masif serta terstruktur antara berbagai pihak diyakini dapat membantu mendorong hasil riset yang ada agar teknologi sel surya generasi ketiga lebih cepat tersampaikan kepada masyarakat. Pada akhirnya, riset dan inovasi sel surya generasi ketiga ini diharapkan dapat berkontribusi dalam mengakselerasi ketahanan dan kemandirian energi bangsa Indonesia, serta dapat menjadi pemacu menuju pencapaian target *net zero emission*.

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur alhamdulillah saya haturkan ke hadirat Allah SWT karena atas ijin dan ridhonya semata maka orasi profesor riset ini dapat terlaksana. Selanjutnya, perkenankan saya menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah banyak berkontribusi pada perjalanan karir saya.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Presiden Republik Indonesia, Ir. Joko Widodo; Kepala dan Wakil Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Prof. Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc. dan Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, ST., M. Sc., DESD., IPU., ASEAN.Eng.; Ketua Majelis Profesor Riset BRIN, Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani; Sekretaris Majelis Profesor Riset, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D; Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, M.A.; dan Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia BRIN, Ratih Retno Wulandari, M.Si. atas bantuan dan dukungannya dalam pelaksanaan orasi ilmiah ini. Saya juga menyampaikan terima kasih kepada Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah, Prof. Dr. Goib Wiranto, Prof. Dr. Ratno Nuryadi, M.Eng., dan Prof. Dr. Eng. Kuwat Triyana, M.Si., atas bantuan dan bimbingannya sehingga naskah orasi ini layak untuk diorasikan.

Terima kasih juga saya haturkan kepada Kepala Organisasi Riset Elektronika dan Informatika BRIN sekaligus Kepala Pusat Riset Elektronika dan Telekomunikasi LIPI 2020–2021, Dr. Eng. Budi Prawara; Kepala Pusat Riset Elektronika BRIN, Dr. Yusuf Nur Wijayanto; serta para Kepala Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi terdahulu: Dr. Purwoko Adhi dan Dr. Hiskia, atas dukungannya selama karir saya sebagai peneliti di BRIN dan LIPI. Terima kasih juga saya sampaikan kepada kolega riset: Lia Muliani, M.T., Erlyta Septa Rosa, M.T., Jojo Hidayat, S.T., Shobih, M.T., dan semua rekan-rekan di kelompok penelitian sel surya di LIPI dan BRIN.

Perjalanan karir saya juga tak lepas dari peran dan jasa guru-guru saya. Penghargaan dan apresiasi saya sampaikan kepada Prof. Dr. Nji Raden Poespawati pembimbing S-1 di Teknik Elektro UI; Prof. Klaus Weber pembimbing S-2 di ANU; serta Prof. Rachel Ann Caruso dari University of Melbourne dan Dr. Xingdong Wang dari CSIRO sebagai pembimbing S-3 sekaligus menjadi host saya selama menjadi *visiting researcher* selama *APEC fellowship* di CSIRO.

Penghormatan dan terima kasih yang tak terhingga saya haturkan kepada ibunda Hj. Nur Fadhilah dan ayahanda (alm.) Sam Roekajat atas doa dan dukungannya, juga kepada ibu dan bapak mertua (alm.) Sri Hartati dan (alm.) Soetjipto, serta saudara kembar saya Natalia Maulina Nursam, S.T. Terima kasih

yang tulus juga saya sampaikan untuk suami saya tercinta Dedi Cahyadi, S.Hut., M.Hum. dan kedua anak saya tersayang yang sangat saya banggakan – Muhammad Habibi Kasyf Al Mulk dan Amarasuli Maulana Al Mulk. Terima kasih atas kasih sayang, pengertian dan dukungan semangat yang senantiasa diberikan.

Terakhir, saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua teman-teman yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, dan kepada seluruh panitia penyelenggara acara orasi ilmiah ini, juga pada seluruh undangan yang telah meluangkan waktunya untuk hadir pada acara ini. Terima kasih dan mohon maaf jika ada hal-hal yang kurang berkenan dalam penyampaian orasi ilmiah ini. Akhir kata, semoga Allah SWT senantiasa melimpahi kita dengan amal dan ilmu yang bermanfaat. Aamiin.

Wabillahittaufiq wal hidayah.

Wassalamu 'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, P. N., Muliani, L., **Nursam, N. M.**, & Hidayat, J. (2018). Performance of 7-cells dye sensitized solar module in Z-type series interconnection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 299, 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/299/1/012088>
- Anggraini, P. N., **Nursam, N. M.**, Putra, R. A., Shobih, & Retnaningsih, L. (2019). Study on the effect of PVDF and TiO₂ composition on quasi-solid state DSSC. *Journal of Physics: Conference Series*, 1245, 012069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1245/1/012068>
- Anggraini, P. N., Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Sinaga, R. F., & Shobih. (2021). Modifications of liquid electrolyte for monolithic dye-sensitized solar cells. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 21(1), 35–40. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14203/jet.v21.35-40>
- Arif, F., **Nursam, N. M.**, Prastomo, N., & Shobih, S. (2019). The influence of carbon counter electrode composition on the performance of monolithic dye-sensitized solar cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 1191, 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1191/1/012021>
- Bosio, A., Pasini, S., & Romeo, N. (2020). The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules. *Coatings*, 10(4), 344. <https://doi.org/10.3390/coatings10040344>
- Deng, R., Zhuo, Y., & Shen, Y. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612>
- Dewan Energi Nasional. (2022). *Outlook Energi Indonesia 2022*. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional.

- Ehrler, B., Alarcón-Lladó, E., Tabernig, S. W., Veecken, T., Garnett, E. C., & Polman, A. (2020). Photovoltaics reaching for the Shockley–Queisser limit. *ACS Energy Letters*, *5*(9), 3029–3033. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.0c01790>
- Fagiolari, L. & Bella, F. (2019). Carbon-based materials for stable, cheaper and large-scale processable perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, *12*, 3437–3472. <https://doi.org/10.1039/C9EE02115A>
- Foo, S., Thambidurai, M., Senthil Kumar, P., Yuvakkumar, R., Huang, Y., & Dang, C. (2022). Recent review on electron transport layers in perovskite solar cells. *International Journal of Energy Research*, *46*(15), 21441–21451. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.7958>
- Green, M. A. (2023). Silicon solar cells step up. *Nature Energy*, *8*(8), 783–784. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01296-7>
- Hidayat, J., Muliani, L., **Nursam, N. M.**, Anggraini, P. N., Rosa, E. S., Retnaningsih, L., & Shobih. (2017). *Metode Pengisian Elektrolit Cair Pada Modul Surya Berbasis Pewarna* (Nomor Pendaftaran Paten P00201706642).
- Hidayat, J., Shobih, **Nursam, N. M.**, Rosa, E. S., Retnaningsih, L., Anggraini, P. N., & Muliani, L. (2018). *Metode Enkapsulasi Modul Surya Berbasis Pewarna dengan Struktur Monolitik Menggunakan Teknik Printing* (Nomor Pendaftaran Paten P00201805622).
- Hidayat, R., Nurunnizar, A. A., Fariz, A., Herman, Rosa, E. S., Shobih, Oizumi, T., Fujii, A., & Ozaki, M. (2020). Revealing the charge carrier kinetics in perovskite solar cells affected by mesoscopic structures and defect states from simple transient photovoltage measurements. *Scientific Reports*, *10*(1), 19197. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74603-x>
- Jaeger-Waldau, A. (2019). *PV Status Report 2019*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/326629>

- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society*, *131*(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P., & Qiu, Y. (2006). Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *90*(5), 549–573. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2005.04.039>
- Li, F., Peng, X., Wang, Z., Zhou, Y., Wu, Y., Jiang, M., & Xu, M. (2019). Machine Learning (ML)-Assisted Design and Fabrication for Solar Cells. *Energy & Environmental Materials*, *2*(4), 280–291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eem2.12049>
- Mubarak, Z., Nursam, N. M., Shobih, Hidayat, J., & Tahir, D. (2018). A comparison of the utilization of carbon nanopowder and activated carbon as counter electrode for monolithic dye-sensitized solar cells (DSSC). *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, *18*(1), 15–20. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14203/jet.v18.15-20>
- Muliani, L., Hidayat, J., Shobih, Nursam, N. M., Rosa, E. S., Anggraini, P. N., & Retnaningsih, L. (2021). Transparent dye-sensitized module for solar windows. *International Journal of Electrochemical Science*, *16*(3), 210329. <https://doi.org/10.20964/2021.03.61>
- Novianti, R. M., Nursam, N. M., Shobih, Hidayat, J., & Soepriyanto, S. (2023). The addition of C, Zn-C, and Sn-C on anatase titanium dioxide (TiO₂) for dye-sensitized solar cells application. *Metalurgi*, *38*(1), 1–8. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.55981/metalurgi.2023.686>
- Nursam, N. M., Anggraini, P. N., Shobih, S., & Hidayat, J. (2017). Low-cost monolithic dye-sensitized solar cells fabricated on single conductive substrate. *IEEE Proceedings of The 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 164–168. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253168>

- Nursam, N. M.,** Hidayat, J., Istiqomah, A., Anggraini, P. N., Shobih, Rosa, E. S., Retnaningsih, L., & Muliani, L. (2017). *Sel Surya Berbasis Pewarna dengan Struktur Monolitik berserta Proses Pembuatannya* (Nomor Pemberian Paten IDP000075315).
- Nursam, N. M.,** Hidayat, J., Muliani, L., Anggraeni, P. N., Retnaningsih, L., & Idayanti, N. (2017). From cell to module: Fabrication and long-term stability of dye-sensitized solar cells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 214, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/214/1/012007>
- Nursam, N. M.,** Hidayat, J., Pranoto, L. M., & Wijayanti, S. (2017). Electrical properties of dye-sensitized solar module with integrated parallel connections. *IEEE Proceedings of The 15th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, 133–136. <https://doi.org/10.1109/QIR.2017.8168468>
- Nursam, N. M.,** Hidayat, J., Shobih, Rosa, E. S., & Pranoto, L. M. (2018). A comparative study between titania and zirconia as material for scattering layer in dye-sensitized solar cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011, 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012003>
- Nursam, N. M.,** Hidayat, J., Shobih, Rosa, E. S., Retnaningsih, L., Anggraini, P. N., & Muliani, L. (2018). *Counter Electrode Berbasis Komposit Karbon untuk Sel Surya Monolitik Tersensitasi Pewarna* (Nomor Pemberian Paten IDP000090513).
- Nursam, N. M.,** Hidayat, J., Shobih, S., & Anggraini, P. N. (2020). Photovoltaic performance and upccaling of monolithic dye-sensitized solar module. *IEEE Proceedings of the 2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 276–280. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET51080.2020.9298663>
- Nursam, N. M.,** Istiqomah, A., Hidayat, J., Anggraini, P. N., & Shobih. (2017). Analysis of catalytic material effect on the

photovoltaic properties of monolithic dye-sensitized solar cells. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 17(2), 30–35. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14203/jet.v17.30-35>

- Nursam, N. M.,** Muliani, L., & Hidayat, J. (2011). Sel surya dye-sensitized TiO₂: Fabrikasi dan analisa material elektrolit. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 11(1), 72–77.
- Nursam, N. M.,** Ren, Y., & Weber, K. J. (2010). PECVD silicon nitride passivation on boron emitter: The analysis of electrostatic charge on the interface properties. *Advances in OptoElectronics*, 2010, 487406. <https://doi.org/10.1155/2010/487406>
- Nursam, N. M.,** Shobih, Hidayat, J., & Ilman, M. A. (2018). Correlating the photoelectrode thickness with the performance and stability of dye-sensitized solar cells. *IEEE Proceedings of the 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar, EECCIS 2018*, 114–118. <https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692868>
- Nursam, N. M.,** Shobih, Hidayat, J., Rosa, E. S., Muliani, L., Anggraini, P. N., Retnaningsih, L., Aminudin, A. W., & Djuhara, D. (2020). *Lapisan Anti-Refleksi Berbahan SiO₂ untuk Sel Surya Berbasis Pewarna Tersensitasi dan Pembuatannya* (Nomor Pendaftaran Paten P00202008338).
- Nursam, N. M.,** Shobih, S., Pandanga, P., & Wang, X. (2020). Titanium dioxide nanorods as an effective blocking layer in solar cells. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(5), 1992–1997. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.5.11142>
- Nursam, N. M.,** Wang, X., & Caruso, R. A. (2015). Macro-/mesoporous titania thin films: Analysing the effect of pore architecture on photocatalytic activity using high-throughput screening. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(48), 24557–24567. <https://doi.org/10.1039/c5ta08959j>

- Nursam, N. M.,** Wang, X., Tan, J. Z. Y., & Caruso, R. A. (2016). Probing the effects of templating on the UV and visible light photocatalytic activity of porous nitrogen-modified titania monoliths for dye removal. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(27), 17194–17204. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b03158>
- Nursam, N. M.,** Weber, K. J., Jin, H., Ren, Y., & Smith, P. (2010). Investigation of interface properties in oxide passivated boron diffused silicon. *Current Applied Physics*, 10, S361–S364. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.02.053>
- Nursam, N. M.,** Weber, K. J., & Ren, Y. (2010). Characterization of boron surface doping effects on PECVD silicon nitride passivation. *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 3214–3219. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5616740>
- Nursam, N. M.,** Widiyanto, E., & Firdaus, Y. (2021). Numerical simulations of MAPbI₃-based perovskite solar cells with carbon backcontact and various hole transport materials. *IEEE Proceedings of the 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 80–83. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET53537.2021.9650480>
- Nurunnizar, A. A., Yandri, V. R., Himat, A. M., Bahar, H., **Nursam, N. M.,** Fujii, A., Ozaki, M., & Hidayat, R. (2023). The role of organofluorine based passivation molecules on the characteristics and stability of perovskite solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* (under review).
- 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. <https://doi.org/10.1038/353737a0>
- Oktaviani, E., & **Nursam, N. M.** (2019). Pengaruh material counter electrode pada dye-sensitized solar cell. *Metalurgi*, 34(3), 109–130. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14203/metalurgi.v34i3.489>

- Oktaviani, E., **Nursam, N. M.**, Prastomo, N., & Shobih. (2020). Effect of counter electrode materials on the performance of dye-sensitized solar cell. *AIP Conference Proceedings*, 2232, 050001. <https://doi.org/10.1063/5.0001601>
- Oktaviani, E., **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., Pranoto, L. M., Rosa, E. S., Prastomo, N., & Timuda, G. E. (2021). Electrical and electrochemical properties of sandwich- and monolithic-structured dye-sensitized solar cells with various counter electrode materials. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(9), 210922. <https://doi.org/10.20964/2021.09.16>
- Pandanga, J. J., **Nursam, N. M.**, Shobih, S., & Prastomo, N. (2019). Synthesis and application of TiO₂ nanorods as photo-anode in dye-sensitized solar cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 1191, 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1191/1/012023>
- Park, J., Kim, J., Yun, H.-S., Paik, M. J., Noh, E., Mun, H. J., Kim, M. G., Shin, T. J., & Seok, S. Il. (2023). Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides. *Nature*, 616(7958), 724–730. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05825-y>
- Poespawati, N. R., & **Nursam, N. M.** (2006). Optimization and analysis of Al_{0.85}Ga_{0.15}As/GaAs heteroface homojunction thin-film solar cell. *Jurnal Teknologi FTUI*, 2, 51–55.
- Pranoto, L. M., Hidayat, J., **Nursam, N. M.**, Shobih, & Rosa, E. S. (2021). Fabrication and electrical performance of monolithic dye-sensitized solar module with low-temperature carbon-based counter electrode. *IEEE Proceedings of the 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 55–59. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET53537.2021.9650345>
- Rajagopal, K. Y. & Jen, A. K. Y. (2018). Toward perovskite solar cell commercialization: A perspective and research roadmap based on interfacial engineering. *Advanced Materials*, 30(32), 1800455. <https://doi.org/10.1002/adma.201800455>

- Ren, Y., Zhang, D., Suo, J., Cao, Y., Eickemeyer, F. T., Vlachopoulos, N., Zakeeruddin, S. M., Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2023). Hydroxamic acid pre-adsorption raises the efficiency of cosensitized solar cells. *Nature*, *613*(7942), 60–65. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05460-z>
- Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., Muliani, L., Anggraini, P. N., Retnaningsih, L., Aminudin, A. W., & Djuhara, D. (2021). *Pasta Konduktif Berbasis Karbon Nanotube Temperatur Rendah* (Nomor Pemberian Paten IDP000092253).
- Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Shobih, S., & Abdillah, R. (2018). Improving the efficiency of perovskite solar cell through the addition of compact layer under TiO₂ electron transfer material. In *Materials Science Forum: Vol. 929 MSF*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.929.218>
- Rosa, E. S., Septina, W., Shobih, Megananda, P. C., Hardian, A., & **Nursam, N. M.** (2024). Improved efficiency and stability of dye-sensitized solar cells by using iodide-based electrolyte with high viscosity solvent. *Materials Letters*, *358*, 135847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135847>
- Saeed, M. A., Yoo, K., Kang, H. C., Shim, J. W., & Lee, J.-J. (2021). Recent developments in dye-sensitized photovoltaic cells under ambient illumination. *Dyes and Pigments*, *194*, 109626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109626>
- Shen, W., Dong, Y., Huang, F., Cheng, Y.-B., & Zhong, J. (2021). Interface passivation engineering for hybrid perovskite solar cells. *Materials Reports: Energy*, *1*(4), 100060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matre.2021.100060>
- Shobih, Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Hidayat, J., Anggraini, P. N., Muliani, L., & Retnaningsih, L. (2019). *Interlayer Counter Electrode Karbon untuk Sel Surya Berbasis Pewarna Tersensitasi dengan Konfigurasi Monolitik dan Proses Pembuatannya* (Nomor Pendaftaran Paten P00201910606).

- Sova, R. R., Budiawan, W., Shobih, Yuliantini, L., Almuqoddas, E., Rijal, M. S., Milana, P., Suendo, V., Yulianto, B., & **Nursam, N. M.** (2024). Defect passivation of organometal halide perovskite solar cells using low-cost green crystalline nanocellulose. *Materials Letters*, (under review).
- Sova, R. R., Shobih, Budiawan, W., Pranoto, L. M., Almuqoddas, E., Yulianto, B., & **Nursam, N. M.** (2022). Free-standing carbon electrode modified by polyvinyl alcohol for efficient HTM-free perovskite solar cells. *IEEE Proceedings of the 2022 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 234–238. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET56917.2022.9991203>
- Sova, R. R., Shobih, Budiawan, W., Septina, W., Yuliantini, L., Firdaus, Y., Almuqoddas, E., Yulianto, B., & **Nursam, N. M.** (2024). Enhanced performance of HTM-free perovskite solar cells with free-standing carbon electrode via surface treatment and conductive support. *Synthetic Metals*, 306, 117646. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2024.117646>
- Syed, T. H., & Wei, W. (2022). Technoeconomic analysis of dye sensitized solar cells (DSSCs) with WS₂/carbon composite as counter electrode material. *Inorganics*, 10(11), 191. <https://doi.org/10.3390/inorganics10110191>
- Wang, A., He, M., Green, M. A., Sun, K., & Hao, X. (2023). A critical review on the progress of kesterite solar cells: Current strategies and insights. *Advanced Energy Materials*, 13(2), 2203046. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203046>
- Widianto, E., Driyo, C., Sudarsono, S., Shobih, S., **Nursam, N. M.**, Hanna, M. Y., Absor, M. A. U., Triyana, K., & Santoso, I. (2024). Unraveling the performance of all-inorganic lead-free CsSnI₃-based perovskite photovoltaic with graphene oxide hole transport layer. *Advanced Theory and Simulations*, 7(3), 2300610. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adts.202300610>

- Widianto, E., Shobih, **Nursam, N. M.**, Hanna, M. Y., Triyana, K., Rusydi, A., & Santoso, I. (2023). Electronic correlations enhance optical absorption in graphene oxide-modified methylammonium lead iodide perovskite. *Journal of Alloys and Compounds*, 947, 169634. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169634>
- Widianto, E., Shobih, Rosa, E. S., Triyana, K., **Nursam, N. M.**, & Santoso, I. (2021a). Graphene oxide as an effective hole transport material for low-cost carbon-based mesoscopic perovskite solar cells. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 12(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/ac204a>
- Widianto, E., Shobih, Rosa, E. S., Triyana, K., **Nursam, N. M.**, & Santoso, I. (2021b). Performance analysis of carbon-based perovskite solar cells by graphene oxide as hole transport layer: Experimental and numerical simulation. *Optical Materials*, 121, 100–200. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111584>
- Widianto, E., Subama, E., **Nursam, N. M.**, Triyana, K., & Santoso, I. (2022). Design and simulation of perovskite solar cell using graphene oxide as hole transport material. *AIP Conference Proceedings*, 2391, 090011. <https://doi.org/10.1063/5.0073007>
- Wijayanti, S. (2020). *Analisis Parameter Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dengan Photoanode TiO₂, Hasil Proses Fusi Kaustik Konsentrat Ilmenit* (Thesis S2). Institut Teknologi Bandung.
- Wijayanti, S., **Nursam, N. M.**, Soepriyanto, S., & Suhendar, D. (2022). Fabrication of DSSC photoanode based on TiO₂ produced by caustic fusion of local ilmenite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1031, 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1031/1/012030>
- Yandri, V. R., Nurunnizar, A. A., Debora, R., Wulandari, P., **Nursam, N. M.**, Hidayat, R., Indari, E. D., & Yamashita, Y. (2023). Crystal structures and photoluminescence characteristics of cesium lead bromide perovskite nanoplatelets depending on the

antisolvent and ligand used in their syntheses. *Heliyon*, e23276. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23276>

- Yuliantini, L., **Nursam, N. M.**, Pranoto, L. M., Shobih, Hidayat, J., Sova, R. R., Isnaeni, Rahayu, E. S., Djamal, M., Yasaka, P., Boonin, K., & Kaewkhao, J. (2023). Photon up-conversion in Er³⁺ ion-doped ZnO-Al₂O₃-BaO-B₂O₃ glass for enhancing the performance of dye-sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 954, 170163. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170163>
- Yuliantini, L., Paramudita, I., Pranoto, L. M., Shobih, S., Hidayat, J., & **Nursam, N. M.** (2022). Application of down-conversion materials based on trivalent europium ion-doped fluoroborotellurite glass for transparent dye-sensitized solar cell. *IEEE Proceedings of the 2022 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 114–118. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET56917.2022.9991239>
- Yustiani, E. B., Shobih, Widiyanto, E., Anggraini, P. N., Soepriyanto, S., Santoso, I., & **Nursam, N. M.** (2023). Colloidal TiO₂-modified mesoporous electron transport layer in perovskite solar cells. *Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi*, 23(2), 115–121.

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Jurnal Internasional

1. Sova, R. R., Shobih, Budiawan, W., Septina, W., Yuliantini, L., Firdaus, Y., Almuqoddas, E., Yuliarto, B., & **Nursam, N. M.** (2024). Enhanced performance of HTM-free perovskite solar cells with free-standing carbon electrode via surface treatment and conductive support. *Synthetic Metals*, 306, 117646.
2. Yuliantini, L., **Nursam, N. M.**, Firdaus, Y., Pranoto, L. M., Shobih, Hidayat, J., Djamal, M., Sova, R. R., Almuqoddas, E., Yasaka, P., Boonin, K., Khotan, S., & Kaewkhao, J. (2024). Optical properties of $\text{Eu}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$ ion co-doped $\text{TeO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ glass and its potential for solar energy harvesting. *Optical Materials*, 149, 115070.
3. Widiyanto, E., Driyo, C., Sudarsono, S., Shobih, S., **Nursam, N. M.**, Hanna, M. Y., Absor, M. A. U., Triyana, K., & Santoso, I. (2024). Unraveling the performance of all-inorganic lead-free CsSnI_3 -based perovskite photovoltaic with graphene oxide hole transport layer. *Advanced Theory and Simulations*, 7(3), 2300610.
4. Yandri, V. R., Nurunnizar, A. A., Debora, R., Wulandari, P., **Nursam, N. M.**, Hidayat, R., Indari, E. D., & Yamashita, Y. (2024). Crystal structures and photoluminescence characteristics of cesium lead bromide perovskite nanoplatelets depending on the antisolvent and ligand used in their syntheses. *Heliyon*, 10(1), e23276.
5. Septina, W., Gunawan, Shobih, Monov, X. I., & **Nursam, N. M.** (2024). Improved performance of protected CuO photocathodes

evaluated by photoelectrochemical characterizations using hydrogen peroxide. *Materials Letters*, 357, 135735.

6. Rosa E. S., Septina, W., Shobih, Megananda, P. C., Hardian, A., & **Nursam, N. M.** (2024). Improved efficiency and stability of dye-sensitized solar cells by using iodide-based electrolyte with high viscosity solvent. *Materials Letters*, 358, 135847.
7. Yuliantini, L., **Nursam, N. M.**, Pranoto, L. M., Shobih, Hidayat, J., Sova, R. R., Isnaeni, Rahayu, E. S., Djamal, M., Yasaka, P., Boonin, K., & Kaewkhao, J. (2023). Photon up-conversion in Er³⁺ ion-doped ZnO-Al₂O₃-BaO-B₂O₃ glass for enhancing the performance of dye-sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 954, 170163.
8. Septina, W., Gunawan, Shobih, **Nursam, N. M.**, Lopes, J. P., & Gaillard, N. (2023). Photoelectrochemical and photovoltaic performance of as-deposited ink-based CuInS₂ heterojunction thin film. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 940, 117484.
9. Widiyanto, E., Shobih, **Nursam, N. M.**, Hanna, M. Y., Triyana, K., Rusydi, A., & Santoso, I. (2023). Electronic correlations enhance optical absorption in graphene oxide-modified methylammonium lead iodide perovskite. *Journal of Alloys and Compounds*, 947, 169634.
10. Widiyanto, E., Firdaus, Y., Shobih, Pranoto, L. M., Triyana, K., Santoso, I., & **Nursam, N. M.** (2022). Device modeling of two-dimensional hole transport materials for boosting the performance of non-fulleren acceptor bulk heterojunction organic solar cells. *Optical Materials*, 132, 112771.
11. Almuqoddas, E., Neophytou, M., Widiyanto, E., **Nursam, N. M.**, Shobih, Pranoto, L. M., & Firdaus, Y. Semi-transparent fullerene-based tandem solar cells with excellent light utilization efficiency enabled by careful selection of sub-cells. *Organic Electronics*, 109, 106633.

12. Widiyanto, E., Shobih, Rosa, E. S., Triyana, K., **Nursam, N. M.**, & Santoso, I. (2021). Graphene oxide as an effective hole transport material for low-cost carbon-based mesoscopic perovskite solar cells. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 12(3), 035001.
13. Widiyanto, E., Shobih, Rosa, E. S., Triyana, K., **Nursam, N. M.**, & Santoso, I. (2021). Performance analysis of carbon-based perovskite solar cells by graphene oxide as hole transport layer: Experimental and numerical simulation. *Optical Materials*, 121, 111584.
14. Muliani, L., Hidayat, J., Shobih, **Nursam, N. M.**, Rosa, E. S., Anggraini, P. N., & Retnaningsih, L. (2021). Transparent dye-sensitized module for solar windows. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(3), 210329.
15. Oktaviani, E., **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., Pranoto, L. M., Rosa, E. S., Prastomo, N., & Timuda, G. E. (2021). Electrical and electrochemical properties of sandwich and monolithic dye-sensitized solar cells with various counter electrode materials. *International Journal of Electrochemical Science*, 16. 210922.
16. **Nursam, N. M.**, Shobih, Pandanga, J., & Wang, X. (2020). Titanium dioxide nanorods as an effective blocking layer in solar cells. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 73(10), 1992–1997.
17. Tan, J. Z. Y., **Nursam, N. M.**, Xia, F., Wang, X., & Caruso, R. A. (2020). Low temperature synthesis of TiO₂ nanoparticles with tuneable phase composition and their photocatalytic activity. *Australian Journal of Chemistry*, 73, 1020–1026 .
18. **Nursam N. M.**, & Tan, J. Z. Y. (2018). Synthesis and modification of macroporous titania using silver nanoparticles. *The Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 7(3), 257–265.

19. Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Shobih, & Abdillah, R. (2018). Improving the efficiency of perovskite solar cell through the addition of compact layer under TiO₂ electron transfer material. *Materials Science Forum*, 929, 218–224.
20. Tan, J. Z. Y., **Nursam, N. M.**, Xia, F., Sani, M., Li, W., Wang, X., & Caruso, R. A. (2017). High performance coral reef-like carbon nitrides: Synthesis and application in photocatalysis and heavy metal ion adsorption. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(5), 4540–4570.
21. Tan, J. Z. Y., **Nursam, N. M.**, Xia, F., Truong, Y. B., Kyratzis, I. L., Wang, X., & Caruso, R. A. (2017). Electrospun PVDF–TiO₂ with tuneable TiO₂ crystal phases: Synthesis and application in photocatalytic redox reactions. *Journal of Materials Chemistry: A*, 5(2), 641–648, 2017.
22. **Nursam, N. M.**, Tan, J. Z. Y., Wang, X., Li, W., Xia, F., & Caruso, R. A. (2016). Mesoporous nitrogen-modified titania with enhanced dye adsorption capacity and visible light photocatalytic activity. *ChemistrySelect*, 1(15), 4868–4878.
23. Li, W., Chen, D., Xia, F., Tan, J. Z. Y., Huang, P., Song, W. G., **Nursam, N. M.**, & Caruso, R. A. (2016). Extremely high arsenic removal capacity for mesoporous aluminium magnesium oxide composites. *Environmental Science: Nano*, 3, 94–106.
24. **Nursam, N. M.**, Wang, X., Tan, J. Z. Y., & Caruso, R.A. (2016). Probing the effects of templating on the UV and visible light photocatalytic activity of porous nitrogen-modified titania monoliths for dye removal. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(27), 17194–17204.
25. **Nursam, N. M.**, Wang, X., & Caruso, R.A. (2015). Macro-/mesoporous titania thin films: Analysing the effect of pore architecture on photocatalytic activity using high-throughput

- screening. *Journal of Materials Chemistry: A*, 3(48), 24557–24567.
26. **Nursam, N. M., Wang, X., & Caruso, R. A.** (2015). High-throughput synthesis and screening of titania-based photocatalysts. *ACS Combinatorial Science*, 17(10), 548–569.
 27. **Nursam, N. M., & Muliani, L.** (2012). Investigation of photoelectrode materials influences in titania-based dye-sensitized solar cells. *International Journal of Technology*, 3, 129–139.
 28. Ren, Y., Weber, K. J. & **Nursam, N. M.** (2011). Modelling the charge decay mechanism in nitrogen-rich silicon nitride films. *Applied Physics Letters*, 98(12), 122909.
 29. **Nursam, N. M., Ren, Y., & Weber, K. J.** (2010). PECVD silicon nitride passivation on boron emitter: The analysis of electrostatic charge on the interface properties. *Advances in Optoelectronics*, 2010, 487406.
 30. **Nursam, N. M., Weber, K. J., Jin, H., Ren, Y., & Smith, P.** (2010). Investigation of interface properties in oxide passivated boron diffused silicon. *Current Applied Physics*, 10, S361–S364.
 31. Ren, Y., Weber, K. J., **Nursam, N. M., & Wang, D.** (2010). Effect of deposition conditions and thermal annealing on the charge trapping properties of SiN_x films. *Applied Physics Letters*, 97(20), 202907.

Jurnal Nasional

32. Yustiani, E. B., Anggraini, P. N., Shobih, Widiyanto, E., Retnaningsih, L., Soepriyanto, S., Santoso, I., & **Nursam, N. M.** (2023). Colloidal TiO₂-modified mesoporous electron transport layer in perovskite solar cells. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 23(2), 115–121.

33. Novianti, R. M., **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., & Soepriyanto, S. (2023). The addition of C, Zn-C, and Sn-C on anatase titanium dioxide (TiO₂) for dye-sensitized solar cells application. *Metalogi*, 38(1), 1–8.
34. Anggraini, P. N., Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Sinaga, R. F., & Shobih. (2021). Modifications of liquid electrolyte for monolithic dye-sensitized solar cells. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 21(1), 35–40.
35. Oktaviani, E., & **Nursam, N. M.** (2019). Pengaruh material counter electrode pada dye-sensitized solar cell. *Metalogi*, 34(3), 109–130.
36. Mubarak, Z., **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., & Tahir, D. (2018). A comparison of the utilization of carbon nanopowder and activated carbon as counter electrode for monolithic dye-sensitized solar cells (DSSC). *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 18(1), 15–20.
37. **Nursam, N. M.**, Istiqomah, A., Hidayat, J., Anggraini, P.N., & Shobih. (2017). Analysis of catalytic material effect on the photovoltaic properties of monolithic dye-sensitized solar cells. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 17(2), 30–35.
38. **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Hidayat, J. (2013). Application of large area TiO₂ photoelectrode on dye-sensitized solar cells. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 13(1), 1–5.
39. **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Hidayat, J. (2012). Application of Pt counter-electrode being deposited on TCO-free substrates for dye-sensitized solar cells. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 12(1), 7–12.
40. **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Hidayat, J. (2011). Sel surya dye-sensitized TiO₂: Fabrikasi dan analisa material elektrolit. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 11(1), 72–77.

41. **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Hidayat, J. (2011). Analisa pengaruh ukuran fotoaktif TiO_2 dan enkapsulasi pada sel surya jenis dye-sensitized untuk konversi energi matahari. *Jurnal Teknologi Indonesia*, 34(2), 85–92.
42. Hidayat, J., Muliani, L., & **Nursam, N. M.** (2011). Studi perakitan dan pengujian karakteristik I-V sel surya berbasis dye-sensitized (DSSC) dalam rangkaian seri yang terhubung secara eksternal. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 11(2), 155–160.
43. Poespawati, N. R. & **Nursam, N. M.** (2006). Optimization and analysis of $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}/\text{GaAs}$ heteroface homojunction thin-film solar cell. *Jurnal Teknologi FTUI*, 2, 51–55.

Prosiding Internasional

44. Febrian, R., Septiani, N. L. W., Iqbal, M., Sobih, **Nursam, N. M.**, Muliani, L. (2024). CV performance of ZnO-carbon nanocomposite based on ZIF-8 as lithium-ion battery anode. *Journal of Physics: Conference Series*, 2705, 012013.
45. Yandri, V. R., Debora, R., Nurunnizar, A. A., Wulandari, P., **Nursam, N. M.**, Hidayat, R., & Yamashita, Y. (2024). Photoluminescence and photovoltaic properties of cesium lead bromide nanocrystals with linoleic acid ligand. *Journal of Physics: Conference Series*, 2696, 012006.
46. Milana, P., Septiyana, M., Noviany, D., Nurhayati, N., **Nursam, N. M.**, Ciptati, & Suendo, V. (2023). Preparation of symmetric and asymmetric porphyrin as a passivating agent for perovskite solar cells. *IEEE Proceedings of the 2023 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 273–278.
47. Almuqoddas, E., Yuliantini, L., Nugraha, M. I., Budiawan, W., Sova, R. R., Yulianto, B., Shobih, **Nursam, N. M.**, & Firdaus, Y. (2023). Enhancing inverted perovskite solar cell efficiency with

- vanadium oxide-modified PEDOT:PSS hole transport layer. *IEEE Proceedings of the 2023 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 264–268.
48. Yuliantini, L., Paramudita, I., Pranoto, L. M., Shobih, Hidayat, J., Rosa, E. S., Sova, R. R., Almuqoddas, E., Firdaus, Y., & **Nursam, N. M.** (2023). Visible light trapping in dye-sensitized solar cell with vanadium-doped ZnO as back reflector layer. *IEEE Proceedings of the 2023 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 216–220.
 49. Sova, R. R., Shobih, Budiawan, W., Pranoto, L. M., Almuqoddas, E., Yuliarto, B., & **Nursam, N. M.** (2022). Free-standing carbon electrode modified by polyvinyl alcohol for efficient HTM-free perovskite solar cells. *IEEE Proceedings of the 2022 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 234–238.
 50. Yuliantini, L., Paramudita, I., Pranoto, L. M., Shobih, S., Hidayat, J., & **Nursam, N. M.** (2022). Application of down-conversion materials based on trivalent europium ion-doped fluoroborotellurite glass for transparent dye-sensitized solar cell. *IEEE Proceedings of the 2022 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 114–118.
 51. Wijayanti, S., **Nursam, N. M.**, Soepriyanto, S., & Suhendar, D. (2022). Fabrication of DSSC photoanode based on TiO_2 produced by caustic fusion of local ilmenite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1031, 012030.
 52. Widiyanto, E., Subama, E., **Nursam, N. M.**, Triyana, K., & Santoso, I. (2022). Design and simulation of perovskite solar cell

using graphene oxide as hole transport material. *AIP Conference Proceedings*, 2391, 090011.

53. **Nursam, N. M.**, Widiyanto, E., & Firdaus, Y. (2021). Numerical simulations of MAPbI₃-based perovskite solar cells with carbon back contact and various hole transport materials. *IEEE Proceedings of the 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 80–83.
54. Lia, M. P., Hidayat, J., **Nursam, N. M.**, Shobih, & Rosa, E. S. (2021). Fabrication and electrical performance of monolithic dye-sensitized solar module with low-temperature carbon-based counter electrode. *IEEE Proceedings of the 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 55–59.
55. Firdaus, Y., **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Shobih. (2021). Efficient organic photovoltaics enabled by aqueous ammonia-based doped copper thiocyanate hole transport layer. *IEEE Proceedings of the 2021 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 215–218.
56. **Nursam, N. M.**, Hidayat, J., Shobih, S., & Anggraini, P. N. (2020). Photovoltaic performance and upscaling of monolithic dye-sensitized solar module. *IEEE Proceedings of the 2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 276–280.
57. Anggraini, P. N., **Nursam, N. M.**, Zulhayyir, Shobih, & Hidayat, J. (2020). The effect of screen printed blocking layer on the performance of monolithic DSSC. *AIP Conference Proceedings*, 2256, 060003.

58. Oktaviani, E., **Nursam, N. M.**, Prastomo, N., & Shobih. (2020). Effect of counter electrode materials on the performance of dye-sensitized solar cell. *AIP Conference Proceedings*, 2232, 050001.
59. **Nursam, N. M.**, Shobih, Rosa, E. S., Hidayat, J., & Mubarak, Z. (2019). Influence of inorganic binder composition on the structure-property relationship of monolithic dye-sensitized solar cells with carbon-based counter electrode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 622, 012033.
60. Anggraini, P. N., **Nursam, N. M.**, Putra, R. A., Shobih, & Retnaningsih, L. (2019). Study on the effect of PVDF and TiO₂ composition on quasi-solid state DSSC. *Journal of Physics: Conference Series*, 1245, 012069.
61. Arif, F., **Nursam, N. M.**, Prastomo, N., & Shobih, S. (2019). The influence of carbon counter electrode composition on the performance of monolithic dye-sensitized solar cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 1191, 012021.
62. Pandanga, J. J., **Nursam, N. M.**, Shobih, S., & Prastomo, N. (2019). Synthesis and application of TiO₂ nanorods as photoanode in dye-sensitized solar cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 1191, 012023.
63. **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., & Ilman, M. A. (2018). Correlating the photoelectrode thickness with the performance and stability of dye-sensitized solar cells. *IEEE Proceedings of the 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar, EECCIS 2018*, 114–118.
64. Agaphela, D., Gunther, M., Kusumocahyo, S., & **Nursam, N. M.** (2018). How to make dye-sensitized solar cells cheaper – Monolithic cells with carbon electrode. *Proceedings of The International Conference on Innovation, Entrepreneurship and Technology (ICONIET 2018)*, 25–29.

65. Anggraini, P. N., Muliani, L., **Nursam, N. M.**, & Hidayat, J. (2018). Performance of 7-cells dye sensitized solar module in Z-type series interconnection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 299, 012088.
66. Nathania, A., **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., & Prastomo, N. (2018). Enhancing the efficiency of dye-sensitized solar cells by hydrothermal post-treatment in acidic environment. *Journal of Physics: Conference Series*, 985, 0012055.
67. **Nursam, N. M.**, Anggraini, P. N., Shobih, & Hidayat, J. (2017). Low-cost monolithic dye-sensitized solar cells fabricated on single conductive substrate. *IEEE Proceedings of The 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 164–168.
68. **Nursam, N. M.**, Hidayat, J., Shobih, Rosa, E. S., & Pranoto, L. M. (2018). A comparative study between titania and zirconia as material for scattering layer in dye-sensitized solar cells. *Journal of Physics: Conference Series 1011* (012003).
69. **Nursam, N. M.**, Hidayat, J., Pranoto, L. M., & Wijayanti, S. (2017). Electrical properties of dye-sensitized solar module with integrated parallel connections. *IEEE Proceedings of the 15th International Conference on Quality in Research (QiR) : International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, 133–136.
70. **Nursam, N. M.**, Hidayat, J. Muliani, L. M., Anggraini, P. N., Retnaningsih, L., & Idayanti, N. (2017). From cell to module: Fabrication and long term stability of dye-sensitized solar cells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 214, 012007.
71. Rosa, E. S., Shobih, **Nursam, N. M.**, & Saputri, D. G. (2016). Perovskite/polymer solar cells prepared using solution process. *Journal of Physics: Conference Series*, 776, 012010.

72. **Nursam, N. M.**, Weber, K. J., & Ren, Y. (2010). Characterization of boron surface doping effects on PECVD silicon nitride passivation. *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 3214–3219.
73. Ren, Y., **Nursam, N. M.**, Wang, D., & Weber, K. J. (2010). Charge stability in LPCVD silicon nitride for surface passivation of silicon solar cells. *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 897–901.
74. Ren, Y., **Nursam, N. M.**, Wang, D., & Weber, K. J. (2010). Charge in PECVD silicon nitride for surface passivation of silicon solar cells. *Proceedings of The 48th Annual Conference of the Australian Solar Energy Society (AuSES)*.
75. Ren, Y., Weber, K. J., **Nursam, N. M.**, & Wang, D. (2010). Charge storage stability in silicon nitride for surface passivation. *Proceedings of The 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*.
76. Weber, K. J., Jin, H., Zhang, C., **Nursam, N. M.**, Jellet, W. E., & Macintosh, K. R. (2009). Surface passivation using dielectric films: How much charge is enough?. *Proceedings of The 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*.
77. **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Hidayat, J. (2012), On analyzing the scaling up effect of TiO_2 -photoelectrode in dye-sensitized solar cells. *Proceeding of the 13th Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*.
78. **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Hidayat, J. (2012). An internally connected dye solar module with Z-type connection. *Proceedings of the 6th National Radar Seminar and International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications*.

79. Muliani, L., & **Nursam, N. M.** (2011). Dye-sensitized solar cells based on carbon nanoparticle counter electrode. *Proceedings of The 5th IMEN-LIPI Joint Seminar*.
80. **Nursam N. M.** (2007). Design of $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ heteroface homojunction thin film solar cells for space PV application. *Proceedings of Industrial Electronics Seminar, Politeknik ITS*.

Prosiding Nasional

81. Zulhayyir, **Nursam, N. M.**, Anggraini, P. N., Arifin. (2019). Penambahan lapisan blocking layer menggunakan TiO_2 partikel pada dye sensitized solar cell tipe monolitik. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF) 2019 Universitas Hasanuddin*.
82. Wakiah, A., **Nursam, N. M.**, Armynah, B., Shobih. (2019). Pengaruh komposisi pasta karbon counter electrode terhadap performa dye sensitized solar cells (DSSC) tipe monolithic. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF) 2019 Universitas Hasanuddin*.
83. Muliani, L., **Nursam, N. M.**, & Hidayat, J. (2012). Fabrikasi modul surya berbasis dye-sensitized. *Prosiding Seminar Ilmu Pengetahuan Teknik*.
84. Muliani, L., **Nursam, N. M.**, & Hidayat, J. (2012). F Pembuatan lapisan tipis platina diatas substrat fleksibel (plastik) untuk aplikasi counter electrode. *Prosiding Seminar XV Kimia dalam Pembangunan*.
85. **Nursam, N. M.**, Muliani, L., & Hidayat, J. (2011). Optimalisasi dimensi area aktif pada sel surya jenis dye-sensitized berbasis nanokristal- TiO_2 . *Prosiding Seminar XIV Kimia dalam Pembangunan*.

Hak Kekayaan Intelektual

86. Muliani, L. M., Anggraini, P. N., Hidayat, J., Shobih, **Nursam, N. M.**, Rosa, E. S., Retnaningsih, L., & Aminudin, A. W. (2022). *Elektroda Lawan dengan Karbon Nanotube sebagai Aditif pada Sel Surya Monolitik Tersensitasi Pewarna dan Proses Pembuatannya* (Nomor Pendaftaran Paten P00202215128).
87. Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., Muliani, L., Anggraini, P. N., Retnaningsih, L., Aminudin, A. W., & Djuhara, D. (2021). *Pasta Konduktif Berbasis Karbon Nanotube Temperatur Rendah* (Nomor Pemberian Paten IDP000092253).
88. **Nursam, N. M.**, Shobih, Hidayat, J., Rosa, E. S., Muliani, L., Anggraini, P. N., Retnaningsih, L., Aminudin, A. W., & Djuhara, D. (2020). *Lapisan Anti-Refleksi Berbahan SiO_2 untuk Sel Surya Berbasis Pewarna Tersensitasi dan Pembuatannya* (Nomor Pendaftaran Paten P00202008338).
89. **Nursam, N. M.**, Shobih, Rosa, E. S., Hidayat, J., Anggraini, P. N., Muliani, L., & Retnaningsih, L. (2019). *Fotoanoda Berlapis TiO_2 Nanorods dan TiO_2 Mesopori Beserta Metode Pembuatannya* (Nomor Pendaftaran Paten P00201910454).
90. Shobih, Rosa, E. S., **Nursam, N. M.**, Hidayat, J., Anggraini, P. N., Muliani, L., & Retnaningsih, L. (2019). *Interlayer Counter Electrode Karbon untuk Sel Surya Berbasis Pewarna Tersensitasi dengan Konfigurasi Monolitik dan Proses Pembuatannya* (Nomor Pendaftaran Paten P00201910606).
91. **Nursam, N. M.**, Hidayat, J., Shobih, Rosa, E. S., Retnaningsih, L., Anggraini, P. N., & Muliani, L. (2018). *Counter Electrode Berbasis Komposit Karbon untuk Sel Surya Monolitik Tersensitasi Pewarna* (Nomor Pemberian Paten IDP000090513).
92. Hidayat, J., Shobih, **Nursam, N. M.**, Rosa, E. S., Retnaningsih, L., Anggraini, P. N., & Muliani, L. (2018). *Metode Enkapsulasi Modul Surya Berbasis Pewarna dengan Struktur Monolitik*

Menggunakan Teknik Printing (Nomor Pendaftaran Paten P00201805622).

93. Hidayat, J., Muliani, L., **Nursam, N. M.**, Anggraini, P. N., Rosa, E. S., Retnaningsih, L., & Shobih. (2017). *Metode Pengisian Elektrolit Cair Pada Modul Surya Berbasis Pewarna* (Nomor Pendaftaran Paten P00201706642).
94. **Nursam, N. M.**, Hidayat, J., Istiqomah, A., Anggraini, P. N., Shobih, Rosa, E. S., Retnaningsih, L., & Muliani L. (2017). *Sel Surya Berbasis Pewarna dengan Struktur Monolitik berserta Proses Pembuatannya* (Nomor Pemberian Paten IDP000075315).

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data pribadi

Nama Lengkap : Natalita Maulani Nursam, S.T.,
M.Phil., Ph.D

Tempat, Tanggal Lahir : Lamongan, 27 Desember 1982

Anak ke : 1 dari 2 Bersaudara

Jenis Kelamin : Perempuan

Nama Ayah Kandung : Sam Roekajat (alm.)

Nama Ibu Kandung : Hj. Nur Fadhilah

Nama Istri : Dedi Cahyadi, S.Hut., M.Hum.

Jumlah Anak : 2

Nama Anak : 1. Muhammad Habibi K. Al Mulk
2. Amarasuli Maulana Al Mulk

Nama Instansi : Pusat Riset Elektronika, Organisasi
Riset Elektronika dan Informastika,
Badan Riset dan Inovasi Nasional

Judul Orasi : Teknologi Sel Surya Generasi Ketiga
sebagai Energi Alternatif Masa
Depan

Bidang Keahlian : Teknik Elektro
Material dan Komponen Elektronika
Teknologi Sel Surya

No. SK Pangkat Terakhir : Keppres RI No 15/K Tahun 2023,
tanggal 14 Juli 2023

No. SK Peneliti Ahli : Keppres RI Nomor 2/M Tahun 2023,
Utama Tanggal 9 Januari 2023

B. Pendidikan Formal

No	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/Universitas	Tempat/ Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	SD	SD Negeri Tumenggungan 1	Lamongan/ Indonesia	1994
2	SMP	SMP Negeri 1	Lamongan/ Indonesia	1997
3	SMA	SMA Negeri 2	Lamongan/ Indonesia	2000
4	S1	Universitas Indonesia	Depok/ Indonesia	1993
5	S2	The Australian National University	Canberra/ Australia	2011
6	S3	The University of Melbourne	Melbourne/ Australia	2016

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat	Tahun
1	Pelatihan ISO 9001:2005	PT. Sharp Semikonduktor Indonesia/ Karawang/ Indonesia	2005

2	Diklat Prajabatan	LIPI/Cibinong/ Indonesia	2006
3	Diklat Fungsional Peneliti Tingkat Pertama	LIPI/Cibinong/ Indonesia	2007
4	Pelatihan Pre-Departure Training Course for Australian Development Scholarship Postgraduate Awardees	IALF/Jakarta/ Indonesia	2008
5	Pelatihan Introductory Academic Skills	ANU/Canberra/ Australia	2008
6	Program Risetpro Non-Gelar: Tailor Made Course on the Fabrication of Solar Module Based on Dye-Sensitized Solar Cells	Dyename AB/ Stockholm/ Swedia	2016
7	Diklat Peneliti Tingkat Lanjut di Cibinong	LIPI/Cibinong/ Indonesia	2017
8	Pelatihan Penyamaan Persepsi Asesor Akreditasi Jurnal Nasional ARJUNA	Kemenristekdikti/ Surabaya/ Indonesia	2018

D. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Ahli Muda Gol. III/c	1 Juli 2011
2	Peneliti Ahli Muda Gol. III/d	1 Desember 2016
3	Peneliti Ahli Madya Gol. IV/a	1 Juni 2018

4	Peneliti Ahli Madya Gol. IV/c	1 Januari 2021
5	Peneliti Ahli Utama Gol. IV/d	1 Februari 2023

E. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Asesor Akreditasi Jurnal Nasional (ARJUNA)	Kemenristekdikti	2018 – sekarang
2	Asesor Jabatan Fungsional Peneliti	LIPI/BRIN	2018 – sekarang
3	Visiting researcher di CSIRO, Australia	APEC	2019
4	Tim perencanaan, monitoring dan evaluasi	Kepala Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi LIPI	2019
5	Tim penilai peneliti unit	Kepala Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi LIPI & Kepala Pusat Riset Elektronika BRIN	2021 – 2023
6	Ketua kelompok riset <i>Advanced Photovoltaic and Functional Electronic Devices</i>	Kepala Pusat Riset Elektronika BRIN	2022 – 2023

7	Pengajar di Workshop Penulisan KTI	Kepala Pusdiklat Tekfunghan Kementerian Pertahanan RI	2023
8	Anggota Majelis Asesor Peneliti Pusat (MAPP)	Kepala BRIN	2024

F. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota,Negara)	Tahun
1	International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-19)	Pemakalah	Jeju, Korea Selatan	2009
2	The 24 th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSC)	Pemakalah	Hamburg, Jerman	2009
3	The 25 th EUPVSC	Pemakalah	Valensia, Spanyol	2010

4	The 48th Annual Conference of the Australian Solar Energy Society (AuSES)	Pemakalah	Canberra, Australia	2010
5	The 35 th IEEE PVSC	Pemakalah	Hawaii, Amerika Serikat	2010
6	Seminar XIV Kimia dalam Pembangunan	Pemakalah	Yogyakarta, Indonesia	2011
7	IMEN-LIPI Joint Seminar	Pemakalah	Yogyakarta, Indonesia	2011
8	The 6 th National Radar Seminar and ICRAMET	Pemakalah	Bali, Indonesia	2012
9	The 13 th SITIA	Pemakalah	Surabaya, Indonesia	2012
10	RACI Inorganic Chemistry Symposium	Pemakalah	Melbourne, Australia	2013
11	ANN Workshop for Early Career Researchers	Pemakalah	Gold Coast, Australia	2015
12	Australian Synchrotron Beamtime	Peserta	Clayton, Australia	2015
13	Nanolytica 2015	Pemakalah	Clayton, Australia	2015

14	ICMAT 2015	Pemakalah	Singapura, Singapura	2015
15	MRS-ID Meeting 2016	Pemakalah	Bandung, Indonesia	2016
16	QiR 2017	Pemakalah	Bali, Indonesia	2017
17	ICTAP 2017	Pemakalah	Yogyakarta, Indonesia	2017
18	ISFAP 2017	Pemakalah	Jakarta, Indonesia	2017
19	ICRAMET 2017	Ketua Panitia & Pemakalah	Jakarta, Indonesia	2017
20	IC2MS 2017	Pemakalah	Malang, Indonesia	2017
21	The 7 th Kavli meeting	Peserta	Ambon, Indonesia	2017
22	ICMNS 2018	Moderator & Pemakalah	Bandung, Indonesia	2018
23	ICONIET 2018	Pemakalah	Serpong, Indonesia	2018
24	ISFAP 2018	Pemakalah	Serpong, Indonesia	2018
25	EECCIS	Pemakalah	Malang, Indonesia	2018
26	MRS-ID Meeting 2018	Pemakalah	Bali, Indonesia	2018
27	Workshop LaTeX for Beginners	Peserta	Bandung, Indonesia	2018

28	Workshop on Nanomaterials and Sensor Technology	Peserta	Bandung, Indonesia	2018
29	Workshop on Advanced Photovoltaic 2018	Keynote speaker	Bandung, Indonesia	2018
30	ISFAP 2019	Pemakalah	Serpong, Indonesia	2019
31	ISMM 2019	Pemakalah	Serpong, Indonesia	2019
32	Photovoltaic Workshop at Monash University	Peserta	Melbourne, Australia	2019
33	ICRAMET 2020	Pemakalah	Online	2020
34	Workshop Advanced Photovoltaic 2020	Keynote presenter	Online	2020
35	Webinar Electrical Summit Universitas Gunadarma	Keynote speaker	Online	2021
36	ISMOA 2021	Peserta	Online	2021
37	ICRAMET 2021	Pemakalah	Online	2021

38	ICRAMET 2022	Pemakalah	Online	2022
39	Guest lecture Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Keynote speaker	Serang, Indonesia	2022
40	Indonesia Solar Summit 2022	Moderator untuk keynote session	Jakarta, Indonesia	2022
41	Subject Matter Expert Day PT. Mayora, Tbk.	Narasumber	Jakarta, Indonesia	2023
42	Seminar Nasional Bakrie Center Foundation	Panelis talkshow	Jakarta, Indonesia	2023
43	Forum Fasilitasi Ahli Teknologi	Presenter	Bandung, Indonesia	2023
44	Symposium on Advanced Photovoltaic	Invited speaker	Bandung, Indonesia	2023
45	Advokasi Kebijakan Industri Panel Surya di Indonesia	Narasumber	Jakarta, Indonesia	2023
46	Mata kuliah Kapita Selekta Universitas Sangga Buana	Dosen Tamu	Bandung, Indonesia	2023

47	Workshop Penulisan KTI dan Pengelolaan Jurnal Ilmiah Badiklat Kementerian Pertahanan RI	Narasumber	Jakarta, Indonesia	2024
48	Training Teknologi Sel Surya PT. Hartono Istana Teknologi (POLYTRON)	Narasumber	Kudus, Indonesia	2024

G. Editor Jurnal/Prosiding

No.	Nama Jurnal/ Prosiding	Peran/Tugas	Tahun
1	Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi	Ketua Dewan Redaksi dan Reviewer	2017 – sekarang
2	Jurnal Teknologi Indonesia	Reviewer	2017
3	Journal of Pure and Applied Chemistry Research	Reviewer	2018
4	Proceedings of International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)	Reviewer	2018 – 2022

5	Proceedings of International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunication (ICRAMET)	Anggota Scientific Committee & Reviewer	2017 – 2023
6	Buku Sains untuk Biodiversitas Indonesia (AIPI)	Reviewer	2016
7	Thin Solid Films	Reviewer	2019 – 2020
8	Applied Surface Science	Reviewer	2019 – 2021
9	Ionics	Reviewer	2019
10	International Journal of Materials Science and Applications	Reviewer	2019
11	Proceedings of International Conference on Electrical, Electronics, and Information Engineering (ICEEIE)	Reviewer	2019
12	Proceedings of International Seminars on Metallurgy and Materials	Reviewer	2020
13	Proceedings of International Symposium on Frontiers of Applied Physics	Reviewer	2021

14	Proceedings of International Symposium on Green Technology for Value Chains	Reviewer	2021
15	Journal of Nano research	Reviewer	2021
16	Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology	Reviewer	2021 – 2023
17	Proceedings of ConQuest	Reviewer	2022
18	Proceedings of International Symposium on Modern Optics	Reviewer	2023
19	International Journal of Ambient Energy	Reviewer	2023
20	Open Physics	Reviewer	2023
21	Journal of Sol-Gel Science and Technology	Reviewer	2023
22	International Journal of Photoenergy	Reviewer	2023

H. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1	Penulis Tunggal	-
2	Bersama Penulis lainnya	85
	Total	85

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Bahasa Indonesia	8
2	Bahasa Inggris	77
3	Bahasa lainnya	-
	Total	85

No.	Kekayaan Intelektual	Jumlah
1	Paten Granted	3
2	Paten Terdaftar	6
	Total	9

I. Pembinaan Kader Ilmiah Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1	Putri Nur Anggraini	PRE BRIN	Pembimbing peneliti pertama	2018 – sekarang
2	Nunik Nurhayati	PRE BRIN	Pembimbing Latsar CASN	2022
3	Wilman Septina	PRE BRIN	Pembimbing ASN P3K	2022
4	Lia Yuliantini	PRE BRIN	Pembimbing Postdoc/ASN P3K	2022 – 2023
5	Phutri Milana	PRE BRIN	Pembimbing ASN P3K	2023

Mahasiswa

No.	Nama Bimbingan	PT/ Universitas	Tahun Lulus
1	Ade Istiqomah (S1)	Telkom University Bandung	2017
2	Anita Nathania (S1)	Universitas Surya	2017
3	Rizki Ananda Putra (S1)	Telkom University Bandung	2018
4	Daniel Agaphela (S1)	Swiss German University	2018
5	Ida Bagus Gede Giodantha (S1)	Swiss German University	2018
6	Fasrah Arif (S1)	Universitas Surya	2018
7	Jovid Jusuf Pandanga (S1)	Universitas Surya	2018
8	Zaky Mubarak (S1)	Universitas Hasanuddin	2018
9	Ainul Wakiah (S1)	Universitas Hasanuddin	2019
10	Zulhayyir (S1)	Universitas Hasanuddin	2019
11	Alfonsius Hasiholan (S1)	Telkom University Bandung	2019
12	Ellyse Oktaviani (S1)	Universitas Surya	2019
13	Suwastika Wijayanti (S2)	Institut Teknologi Bandung	2019

No.	Nama Bimbingan	PT/ Universitas	Tahun Lulus
14	Ressa Muhriyah Novianti (S2)	Institut Teknologi Bandung	2021
15	Evira Bella Yustiani (S1)	Institut Teknologi Bandung	2022
16	Mohammad Fadli Alifvian (S1)	Institut Teknologi Bandung	2023
17	Eri Widiyanto (S3)	Universitas Gadjah Mada	2023
18	Rimbi Rodiyana Sova (S2)	Institut Teknologi Bandung	2024
19	Adhita Asma Nurunnizar (S3)	Institut Teknologi Bandung	2024
20	Valdi Rizki Yandri (S3)	Institut Teknologi Bandung	2024
21	Athallah Zaidan (S1)	Institut Teknologi Bandung	2024
22	Melly Puspita (S1)	Institut Teknologi Bandung	2024

J. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1	Anggota	Australian Nanotechnology Network (ANN)	2012 – 2016

2	Anggota	Royal Australian Chemical Institute (RACI)	2012 – 2016
3	Anggota	Materials Research Society of Indonesia (MRS-ID)	2016 – sekarang
4	Anggota	Masyarakat Energi Terbarukan Indonesia (METI)	2016 – sekarang
5	Anggota	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)	2018 – 2019
6	Anggota	Council of Asian Science Editors (CASE)	2018 – sekarang
7	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO)	2019 – 2021
8	Anggota	Perhimpunan Periset Indonesia (PPI)	2022 – sekarang

K. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1	International Community Activity Center Undergraduate Scholarship	Goodwill Foundation Indonesia	2003
2	Australian Development Scholarship	Pemerintah Australia (AusAID)	2008
3	Melbourne International Research Scholarship	Pemerintah State of Victoria - Australia	2012

4	Top-Up Scholarship for PhD Students in Materials Science	CSIRO & Melbourne Materials Institute	2012
5	David Hay Thesis Writing Award	University of Melbourne	2016
6	Riset PRO Non-Degree	Kemenristekdikti	2016
7	Satya Lencana X Tahun	Presiden RI	2016
8	Selected participant of 7th Kavli America-Indonesia Meeting	Kavli & AIPI	2017
9	Peneliti Terbaik	Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi LIPI	2017, 2018
10	APEC-Australia Women in Research Award	APEC	2019

Seiring meningkatnya penggunaan berbagai teknologi canggih pada gaya hidup manusia, seperti maraknya pemakaian perangkat elektronika, berkembangnya industri kendaraan listrik, dan tumbuh pesatnya jaringan IoT, maka diperlukan suatu teknologi sel surya yang bersifat versatile dan berefisiensi tinggi.

Orasi ini berisi pemaparan terkait perkembangan teknologi sel surya generasi ketiga yang berbasis pewarna tersensitasi dan perovskite. Kedua jenis sel surya generasi ketiga tersebut memiliki keunggulan berupa harga material yang rendah, proses fabrikasi yang sederhana, serta mampu bekerja secara efisien pada berbagai kondisi cahaya. Pada naskah orasi ini diuraikan serangkaian hasil riset dan inovasi dalam mengoptimasi performa sel surya generasi ketiga tersebut, termasuk upaya scale-up untuk mendukung proses adaptasinya menuju skala industri.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin-others.1317



ISBN 978-602-6303-24-0



9 786026 303240