



**FORUM GURU BESAR**  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



# **Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung**



**Eksplorasi Material Maju  
dan Kinetika Transpor Pembawa Muatan  
untuk Pengembangan Sel Surya Generasi Baru**

**Profesor Rachmat Hidayat**

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB  
21 September 2024**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**EKSPLORASI MATERIAL MAJU DAN  
KINETIKA TRANSPOR PEMBAWA  
MUATAN UNTUK PENGEMBANGAN SEL  
SURYA GENERASI BARU**





Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**EKSPLORASI MATERIAL MAJU DAN  
KINETIKA TRANSPOR PEMBAWA  
MUATAN UNTUK PENGEMBANGAN SEL  
SURYA GENERASI BARU**

**Prof. Rachmat Hidayat**

21 September 2024  
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

*Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:*  
***Eksplorasi Material Maju dan Kinetika Transpor Pembawa Muatan  
untuk Pengembangan Sel Surya Generasi Baru***

Penulis : Prof. Rachmat Hidayat

Reviewer : Prof. Agustinus Agung Nugroho Sulisty Hutomo

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-567-5

e-ISBN : 978-623-297-568-2 (PDF)

**ITB PRESS**

© Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

+62 22 20469057

www.itbpress.id

office@itbpress.id

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

# PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, bahwasanya atas rahmat dan kasih karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan buku orasi ilmiah ini. Kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memberi kesempatan untuk membuat tulisan dan menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung.

Buku ini diharapkan dapat memberikan gambaran umum tentang perkembangan terkini sel surya generasi baru yang dieksplorasi melalui pengembangan bahan-bahan aktif dan karakterisasi sifat fisiknya, khususnya terkait dengan keadaan cacat dan transpor pembawa muatan setelah proses serapan cahaya (foton). Buku ini meliputi secara ringkas perbedaan dan perkembangan dari tiga tipe sel surya generasi ketiga, yakni sel surya polimer, sel tersensitisasi pewarna, dan sel surya perovskit. Penelitian ketiga tipe sel surya tersebut sangat luas, sehingga buku ini hanya bisa mengulas sekilas perkembangan tersebut. Selain itu, buku ini khususnya akan memaparkan hasil-hasil penelitian penulis, bersama-sama dengan para kolega dan mahasiswa bimbingan, yang terkait dengan ketiga tipe sel surya tersebut.

Penulisan buku ini dapat dituntaskan tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan masukan-masukan, khususnya kepada Prof. Dr. Agustinus Agung Nugroho Sulistyو Hutomo, yang telah menjadi penelaah buku ini.

Semoga tulisan dalam buku orasi ilmiah ini bermanfaat bagi mahasiswa, sesama akademisi dan peneliti sebidang, serta masyarakat umum dalam mengenal dan mendalami sains dan teknologi sel surya generasi baru ini.

Bandung, 21 September 2024

Penulis



# SINOPSIS

Buku ini memaparkan secara ringkas hasil-hasil penelitian terkait pengembangan sel surya generasi ketiga, khususnya untuk tipe sel surya polimer, sel surya tersensitisasi pewarna (DSSC) dan sel surya perovskit. Buku ini secara khusus juga memaparkan hasil-hasil penelitian dari penulis, yang dilaksanakan bersama beberapa kolega dan mahasiswa bimbingan, yang terkait dengan penelitian sel surya tersebut. Meskipun gambaran secara umum ketiga sel surya tersebut memiliki karakteristik sel seperti sel surya silikon, tetapi sebenarnya ada perbedaan-perbedaan yang mendasar. Perbedaan tersebut sangat terkait dengan proses optik dan elektronik yang terjadi pada bahan aktif, mulai dari proses penyerapan cahaya (foton) hingga ekstraksi pembawa muatan (arus listrik) keluar dari sel surya. Pemahaman yang baik terkait sifat-sifat material aktif tersebut akan membantu dalam mendesain kembali dan memodifikasi baik material aktifnya maupun struktur sel suryanya, sehingga bisa diperoleh peningkatan performa sel surya tersebut dan proses *up-scaling*-nya.

Buku ini terdiri atas 5 bab, yakni Bab 1 berisi tentang pendahuluan, Bab 2 berisi tentang sel surya polimer dan DSSC, sedangkan Bab 3 dan Bab 4 terkait dengan sel surya perovskit, dan terakhir Bab 5 berisi kata-kata penutup. Pada Bab 1, Penulis mencoba memaparkan dengan ringkas tentang kondisi persoalan energi dan emisi gas secara global, yang menjadi latar belakang peluang untuk pemanfaatan energi matahari dan pengembangan sel surya. Pada Bab I ini juga diuraikan secara ringkas sejarah pengembangan sel surya dan prinsip kerja sel surya secara umum. Pada Bab 2 penulis mencoba memaparkan tentang material aktif polimer dan prinsip kerja sel surya polimer serta aspek-aspek penting yang berbeda dengan sel surya silikon. Dibahas juga tentang peran penulis dan tim peneliti dalam upaya memahami dan menekan efek rekombinasi rugi pada sel surya polimer ini. Pada bab yang sama juga dipaparkan secara ringkas tentang material aktif dan prinsip kerja sel surya DSSC, serta pengembangan elektrolit gel polimer yang telah kami kembangkan untuk pemakaian pada DSSC semi-padat. Selain itu, pada bab tersebut dipaparkan juga bagaimana karakterisasi transpor pembawa muatan, seperti pengukuran impedansi sederhana, dapat memberikan

informasi tentang proses-proses rekombinasi rugi yang mengurangi performa sel surya tersebut.

Sel surya perovskit merupakan salah satu *emerging solar cells* saat ini. Perovskit halida ini berbeda dengan perovskit oksida yang telah lebih dulu dikenal karena perovskit halida menunjukkan sifat-sifat material semikonduktor. Akan tetapi, kristal perovskit halida dibangun oleh ikatan ionik sehingga berbeda dengan kristal silikon yang dibangun oleh ikatan kovalen. Bab 3 ini memaparkan bagaimana bentuk kristal perovskite dan hasil perhitungan struktur elektroniknya dengan menggunakan metode komputasi berbasis *Density Functional Theory* (DFT). Dari hasil komputasi ini dapat dipahami bagaimana terbentuknya pita valensi dan pita konduksi serta celah pita energi, yang merupakan ciri-ciri khusus material semikonduktor. Bab 4 memaparkan karakteristik sel surya yang terbuat dari material perovskit halida tersebut, termasuk hasil-hasil penelitian penulis dan tim terkait efek dari kehadiran keadaan cacat kristal dan cacat permukaan pada karakteristik sel suryanya. Dikarenakan perovskit terbentuk dari ikatan ionik maka cacat kristal dan cacat permukaan akan lebih mudah terbentuk. Pada bab ini, penulis juga memaparkan bagaimana mengidentifikasi efek dari kehadiran keadaan cacat pada kinetika transpor pembawa muatan melalui metode pengukuran sederhana transien fototegangan.

Buku ini ditutup oleh Bab 5, yang menyampaikan pandangan secara umum dari penulis bagaimana penelitian bidang sel surya ini berlangsung dan status ke depannya, yang jelas masih akan tetap berjalan karena peningkatan performa sel surya silikon terbatas oleh batas Shockley-Queisser. Tertera juga dalam bab penutup ini harapan-harapan untuk perkembangan penelitian dan industri sel surya di dalam negeri.

# DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS .....	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR .....	XI
1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Sejarah Singkat dan Tonggak Perkembangan Sel Surya .....	4
1.2 Prinsip Kerja Sel Surya Secara Umum .....	6
2 SEL SURYA POLIMER DAN SEL SURYA TERSENTISISASI PEWARNA (DSSC) .....	11
2.1 Sel Surya Polimer .....	11
2.2 Sifat Polimer Terkonjugasi dan Prinsip Donor-Akseptor dalam Proses Pemisahan Eksiton.....	12
2.3 Efek Morfologi Permukaan dan Rekombinasi Rugi pada Karakteristik Sel Surya Polimer .....	17
2.4 Sel Surya Tersentisisasi Pewarna (DSSC).....	21
2.5 Prinsip Kerja dan Bahan-Bahan Aktif Sel Surya DSSC .....	23
2.6 Pengembangan Elektrolit Semipadat dan Karakteristik DSSC-nya .....	30
3 SEL SURYA PEROVSKITE: STRUKTUR KRISTAL DAN STRUKTUR ELEKTRONIK PEROVSKIT HALIDA.....	37
3.1 Struktur Kristal Perovskit Halida .....	38
3.2 Struktur Elektronik Perovskit Halida Berdasarkan Hasil Komputasi.....	43
3.3 Struktur Elektronik Perovskit MAPbI <sub>3</sub> .....	44
3.4 Struktur Elektronik Perovskit APbBr <sub>3</sub> (A= Li, Na, K, Rb dan Cs).....	48
4 SEL SURYA PEROVSKIT: STRUKTUR DAN CACAT KRISTAL SERTA PENGARUHNYA PADA KARAKTERISTIK ELEKTRONIK DAN PERFORMANSI SEL SURYA .....	55
4.1 Struktur Bulk dan Permukaan Kristal Serta Kaitannya dengan Dinamika Relaksasi Keadaan Tereksitasi.....	55
4.2 Cacat Permukaan Kristal dan Kaitannya dengan Karakteristik dan Perfoma Sel Surya .....	59
4.3 Efek Morfologi Permukaan Dipindai dengan Teknik Pengukuran Fototegangan Transien.....	64

4.4	Efek Rekombinasi Rugi pada Permukaan Bidang Batas dalam Sel Surya Dilihat dengan Teknik Pengukuran Fototegangan Transien.....	68
5	PENUTUP.....	71
6	UCAPAN TERIMA KASIH.....	75
	DAFTAR PUSTAKA .....	79
	CURRICULUM VITAE .....	91



# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b>	Perkembangan (a) kebutuhan energi dari tahun ke tahun pasca era industrialisasi dan (b) distribusi konsumsi energi per kapita di berbagai negara di tahun 2023 (Ritchie, dkk., 2024). .....	2
<b>Gambar 2</b>	(a) Pertumbuhan emisi gas CO <sub>2</sub> dunia dari tahun ke tahun pasca-era industrialisasi. (b) Distribusi emisi gas CO <sub>2</sub> per kapita per negara di tahun 2022 (Ritchie dan Roser, 2024). .....	3
<b>Gambar 3</b>	<i>Top record timeline</i> dari pengembangan sel surya untuk prototipe skala lab (NREL Transforming Energy, 2024). .....	6
<b>Gambar 4</b>	Kurva karakteristik sel surya (kurva J-V). Kurva garis hijau: kurva karakteristik dioda (sel surya tanpa disinari), kurva garis biru: kurva karakteristik fotovoltaik (sel surya saat disinari), kurva garis ungu: kurva daya listrik luaran yang dihasilkan (sel surya saat disinari). .....	7
<b>Gambar 5</b>	Kurva batas efisiensi sel surya menurut Shockley-Quessier. (b) Spektrum radiasi emisi benda hitam. (c) Spektrum sinar matahari di lapisan luar atmosfer (warna kuning) dan permukaan bumi (warna merah oranye). (d) Porsi dari spektrum energi foton dari sinar matahari yang tidak dapat dan tidak efektif diserap oleh sel surya silikon. (Smith, 2010; Wikipedia, 2024c, 2024d, 2024e) .....	9
<b>Gambar 6</b>	Tahapan proses optik dan elektronik yang terjadi di dalam sel surya. Jalur sebelah kiri menggambarkan rekombinasi radiatif dan non-radiatif yang merupakan rekombinasi rugi. ....	10
<b>Gambar 7</b>	(a) Ilustrasi persambungan p-n pada bahan kristal silikon dan mekanisme pemisahan pembawa muatannya. (b) Ilustrasi pembentukan persambungan antara dua bahan yang berperan pasangan sebagai donor (D) dan akseptor (A) dengan proses transfer	

	elektron untuk menghasilkan pemisahan pembawa muatan. ....	13
<b>Gambar 8</b>	(a) Contoh beberapa jenis polimer terkonjugasi yang bisa dipakai sebagai donor (D). (b) Contoh molekul <i>fullerene</i> yang dapat dipakai sebagai akseptor (A). ....	13
<b>Gambar 9</b>	Ilustrasi pembentukan eksiton (pasangan elektron-hole) pada bahan semikonduktor kristalin: eksiton Wannier-Mott, yang muncul dalam bahan dengan struktur kristal tinggi, dan eksiton Frenkel, yang muncul dalam bahan organik dan polimer terkonjugasi (bahan amorf). ....	14
<b>Gambar 10</b>	Arsitektur struktur solar cell berbentuk (a) persambungan planar, (b) interdigitized junction dan (c) persambungan bulk hetero (bulk hetero-junction). (Wikipedia, 2024b) .....	15
<b>Gambar 11</b>	(a) Proses generasi eksiton akibat penyerapan foton. (b) proses transfer eksiton sebelum mengalami (c) disosiasi (pemisahan), (d) eksiton menjadi elektron dan hole bebas dan bergerak menuju ke elektroda, ataupun dapat mengalami (e) rekombinasi sebelum ataupun (f) sesudah disosiasi eksiton terjadi (Scharber dkk., 2006). ....	16
<b>Gambar 12</b>	Diagram pita energi pada sel surya polimer, sebagai contoh, dengan lapisan ETL dari ZnO dan HTL dari MoO <sub>3</sub> . ....	17
<b>Gambar 13</b>	(a) Diagram skematik arsitektur struktur persambungan bulk terbalik yang terdiri atas ITO/AZO/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag. (b) Kurva karakteristik J-V dari sel tersebut di mana efisiensi maksimum dicapai oleh divais yang menggunakan AZO 0.5wt%. (Aprilia dkk., 2013) .....	18
<b>Gambar 14</b>	Hasil pemindaian <i>Atomic Force Microscope</i> (AFM), untuk Aluminum doped ZnO dengan menggunakan pelarut methoxyethanol (a) ITO only, and (b) AZO-0,5 wt%, (c) 0,8 wt %, and (d) 1 wt% (Aprilia dkk., 2013). ....	19
<b>Gambar 15</b>	Hasil pengukuran Efek Hall pada lapisan AZO yang dibuat dengan metode sol-gel dengan pelarut <i>methoxyethanol</i> . (Aprilia dkk., 2013) .....	19

<b>Gambar 16</b>	(a) Rangkaian ekuivalen pada persambungan bulk P3HT:PCBM, kombinasi paralel CPE1 dan R1 merupakan impedansi pada persambungan AZO/P3HT:PCBM, sedangkan nilai CPE2 dan R2 adalah persambungan P3HT:PCBM/PEDOT:PSS. R <sub>s</sub> adalah hambatan Ohmik dari lapisan elektroda. (b) Nilai resistansi R <sub>1</sub> dan (c) kapasitansi C <sub>1</sub> yang diperoleh dari hasil fitting kurva semi lingkaran dari hasil pengukuran sel surya polimer ini (Aprilia dkk., 2013).....	20
<b>Gambar 17</b>	Struktur sel surya tersensitisasi pewarna (DSSC) sederhana. ....	22
<b>Gambar 18</b>	Prinsip kerja dari sel surya DSSC dari mulai proses serapan cahaya atau fotoeksitasi hingga proses eksitasi. ....	23
<b>Gambar 19</b>	Diagram pita energi untuk beberapa semikonduktor logam oksida yang berpotensi untuk dipergunakan sebagai lapisan fotoanoda pada DSSC (Grätzel, 2001). ....	26
<b>Gambar 20</b>	(a) Struktur molekul <i>dye</i> /pewarna yang pertama kali digunakan oleh kelompok Gratzel. (b) Struktur molekul <i>dye</i> /pewarna yang sering digunakan hingga saat ini.....	27
<b>Gambar 21</b>	Ilustrasi posisi potensial standar/formal dari pasangan redoks elektrolit terhadap tingkat energi lainnya pada sel DSSC. ....	30
<b>Gambar 22</b>	Beberapa contoh cairan ionik. (Gorlov dan Kloo, 2008) .....	31
<b>Gambar 23</b>	Struktur molekul komponen pembentuk Elektrolit Gel Polimer (EGP) tipe pertama yang kami kembangkan. (a) Struktur molekul TMSPMA, (b) cairan ionik, dan (c) EGP. (W. O. S. Arsyad, dkk., 2018).....	32
<b>Gambar 24</b>	Struktur molekul komponen pembentuk Elektrolit Gel Polimer (EGP) tipe kedua yang telah kami kembangkan (Pujiarti, dkk., 2019). ....	33
<b>Gambar 25</b>	Karakteristik kurva J-V untuk sel DSSC dengan (a) EGP#1 saja dan (b) EGP#1 dengan tambahan sedikit propilen karbonat (PC). Plot Nyquist hasil pengukuran EIS dalam keadaan penyinaran (terang) dari sel DSSC dengan (c) EGP#1 saja dan (d) EGP#1 dengan tambahan sedikit propilen karbonat (PC). (e) dan (f) Interpretasi proses transpor elektron dan regenerasi pewarna oleh	

	elektrolit untuk kedua sel yang berbeda tersebut (W. O. S. Arsyad dkk., 2018). .....	35
<b>Gambar 26</b>	Plot Nyquist hasil pengukuran EIS dalam keadaan penyinaran (terang) dari sel DSSC dengan (a) elektrolit standar dan (b) elektrolit EGP#2. Pengukuran dilakukan pada sel yang dibuat dengan waktu perendaman bervariasi, yakni 1, 2 dan 16 jam, yang terindikasi pada nama-nama sel tersebut (Pujiarti dkk., 2019). .....	36
<b>Gambar 27</b>	(a) Struktur kristal perovskit $ABX_3$ berbentuk kubik dengan unsur A sebagai atom pusatnya. (b) Penggambaran lain dengan unsur A sebagai atom pusat pada struktur kubiknya dan untuk menunjukkan kehadiran sub-grup oktahedral $BX_6$ di titik-titik sudutnya.....	38
<b>Gambar 28</b>	Klasifikasi yang menunjukkan perbedaan dua kelas perovskit, yakni perovskit oksida dan perovskit halida. ....	39
<b>Gambar 29</b>	Ragam kemungkinan unsur pembentuk kristal perovskit halida. ....	40
<b>Gambar 30</b>	Struktur kristal $MAPbI_3$ dengan struktur (a) kubik, (b) tetragonal dan (c) ortorombik (Bechtel, dkk., 2019). ....	42
<b>Gambar 31</b>	Ragam variasi struktur kristal yang mungkin terbentuk selain dari bentuk $ABX_3$ -nya (Pering, 2023). ....	42
<b>Gambar 32</b>	(a) Sel satuan perovskit $MAPbI_3$ dengan fasa kubik. (b) Kisi resiprok dari perovskit $MAPbI_3$ dengan lintasan perhitungan (untuk Zona Brillouin pertama-nya): $\Gamma$ -X-M- $\Gamma$ -Z-R-A-Z X-R M-A. (Yolla Sukma Handayani dkk., 2019) .....	45
<b>Gambar 33</b>	Struktur pita elektronik dan PDOS perovskit $MAPbI_3$ hasil komputasi DFT (Yolla Sukma Handayani dkk., 2019).....	46
<b>Gambar 34</b>	Struktur perovskit oksida dengan bentuk kubik ideal (di tengah-tengah gambar) dan beberapa jenis distorsi struktural yang mungkin. Distorsi kristal ini terjadi akibat rotasi dan <i>tilting</i> grup oktahedronya serta pergeseran atom B dari posisi pusatnya, yang dapat memengaruhi sifat fotoelektrik, seperti pada perovskit $FeTiO_3$ dan $ZnSnO_3$ (Benedek dan Fennie, 2013). ....	47

<b>Gambar 35</b>	(a) Prinsip pengukuran spektroskopi fotoelektron ultraviolet ( <i>Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy</i> (UPS)). (b) Spektrum UPS dari metil amonium iodida (MAI) dan MAPbI <sub>3</sub> (MAPI) (Yolla Sukma Handayani dkk., 2019). .... 48
<b>Gambar 36</b>	Hasil komputasi struktur elektronik perovskit APbBr <sub>3</sub> , hanya ditampilkan untuk (a) A = Li dan (b) A = Cs saja, dengan fungsi korelasi-pertukaran GGA-PBE. Energi Fermi telah digeser ke 0 eV. Inset dalam gambar (a) menunjukkan kisi resiprok dan lintasan <i>k</i> yang digunakan dalam komputasi ini (Pitriana dkk., 2019). .... 50
<b>Gambar 37</b>	Kurva rapat keadaan PDOS dari (a) LiPbBr <sub>3</sub> dan (b) CsPbBr <sub>3</sub> yang diekstraksi dari kurva dispersi struktur elektronik pada Gambar 36 (Pitriana dkk., 2019). .... 50
<b>Gambar 38</b>	(a) Struktur sel kristal CsSnI <sub>3</sub> (unit sel), (b) supersel 2x2x2 CsSnI <sub>3</sub> , dan (c) struktur sel kristal satuan Cs <sub>2</sub> SnI <sub>6</sub> (Yolla Sukma Handayani dkk., 2021). .... 50
<b>Gambar 39</b>	Struktur pita elektronik dan DOS perovskit (a) CsSnI <sub>3</sub> dan (b) Cs <sub>2</sub> SnI <sub>6</sub> hasil perhitungan dengan fungsional GGA-PBE (Yolla Sukma Handayani dkk., 2021). .... 52
<b>Gambar 40</b>	Variasi cahaya PL dari titik kuantum CsPbBr <sub>3</sub> . (Wei dkk., 2016). .... 56
<b>Gambar 41</b>	Perubahan struktur kristal CsPbBr <sub>3</sub> akibat pengaruh suhu. .... 56
<b>Gambar 42</b>	Citra TEM dari sampel (a) CsPbBr <sub>3</sub> (TL/AL-LARP) dan (b) CsPbBr <sub>3</sub> (TL/AO-LARP). Spektrum PL dari (c) CsPbBr <sub>3</sub> (TL/AL-LARP) dan (d) CsPbBr <sub>3</sub> (TL/AO-LARP). Struktur kristal untuk bentuk (e) ortorombik dan (f) kubik (Yandri dkk., 2024). .... 57
<b>Gambar 43</b>	Spektrum XPS dari dua sampel CsPbBr <sub>3</sub> berbeda, yakni TL/AL-LARP dan TL/AO-LARP, yang masing memiliki struktur kristal ortorombik dan tetragonal (Yandri dkk., 2024). .... 58
<b>Gambar 44</b>	Relaksasi keadaan tereksitasi setelah proses fotoeksitasi dengan melibatkan proses pembentukan eksiton polaron di dalam perovskit CsPbBr <sub>3</sub> (Yandri, dkk., 2024). .... 59
<b>Gambar 45</b>	Ilustrasi sederhana dari struktur permukaan perovskit. (a) Kristal murni, (b) kristal dengan cacat kekosongan

	dan cacat penyisipan, (c) kristal murni dengan <i>tilting</i> oktahedral, dan (d) kristal dengan <i>tilting</i> oktahedral yang terjadi karena kehadiran cacat kekosongan. Segi empat titik merah melambangkan sub-grup oktahedral $PbI_6$ dilihat dari arah sumbu vertikal kristal.....	60
<b>Gambar 46</b>	Proses pembuatan lapisan perovskit dengan teknik <i>spin coating</i> larutan prekursor.....	61
<b>Gambar 47</b>	Struktur sel surya perovskit dalam bentuk struktur mesoskopik (a dan d) dan struktur planar (b dan c). Sel dapat berbentuk struktur normal atau <i>n-i-p</i> (a dan b) atau struktur terbalik atau <i>p-i-n</i> (c dan d) (Xiao dkk., 2016).....	61
<b>Gambar 48</b>	(a) Struktur sel surya perovskit berstruktur FTO/TiO <sub>2</sub> (cp) TiO <sub>2</sub> (mp)/MAPbI <sub>3</sub> /PTAA/Au. (b) Diagram struktur pita energi untuk struktur tersebut dan proses optik-elektronik yang terlibat.....	63
<b>Gambar 49</b>	Skema diagram pengukuran TPV (Hidayat dkk., 2020). ....	63
<b>Gambar 50</b>	Citra mikroskop pemindaian elektron ( <i>scanning electron microscopy</i> , SEM) dari (a) permukaan dan (b) penampang lintang lapisan nanokristal perovskit di atas lapisan mp-TiO <sub>2</sub> #A. Gambar (c) dan (d) serupa dengan (a) dan (b), tetapi untuk yang di atas lapisan mp-TiO <sub>2</sub> #B (Hidayat dkk., 2020). ....	64
<b>Gambar 51</b>	Karakteristik kurva <i>J-V</i> (a) sel #A dan (b) sel #B (Hidayat dkk., 2020). ....	65
<b>Gambar 52</b>	Kurva peluruhan TPV dari sel #A dan sel #B untuk (a) interval waktu menyeluruh hingga 10 ms, dan (b) interval waktu lebih pendek (bagian awal peluruhan) hanya sampai 50 $\mu$ s dengan sumbu <i>x</i> dalam skala linier dan logaritmik (inset) yang dinormalisasi (Hidayat dkk., 2020). ....	65
<b>Gambar 53</b>	(a) Akumulasi muatan di antarmuka dan pembentukan $V_{oc}$ (b) akumulasi elektron dan relaksasi ke lapisan perovskit (c) rekombinasi elektron di antarmuka TiO <sub>2</sub> /perovskit dan <i>trapping-detrapping</i> di batas bulir (Hidayat dkk., 2020). ....	66

- Gambar 54** Kurva J–V dari dua sel yang berbeda tetapi dibuat pada satu batch yang sama, yakni (a) sel #B1 dan (b) sel #B2. (c) Kurva TPV untuk kedua sel tersebut. Kurva sebelah kiri sumbu waktu dalam skala linier, sedangkan sebelah kanan dalam skala log (Nurunnizar, dkk., 2021b). ..... 70
- Gambar 55** Ilustrasi untuk transfer muatan dan pemerangkap elektron di keadaan pemerangkap permukaan (*surface trap states*) di antarmuka TiO<sub>2</sub>/perovskit dengan kondisi konsentrasi cacat kekosongan ion (anion) yang (a) rendah dan (b) tinggi (Nurunnizar, dkk., 2021b). ..... 70

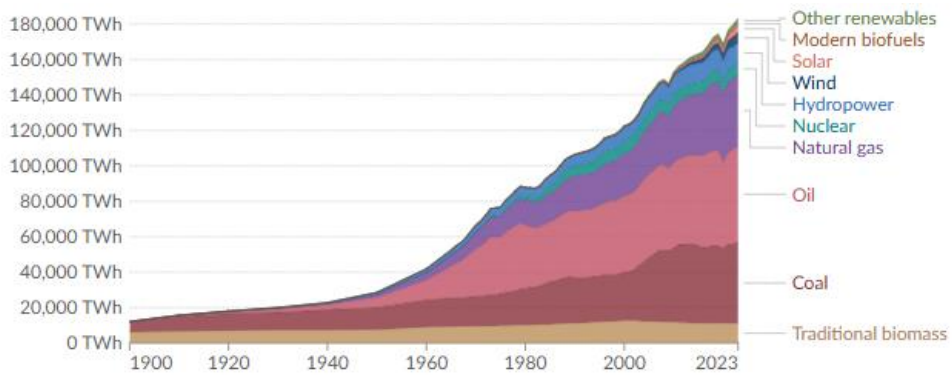




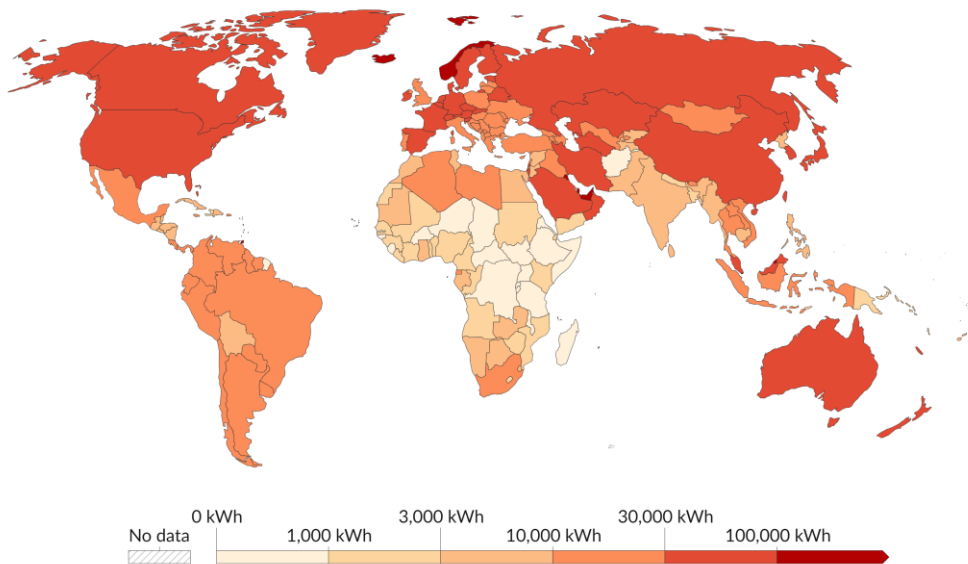
# 1 PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi dan industrialisasi telah ikut berkontribusi dalam menekan konflik-konflik regional dan meningkatkan perdamaian dunia, menciptakan kesejahteraan yang lebih baik dan merata dibandingkan beberapa abad lalu. Seiring dengan itu, dunia pasca-era industrialisasi diwarnai dengan peningkatan konsumsi energi yang drastis hingga saat ini, baik untuk keperluan dunia industri itu sendiri ataupun aktivitas manusia modern saat ini. Sayangnya, sampai saat ini sumber energi tersebut masih didominasi oleh bahan bakar fosil, yakni minyak bumi dan batubara, seperti terlihat pada **Gambar 1** (a). (Ritchie, dkk., 2024) Diperkirakan, dalam beberapa tahun ke depan kebutuhan energi semakin meningkat dengan bertambahnya kawasan-kawasan dan negara yang semakin berkembang ekonominya. Indonesia termasuk salah satu negara tersebut, dengan konsumsi energi per kapita sekitar 10 MWh, seperti tampak pada **Gambar 1** (b), yang menempatkan Indonesia sebagai salah satu negara dengan konsumsi energi level menengah. (Ritchie, dkk., 2024) Saat ini dunia berada dalam kondisi harus segera mengembangkan sumber-sumber energi alternatif karena semakin berkurangnya sumur-sumur minyak bumi dan gas alam yang bisa menjadi pasokan di 20 tahun ke depan.

Peningkatan konsumsi energi itu ternyata membawa dampak negatif dari segi lingkungan. Penggunaan bahan bakar meningkatkan kadar emisi gas CO<sub>2</sub> dan gas rumah kaca lainnya. **Gambar 2** (a) menunjukkan peningkatan emisi gas CO<sub>2</sub> total dunia setelah pasca era industrialisasi dengan rincian per regional. Terlihat bahwa semenjak tahun 2000 Cina memberikan kontribusi terbesar pada peningkatan kadar emisi gas CO<sub>2</sub> ini seiring dengan pertumbuhan ekonominya yang sangat tinggi. Di tahun 2022, Indonesia berkontribusi pada emisi gas CO<sub>2</sub> sekitar 2,6 ton per kapita per tahun, seperti ditunjukkan oleh **Gambar 2** (b), yang diperkirakan akan terus meningkat karena semakin bertambahnya industri dan infrastruktur transportasi, serta peningkatan pendapatan per kapita.

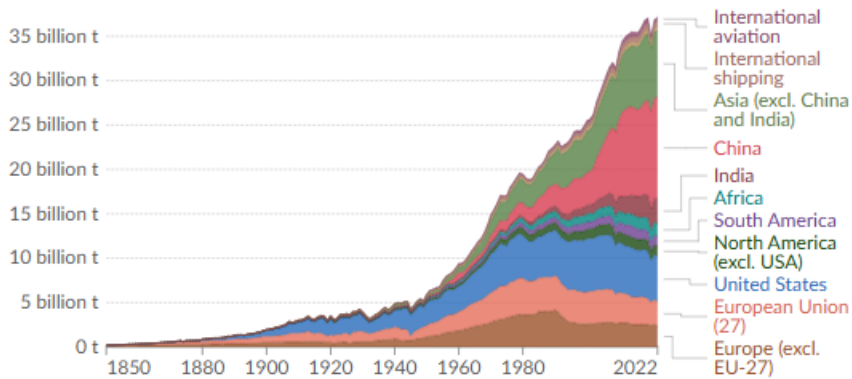


(a)

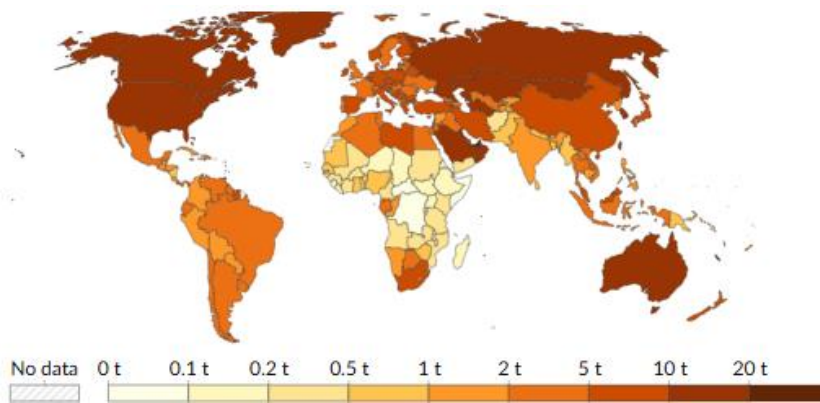


(b)

**Gambar 1** Perkembangan (a) kebutuhan energi dari tahun ke tahun pasca era industrialisasi dan (b) distribusi konsumsi energi per kapita di berbagai negara di tahun 2023 (Ritchie, dkk., 2024).



(a)



(b)

**Gambar 2** (a) Pertumbuhan emisi gas CO<sub>2</sub> dunia dari tahun ke tahun pasca-era industrialisasi. (b) Distribusi emisi gas CO<sub>2</sub> per kapita per negara di tahun 2022 (Ritchie dan Roser, 2024).

Salah satu cara untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil tersebut adalah dengan mengembangkan penggunaan energi baru dan terbarukan. Salah satu bentuk energi baru terbarukan adalah energi sinar matahari, yang pemanfaatannya dapat dilakukan dalam bentuk:

1. pemanfaatan energi termal/panas secara langsung
2. pemanfaatan cahaya matahari melalui konversi dari foton menjadi listrik.

Konversi energi foton menjadi listrik terjadi dalam suatu piranti yang dikenal sebagai sel surya (*solar cell*) yang dalam ukuran besar untuk pembangkitan listrik dikenal sebagai panel sel surya (*solar cell panel*). Prinsip konversi energi ini didasari pada fenomena fotovoltaik (*photovoltaic*), yakni pembangkitan beda tegangan listrik di antara kedua kutub-kutubnya dan mengalirkan arus listrik ke rangkaian luarnya.

## 1.1 Sejarah Singkat dan Tonggak Perkembangan Sel Surya

Sejarah sel surya dimulai dari pengungkapan fenomena fisika di awal abad 19. Meskipun penerapan sel surya dapat kita lihat di berbagai tempat saat ini, bukan berarti riset dan pengembangan sel surya sudah selesai. Akan tetapi, perkembangan sains dan teknologi nano hingga saat ini telah membuka tahapan riset sel surya ke tingkat selanjutnya yang semakin kompetitif. Sains dan teknologi nano, baik dalam domain spasial dan temporal, membuka kemungkinan untuk melakukan kajian struktur material hingga skala atomik dan kinetika pembawa muatan listrik dalam skala waktu hidupnya. Fisika dan Kimia telah menjadi bagian dari basis perkembangan sains dan teknologi nano ini bersama-sama dengan cabang ilmu fundamental lainnya.

Fenomena fotovoltaiik diungkapkan pertama kali oleh Edmond Becquerel di tahun 1839 dengan menggunakan perak klorida yang ditaruh ke dalam larutan asam dan disinari cahaya. Selanjutnya, pada tahun 1876, William Grylls Adams melakukan hal serupa dengan menggunakan Selenium. Hasil penelitiannya itu tertuang dalam sebuah buku berjudul “*Solar Heat: A Replacement for Fuel in Tropical Countries for Heating Steam Boilers, and Other Purposes*”, yang merefleksikan pemikiran yang masih relevan hingga saat ini. Di awal tahun 1900-an, Albert Einstein mengungkap efek fotolistrik, yang juga menjadi tonggak untuk pemahaman konsep baru tentang foton. Foton merupakan interpretasi kuantum dari gelombang cahaya, di mana cahaya dipandang sebagai kumpulan paket-paket energi terkuantisasi yang besarnya dinyatakan oleh

$$E = h\nu = h \cdot c / \lambda, \quad (1)$$

di mana  $h$  adalah tetapan Planck,  $c$  adalah tetapan laju cahaya dan  $E$  adalah energi foton, yang besarnya sebanding dengan frekuensi gelombang cahaya ( $\nu$ ) atau berbanding terbalik dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ). Dengan konsep foton ini, proses serapan cahaya dalam bahan, termasuk bahan untuk fotovoltaiik atau sel surya, dapat dipahami dengan lebih baik.

Tonggak perkembangan lain yang tidak kalah pentingnya adalah penemuan bahan semikonduktor. Pemanfaatan bahan semikonduktor menjadi ekspansif setelah demonstrasi transistor silikon oleh fisikawan John Bardeen, Walter Brattain, and William Shockley dari Bell Labs di tahun 1947, yang kemudian dianugerahi hadiah Nobel pada tahun 1956. Dalam bahan

semikonduktor semacam ini terdapat pembawa muatan elektron dan *hole* (lubang). Penyinaran cahaya dapat menggenerasi pembentukan pembawa muatan elektron-*hole* tersebut sehingga terjadi penambahan jumlah pembawa muatan di dalam bahan tersebut. Oleh karena itu, di tahun 1954, Daryl Chapin, Calvin Fuller, dan Gerald Pearson, juga dari Bell Labs, berhasil mengembangkan sel fotovoltaik silikon, yang awalnya hanya menunjukkan efisiensi sekitar 4%, tetapi kemudian berhasil ditingkatkan menjadi 11%. Sejak saat itu, sel surya dan panel surya berkembang pesat, yang didominasi oleh sel surya berbasis bahan semikonduktor silikon ini.

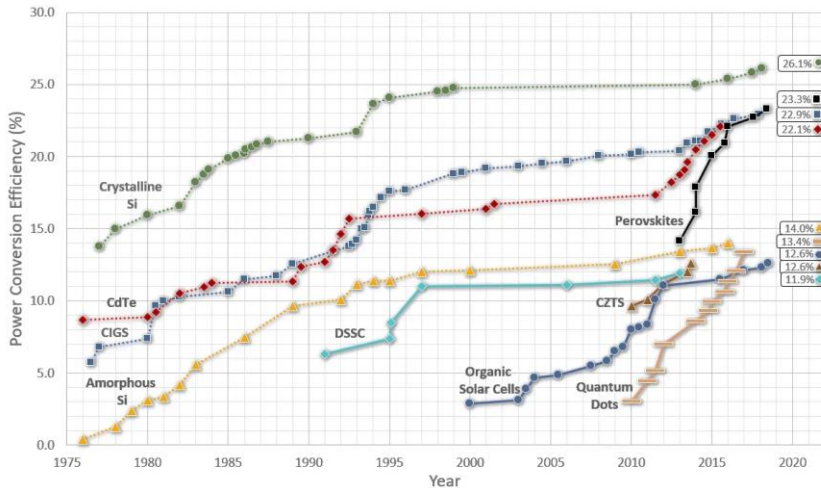
Pada awal perkembangannya, teknologi pembuatan sel surya silikon sangatlah mahal, sehingga sel surya silikon hanya digunakan untuk keperluan khusus seperti satelit dan piranti komunikasi tertentu. Oleh karena itu, banyak penelitian untuk mencari bahan dan teknologi alternatif untuk pembuatan sel surya. Bahan-bahan tersebut ada yang berupa polikristal, nanokristal, polimer, bahan organik dan bahan organik-anorganik lainnya. Dalam perkembangannya hingga saat ini, sel surya dapat dibagi menjadi 3 generasi, yakni

1. Generasi pertama: sel surya yang dibangun dari wafer kristal silikon, baik monokristal maupun polikristalnya.
2. Generasi kedua: dibangun dari bahan semikonduktor anorganik lainnya dengan bentuk lapisan tipis uniform atau lapisan partikel berukuran nanometer, seperti semikonduktor golongan III-IV (seperti Ga-As) dan selenium.
3. Generasi ketiga: dibangun dengan menggunakan bahan organik atau hibrid organik-anorganik dalam bentuk lapisan tipis uniform atau lapisan partikel berukuran nanometer.

Perkembangan generasi kedua dan ketiga sangat terkait dengan perkembangan sains dan teknologi nano, yang memungkinkan pembuatan beragam lapisan nano dan partikel berstruktur nanometer, serta karakterisasi sifat fisika kimia dalam skala nanometer dan nanosekon.

Efisiensi konversi dari ketiga macam generasi sel surya tersebut, untuk prototipe skala laboratorium, dapat dilihat pada **Gambar 3**. Sel surya generasi pertama masih tertinggi dibanding dengan generasi lainnya dan masih yang paling mendominasi di pasar komersial hingga saat ini. Meskipun demikian, besarnya energi dan biaya yang dipergunakan dalam proses produksi sel

surya silikon inilah yang masih menjadi salah satu alasan pengembangan sel surya jenis lainnya tetap berlanjut. Terlepas dari pertimbangan aspek ekonomi dan industri tersebut, upaya pengembangan sel surya jenis lainnya itu telah ikut membangun perkembangan sains dan teknologi material dan karakterisasinya yang impresif dalam beberapa dekade terakhir ini, khususnya pada skala nano baik secara spasial maupun temporal.



**Gambar 3** Top record timeline dari pengembangan sel surya untuk prototipe skala lab (NREL Transforming Energy, 2024).

## 1.2 Prinsip Kerja Sel Surya Secara Umum

Secara umum, prinsip kerja dari ketiga sel surya tersebut terlihat hampir serupa, yakni terdiri atas tiga tahapan:

1. Penyerapan cahaya dan pembentukan pembawa muatan
2. Pemisahan pembawa muatan
3. Ekstraksi pembawa muatan ke kedua elektrodanya (katoda dan anoda)

Keserupaan mekanisme tersebut menghasilkan karakteristik sel surya yang selalu sama, yang bisa didekati dengan rumus umum yang menyatakan hubungan antara arus ( $I$ ) dan tegangan ( $V$ ) yang dihasilkan sel surya, yakni

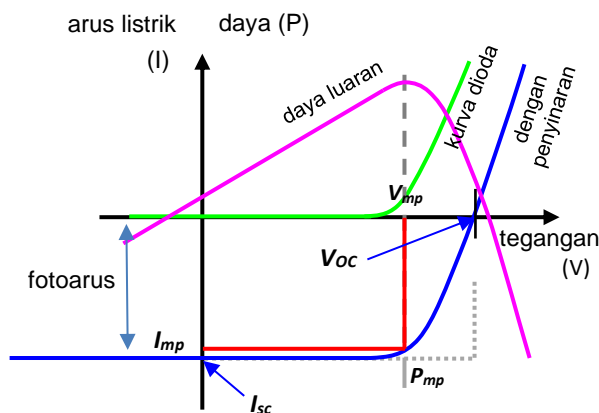
$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

di mana  $I_L$  adalah arus hasil fotogenerasi,  $I_0$  adalah arus saturasi dioda,  $q$  adalah besar muatan pembawa muatan listrik (yakni muatan elektron  $e$ ),  $V$  adalah tegangan sel surya,  $n$  adalah faktor idealitas dioda,  $k$  adalah tetapan

Boltzmann dan  $T$  adalah suhu. Persamaan tersebut mirip dengan persamaan dioda persambungan  $p-n$  Shockley tetapi dengan tambahan satu suku, yakni arus hasil fotogenerasi  $I_L$ . Hal ini dapat terlihat secara gamblang dari ilustrasi pada **Gambar 4**. Kurva karakter dioda bergeser ke bawah sebagai akibat terjadinya pembentukan arus listrik oleh penyerapan cahaya ( $I_L$ ). Pergeseran ke arah negatif menunjukkan bahwa arus tersebut berlawanan arah dengan arus kerja dioda biasa. Beberapa parameter performa sel surya ini adalah tegangan rangkaian buka ( $V_{OC}$ ) dan arus rangkaian tertutup ( $I_{SC}$ ) serta titik daya maksimum ( $P_{mp}$ ). Nilai  $P_{mp}$  dihitung dari perkalian titik tegangan maksimum ( $V_{mp}$ ) dan titik arus maksimum ( $I_{mp}$ ). Parameter arus sering juga dituliskan dalam bentuk rapat arus ( $j$ ). Parameter lainnya adalah efisiensi konversi (*power conversion efficiency*) PCE atau  $\eta$ , yang dapat dihitung dari parameter-parameter di atas, yakni

$$PCE = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (3)$$

di mana  $P_{in}$  adalah daya sinar yang datang dan FF (*filling factor*) adalah ukuran kekotakan kurva ( $<1$ ). Semakin besar nilai PCE (dalam %) sebuah sel surya maka semakin bagus performa sel surya tersebut.



**Gambar 4** Kurva karakteristik sel surya (kurva J-V). Kurva garis hijau: kurva karakteristik dioda (sel surya tanpa disinari), kurva garis biru: kurva karakteristik fotovoltaiik (sel surya saat disinari), kurva garis ungu: kurva daya listrik luaran yang dihasilkan (sel surya saat disinari).

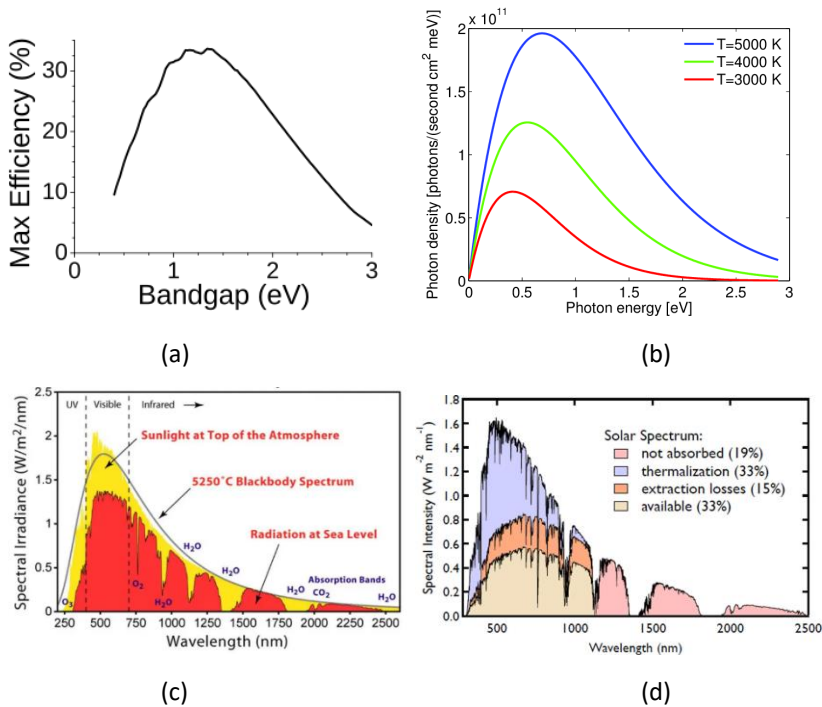
Di balik keserupaan mekanisme umum di atas, sebenarnya ada beberapa perbedaan mendasar terkait pada material yang digunakan. Perbedaan tersebut bergantung bagaimana atom-atom menyusun material tersebut

sehingga ada perbedaan struktur dan karakteristik elektronik serta sifat optiknya. Pada sel surya generasi pertama, bahan aktifnya menggunakan kristal silikon dengan atom-atom Si yang tersusun secara periodik sempurna sehingga terbentuk pita energi, yakni pita valensi (VB) dan pita konduksi (CB), yang lebar yang memungkinkan delokalisasi pembawa muatan (elektron-hole) secara luas. Delokalisasi itu memungkinkan elektron dan hole dapat bergerak secara lincah dan jauh, sehingga panjang difusi elektron dan hole ini bisa mencapai orde mikrometer. Oleh karena itu, sel surya silikon ini bisa dibangun dengan teknologi semikonduktor skala mikron (mikrometer), berbeda dengan teknologi *chip* silikon yang sekarang ini harus berbasis teknologi nano. Untuk sel surya generasi ketiga, bahan tidak tersusun secara teratur dalam skala luas sehingga pembawa muatan lebih terlokalisasi dan jarak transpor menjadi lebih pendek. Bahan polimer terkonjugasi, seperti *polyalkylthiophene* (PAT), yang sering dipakai dalam sel surya polimer, memiliki panjang difusi elektron-hole hanya dalam beberapa ratus nanometer. Oleh karena itu, struktur solar sel yang dibangun harus memiliki ketebalan lapisan aktif hanya dalam beberapa ratus nanometer saja.

Upaya peningkatan performa sel surya ditujukan untuk mengejar melewati batas Shockley-Queisser, yang merupakan batasan teoretis fundamental untuk efisiensi sel surya persambungan tunggal berdasarkan argumen yang dibangun oleh Shockley-Queisser. (Wikipedia, 2024c) Batas Shockley-Queisser ini menunjukkan nilai maksimum efisiensi yang bisa dicapai bergantung pada besar energi celah material aktif sel surya yang digunakan, seperti terlihat pada **Gambar 5** (a). Bentuk kurva batas tersebut sebenarnya menyerupai kurva radiasi benda hitam pada **Gambar 5** (b), akan tetapi bergeser ke energi yang lebih kecil sebagai akibat adanya energi yang hilang karena efek termal dan rekombinasi rugi pada saat penyerapan cahaya oleh bahan semikonduktor silikon dan sejenisnya. Bentuk kurva radiasi benda hitam ini tentunya mirip dengan spektrum sinar matahari (**Gambar 5** (b)). Untuk melewati batas Shockley-Queisser ini, ada beberapa kondisi utama yang harus terpenuhi, yakni

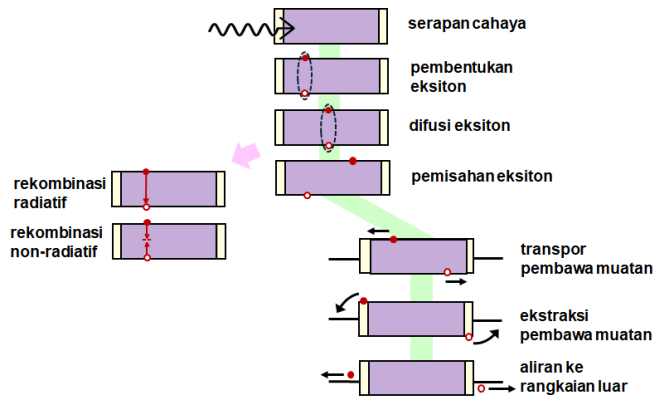
- Spektrum serapan cahaya yang lebih lebar,
- proses rekombinasi non-radiatif yang sangat kecil,
- mobilitas pembawa muatan yang tinggi,
- kontak/persambungan yang sempurna, dan
- tidak ada efek pemantulan cahaya.





**Gambar 5** Kurva batas efisiensi sel surya menurut Shockley-Quessier. (b) Spektrum radiasi emisi benda hitam. (c) Spektrum sinar matahari di lapisan luar atmosfer (warna kuning) dan permukaan bumi (warna merah oranye). (d) Porsi dari spektrum energi foton dari sinar matahari yang tidak dapat dan tidak efektif diserap oleh sel surya silikon. (Smith, 2010; Wikipedia, 2024c, 2024d, 2024e)

Pada bahan semikonduktor kristal seperti silikon, upaya meningkatkan serapan cahaya di daerah cahaya tampak dengan efek rekombinasi non-radiatif yang sangat kecil ternyata tidaklah mudah. Secara konseptual, hal ini dapat dilakukan dengan mengubah celah pita energi. Akan tetapi, untuk dapat mengubah celah pita energi maka harus mengubah tetapan kisi atau ukuran sel satuannya, yang harus ditempuh dengan membangun kristal paduan. Pembentukan kristal paduan sangat selektif terbatas oleh faktor kecocokan dengan ukuran atom dan jarak antar atom penyusunnya. Di sisi lain, bahan-bahan organik ataupun nanokristal memiliki kemungkinan lebih besar untuk dibuat beberapa variannya dengan besar celah pita energi yang berbeda-beda. Fleksibilitas untuk melakukan modifikasi struktur molekul dan nanokristal inilah yang mendukung salah satu faktor pendukung pengembangan sel surya generasi ketiga.



**Gambar 6** Tahapan proses optik dan elektronik yang terjadi di dalam sel surya. Jalur sebelah kiri menggambarkan rekombinasi radiatif dan non-radiatif yang merupakan rekombinasi rugi.

Secara garis besar, proses konversi cahaya menjadi listrik terjadi melalui beberapa tahapan proses, seperti terlihat dalam **Gambar 6**, yakni:

1. Penyerapan cahaya,
2. pembentukan pasangan elektron-hole atau eksiton,
3. difusi pasangan elektron-hole atau eksiton,
4. pemisahan pasangan elektron-hole atau eksiton,
5. transpor masing-masing elektron dan hole, dan
6. ekstraksi masing-masing elektron dan hole.

Masing-masing tahap tersebut harus terjadi secara efisien agar diperoleh konversi efisiensi (PCE) maksimum, yang terkait dengan proses-proses di atas setara dengan efisiensi kuantum eksternal ( $\eta_{EQE}$ )

$$\eta_{EQE} = \eta_A \eta_{IQE} = \eta_A \eta_{diff} \eta_{diss} \eta_{CC} \quad (4)$$

di mana  $\eta_A$  adalah efisiensi absorpsi foton menghasilkan pasangan elektron-hole atau eksiton, proses (1-2) di atas,  $\eta_{IQE}$  adalah efisiensi kuantum internal,  $\eta_{diff}$  adalah efisiensi difusi eksiton,  $\eta_{diss}$  adalah efisiensi pemisahan eksiton dan  $\eta_{CC}$  adalah efisiensi pengumpulan dan ekstraksi pembawa muatan pada kedua elektrodanya. Efisiensi kuantum internal bergantung pada efisiensi proses tahap (3), (4) dan (5-6) di atas. Dalam sel surya silikon, tahap (3) dan (4) tidak terlalu menjadi masalah karena pasangan elektron-hole dapat terpisah secara spontan bahkan pada kristal silikon intrinsik.

## 2 SEL SURYA POLIMER DAN SEL SURYA TERSENSITISASI PEWARNA (DSSC)

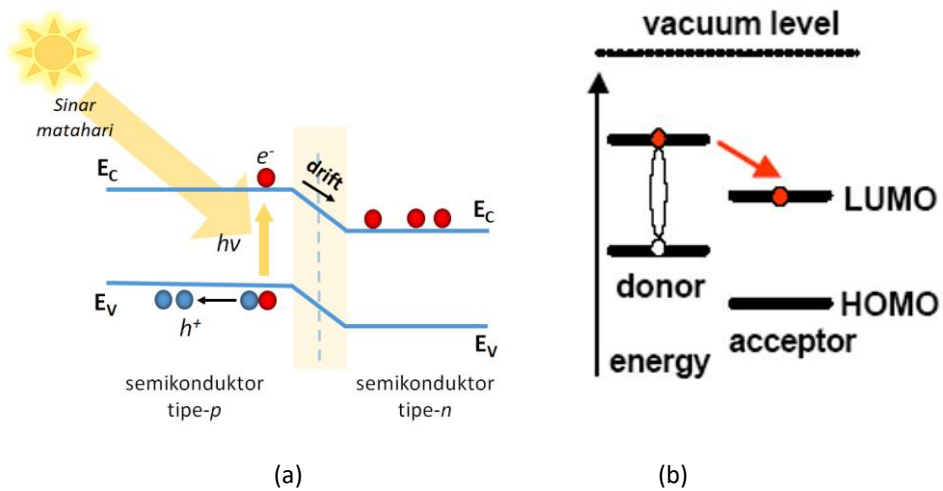
Seperti telah disampaikan pada bab sebelumnya, perkembangan sel surya sampai saat ini telah menghasilkan berbagai macam sel surya yang dapat dikelompokkan menjadi 3 generasi. Sesuai dengan riwayat penelitian yang telah dilakukan oleh penulis, maka tulisan ini akan memaparkan secara singkat beberapa hal dari perkembangan sel surya generasi ketiga dan itupun terbatas hanya untuk beberapa tipe saja, yakni sel surya polimer, sel surya tersensitisasi pewarna (DSSC) dan sel surya perovskit. Sel surya polimer merupakan bagian dari sel surya organik atau yang sering disebut sebagai *organic photovoltaic (OPV) solar cells*. OPV merujuk pada penggunaan bahan aktif berbasis bahan organik, baik dalam bentuk molekul kecil maupun molekul besar seperti polimer.

### 2.1 Sel Surya Polimer

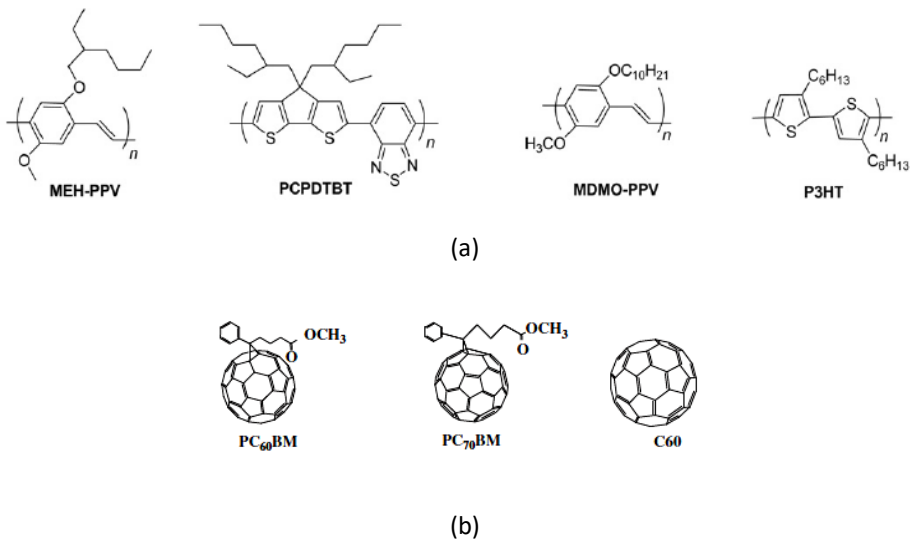
Sel surya polimer dibuat dengan lapisan aktif utama dari bahan polimer. Polimer atau plastik banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari sebagai bahan insulator, seperti *polyvinyl chloride (PVC)* dan *polymethyl methacrylate (PMMA)*. Akan tetapi, polimer yang digunakan dalam sel surya jenis ini polimer konduktif (*conducting polymer*), yang berbasis pada polimer terkonjugasi (*conjugated polymer*). Polimer terkonjugasi terbentuk dari rantai dengan susunan selang seling ikat tunggal dan rangkap. Hal itulah yang membedakan bentuk rantai polimer terkonjugasi dengan polimer lainnya. Polimer terkonjugasi awalnya dikembangkan oleh Alan MacDiarmid dan Hideki Shirakawa pada tahun 1977 yang berhasil mensintesis poliasetilena dan melaporkan konduktivitas listrik yang tinggi dalam keadaan teroksidasi saat didoping iodium. Bersama-sama dengan Alan J Heeger, sifat konduktivitas listrik tersebut dikaitkan dengan kehadiran soliton dan polaron sebagai pembawa muatan listriknya. Ketiganya dianugerahi Penghargaan Nobel Kimia tahun 2000 atas penemuan dan pengembangan polimer konduktif itu. (The Nobel Prize, 2000) Hingga kini lebih dari puluhan jenis polimer terkonjugasi dan ratusan turunannya telah dikembangkan dan beberapa di antaranya memiliki kemampuan untuk digunakan sebagai lapisan aktif sel surya.

## 2.2 Sifat Polimer Terkonjugasi dan Prinsip Donor-Akseptor dalam Proses Pemisahan Eksiton

Dalam sel surya silikon, pemisahan pembawa muatan terjadi pada daerah persambungan, yang bentuk paling sederhananya berupa persambungan  $p-n$ . Dalam sel surya polimer, secara sederhana kita juga bisa memandang adanya pembentukan persambungan  $p-n$ , seperti dalam sel surya silikon (**Gambar 7.(a)**). Akan tetapi, karena di dalam polimer terkonjugasi jumlah rapat pembawa muatan intrinsik jauh lebih sedikit, maka tidak terjadi adanya penyesuaian pita (*band alignment*) dan pembentukan daerah deplesi. Oleh karena itu, pada sistem sel surya polimer lebih sering digunakan model transfer muatan dari donor (D) ke akseptor (A), seperti diilustrasikan oleh **Gambar 7 (b)**. Saat ini, banyak pilihan untuk donor dan akseptor, yang beberapa di antaranya ditunjukkan pada **Gambar 8**. Polimer terkonjugasi memiliki struktur pita energi yang membentuk pita valensi (VB) dan pita konduksi (CB). Polimer terkonjugasi ini bisa berperan sebagai donor ataupun akseptor. Pasangan polimer terkonjugasi ini dapat juga berupa molekul kecil, molekul karbon, seperti *fullerene* (C<sub>60</sub>), atau makromolekul lainnya. Untuk sistem molekul, tingkat energi yang terkait adalah tingkat energi orbital molekul terisi tertinggi (*highest occupied molecular orbital* (HOMO)) dan tingkat energi orbital molekul tak-terisi terendah (*lowest unoccupied molecular orbital* (LUMO)). Sinar cahaya (foton) yang diserap oleh donor menghasilkan eksitasi elektron dari pita valensi polimer terkonjugasi ke pita konduksinya, yang kemudian elektron itu harus ditransferkan ke pita konduksi (atau LUMO) dari akseptor. Dengan demikian, dapat terjadi pemisahan eksiton menjadi dua pembawa muatan listrik terpisah, elektron pada pita konduksi atau LUMO dan *hole* pada pita valensi atau HOMO.



**Gambar 7** (a) Ilustrasi persambungan p-n pada bahan kristal silikon dan mekanisme pemisahan pembawa muatannya. (b) Ilustrasi pembentukan persambungan antara dua bahan yang berperan pasangan sebagai donor (D) dan akseptor (A) dengan proses transfer elektron untuk menghasilkan pemisahan pembawa muatan.

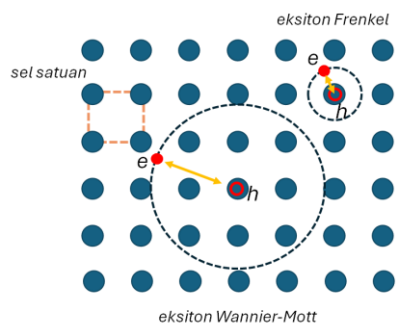


**Gambar 8** (a) Contoh beberapa jenis polimer terkonjugasi yang bisa dipakai sebagai donor (D). (b) Contoh molekul fullerene yang dapat dipakai sebagai akseptor (A).

Selain perbedaan mekanisme pemisahan pembawa muatan listrik bebas di atas, ada pula perbedaan karakteristik eksiton pada kristal silikon dan polimer terkonjugasi. Sesaat setelah terjadi penyerapan foton (fotoeksitasi), keadaan tereksitasi membentuk pasangan sebuah elektron berada di pita

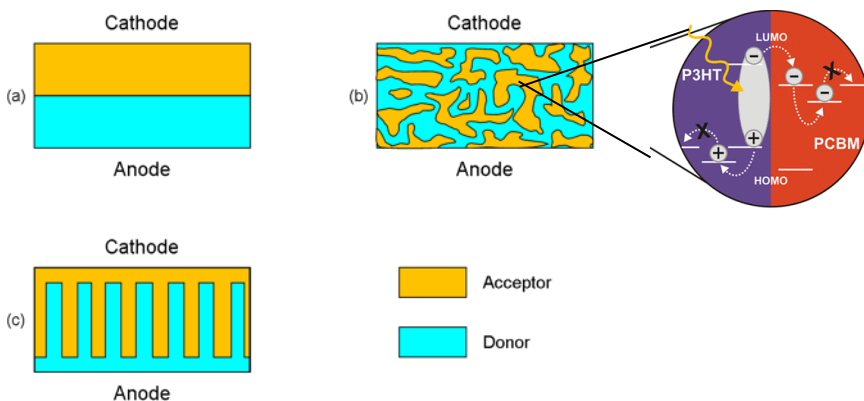
konduksi dan sebuah *hole* di pita valensi. Pasangan ini dapat terpengaruh oleh gaya Coulomb dari perbedaan muatan listrik di antara mereka sendiri. Gaya Coulomb ini menghasilkan pasangan elektron-*hole* terikat, yang sering dipandang sebagai kuasi-partikel yang disebut sebagai eksiton. Pada kristal silikon, energi ikat eksiton ini sangatlah kecil sekitar 14 meV dan membentuk eksiton Wannier-Mott dengan jejari Bohr yang relatif besar sekitar ~5 nm. (Alex, dkk., 1996; Canham, 2020; Koch, dkk., 2006; Kole dan Chaudhuri, 2014) Besar energi ikat eksiton ini masih lebih kecil dari energi fononnya, sekitar 18 - 58 meV, sehingga eksiton hasil fotoeksitasi dapat mengalami disosiasi secara spontan menghasilkan elektron dan hole yang bebas (Canham, 2020).

Pada bahan semikonduktor organik, termasuk polimer terkonjugasi, penyerapan energi cahaya / foton akan menghasilkan eksiton, berbentuk Frenkel eksiton, dengan energi ikat yang besar ( $> 0.1$  eV). Energi ikat yang besar ini dikarenakan jarak antara elektron dan hole yang kecil, yang tidak lebih besar dari jarak antar atom penyusunnya (konstanta kisi). Eksiton ini membentuk eksiton Frenkel, seperti diilustrasikan pada **Gambar 9**, sehingga tidak selincah eksiton dalam silikon. Selain itu, karena sifat rantai polimer yang lunak dan fleksibel, kehadiran eksiton itu sendiri menimbulkan medan elektrik lokal yang mengakibatkan polarisasi lokal dan distorsi kisi atau ikatan di sekitarnya. Akan tetapi distorsi itu justru membuat eksiton turun ke tingkat energi yang lebih rendah sehingga eksiton lebih stabil tetapi lebih sulit berdifusi. Eksiton yang berada dalam keadaan seperti ini disebut sebagai eksiton polaron.



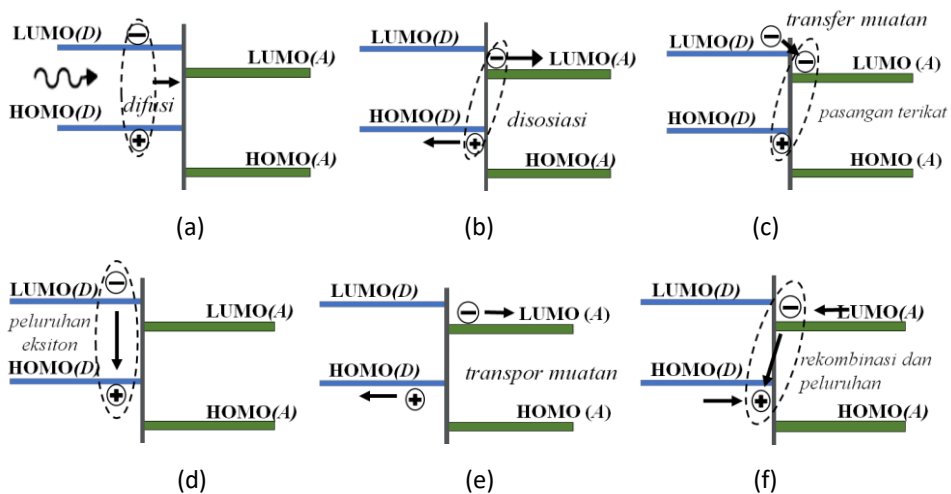
**Gambar 9** Ilustrasi pembentukan eksiton (pasangan elektron-hole) pada bahan semikonduktor kristalin: eksiton Wannier-Mott, yang muncul dalam bahan dengan struktur kristal tinggi, dan eksiton Frenkel, yang muncul dalam bahan organik dan polimer terkonjugasi (bahan amorf).

Dengan karakteristik struktur elektronik dan eksiton seperti itu, maka pemisahan eksiton harus dilakukan dengan cara yang berbeda dari yang di dalam silikon sel surya. Kontak antara polimer terkonjugasi, sebagai donor, dan bahan lain, sebagai akseptornya, harus tersebar secara merata dalam lapisan aktif sel surya. Oleh karena itu, untuk sel surya polimer, arsitektur struktur persambungan hetero (*heterojunction structure*), seperti diilustrasikan oleh **Gambar 10**, merupakan struktur yang lebih populer dibandingkan struktur lapis jamak. Sebagai contoh, untuk sel surya polimer berbasis poli(3-hexiltiofen) (P3HT) biasanya akan dipasangkan dengan salah satu jenis *fullerene* ( $C_{60}$ ), yakni *phenyl-C61-butyric acid methyl ester* (PCBM) sebagai pasangan akseptornya. Seperti terlihat dalam ilustrasi **Gambar 10**, ada selisih tingkat energi pita valensi (atau HOMO) dan pita konduksi (atau LUMO) dari P3HT dan PCBM. Setelah terjadi serapan cahaya oleh P3HT, elektron tereksitasi dari pita valensi (VB atau LUMO) ke pita konduksi (CB atau LUMO) dan elektron tersebut kemudian ditransferkan ke pita konduksi PCBM. Dengan kondisi seperti ini dapat terjadi secara efektif pemisahan eksiton menjadi elektron dan *hole* yang terpisah. Peristiwa ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat hanya dalam beberapa puluh femto sekon hingga beberapa pikosekon. (Rana dkk., 2020) Proses ini dapat terlihat dengan jelas dari hasil studi *femtosecond transient absorption spectroscopy*, yang dilaporkan sekitar 30 tahun lebih semenjak fenomena fotoinduksi transfer muatan ini pertama kali dilaporkan (Sariciftci, dkk., 1992).



**Gambar 10** Arsitektur struktur solar cell berbentuk (a) persambungan planar, (b) interdigitized junction dan (c) persambungan bulk hetero (bulk hetero-junction). (Wikipedia, 2024b)

Arsitektur struktur sel surya dirancang agar dapat menghasilkan efisiensi konversi semaksimal mungkin, yang dinyatakan oleh Persamaan (4). Dalam struktur donor-akseptor, donor, dan akseptor dipilih sehingga memiliki perbedaan struktur tingkat energi seperti diilustrasikan pada **Gambar 11**, sehingga dapat terjadi pemisahan eksiton. Akan tetapi, proses tersebut dapat pula dibarengi dengan proses kompetitif lainnya, seperti rekombinasi pasangan (*geminate recombination*), rekombinasi bimolekular, dan rekombinasi Langevin baik di lapisan donor/akseptor dan persambungannya (**Gambar 11**.(e) dan (f)).

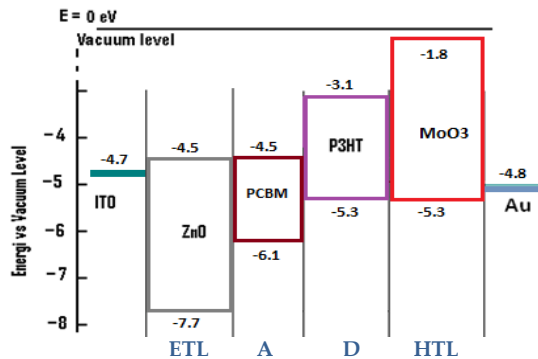


**Gambar 11** (a) Proses generasi eksiton akibat penyerapan foton. (b) proses transfer eksiton sebelum mengalami (c) disosiasi (pemisahan), (d) eksiton menjadi elektron dan hole bebas dan bergerak menuju ke elektroda, ataupun dapat mengalami (e) rekombinasi sebelum ataupun (f) sesudah disosiasi eksiton terjadi (Scharber dkk., 2006).

Selain rekombinasi rugi di atas, perlu juga dihindari terjadinya rekombinasi bimolekular pada bidang batas dengan elektroda, di mana elektron dari pita konduksi yang telah ditarik ke elektroda (logam) kembali ke dalam lapisan karena berekombinasi dengan hole di pita valensi. Proses ini merupakan rekombinasi rugi karena elektron dan hole gagal diekstrak keluar sel, sehingga efisiensi konversi menjadi turun. Untuk menghindari ini, biasanya disisipkan lapisan pemblok *hole*, atau lapisan transpor elektron (ETL), dan lapisan pemblok elektron, atau lapisan transpor hole (HTL). Sebagai contoh, struktur sel surya secara lengkap dapat berbentuk seperti pada **Gambar 12** dengan ZnO sebagai lapisan ETL dan MoO<sub>3</sub> sebagai lapisan HTL. Ada beberapa macam pilihan bahan aktif yang mungkin, termasuk



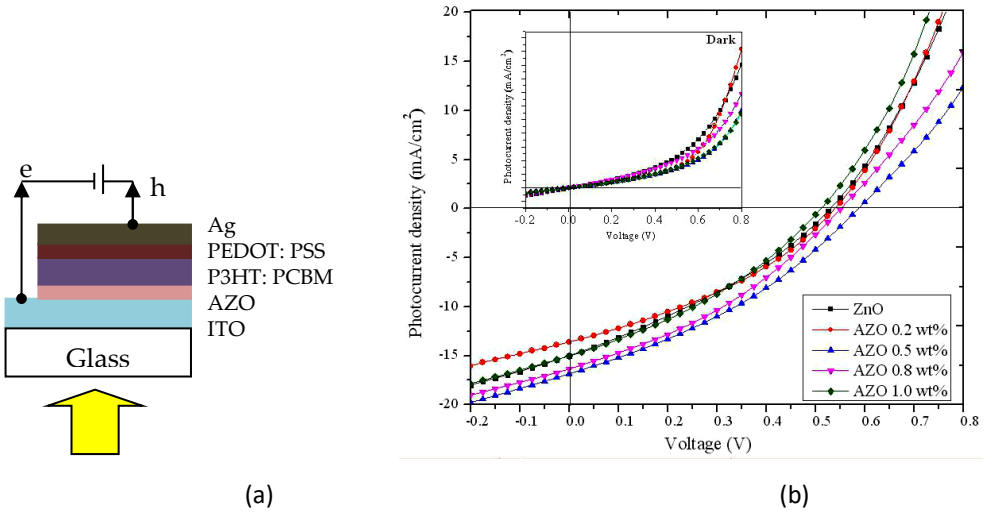
untuk lapisan ETL dan HTL, yang dipilih sesuai dengan kecocokan diagram pita energi yang terbaik. Pemilihan bahan biasanya juga ditentukan oleh faktor solubilitas dan kecocokan dengan proses fabrikasi yang dilakukan.



**Gambar 12** Diagram pita energi pada sel surya polimer, sebagai contoh, dengan lapisan ETL dari ZnO dan HTL dari MoO<sub>3</sub>.

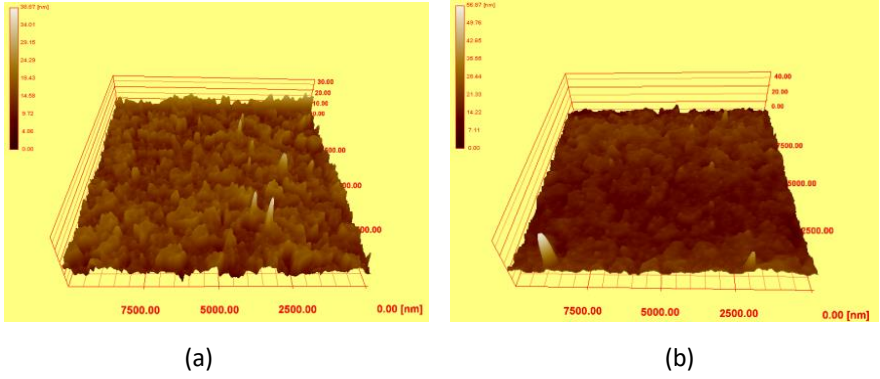
### 2.3 Efek Morfologi Permukaan dan Rekombinasi Rugi pada Karakteristik Sel Surya Polimer

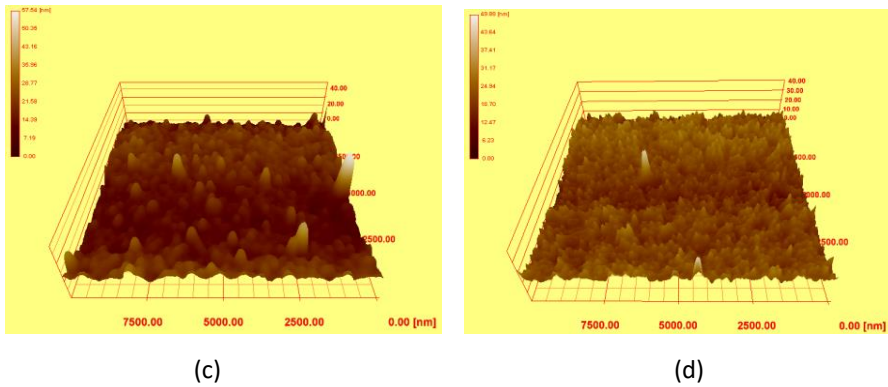
ZnO banyak digunakan untuk ETL karena tingkat energi pita konduksinya (CB) dengan tingkat energi LUMO dari akseptor dari jenis *fullerene*, sedangkan tingkat energi pita valensinya (VB) sangat rendah sehingga dapat memblokir hole dengan efektif. Untuk mengurangi efek rekombinasi rugi yang terjadi pada lapisan ETL ZnO ini, telah dilakukan kajian untuk melihat bagaimana efek tersebut dapat dikurangi dengan mendoping lapisan ZnO-nya. (Aprilia dkk., 2013) Proses ini dapat dilakukan melalui pembuatan lapisan ZnO dengan metode sol-gel, dengan pelarut *methoxyethanol* dan pemberian dopan Al. Lapisan ini disebut sebagai AZO, yakni *Aluminum doped ZnO*. **Gambar 13** (a) menunjukkan struktur dari devais sel surya yang dibuat, yang merupakan struktur sel surya terbalik. **Gambar 13** (b) menunjukkan karakteristik kurva J-V yang menunjukkan adanya peningkatan rapat fotoarus, di mana nilai terbesar diperoleh untuk sel surya dengan lapisan AZO yang terdoping Al sebesar 0.5wt%.



**Gambar 13** (a) Diagram skematik arsitektur struktur persambungan bulk terbalik yang terdiri atas ITO/AZO/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag. (b) Kurva karakteristik J-V dari sel tersebut di mana efisiensi maksimum dicapai oleh divais yang menggunakan AZO 0.5wt%. (Aprilia dkk., 2013)

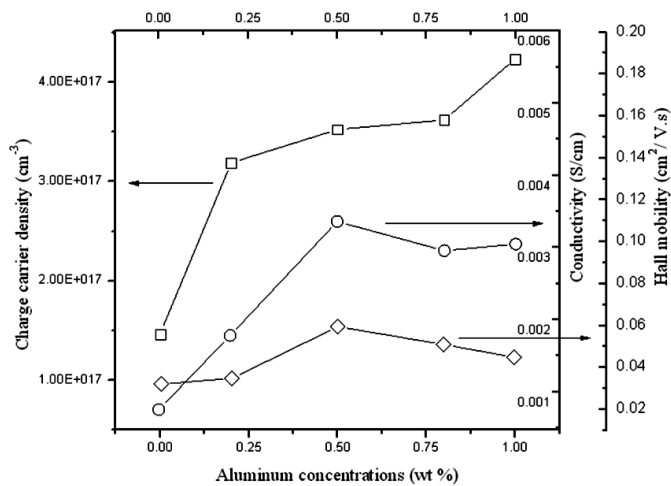
Kajian melalui karakterisasi difraksi sinar-X (*x-ray diffraction*, XRD) dan mikroskopi gaya atomik (*atomic force microscopy*, AFM) menunjukkan bahwa penambahan doping Al dalam proses sintesis sol-gel menghasilkan morfologi permukaan yang lebih uniform dan halus, seperti terlihat pada **Gambar 14**. Hasil ini menunjukkan bahwa morfologi lapisan ZnO pada skala nano dapat memengaruhi rekombinasi rugi pada bidang batas AZO/P3HT:PCBM.





**Gambar 14** Hasil pemindaian *Atomic Force Microscope* (AFM), untuk Aluminum doped ZnO dengan menggunakan pelarut methoxyethanol (a) ITO only, and (b) AZO-0,5 wt%, (c) 0,8 wt %, and (d) 1 wt% (Aprilia dkk., 2013).

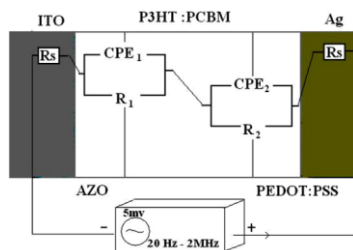
Di bidang sel surya, banyak metode karakterisasi untuk mengkaji karakteristik transpor pembawa muatan di dalam sel. Salah satunya adalah dengan pengukuran efek Hall. Melalui pengukuran ini dapat diketahui bahwa peningkatan kadar dopan Al menghasilkan peningkatan rapat pembawa muatan, mobilitas Hall dan konduktivitas, dengan nilai optimum terjadi pada kadar dopan 0.5wt% (**Gambar 15**).



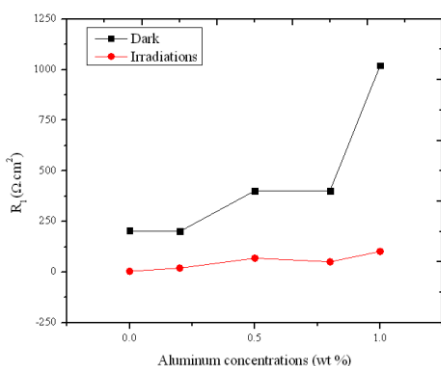
**Gambar 15** Hasil pengukuran Efek Hall pada lapisan AZO yang dibuat dengan metode sol-gel dengan pelarut *methoxyethanol*. (Aprilia dkk., 2013)

Akan tetapi, seperti telah disinggung sebelumnya, performansi sel suryanya tidak hanya bergantung pada besar hambatan Ohmik-nya saja, tetapi juga pada besar hambatan yang terkait dengan proses transfer muatannya ( $R_{CT}$ ), yang memiliki dua komponen yang berbeda:

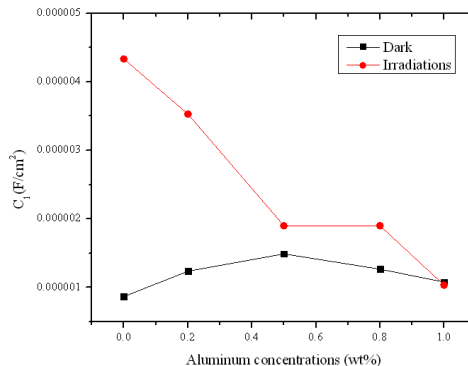
- Transfer muatan yang terkait dengan proses ekstraksi elektron/*hole* ke luar sel, di mana semakin kecil nilai  $R_{CT}$  akan semakin bagus, dan
- transfer muatan yang terkait dengan proses rekombinasi rugi (elektron/*hole* kembali ke dalam sel), di mana semakin besar nilai  $R_{CT}$  akan semakin bagus.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 16** (a) Rangkaian ekuivalen pada persambungan bulk P3HT:PCBM, kombinasi paralel CPE1 dan R1 merupakan impedansi pada persambungan AZO/P3HT:PCBM, sedangkan nilai CPE2 dan R2 adalah persambungan P3HT:PCBM/PEDOT:PSS.  $R_s$  adalah hambatan Ohmik dari lapisan elektroda. (b) Nilai resistansi  $R_1$  dan (c) kapasitansi  $C_1$  yang diperoleh dari hasil fitting kurva semi lingkaran dari hasil pengukuran sel surya polimer ini (Aprilia dkk., 2013).

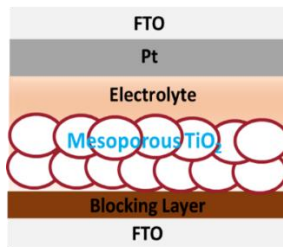
Salah satu metode karakterisasi sederhana untuk mengkaji hal itu adalah dengan pengukuran spektroskopi impedansi, yang dikenal dengan nama spektroskopi impedansi elektrokimia (*electrochemical impedance spectroscopy* (EIS)). (Sarker dkk., 2014) Pengukuran impedansi ini mirip seperti pengukuran impedansi kapasitor, tetapi instrumen yang digunakan dapat juga menimbulkan injeksi atau ekstraksi elektron pada piranti yang diuji dan tidak sekedar hanya menimbulkan polarisasi muatan. Struktur sel surya

polimer tadi dapat dipandang sebagai dua rangkaian RC yang menggambarkan proses elektronik pada daerah persambungan AZO/P3HT:PCBM dan P3HT:PCBM/PEDOT:PSS, seperti diilustrasikan oleh **Gambar 16**. Hasil karakteristik impedansi menunjukkan nilai  $R_1$  dan  $C_1$  yang berubah terhadap kadar konsentrasi dopan Al, sedangkan  $R_2$  dan  $C_2$  relatif tidak berubah (tidak ditampilkan pada tulisan, dapat dilihat di (Aprilia dkk., 2013)). Membesarnya  $R_1$  terhadap peningkatan kadar dopan menunjukkan bahwa hambatan rekombinasi rugi menjadi semakin besar. Di sisi lain,  $C_1$  mengecil terhadap kadar dopan Al sebagai indikasi bahwa kadar keadaan perangkat permukaan (*surface trap states*) semakin berkurang. Kombinasi dari kedua perubahan tersebut membuat rekombinasi rugi dapat ditekan, yang memberikan efek positif pada performansi sel surya dengan kadar dopan Al di 0.5wt%.

## 2.4 Sel Surya Tersensitisasi Pewarna (DSSC)

Sel surya tersensitisasi pewarna, yang dikenal sebagai *dye sensitized solar cells* (DSSC), merupakan sel surya yang menggunakan pewarna atau molekul organik kecil sebagai penyerap cahayanya. Berbeda dengan sel surya polimer, pewarna atau molekul organik kecil ini tidak memiliki kemampuan menghantarkan elektron dengan baik, sehingga setiap molekul pewarna harus terdistribusi dan kontak secara langsung pada akseptor, yang memiliki kemampuan pengantaran atau transpor elektron lebih baik. Bahan sebagai akseptor yang sering dipakai biasanya logam oksida  $\text{TiO}_2$ . Berbagai logam oksida lainnya seperti  $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$  dll. juga telah banyak dikaji. Perbedaan lain yang mencolok dibanding sel surya jenis lainnya adalah penggunaan elektrolit. Elektrolit diperlukan untuk mengantarkan elektron (terlihat sebagai aliran muatan positif dalam rangkaian listrik) guna menetralkan kembali pewarna yang telah kehilangan elektron. Secara umum, bentuk sel DSSC sederhana tersusun dari:

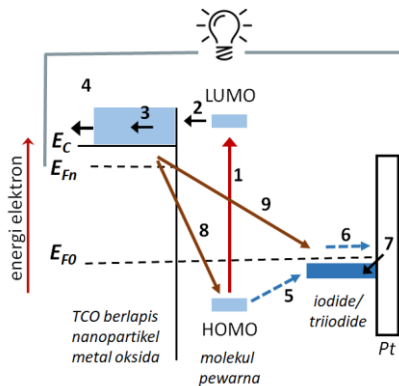
- 1) substrat konduktif transparan *fluorine doped tin oxide* (FTO),
- 2) nanopartikel logam oksida semikonduktor, seperti nanopartikel  $\text{TiO}_2$ ,
- 3) *dye* atau pewarna DSSC,
- 4) elektrolit, dan
- 5) dan elektroda mitra (*counter electrode*).



**Gambar 17** Struktur sel surya tersensitisasi pewarna (DSSC) sederhana.

Komponen-komponen di atas disusun secara berlapis membentuk susunan seperti pada **Gambar 17**, di mana elektrolit mengisi ruang di antara elektroda aktif dan elektroda mitra. Elektroda aktif atau fotoanoda terbentuk dari ketiga komponen pertama di atas (1-3), yakni substrat konduktif (1) yang dilapisi dengan mesopori nanopartikel logam oksida (2) dan kemudian direndam ke dalam larutan pewarna (3). Struktur mesopori diperlukan agar pewarna dapat menyisip ke dalam rongga-rongga di antaranya dan meningkatkan peluang kontak langsung antara molekul pewarna dan nanopartikel logam oksida. Syarat utama pewarna yang bagus adalah yang dapat menyerap spektrum sinar cahaya matahari pada rentang panjang gelombang selebar-lebarnya. Saat ini banyak ragam pewarna yang telah dikembangkan untuk sel DSSC ini. Akan tetapi, pewarna jenis ini berbeda dari kebanyakan pewarna yang dikenal dalam industri tekstil, cat, dan makanan. Pewarna untuk keperluan DSSC harus mampu menghasilkan keadaan tereksitasi yang relatif stabil sebelum relaksasi kembali ke keadaan dasar sehingga elektron yang tereksitasi ke LUMO dapat ditransferkan ke akseptor. Sebagai contoh, pewarna rodamin yang banyak digunakan sebagai pewarna dalam industri tekstil memiliki serapan cahaya yang tinggi tetapi tidak bisa digunakan untuk DSSC. Untuk elektroda mitra umumnya dibuat dari lapisan Pt atau bahan karbon, seperti grafena dan *carbon nanotube*, pada substrat FTO.

## 2.5 Prinsip Kerja dan Bahan-Bahan Aktif Sel Surya DSSC

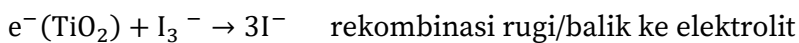
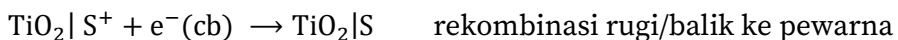
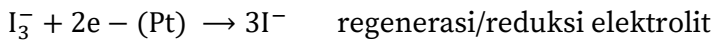
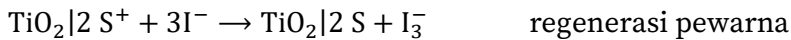
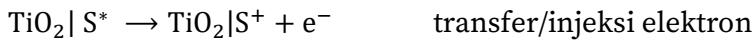
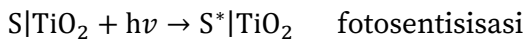


**Gambar 18** Prinsip kerja dari sel surya DSSC dari mulai proses serapan cahaya atau fotoeksitasi hingga proses eksitasi.

**Gambar 17** menunjukkan contoh tipikal dari struktur DSSC yang tersusun dari TCO/mesopori-TiO<sub>2</sub>/pewarna/elektrolit/Pt/FTO. Prinsip kerja dari sel DSSC ini dapat dipahami dengan merujuk pada **Gambar 18**.  $E_c$  adalah tingkat energi terendah dari pita konduksi logam oksida,  $E_{F0}$  adalah tingkat energi Fermi dari akseptor (TiO<sub>2</sub>) pada keadaan tanpa penyinaran, sedangkan  $E_{Fn}$  adalah tingkat energi Fermi pada saat penyinaran (setelah akseptor (TiO<sub>2</sub>) menampung elektron dari pewarna). Secara sederhana, tegangan sel surya yang muncul berasal dari selisih tingkat energi  $E_{Fn}$  dengan tingkat energi redoks elektrolit. Keseluruhan proses konversi energi cahaya ke listrik ini terdiri atas beberapa tahapan, seperti terlihat pada **Gambar 18**, yakni:

1. Fotoeksitasi yang terjadi pada molekul pewarna melalui penyerapan cahaya (foton),
2. Proses transfer elektron dari LUMO pewarna ke logam oksida (dalam hal ini TiO<sub>2</sub>),
3. Proses difusi elektron di dalam lapisan mesopori TiO<sub>2</sub> akibat adanya gradien konsentrasi elektron,
4. Injeksi elektron ke TCO dan ekstraksi muatan ke luar sel,
5. Regenerasi pewarna melalui proses transfer elektron (oksidasi) dari elektrolit ke HOMO pewarna setelah pewarna kehilangan elektronnya,
6. Difusi ion elektrolit,
7. Proses reduksi elektrolit pada elektroda mitra (misalnya Pt),
8. Proses rekombinasi rugi elektron kembali ke pewarna, dan
9. Proses rekombinasi rugi elektron kembali ke elektrolit.

Keseluruhan mekanisme di atas melibatkan proses transfer muatan, termasuk reaksi reduksi-oksidasi, yang berupa (untuk DDSC dengan elektrolit berbasis pasangan redoks  $I^-/I_3^-$ ):



Terlihat bahwa proses konversi cahaya (foton) menjadi listrik pada DSSC ini merupakan proses berantai yang kompleks, yang melibatkan proses dengan domain waktu yang berbeda jauh. Proses absorpsi terjadi pada domain waktu femtosekon (fs), proses transfer elektron ke pita konduksi  $TiO_2$  terjadi pada rentang sekitar puluhan fs hingga puluhan pikosekon (ps), dan proses regenerasi pewarna oleh elektrolit dalam kisaran puluhan nanosekon (ns). Akan tetapi, proses reduksi-oksidasi pasangan redoks iodide/tri-iodide di dalam elektrolit dan proses transpor ionnya merupakan proses yang lambat di kisaran mikrosekon hingga milisekon.

Beragam bahan aktif telah dikembangkan untuk digunakan sebagai komponen elemen pembentuk DSSC, sehingga tidak mungkin dipaparkan secara menyeluruh dalam tulisan ini. Banyak makalah *review* dan *handbook* yang membahas hal ini secara komprehensif. Dalam tulisan ini hanya akan disinggung secara ringkas beberapa aspek dan perkembangan penting yang terkait dengan kegiatan penelitian yang telah dilakukan.

#### 1. Substrat transparan konduktif

Substrat transparan konduktif biasanya terbuat dari lapisan logam oksida berupa *fluorine tin oxide* (FTO) atau *indium tin oxide* (ITO), yang termasuk kategori *transparent conducting oxide* (TCO). Keduanya sering dipergunakan karena memiliki transparansi tinggi lebih dari 80%, hambatan listrik yang cukup rendah, sekitar  $10\text{-}50 \Omega/\text{cm}^2$ , dan tingkat energi Fermi yang cocok dengan tingkat pita konduksi logam oksida. Beberapa jenis elektroda transparan lainnya juga telah dikembangkan,



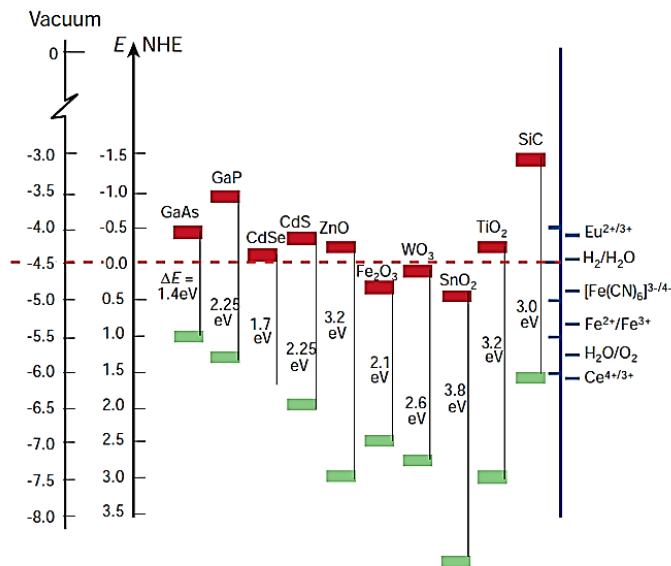
seperti bahan karbon nanotabung, nanoserat dan grafena. Lapisan-lapisan tersebut tidak hanya dideposisikan pada gelas, tetapi bisa juga pada medium transparan lainnya seperti plastik sehingga dapat membentuk DSSC fleksibel.

## 2. Semikonduktor Logam Oksida

Bahan semikonduktor logam oksida, seperti  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  dan  $\text{SnO}_2$ , banyak digunakan sebagai matriks/*host* dan sekaligus pasangan akseptor bagi pewarna. (Borbón dkk., 2021) Lapisan logam oksida yang telah diberi pewarna disebut juga sebagai fotoanoda. Pemilihan bahan ini didasarkan pada kemampuan mengadsorpsi pewarna, kecocokan tingkat energi pita konduksinya dengan tingkat energi LUMO dari pewarna, dan mobilitas elektron yang cukup untuk menghantarkan elektron dari pewarna ke substrat konduktif, selain sifat transparansinya yang cukup baik. Selain itu, tingkat energi pita valensi yang sangat rendah dapat menghindari terjadinya reduksi-oksida elektrolit dan rekombinasi rugi lainnya. Hal penting lainnya yang penting adalah kemampuan sifat katalitiknya, yang terkait dengan kemampuan menarik dan menerima elektron hasil fotoeksitasi pada pewarna. Sifat katalitik ini akan muncul secara efektif jika partikel logam oksida ini berukuran nanometer dengan bentuk struktur kristal tertentu, sehingga tidak semua bubuk logam oksida dapat dipergunakan. Oleh karena itu, selain untuk memperbesar luas penampang adsorpsi, banyak upaya untuk meningkatkan kemampuan katalitik dan transpor elektron dengan mengembangkan beragam struktur nano logam oksida tersebut, baik berbentuk nanopartikel bola biasa maupun bentuk lainnya seperti nanobatang, nanokabel, nanolempar dll. (X. Wang dkk., 2014) (Yuliasari, dkk., 2022) (Lai, dkk., 2020) (Y. Wang, dkk., 2016) Nanopartikel  $\text{TiO}_2$  dapat memiliki struktur kristal berbentuk *rutil*, *anatase* dan *brookit*. Dari ketiganya itu, anatase lebih banyak dipakai karena energi gap dan tingkat energi yang paling cocok dengan LUMO pewarna, kestabilan kimia dan sifat katalitik yang lebih baik. (Borbón, dkk., 2021) (Cavallo, dkk., 2017) Selain dalam bentuk murninya, beberapa upaya lain juga telah dilaporkan dengan membuat bentuk kompositnya dengan bahan lain, seperti dengan karbon nanotabung, grafena, nanopartikel semikonduktor anorganik dan perovskit. (Eshaghi dan Aghaei, 2015) (W. S. Arsyad, dkk., 2019) (Celline,

dkk., 2023) (Nurazizah, dkk., 2023) (Safriani, dkk., 2023) (Miao, dkk., 2022) (Pujiarti, dkk., 2020a)

Selain ketiga logam oksida yang populer itu, bahan-bahan semikonduktor anorganik lainnya juga telah dikembangkan untuk fungsi yang sama, seperti CdS, CuO dan WO<sub>3</sub>. (Alkuam dkk., 2018) Salah satu perbedaan utama dari bahan-bahan tersebut adalah struktur pita energinya, seperti terlihat pada **Gambar 19**, yang harus dipertimbangkan ketika mendesain sel DSSC ini. Selain kecocokan tingkat energi pita konduksinya, juga harus diperhatikan efek rekombinasi rugi yang mungkin muncul dengan difasilitasi oleh keadaan dalam celah pita (*gap states*) dan keadaan cacat permukaan (*surface defect states*).



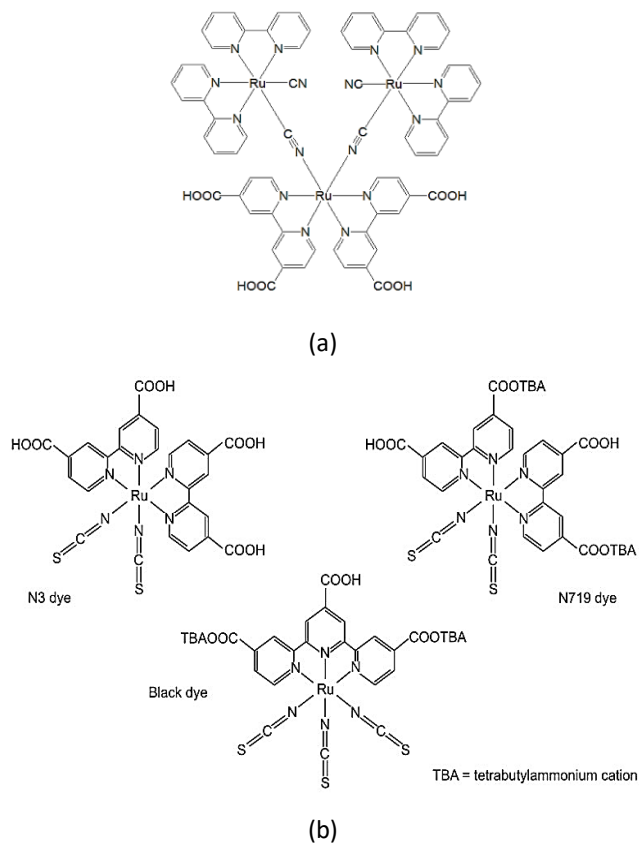
**Gambar 19** Diagram pita energi untuk beberapa semikonduktor logam oksida yang berpotensi untuk dipergunakan sebagai lapisan fotoanoda pada DSSC (Grätzel, 2001).

### 3. Dye (pigmen/pewarna)

Pewarna merupakan unsur penting yang berperan sebagai fotosensitizer (*photosensitizer*), yang menyerap cahaya (foton) dan menghasilkan elektron yang akan disalurkan ke luar sel. Syarat utama pewarna adalah kemampuan menyerap spektrum sinar matahari selebar dan seefisien mungkin, dengan laju rekombinasi radiatif dan non-radiatif internal yang sangat kecil. Selain itu, harus ada kecocokan tingkat energi HOMO dan

LUMO-nya dengan bahan akseptor. Secara umum, *dye*/pewarna yang sering digunakan dikelompokkan menjadi tiga jenis, yakni (Ito, 2011; Kosyachenko, 2011)

- organik logam kompleks,
- organik murni (bebas logam), dan
- bahan alam.



**Gambar 20** (a) Struktur molekul *dye*/pewarna yang pertama kali digunakan oleh kelompok Gratzel. (b) Struktur molekul *dye*/pewarna yang sering digunakan hingga saat ini.

Untuk jenis organik logam kompleks, rutenium kompleks merupakan jenis pewarna yang paling banyak digunakan dan dikaji. Dalam laporan awalnya tahun 1991, yang menjadi tonggak perkembangan DSSC ini, Gratzel, dkk. menggunakan molekul *trimeric ruthenium complex* sebagai fotosensitizernya, dengan struktur molekul seperti pada Gambar 20.(a). (O'Regan dan Grätzel, 1991) Beberapa tahun berikutnya, kelompok Gratzel tersebut melaporkan penggunaan rutenium kompleks yang lebih

sederhana dengan hanya satu atom Ru di pusatnya, yang sekarang dikenal dengan nama produk sebagai pewarna N3. Dengan pewarna N3 ini mereka melaporkan efisiensi konversi sebesar 10,3%. Hingga saat ini, ada puluhan varian rutenium kompleks yang telah dibuat dan dilaporkan untuk fotosensitizer dalam DSSC. Pewarna yang populer dan sering digunakan, misalnya, adalah N3, N719 dan *black dye*, dengan struktur molekul seperti pada Gambar 20.

Untuk bahan organik murni pun terdapat banyak ragam molekul yang telah dikembangkan. Beberapa molekul dan turunannya telah banyak dilaporkan dipergunakan sebagai fotosensitizer pada DSSC, seperti *hemicyanine dye*, *polyene-diphenylaniline dye*, *thienylfluorene dye*, *thienothiophene-thiophene-derived dye*, *oligothiophene dye*, *phenyl-conjugated polyene dye*, *oligo-phenylenevinylene dye*, *indoline dye* dll. (Ito, 2011). Bahan alam akhir-akhir ini juga banyak dikaji kembali sebagai alternatif pewarna untuk DSSC. Keunggulan dari bahan ini adalah dapat diekstrak dari berbagai tumbuhan-tumbuhan di alam bebas. Berbeda dengan kedua jenis sebelumnya yang membutuhkan katalis dan rute sintesis serta purifikasi khusus. Oleh karena itu, pewarna bahan alam dapat lebih murah dari segi harga dan ramah lingkungan. Ada empat kelompok pewarna bahan alam, yakni klorofil, karotenoid, antosianin (flavonoid), dan betalain, yang merupakan pigmen dasar dalam tumbuhan. (Baby, dkk., 2022; Mahajan dkk., 2024) Beberapa bahan alam menunjukkan sifat absorbansi cahaya, atau kemampuan *light harvesting*, yang tinggi. Sayangnya, bahan alam memiliki struktur molekul yang lebih kompleks dan lebih besar yang dapat mengurangi kemampuan transfer elektron selain peluang relaksasi *intersystem crossing* yang besar. Hal ini memerlukan strategi khusus untuk mengaktifkan kontak dengan akseptor dan transfer elektron sebelum terjadi proses *intersystem crossing*. Banyak peneliti DSSC dari Indonesia dan Malaysia telah mengembangkan potensi molekul pewarna dari bahan alam ini untuk fotosensitizer pada DSSC, seperti molekul klorofil (*chlorophyll*), antosianin (*anthocyanin*), *curcumin*, *mangosteen*, *crude brazilian extract* (dari kayu secang), dll. (W. S. Arsyad, dkk., 2022, 2024; Diantoro, dkk., 2019; Ismail, dkk., 2018)

#### 4. Elektroda Mitra (*Counter Electrode*)

Elektroda mitra berfungsi agar sel surya ini membentuk sebuah siklus aliran muatan listrik tertutup dengan meregenerasi elektrolit melalui

reaksi reduksi. Reaksi yang terjadi pada elektroda mitra ini bergantung pada spesies redoks yang terkandung dalam larutan elektrolit, di mana umumnya menggunakan pasangan redoks iodida/triiodida ( $I^-/I_3^-$ ). Elektroda mitra yang bagus harus bersifat inert, tidak ikut mengalami reaksi reduksi-oksidasi, bersifat katalis aktif, memiliki konduktivitas listrik tinggi, dan stabilitas kimia di dalam larutan elektrolit yang digunakan. Platinum (Pt) merupakan elektroda mitra yang banyak dipakai karena keunggulannya dengan sifat-sifat di atas. Platinum digunakan dalam bentuk lapisan tipis dengan ketebalan beberapa nanometer saja sehingga lapisannya masih bersifat transparan. Akan tetapi, Pt merupakan logam mulia yang sangat mahal dan ketersediaan di alam terbatas, maka banyak dikembangkan juga material alternatif lain untuk menggantikannya, seperti karbon, grafena, dan polimer konduktif, dengan beragam metode pembuatan lapisannya. (Ahmed dkk., 2018; Fauziah dkk., 2023; Nursam, 2020; Sunarya dkk., 2020; Widiyandari dkk., 2018)

#### 5. Elektrolit

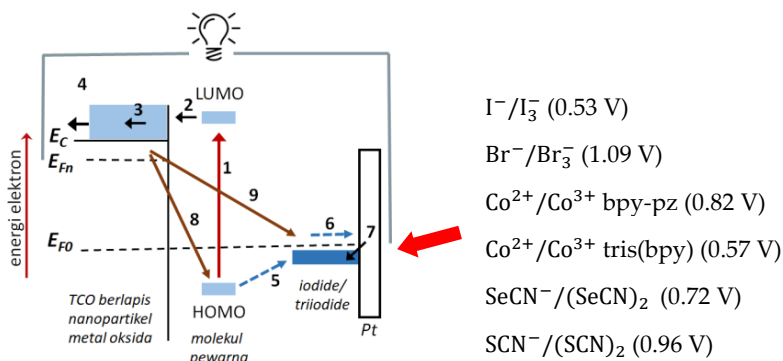
Elektrolit memiliki peran penting dalam membentuk suatu siklus tertutup di dalam sel surya ini. Berbeda dengan sel surya tipe lainnya, di dalam sel DSSC ini ion-ion pasangan redoks dalam elektrolit yang bergerak secara fisik seolah-olah menjadi penghantar muatan positif di dalam sel, bukan *hole*. Larutan elektrolit yang umum digunakan terdiri atas pasangan iodida/tri-iodida ( $I^-/I_3^-$ ) yang dilarutkan ke dalam pelarut organik seperti asetonitril. Anion iodida ( $I^-$ ) menghantarkan dan menyerahkan elektron ke tingkat HOMO pewarna yang telah kehilangan elektron (teroksidasi) setelah proses fotoeksitasi, yakni melakukan regenerasi pewarna. Jika pewarna tersebut gagal digenerasi maka pewarna mengalami ketidakstabilan molekular sehingga mengalami degradasi dan merusak performansi sel. Setelah pewarna diregenerasi maka giliran elektrolit yang harus diregenerasi, yakni dengan mereduksi tri-iodida ( $I_3^-$ ) pada elektroda mitra. Keseluruhan proses ini memerlukan transpor ion, bukan sekedar elektron saja, sehingga konduktivitas ion di dalam larutan elektrolit menjadi hal yang sangat penting.

Berdasarkan fasanya, elektrolit DSSC ini dapat dikelompokkan menjadi (1) elektrolit cair, (2) elektrolit semipadat dan (3) elektrolit padat. Pengembangan elektrolit ini didasari pada kebutuhan untuk

meningkatkan performa DSSC dan juga usia pakai selnya. Elektrolit cair memiliki konduktivitas ion yang tinggi tetapi mudah menguap dan mengalami kebocoran. Elektrolit semipadat dan padat dapat mengeliminasi problem penguapan dan kebocoran, tetapi memiliki keterbatasan pada konduktivitas ion yang lebih rendah.

## 2.6 Pengembangan Elektrolit Semipadat dan Karakteristik DSSC-nya

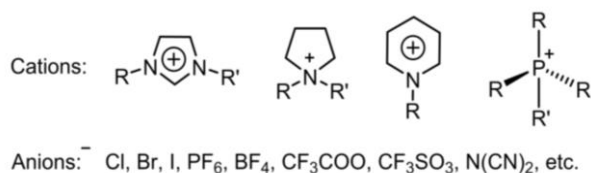
Elektrolit cair pada DSSC yang paling umum digunakan terbuat dari pasangan redoks iodida/triiodida ( $I^-/I_3^-$ ) di dalam pelarut organik seperti *acetonitrile* (ACN), *ethylene carbonate* (EC), *propylene carbonate* (PC), *n-methylpyrrolidine* (NMP) dan pelarut organik lainnya atau dalam bentuk campurannya. Pelarut harus bersifat transparan agar tidak ikut menyerap cahaya yang datang. Selain  $I^-/I_3^-$ , pasangan redoks lain yang telah dikembangkan misalnya adalah  $Br^-/Br_3^-$ ,  $SeCN^-/(SeCN)_2$ ,  $SCN^-/(SCN)_2$ ,  $Co^{3+}/Co^{2+}$  dan  $Cu^{2+}/Cu^+$ . (Nath dan Lee, 2019) (D. Zhang, dkk., 2021) (S. Srivishnu dkk., 2021) (Dhonde, dkk., 2022) Hal penting dalam pemilihan elektrolit dengan pasangan redoks tersebut adalah tingkat energi atau potensial standar redoksnya, yang seharusnya lebih tinggi tetapi masih dekat dengan HOMO pewarna, seperti diilustrasikan oleh **Gambar 21**. Setiap pasangan redoks memiliki tingkat energi reduksi tersendiri, yang sering disebut sebagai potensial formal, diukur terhadap potensial *normal hydrogen electrode* (NHE). Angka-angka dalam kurung untuk masing-masing pasangan redoks menunjukkan potensial formalnya terhadap NHE. Tegangan rangkaian buka ( $V_{oc}$ ) dari DSSC biasanya adalah selisih tingkat energi  $E_{Fn}$  terhadap tingkat energi potensial formal ini.



**Gambar 21** Ilustrasi posisi potensial standar/formal dari pasangan redoks elektrolit terhadap tingkat energi lainnya pada sel DSSC.

Penggunaan pelarut organik dapat menyebabkan beberapa *problem* seperti larutnya pewarna, korosif pada elektroda mitra dan pengeringan elektrolit karena mudah menguap. Untuk mengatasi hal tersebut telah dikembangkan penggunaan elektrolit berbasis cairan ionik (*ionic liquid*), atau dikenal juga sebagai garam cair (*molten salt*). (Gorlov dan Kloo, 2008) Cairan ionik adalah garam yang berbentuk cair pada suhu ruang. Cairan ionik memiliki stabilitas termal dan kimia yang lebih bagus, konduktivitas ionik tinggi, tidak mudah terbakar, solubilitas baik dengan berbagai jenis pelarut. Contoh beberapa cairan ionik yang sering dipakai untuk DSSC adalah yang mengandung pasangan redoks di atas sebagai anionnya, seperti terlihat pada Gambar 22. Karena memiliki viskositas yang lebih tinggi daripada elektrolit cair dengan pelarut organik, konduktivitas ioniknya menjadi lebih rendah sehingga sedikit menurunkan efisiensi DSSC. Akan tetapi, elektrolit ini masih bisa kompetitif karena beberapa alasan lain di atas.

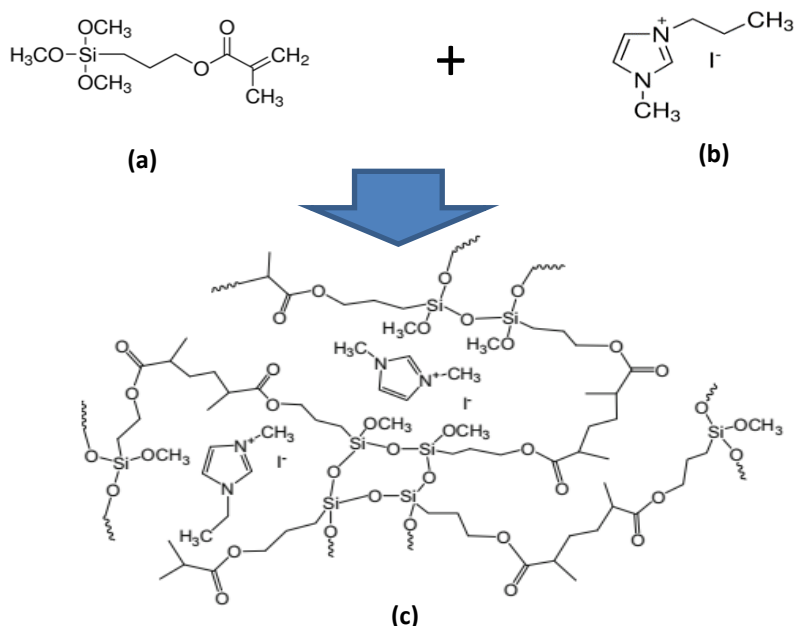
Pengembangan DSSC dengan elektrolit padat tidak terlalu menggembirakan karena terbatasnya pergerakan ion dalam medium padat. Beberapa hasil terbaik, misalnya, diperoleh dengan menggunakan CuI, CuBr dan CuSn serta molekul atau polimer penghantar muatan seperti 2,2',7,7'-tetrakis(*N,N*-di-*p*-methoxyphenylamine)9,9'-spirobifluorene (OMeTAD atau biasa disebut Spiro OMETAD). Bentuk lain pengembangan elektrolit ini adalah dengan bentuk semi-padat, sehingga karakteristiknya pun ada di antara elektrolit cair dan padat. Elektrolit semi padat (*quasi solid state electrolyte*) tidak mudah menguap tetapi konduktivitas ioniknya masih bisa jauh lebih tinggi dari elektrolit padat.



**Gambar 22** Beberapa contoh cairan ionik. (Gorlov dan Kloo, 2008)

Berbagai sistem elektrolit semipadat ini telah dikembangkan. Bentuk yang paling umum adalah berupa komposit polimer yang terdiri atas polimer sebagai matriks/*host* materialnya dan cairan ionik sebagai sumber kation-anionnya. Beberapa di antaranya menggunakan polimer seperti campuran *poly ethylene oxide* (PEO) dan polimer bismaleimide (BM), *poly(vinylidene*

*fluorideco-hexafluoropropylene*) (PVdF-HFP) dll.. (Anggraini, dkk., 2019; Lee, dkk., 2014; Noor, dkk., 2011; Prabakaran, dkk., 2015; Senthil, dkk., 2017) Jenis elektrolit semipadat lainnya menggunakan matrik berbasis molekul atau polimer siloksan, seperti campuran *poly(1-N-methylimidazolium-pentylpolydimethylsiloxane) iodide* dan *pentylimidazolium iodide* yang ditambahkan dengan cairan ionik (Bharwal dkk., 2017). Cairan ionik yang dipergunakan adalah *1-methyl-3-propylimidazolium iodide* (MPII), *1-methyl-3-propylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide* (MPITFSI) dengan tambahan *ethylene carbonate* (EC).



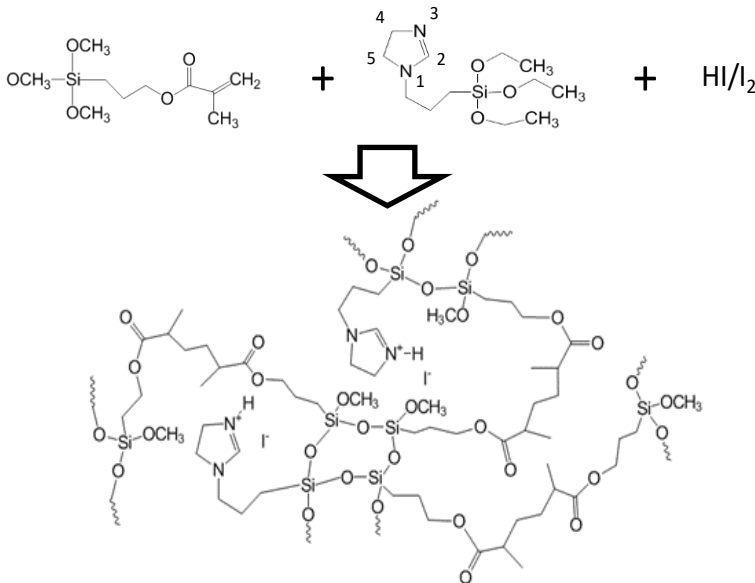
**Gambar 23** Struktur molekul komponen pembentuk Elektrolit Gel Polimer (EGP) tipe pertama yang kami kembangkan. (a) Struktur molekul TMSPMA, (b) cairan ionik, dan (c) EGP. (W. O. S. Arsyad, dkk., 2018)

Kami telah ikut pula mengembangkan elektrolit semipadat dengan menggunakan polimer berbasis siloksan sebagai matriknya dan cairan ionik sebagai sumber kation-anionnya. Pada tahap awal, kami mengembangkan sistem semacam komposit sederhana berupa Elektrolit Gel Polimer (EGP), yang merupakan komposit antara Gel Polimer Hibrid (GPH) dengan cairan ionik (IL), yang terdiri atas *1,3-dimethylimidazolium iodide* [DMII], *1-ethyl-3-methylimidazolium iodide* [EMII] dan *iodine*. (W. O. S. Arsyad, dkk., 2018; Usman dkk., 2023) Elektrolit ini akan kita sebut sebagai EGP#1 dalam makalah ini. GP Struktur molekul dari GPH dan cairan ionik serta produk EGP-nya



(sebagai ilustrasi) dapat dilihat pada **Gambar 23**. Proses pembuatan elektrolit diawali dengan sintesis Gel Polymer Hibrid (GPH) dari monomer 3-(Trimethoxysilyl propyl methacrylate) (TMSPMA) dengan metode sol gel sederhana, yang kemudian dilanjutkan dengan penambahan cairan ionik.

Elektrolit jenis kedua adalah berbasis poli-ionik, di mana poli-ionik merupakan cairan ionik yang terpolimerisasi, atau bisa pula disebut sebagai poli(ionik cair). Polimer ini dicirikan oleh kehadiran gugus bermuatan di setiap unit pengulangan monomernya, yang dihubungkan dengan rantai utama polimernya. Elektrolit jenis kedua ini dibuat dengan menggunakan bahan cairan ionik berbasis imidazolin (*triethoxy-3-(2-imidazolin-1-yl)propylsilane* (TEIPS)) sebagai kationnya, yang diikat-silang dengan monomer TMSPMA sebagai pembentuk kerangka matriks/*host*-nya. (Pujiarti dkk., 2019) Sebagai anionnya digunakan iodida yang diperoleh dari senyawa lain, yaitu HI/I<sub>2</sub>. Proses pembuatan dilakukan dengan menggunakan metode sol-gel di mana selain terjadi proses polimerisasi juga terjadi reaksi protonasi gugus imidazolin-nya secara bersamaan. Elektrolit ini akan kita sebut sebagai #EGP2 dalam buku ini.



**Gambar 24** Struktur molekul komponen pembentuk Elektrolit Gel Polymer (EGP) tipe kedua yang telah kami kembangkan (Pujiarti, dkk., 2019).

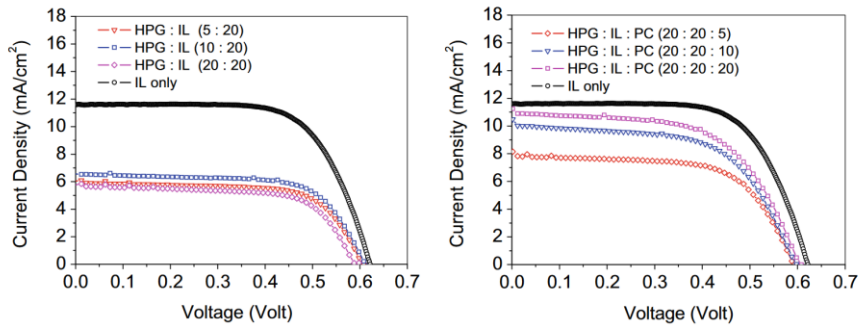
Karakteristik dan performa DSSC dengan EGP#1 memang lebih rendah dari DSSC referensi yang dibuat dengan elektrolit standar cairan ionik, seperti

terlihat pada **Gambar 25** (a) dan (b). Akan tetapi, dengan penambahan sedikit propilen karbonat (PC), performansi sel DSSC dengan EGP#1 ini dapat menyamai sel referensi. Hal ini mengindikasikan bahwa lebih kecilnya performansi sel tersebut belum tentu terkait dengan faktor fotosentisasi dan transfer muatan elektron. Untuk mengetahui lebih lanjut penyebab ini, karakterisasi transpor pembawa muatan berupa pengukuran spektroskopi impedansi EIS, seperti yang diterapkan pada penelitian sel surya polimer sebelumnya, ternyata dapat memberikan informasi penting.

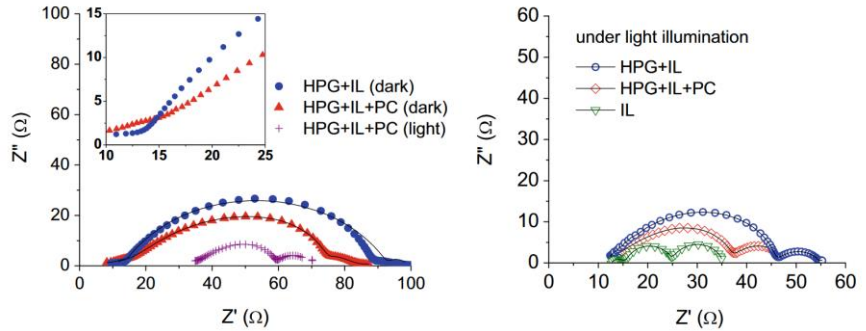
Hasil pengukuran EIS biasanya ditampilkan dalam bentuk kurva plot Nyquist, seperti terlihat pada **Gambar 25** (c) dan (d). Plot Nyquist hasil pengukuran EIS dari sel DSSC standar (dengan elektrolit standar), biasanya tegangan bias dc di sekitar tegangan rangkaian terbukanya dan dalam keadaan penyinaran (terang) umumnya menunjukkan karakteristik yang unik. Yakni, terlihat munculnya tiga semi-lingkaran (SL) dari daerah frekuensi tinggi ke frekuensi rendah:

1. SL1: transfer muatan pada Pt/elektrolit (katode),
2. SL2: transfer dan transpor muatan pada lapisan  $\text{TiO}_2$  mesopori dan pada antarmukanya dengan pewarna dan elektrolit (anode), dan
3. SL3: difusi ion dalam elektrolit.

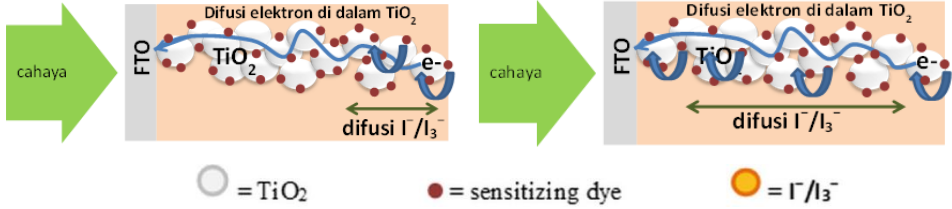
Setengah lingkaran SL1 dan SL3 akan muncul dalam ukuran yang hampir sama, tetapi setengah lingkaran SL2 biasanya lebih besar. Perbedaan karakteristik EIS pada kedua sampel EGP#1 menunjukkan bahwa ada perbedaan proses transfer dan transpor di daerah lapisan fotoanoda, yakni di lapisan  $\text{TiO}_2$ +pewarna. Analisis lebih detil mengarahkan pada gambaran mekanisme yang berbeda, seperti diilustrasikan oleh **Gambar 25**.(e) dan (f). Yakni, pada sel DSSC dengan EGP#1 saja elektrolit tidak dapat penetrasi dengan baik ke dalam lapisan mesopori  $\text{TiO}_2$ . Sebagai akibat itu, jarak transpor elektron rata-rata menjadi lebih jauh sedangkan proses regenerasi pewarna yang berada dekat dengan sisi FTO tidak dapat terjadi sebagaimana mestinya.



(a) (b)

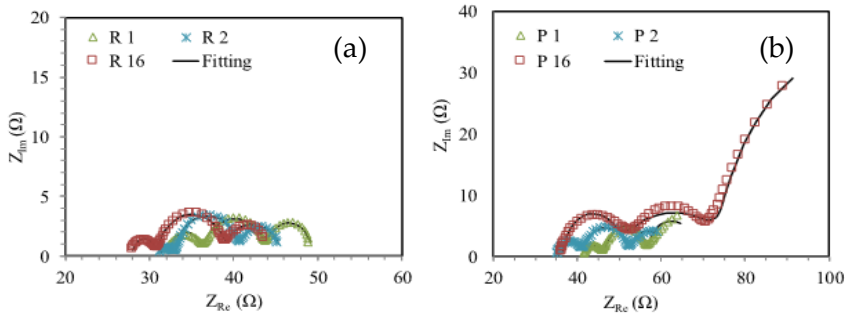


(c) (d)



(e) (f)

**Gambar 25** Karakteristik kurva J-V untuk sel DSSC dengan (a) EGP#1 saja dan (b) EGP#1 dengan tambahan sedikit propilen karbonat (PC). Plot Nyquist hasil pengukuran EIS dalam keadaan penyinaran (terang) dari sel DSSC dengan (c) EGP#1 saja dan (d) EGP#1 dengan tambahan sedikit propilen karbonat (PC). (e) dan (f) Interpretasi proses transpor elektron dan regenerasi pewarna oleh elektrolit untuk kedua sel yang berbeda tersebut (W. O. S. Arsyad dkk., 2018).



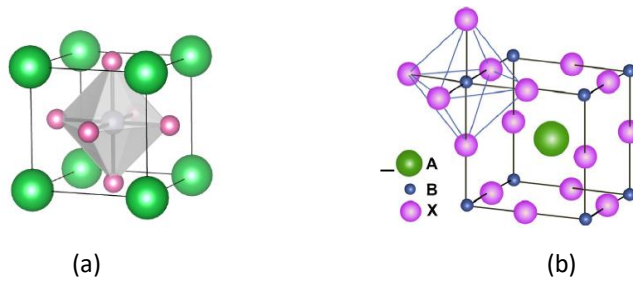
**Gambar 26** Plot Nyquist hasil pengukuran EIS dalam keadaan penyinaran (terang) dari sel DSSC dengan (a) elektrolit standar dan (b) elektrolit EGP#2. Pengukuran dilakukan pada sel yang dibuat dengan waktu perendaman bervariasi, yakni 1, 2 dan 16 jam, yang terindikasi pada nama-nama sel tersebut (Pujiarti dkk., 2019).

Untuk elektrolit EGP#2, kami menemukan *problem* yang sama. Akan tetapi dengan mengatur derajat viskositas pada saat proses sintesis kami dapat memperbaiki performa sel DSSC-nya. Peningkatan tersebut dapat terlihat dari semakin mengecilnya semilingkaran SL2, dibandingkan hasil sebelumnya, mendekati sel referen dengan larutan elektrolit standar, seperti terlihat pada **Gambar 26**. Hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa EGP#2 dapat berfungsi sebagai elektrolit mendekati elektrolit standar dengan syarat bahwa struktur mesopori fotoanoda masih cukup berongga sehingga EGP dapat berpenetrasi dengan baik pada fotoanoda. Jika tidak dapat berpenetrasi dengan baik, maka proses regenerasi elektrolit akan memiliki hambatan yang besar sehingga memperbesar semilingkaran SL3, seperti yang terjadi pada sel dengan perendaman pewarna selama 16 jam.

### 3 SEL SURYA PEROVSKITE: STRUKTUR KRISTAL DAN STRUKTUR ELEKTRONIK PEROVSKIT HALIDA

Perovskit halida telah menarik banyak perhatian setelah dua laporan independen oleh kelompok Snaith dan Gratzel, menyusul laporan yang dibuat oleh kelompok Miyasaka, tentang aplikasinya sebagai bahan sel surya dengan efisiensi konversi lebih tinggi dari 10%. (Kim, dkk., 2012; Kojima, dkk., 2009; Snaith, 2013) Sejak laporan tersebut, banyak upaya telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dengan memodifikasi komposisi unsur perovskit, struktur sel, proses fabrikasi sel, dll.. Kemungkinan penggunaan perovskit ini sebagai bahan aktif dalam sel surya bergantung pada sifat semikonduktornya, yang jarang teramati pada bahan perovskit lain seperti perovskit oksida. Namun, sifat semikonduktor bahan perovskit halida ini berbeda dari bahan semikonduktor Si dan golongan III-IV-V lainnya karena kristalnya terbentuk melalui ikatan ionik. Perovskit halida memiliki struktur kristal umum bahan perovskit dengan rumus  $ABX_3$ , di mana A adalah kation logam alkali organik atau anorganik, B adalah kation logam divalen (umumnya Pb atau Sn), dan X adalah anion halida (Cl, Br, atau I). Bahan perovskit ini dapat terbentuk dalam bentuk nanokristal, titik kuantum (*quantum dot*), nanoserat (*nanowire*), dan bahkan dalam bentuk kristal tunggal. Dalam kristal perovskit ini, elemen B dan X membentuk grup struktur oktahedral  $BX_6$ , seperti terlihat dalam **Gambar 27**.

Studi struktur elektronik menunjukkan bahwa grup oktahedral ini memainkan peran penting dalam pembentukan pita valensi dan konduksi. Modifikasi elemen penyusun dan deformasi kristal dapat mengubah struktur kristal, yang mengarah pada kemungkinan modifikasi celah pita. Namun, karena sifat ikatan ionik, kation dan anion di permukaan sangat sensitif dan mudah terlepas oleh kehadiran molekul lain, bahkan oleh oksigen dan uap air, atau efek lingkungan lainnya, sehingga pada perovskit halida ini mudah terbentuk cacat permukaan dan distorsi kristal lokal. Dalam banyak kasus, cacat permukaan ini menyebabkan kerugian, seperti penangkapan pembawa muatan dan kehilangan rekombinasi dalam sel surya. Dalam kasus lain, efek ligan pada kristal perovskit dapat mengubah permukaan kristal, yang dapat mencegah rekombinasi non-radiatif dan menghasilkan efek fotoluminesensi yang tinggi, seperti pada perovskit  $CsPbX_3$  ( $X = Cl, Br, I$ ).



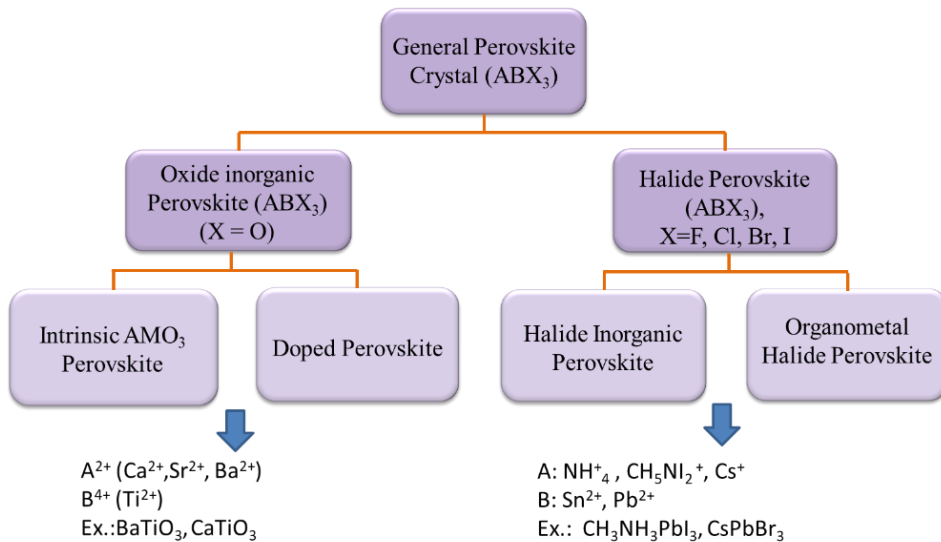
**Gambar 27** (a) Struktur kristal perovskit  $ABX_3$  berbentuk kubik dengan unsur A sebagai atom pusatnya. (b) Penggambaran lain dengan unsur A sebagai atom pusat pada struktur kubiknya dan untuk menunjukkan kehadiran sub-grup oktahedral  $BX_6$  di titik-titik sudutnya.

Selain itu, seperti yang diamati juga pada beberapa perovskit oksida, orientasi arah atau sudut kemiringan grup oktahedral juga dipandang memainkan peran penting dalam sifat elektronik dan optik bahan. Pembentukan eksiton dan polaron eksiton tampaknya sangat bergantung pada struktur kristal dan kemiringan gugus oktahedralnya. Saat ini, sel surya perovskit halida (PSC) mencapai efisiensi konversi daya (PCE) lebih dari 20%, yang merupakan yang tertinggi di antara sel surya generasi ketiga, meskipun masih diperlukan lebih banyak penelitian untuk meningkatkan stabilitas kristalnya (Hussain dkk., 2018). Namun demikian, aspek struktur dan komposisi kristal yang disebutkan di atas dapat menghasilkan variasi sifat elektronik dan optik, yang dapat diterapkan untuk berbagai aplikasi mulai dari sel surya, perangkat pemancar cahaya, laser, perangkat sintilasi, perangkat elektro-fotokatalitik, dan sensor. Aplikasi bahan-bahan ini telah meluas dari sel surya ke berbagai perangkat optoelektronika dan akhir-akhir ini telah meluas dari domain respons optik linier ke domain respons optik non-linier (G. Wang, dkk., 2021).

### 3.1 Struktur Kristal Perovskit Halida

Perovskit sebenarnya telah dikenal sejak lama dan ada yang dapat terbentuk secara alami. Istilah perovskit diambil dari nama ahli mineralogi Rusia Lev Perovski (1792–1856), yang mengkaji banyak bahan perovskit alami di Pegunungan Ural Rusia. Bahan perovskit alami itu adalah kalsium titanium oksida atau kalsium titanat yang memiliki rumus kimia  $CaTiO_3$ . Struktur kristal perovskit itu pertama kali dijelaskan oleh Victor Goldschmidt pada tahun 1926 dalam karyanya tentang faktor toleransi dalam kristal (Wikipedia, 2024a).

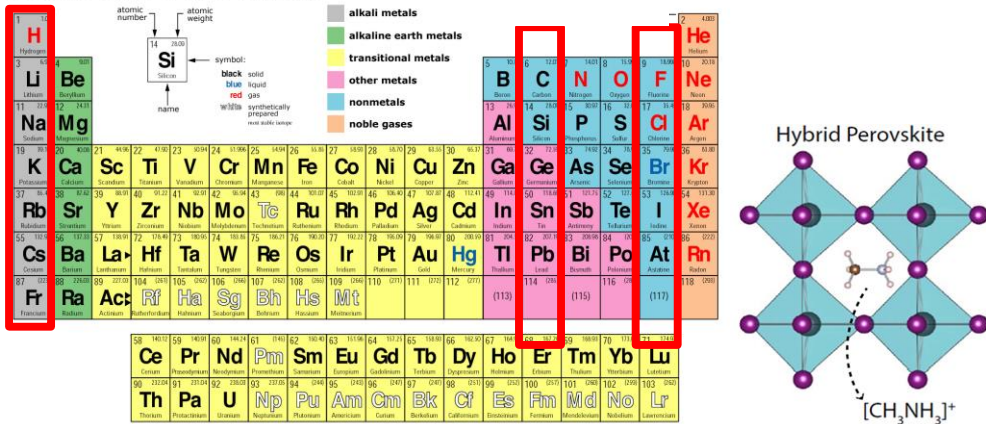
Kristal perovskit non-alami, perovskit buatan, barium titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) pertama kali dilaporkan struktur kristalnya oleh Helen D Megaw (Glazer, 2021). Kristal tersebut memiliki struktur kristal rumus umum  $\text{ABX}_3$ . Semua bahan yang memiliki struktur serupa dengan  $\text{CaTiO}_3$  dan  $\text{BaTiO}_3$  ini kemudian akan masuk dalam klasifikasi bahan perovskit.



**Gambar 28** Klasifikasi yang menunjukkan perbedaan dua kelas perovskit, yakni perovskit oksida dan perovskit halida.

Sebenarnya banyak kelas klasifikasi dari bahan perovskit, tetapi dalam **Gambar 28** hanya ditunjukkan dua klasifikasi utama, yakni perovskit oksida dan perovskit halida. Kedua kelas tersebut memiliki struktur kristal perovskit  $\text{ABX}_3$  yang sama, tetapi unsur X ditempati oleh oksigen pada perovskit oksida sedangkan unsur X ditempati oleh halida pada perovskit halida. Namun demikian, perbedaan tersebut ternyata menghasilkan perbedaan yang besar pada sifat fisiknya, khususnya sifat elektronik dan optiknya. Perovskit oksida secara umum tidak menunjukkan sifat bahan semikonduktor, tetapi menunjukkan sifat bahan dielektrik dengan sifat-sifat yang unik. Barium titanat, sebagai contoh, memiliki sifat fisis yang unik, yakni sifat feroelektrik, piroelektrik, dan piezoelektrik serta menunjukkan efek fotorefraksi. Barium titanat banyak digunakan dalam kapasitor, transduser elektromekanik, dan optik non-linier. Di sisi lain, perovskit halida ternyata menunjukkan karakteristik seperti bahan semikonduktor. Sifat inilah yang menjadi dasar pemunculan efek fotovoltaik dalam sel surya perovskit.

Periodic Table of the Elements



Gambar 29 Ragam kemungkinan unsur pembentuk kristal perovskit halida.

Perovskit halida  $ABX_3$  terbentuk dari tiga unsur, di mana A adalah kation monovalen, baik anorganik ataupun molekuler organik, B adalah logam bivalen seperti  $Pb^{2+}$  atau  $Sn^{2+}$ , dan X adalah anion halida seperti  $I^-$ ,  $Cl^-$ , dan  $Br^-$ . Kation A berkoordinasi dengan 12 anion X membentuk geometri kubo-oktahedral (**Gambar 27(a)**), sedangkan kation B berkoordinasi dengan 6 anion X membentuk geometri oktahedral  $BX_6$  (**Gambar 27(b)**). Secara umum, seperti ditunjukkan oleh **Gambar 29**, ada banyak variasi yang mungkin dibangun, yang melibatkan golongan I (dalam tabel periodik) sebagai unsur A dan golongan VII sebagai unsur X-nya. Golongan IV dapat menjadi unsur B-nya, tetapi sejauh ini hanya Pb dan Sn yang dapat membentuk kristal perovskit yang stabil dan dikembangkan untuk sel surya. Untuk unsur A, beragam monovalen organik juga memiliki kemungkinan, tetapi yang sering dipakai, misalnya, adalah *methylammonium cation* ( $MA^+ = CH_3NH_3^+$ ) dan *formanidinium* ( $FA^+ = CH_5N_2^+$ ).

Kemungkinan terbentuknya kristal perovskit yang stabil dapat dilihat dari faktor toleransi geometri Gold-Schmidt, yaitu rasio antara jari-jari ion efektif dari elemen A dan B yang dinyatakan oleh persamaan (Bhalla dkk., 2000).

$$t = \frac{r_A + r_X}{\sqrt{2}(r_B + r_X)} \tag{5}$$

di mana  $r_A$ ,  $r_B$ , dan  $r_X$  adalah jari-jari ion efektif untuk ion A, B, dan X secara berturut-turut. Nilai  $t = 1$  menunjukkan sebuah struktur perovskit ideal, yaitu kubik. Jika nilai  $t$  mendekati 1, maka struktur perovskit adalah pseudo-kubik atau kubik terdistorsi. Semakin besar jari-jari kation A atau semakin



kecil jari-jari kation B, maka faktor toleransi akan bergeser jauh dari satu ( $t \neq 1$ ) sehingga menghasilkan simetri yang lebih rendah (Chen dkk., 2015). Perovskit fase kubik ( $\alpha$ -,  $Pm3m$ ) dapat dibentuk antara  $0,9 < t < 1,0$  atau pada suhu tinggi, sedangkan perovskit fase tetragonal ( $\beta$ -,  $P4/mbm$ ) atau ortorombik ( $\gamma$ -,  $Pbnm$ ) yang kurang simetris diperoleh untuk nilai faktor  $t$  yang lebih kecil atau pada suhu rendah. Tekukan dan distorsi kecil pada struktur kristal bisa mengurangi derajat simetrinya, sehingga dapat memengaruhi beberapa sifat fisisnya, khususnya sifat elektronik, magnetik, dan dielektrik yang sangat penting pada beberapa aplikasi.

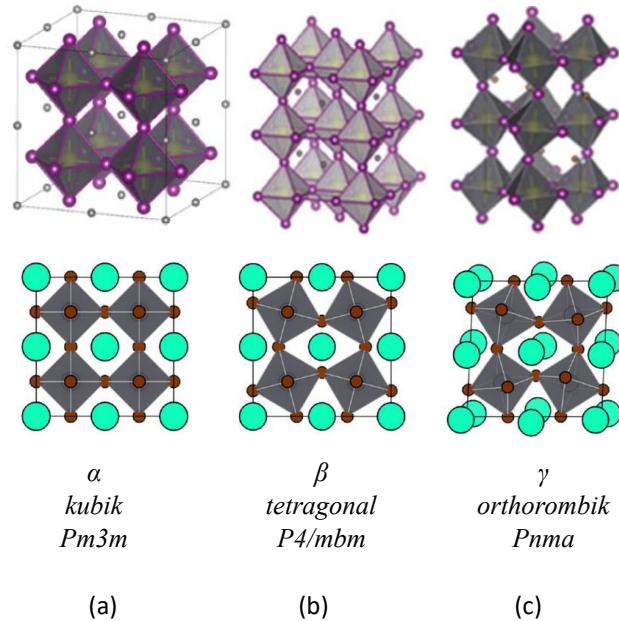
Selain faktor toleransi di atas, struktur kristal juga dipengaruhi oleh faktor oktahedral ( $\mu$ ) yaitu ukuran kestabilan oktahedral yang didefinisikan sebagai:

$$\mu = \frac{r_B}{r_X} \quad (6)$$

Perovskit yang stabil biasanya memiliki faktor oktahedral  $\mu$  pada rentang  $0,44 < \mu < 0,90$  (Heo dkk., 2015), sedangkan faktor toleransinya pada rentang  $0,89 < t < 1$  untuk perovskit oksida (Chen dkk., 2015) dan  $0,81 < t < 1,10$  untuk perovskit halida (Zhu, 2016).

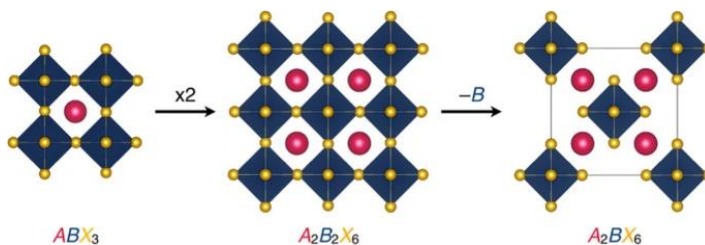
Pada kristal perovskit ini, akan tetapi, ada beberapa hal yang perlu dicatat, yakni:

1. Struktur kristalnya sangat mudah dipengaruhi oleh suhu dan tekanan, yang menghasilkan perubahan struktur kristalnya dari kubik menjadi tetragonal dan ortorombik. Sebagai contoh, perovskit  $MAPbI_3$  dapat berubah dari kubik, tetragonal dan ortorombik pada suhu yang berbeda.  $MAPbI_3$  memiliki struktur kubik pada suhu  $T > 330$  K dengan energi celah  $E_g = 1.3$  eV, struktur tetragonal pada  $161$  K  $< T < 177$  K dengan  $E_g = 1.43$  eV dan struktur ortorombik pada  $T < 161$  K dengan  $E_g = 1.61$  eV. (Oku, 2015) Akan tetapi,  $CsPbBr_3$ , misalnya, memiliki struktur kristal ortorombik pada suhu ruang (300 K), namun berubah menjadi tetragonal pada suhu  $361$  K  $< T < 403$  K, dan menjadi kubik pada  $T > 403$  K. (M. Zhang, dkk., 2017)



**Gambar 30** Struktur kristal MAPbI<sub>3</sub> dengan struktur (a) kubik, (b) tetragonal dan (c) ortorombik (Bechtel, dkk., 2019).

2. Beberapa perovskit halida dapat memiliki beberapa macam struktur kristal yang berbeda meski terbentuk dari unsur-unsur yang sama, tetapi sifatnya berbeda dari kristal ABX<sub>3</sub>-nya (Pering, 2023). CsPbBr<sub>3</sub> dapat berubah menjadi Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> dengan karakter fotoluminesensi yang berbeda dari CsPbBr<sub>3</sub>. (Adhikari, dkk., 2019) Variasi struktur kristal lebih mudah terjadi pada kristal halida dengan Sn. Untuk perovskit timah iodida, struktur CsSnI<sub>3</sub> memunculkan sifat pendaran luminesensi yang tinggi, tetapi tidak demikian dengan Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub>. Sementara CsSnI<sub>3</sub> dapat digunakan untuk aplikasi dioda pengemisi cahaya (LED), Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub> malah dipergunakan sebagai lapisan transpor dalam sel surya polimer dan DSSC. (Khaeroni, dkk., 2020; Pujiarti, dkk., 2020b)



**Gambar 31** Ragam variasi struktur kristal yang mungkin terbentuk selain dari bentuk ABX<sub>3</sub>-nya (Pering, 2023).

### 3.2 Struktur Elektronik Perovskit Halida Berdasarkan Hasil Komputasi

Sifat elektronik dalam bahan kristal sangat bergantung pada struktur kristal dan unsur penyusunnya. Untuk memperkirakan dan memahami struktur elektronik perovskit ini, dengan kemampuan komputer saat ini, kajian dapat dilakukan dengan melakukan perhitungan prinsip pertama (*first principle calculation*) berdasarkan teori fungsional kerapatan (*Density Functional Theory*, DFT). Hal yang dimaksud dengan perhitungan prinsip pertama adalah metode perhitungan sifat fisika secara langsung dari besaran-besaran dasar fisika seperti massa, muatan, gaya Coulomb, dll. berdasarkan prinsip-prinsip mekanika kuantum. Dengan kata lain, perhitungan tersebut menghasilkan nilai-nilai yang terkait dengan sifat fisika secara langsung berdasarkan prinsip-prinsip dasar fisika tanpa menggunakan parameter-parameter penyesuaian atau pemodelan semi-empirik agar sesuai dengan hasil eksperimen. Dimulai dari interaksi Coulomb antara elektron, inti atom, dan inti atom-elektron, sifat-sifat material (terutama sifat elektronik) dihitung secara non-empiris.

DFT adalah suatu metode komputasi kuantum untuk menghitung energi dan sifat fisis dari suatu molekul atau kristal melalui perhitungan kerapatan muatan, alih-alih menghitung fungsi gelombangnya secara eksplisit seperti dalam metode berbasis teori orbital kuantum. Dalam DFT, sifat-sifat sistem dengan elektron jamak dapat ditentukan dengan menggunakan suatu fungsi fungsional, yakni fungsi kerapatan elektron yang bergantung secara spasial. Dengan pendekatan ini, metode komputasi ini dapat diterapkan untuk molekul besar, kristal ataupun sistem terkondensasi lainnya yang berstruktur kompleks. Komputasi DFT menyelesaikan persamaan Schrödinger untuk sistem elektron jamak tersebut dengan menyelesaikan persamaan Kohn-Sham, yang memanfaatkan potensial eksternal lokal efektif (fiktif)  $V_s(r)$  atau  $V_{eff}(r)$ , biasa disebut sebagai potensial Kohn-Sham.

Jika partikel dalam sistem Kohn-Sham adalah fermion yang tidak berinteraksi, fungsi gelombang Kohn-Sham adalah determinan Slater tunggal yang dibangun dari sekumpulan orbital yang merupakan solusi energi terendah dari

$$(H_{KS} - \varepsilon_i)\psi_i(\vec{r}) = 0 \quad (7)$$

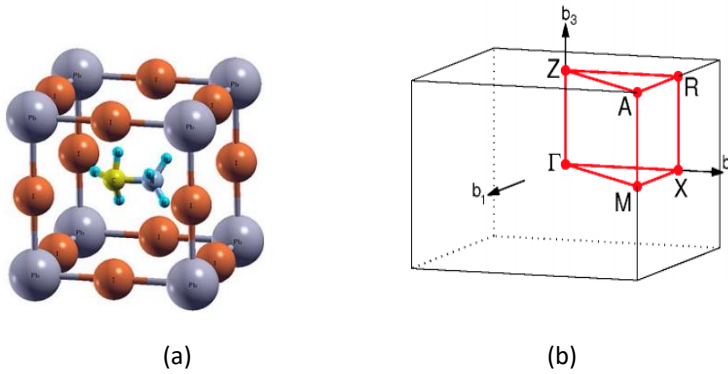
di mana

$$H_{KS} = -\frac{\hbar^2}{2m} + V_H(\vec{r}) + V_{XC}(\vec{r}) + V(\vec{r}) \equiv -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{KS}(\vec{r}) \quad (8)$$

Persamaan di atas tidak lain seperti persamaan Schrödinger, tetapi memiliki satu suku khusus, yakni potensial korelasi-pertukaran  $V_{XC}(\vec{r})$ , yang digunakan untuk memperhitungkan efek interaksi, seperti interaksi elektron-elektron.  $V_{XC}(\vec{r})$  merupakan potensial yang belum terdefinisi secara khusus dalam bentuk formula tertentu, tetapi sangat bergantung pada kerapatan dan distribusi muatan dari susunan atom-atom dan konfigurasi elektron secara keseluruhan. Oleh karena itu,  $V_{XC}(\vec{r})$  dicari melalui fungsional korelasi-pertukaran  $E_{XC}[n(\vec{r})]$ . Ada beberapa pendekatan untuk fungsional korelasi-pertukaran ini, seperti *local-density approximations* (LDA), *local spin density approximation* (LSDA), *generalized gradient approximation* (GGA), dan *hybrid density functional* BLYP. (Götz, dkk., 2010) Dalam perhitungan kristal semikonduktor, pemilihan fungsional korelasi-pertukaran ini dapat memiliki pengaruh yang besar pada nilai celah pita energi, termasuk tingkat energi pita valensi dan pita konduksinya. Paket komputasi Quantum Espresso banyak digunakan untuk melakukan perhitungan DFT. (Giannozzi dkk., 2020) Beberapa hasil perhitungan menunjukkan bahwa, untuk kristal perovskit, komputasi dengan *pseudopotensial* GGA memberikan hasil yang lebih baik dari *pseudopotensial* LDA, yang menunjukkan karakter elektron valensi yang terdelokalisasi secara luas (Afsari, dkk., 2017; Yolla Sukma Handayani, dkk., 2019; Pitriana, dkk., 2019).

### 3.3 Struktur Elektronik Perovskit MAPbI<sub>3</sub>

Untuk perhitungan struktur elektronik dari kristal perovskit MAPbI<sub>3</sub>, yang banyak digunakan dalam sel surya perovskit, perhitungan dilakukan dengan *pseudopotensial* jenis *ultrasoft* (USPP) untuk mendeskripsikan interaksi elektron-ion dan fungsional pertukaran korelasi jenis PBE-GGA. Perlu diingat kembali, bahwa kristal perovskit terbentuk dari ikatan-ikatan ionik, sehingga interaksi elektron dan ion akan cukup kuat. Bentuk sel satuan yang dipergunakan dalam komputasi struktur elektronik MAPbI<sub>3</sub> ini ditunjukkan oleh **Gambar 32** (a) Sel satuan perovskit MAPbI<sub>3</sub> dengan fasa kubik.

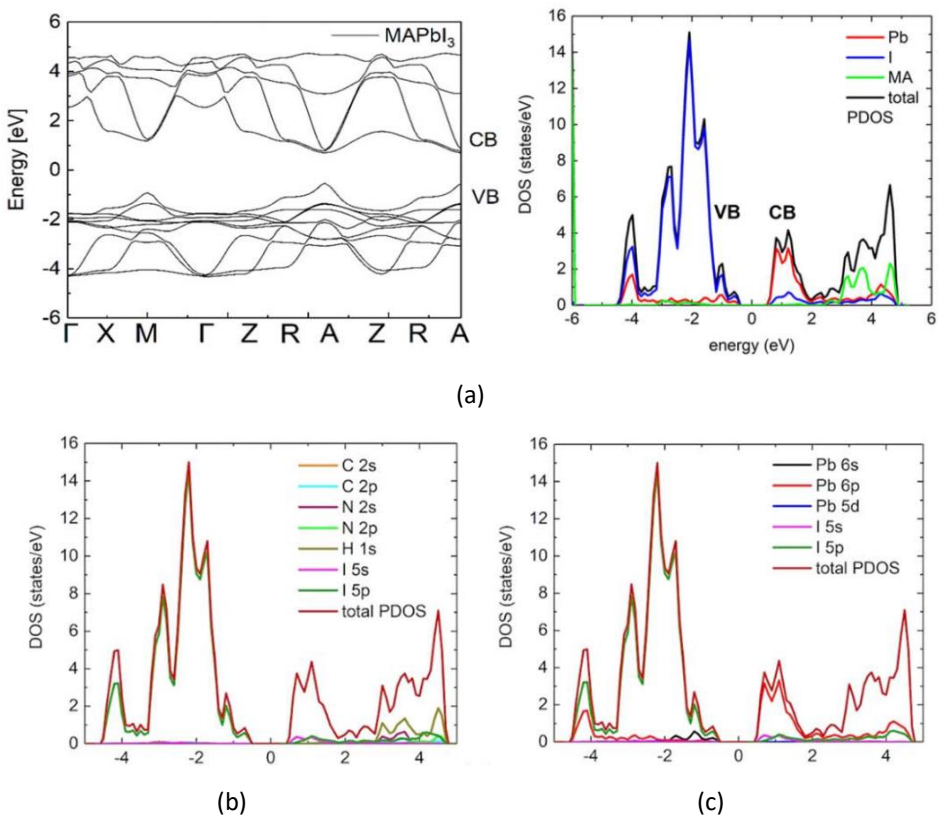


**Gambar 32** (a) Sel satuan perovskit MAPbI<sub>3</sub> dengan fasa kubik. (b) Kisi resiprok dari perovskit MAPbI<sub>3</sub> dengan lintasan perhitungan (untuk Zona Brillouin pertama-nya):  $\Gamma$ -X-M- $\Gamma$ -Z-R-A-Z|X-R|M-A. (Yolla Sukma Handayani dkk., 2019)

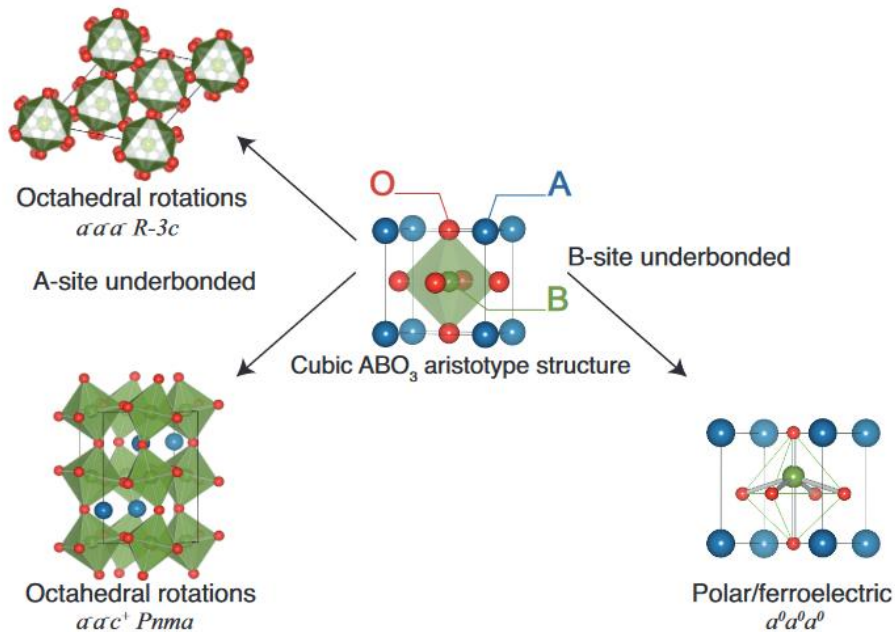
Struktur elektronik dari MAPbI<sub>3</sub> dari hasil komputasi DFT dapat dilihat pada **Gambar 33**, yang memberikan informasi penting terkait sifat elektronik dan optiknya. Struktur elektronik pada **Gambar 33** (a) menunjukkan secara jelas adanya pembentukan celah pita energi (*gap energy*,  $E_g$ ), dengan pita valensi (*valence band*, VB) terbentuk di bawah energi Fermi  $E_F$  (pada 0 eV) dan pita konduksi (*conduction band*, VB) terbentuk di atasnya. Kurva rapat keadaan parsial (*partial density of states*, PDOS) dapat memberikan informasi orbital-orbital mana saja yang berkontribusi pada pembentukan pita valensi dan konduksi. Kurva PDOS pada **Gambar 33** (b) menunjukkan bahwa pita valensi dari perovskit MAPbI<sub>3</sub> diturunkan dari orbital 5p anion I, sementara kurva PDOS pada **Gambar 33** (c) menunjukkan pita konduksi didominasi oleh orbital 6p kation Pb<sup>2+</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa sub-struktur oktahedral PbI<sub>6</sub> memiliki peran penting pada sifat elektronik dan optik bahan ini karena proses transpor elektron dan proses fotoeksitasi melibatkan elektron-elektron di pita valensi dan konduksi ini. Karakteristik pembentukan pita valensi dan konduksi serupa dengan hasil-hasil perhitungan yang dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya (Filip dkk., 2014).

Struktur di atas adalah untuk struktur kubik dengan keadaan ideal, tanpa adanya sudut *tilting* gugus oktahedral PbI<sub>6</sub> dan bentuk distorsi lainnya. Filip *et al.* menunjukkan bahwa energi celah pita dapat diubah dengan pengubahan sudut *tilting* dari gugus oktahedral PbI<sub>6</sub>-nya. (Filip, dkk., 2014) Fenomena serupa sebenarnya juga ditemukan pada perovskit oksida, seperti pada FeTiO<sub>3</sub> dan ZnSnO<sub>3</sub>, di mana sudut *tilting* dan rotasi dari gugus oktahedral, yang menghasilkan distorsi dari bentuk kubiknya, dapat memengaruhi struktur

dan sifat elektronik secara signifikan (Benedek dan Craig J. Fennie, 2013). Dalam perovskit ini, rotasi dari gugus oktahedral akan mengurangi sifat feroelektrik-nya. Sementara itu, distorsi posisi atom B dari posisi idealnya, yang bergeser dari posisi seharusnya di pusat kubik, menghasilkan sifat feroelektrik pada bahan tersebut. Distorsi perubahan bentuk kristal dari kubik ke tetragonal pada perovskit *lead zirconate titanate*  $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) menghasilkan polarisasi spontan yang memunculkan sifat feroelektrik dan piroelektrik, sehingga banyak digunakan sebagai bahan piezoelektrik dalam berbagai aplikasi (Steinem dan Janshoff, 2005).



**Gambar 33** Struktur pita elektronik dan PDOS perovskit  $\text{MAPbI}_3$  hasil komputasi DFT (Yolla Sukma Handayani dkk., 2019).

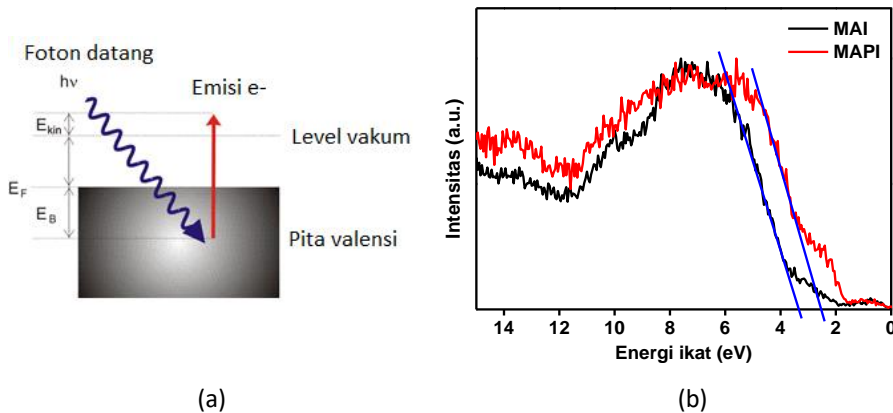


**Gambar 34** Struktur perovskit oksida dengan bentuk kubik ideal (di tengah-tengah gambar) dan beberapa jenis distorsi struktural yang mungkin. Distorsi kristal ini terjadi akibat rotasi dan *tilting* grup oktahedra serta pergeseran atom B dari posisi pusatnya, yang dapat memengaruhi sifat fotoelektrik, seperti pada perovskit  $FeTiO_3$  dan  $ZnSnO_3$  (Benedek dan Fennie, 2013).

Seperti diuraikan sebelumnya, ada banyak kemungkinan pilihan unsur untuk membangun bahan perovskit halida. Di atas telah terlihat bahwa unsur B dan X yang membentuk oktahedral  $BX_6$  memiliki peran penting dalam pembentukan pita konduksi dan pita valensi. Kontribusi kation organik ( $MA^+$ ) sangat kecil pada pembentukan pita valensi dan pita konduksi tersebut. Akan tetapi, diperkirakan bahwa orbital-orbital dari  $MA^+$  berperan dalam pembentukan ikatan pada level inti (*core level*) dan menjaga keseimbangan muatan secara Coulomb. Kation organik  $MA^+$  juga berperan untuk memenuhi syarat faktor toleransi geometri Gold-Schmidt  $t$  dan faktor oktahedral  $\mu$ .

Pembentukan pita valensi VB dalam kristal  $MAPbI_3$  telah dibuktikan secara eksperimen melalui pengukuran spektroskopi fotoelektron ultraviolet (*Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy* (UPS)). Prinsip pengukuran UPS dapat secara sederhana dijelaskan dengan melihat **Gambar 35** (a), di mana foton datang dipakai untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi hingga terlepas dari bahan yang diukur. Detektor akan mengukur energi kinetik elektron yang terlepas dan dari nilai itu dapat dihitung energi ikat dari elektron pada

keadaan awalnya. Hasil pengukuran UPS untuk metil amonium iodida (MAI), prekursor kation A dari  $\text{MAPbI}_3$ , dan  $\text{MAPbI}_3$  hasil sintesis dapat dilihat pada **Gambar 35** (b). Terlihat dengan jelas adanya pergeseran tepi spektrum dari spektrum MAI ke spektrum  $\text{MAPbI}_3$ . Elektron terluar/valensi dari  $\text{MAPbI}_3$  memiliki energi ikat yang lebih kecil dibandingkan energi ikat dari prekursor MAI itu sendiri. Hal ini secara tidak langsung menunjukkan pembentukan pita valensi pada  $\text{MAPbI}_3$ . Dibandingkan dengan beberapa kation organik lain yang menjadi bahan kajian, hanya sampel  $\text{MAPbI}_3$  ini saja yang menunjukkan perbedaan energi ikat yang signifikan antara energi ikat prekursornya dan energi ikat produk sintesisnya (Yolla Sukma Handayani dkk., 2019). Hal ini bersesuaian dengan hasil komputasi di atas yang menunjukkan pembentukan pita valensi (VB) pada  $\text{MAPbI}_3$  tetapi orbital dari kation A tidak berkontribusi baik pada VB ataupun CB-nya.



**Gambar 35** (a) Prinsip pengukuran spektroskopi fotoelektron ultraviolet (*Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy* (UPS)). (b) Spektrum UPS dari metil amonium iodida (MAI) dan  $\text{MAPbI}_3$  (MAPI) (Yolla Sukma Handayani dkk., 2019).

### 3.4 Struktur Elektronik Perovskit $\text{APbBr}_3$ (A= Li, Na, K, Rb dan Cs)

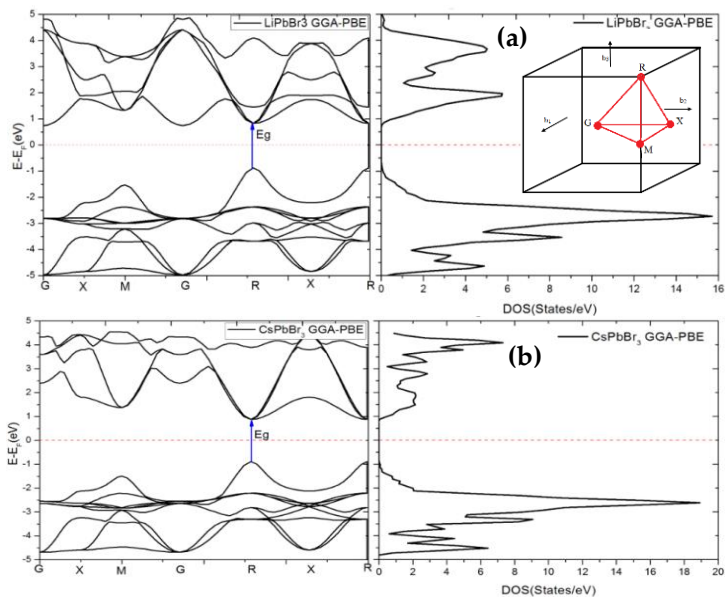
Untuk memahami bagaimana pengaruh kation A pada struktur elektronik perovskit secara keseluruhan, beberapa studi komputasi DFT pada perovskit anorganik halida (*all-inorganic halide perovskite*) telah dilakukan. Untuk perovskit  $\text{APbBr}_3$ , dengan A = Li, Na, K, Rb dan Cs, perhitungan telah dilakukan dengan menggunakan *ultrasoft pseudopotential* dengan fungsi korelasi-pertukaran GGA-PBE dan LDA-PZ. Akan tetapi, dari hasil komputasi untuk  $\text{CsPbBr}_3$ -nya, fungsi korelasi-pertukaran GGA-PBE menghasilkan nilai



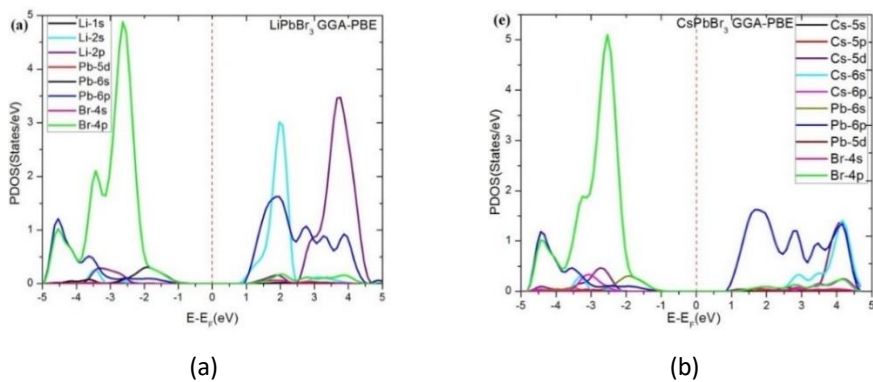
energi celah lebih besar dan lebih mendekati hasil eksperimen dibandingkan dengan fungsi korelasi-pertukaran LDA-PZ. Hasil komputasi ditunjukkan oleh Gambar 36 (hanya ditampilkan untuk hasil komputasi dengan fungsi korelasi-pertukaran GGA-PBE untuk  $\text{LiPbBr}_3$  dan  $\text{CsPbBr}_3$ ). Untuk semua  $\text{APbBr}_3$  ini, struktur elektroniknya terlihat jelas terbagi dua di bawah dan di atas energi Fermi (pada 0 eV), yang masing-masing menjadi pita valensi (VB) dan pita konduksi (CB). Celah pita energi terkecil terbentuk pada titik simetri R-nya. Celah pita energi sedikit bervariasi dalam kisaran 1,708–1,769 eV dikarenakan variasi unsur A tersebut tidak terlalu mengubah tetapan kisi drastis (sesuai dengan hasil optimasi kisi dalam tahap perhitungan sebelumnya). Khusus untuk  $\text{CsPbBr}_3$ , nilai celah pita energinya pernah dilaporkan sebesar 1,75 eV dan 1,76 eV berdasarkan hasil komputasi DFT. (Qian, dkk., 2016)

Hasil ekstraksi rapat keadaan (DOS), akan tetapi, menunjukkan bahwa pita valensi sebagian besar dibangun oleh anion  $\text{Br}^-$ , sedangkan pita konduksi sebagian besar dibangun oleh kation  $\text{Pb}^{2+}$ . Hal yang serupa dengan yang terjadi pada  $\text{MAPbI}_3$ . Kation  $\text{A}^+$  tidak berkontribusi secara signifikan pada pembentukan pita valensi dan level terendah pita konduksinya, kecuali pada perovskit  $\text{LiPbBr}_3$  dan  $\text{NaPbBr}_3$ . Meskipun demikian, belum dapat diyakini bahwa orbital-orbital Li dan Na itu membentuk hibridasi dengan orbital Pb pada tingkat energi pita konduksi tersebut. Namun hasil-hasil ini dapat menyiratkan kembali bahwa pita valensi dan konduksi serta energi celah dari perovskit halida ini lebih ditentukan oleh struktur oktahedral  $\text{PbBr}_6$ -nya.

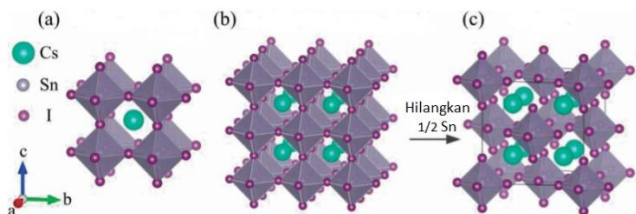
Seperti telah disinggung sebelumnya, perovskit halida  $\text{ABX}_3$  ini dapat memiliki beberapa struktur variannya, seperti  $\text{A}_2\text{B}_2\text{X}_6$  dan  $\text{A}_2\text{BX}_6$ . Varian ini khususnya lebih mudah muncul pada halida perovskit berbasis Sn dibandingkan dengan yang berbasis Pb. Sebagai contoh,  $\text{CsSnI}_3$  memiliki varian  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$ , yang dapat terbentuk langsung dari hasil sintesis atau hasil transformasi dari  $\text{CsSnI}_3$ . (Khaerani, dkk., 2020; Pering, 2023; Pujiarti, dkk., 2020b) Struktur  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  dapat dibayangkan sebagai hasil dari sebuah supersel  $\text{CsSnI}_3$  berukuran  $2 \times 2 \times 2$  yang kehilangan setengah jumlah Sn-nya, seperti diilustrasikan dalam **Gambar 38**.



**Gambar 36** Hasil komputasi struktur elektronik perovskit APbBr<sub>3</sub>, hanya ditampilkan untuk (a) A = Li dan (b) A = Cs saja, dengan fungsi korelasi-pertukaran GGA-PBE. Energi Fermi telah digeser ke 0 eV. Inset dalam gambar (a) menunjukkan kisi resiprok dan lintasan *k* yang digunakan dalam komputasi ini (Pitriana dkk., 2019).



**Gambar 37** Kurva rapat keadaan PDOS dari (a) LiPbBr<sub>3</sub> dan (b) CsPbBr<sub>3</sub> yang diekstraksi dari kurva dispersi struktur elektronik pada **Gambar 36** (Pitriana dkk., 2019).

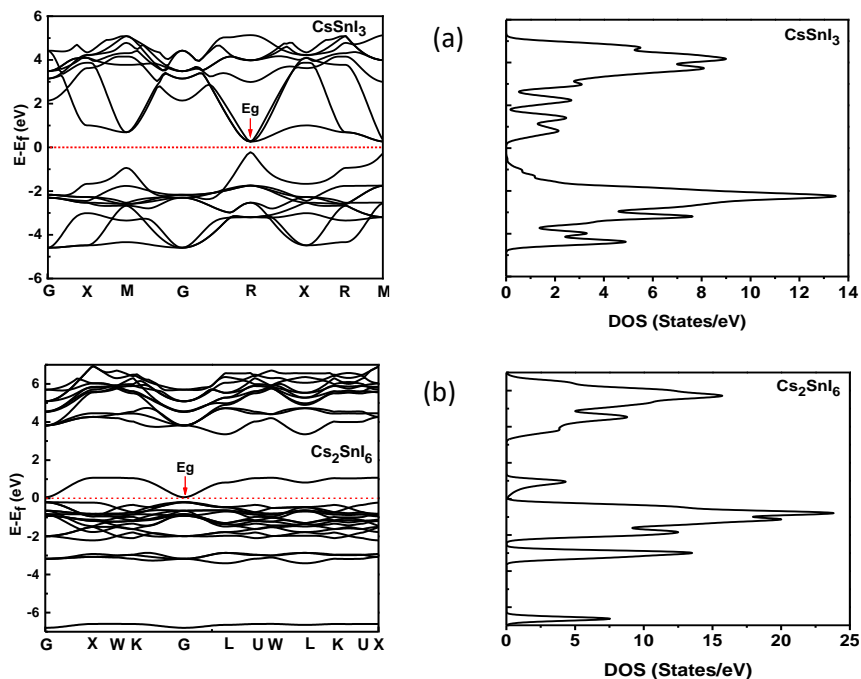


**Gambar 38** (a) Struktur sel kristal CsSnI<sub>3</sub> (unit sel), (b) supersel 2x2x2 CsSnI<sub>3</sub>, dan (c) struktur sel kristal satuan Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub> (Yolla Sukma Handayani dkk., 2021).

Meski terbentuk dari unsur yang sama, tetapi karakteristik kedua perovskit tersebut ternyata berbeda jauh.  $\text{CsSnI}_3$  memiliki sifat fotoluminesensi yang baik di daerah inframerah, di sekitar 950 nm, sehingga dapat diaplikasikan untuk devais pengemisi cahaya. Selain itu, perovskit ini menunjukkan karakter semikonduktor tipe  $p$  dengan mobilitas hole yang tinggi  $\sim 585 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  dengan rapat pembawa muatan sekitar  $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . (Chung, dkk., 2012) Akan tetapi, tidak demikian halnya dengan  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$ , yang tidak memiliki sifat fotoluminesensi yang bagus dan lebih banyak dipergunakan sebagai lapisan transpor pada sel surya. (Khaerani, dkk., 2020; Pujiarti, dkk., 2020b; Yuan, dkk., 2018) Hasil eksperimen lainnya menunjukkan bahwa  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  adalah semikonduktor tipe- $n$  dengan celah pita 1,6 eV, kerapatan pembawa muatan  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  dan mobilitas  $2,9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Perbedaan karakteristik itu terlihat pula dari hasil perhitungan DFT keduanya, seperti terlihat pada **Gambar 39**. Struktur elektronik  $\text{CsSnI}_3$  memiliki karakteristik seperti perovskit halida  $\text{ABX}_3$  umumnya. Pita valensi dan pita konduksi terbentuk dengan energi Fermi di tengah-tengah celah pita. Pita valensi maksimum (VBM) dan pita konduksi minimum (CBM) terletak pada titik simetri R, yang menandakan karakter semikonduktor langsung (*direct semiconductor*) pada  $\text{CsSnI}_3$ .

Berbeda dengan  $\text{CsSnI}_3$ , struktur elektronik  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  menunjukkan kehadiran pita sempit di atas energi Fermi. Jika pita sempit ini dianggap sebagai pita konduksi, maka  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  dapat dianggap sebagai semikonduktor langsung dengan VBM dan CBM pada titik G, yang terdiri atas orbital I (5p) untuk VBM dan orbital hibrid I (6p) / Sn (5s) untuk CBM. Akan tetapi, nilai energi celah ini masih terlalu kecil dibandingkan laporan hasil eksperimen oleh Saparov dkk. sebesar 1,62 eV. (Saparov dkk., 2016) Pita sempit di atas energi Fermi tersebut dapat juga dipandang sebagai pita antara IB (*intermediate band*), yang tidak terlibat dalam proses serapan atau absorpsi cahaya. Proses serapan cahaya tetap melibatkan VBM ke CBM yang lebih tinggi pada titik G. Akan tetapi, elektron yang tereksitasi segera turun ke tingkat energi lebih rendah pada pita konduksi di titik L sebelum jatuh kembali ke pita valensi. Hal ini membuat  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  menjadi seperti semikonduktor tak-langsung (*indirect semiconductor*). Akan tetapi, baik di bawah pengaruh cahaya maupun tidak, pita antara IB dapat berperan sebagai pembawa muatan hole di dalam suatu devais. Dengan mekanisme seperti ini,

$\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  dapat berperan sebagai lapisan transpor hole di dalam sel surya. (Y. S. Handayani dkk., 2018; Pujiarti dkk., 2020b; G. Zhang dkk., 2022)



**Gambar 39** Struktur pita elektronik dan DOS perovskit (a)  $\text{CsSnI}_3$  dan (b)  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  hasil perhitungan dengan fungsional GGA-PBE (Yolla Sukma Handayani dkk., 2021).

Sebagai catatan, hasil-hasil komputasi di atas masih menunjukkan adanya perbedaan dengan hasil-hasil eksperimen. Hal ini dapat dipahami mengingat perhitungan DFT ini belum memasukkan efek termal, yang berarti setara dengan kondisi 0K pada eksperimen. Selain itu, perhitungan DFT didasari pada keadaan dasar termasuk saat menghitung pita konduksinya. DFT tidak menghitung energi pita konduksi dengan meninjaunya sebagai keadaan tereksitasi sebenarnya. Untuk mengatasi hal itu, beberapa perbaikan metode komputasi telah dikembangkan, misalnya dengan menggunakan *Hybrid Functionals*, di mana penambahan fungsi pertukaran korelasi Hartree-Fock dapat meningkatkan akurasi nilai celah pita energi. Dengan menggunakan fungsional hibrid HSE06, hasil perhitungan untuk perovskit  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  memberikan nilai celah energi sekitar 0,82 eV untuk struktur semikonduktor langsung dan 2,3 eV untuk struktur semikonduktor tak-langsung, yang lebih mendekati nilai eksperimennya. Akan tetapi, akhir-akhir ini banyak upaya untuk memperbaiki perhitungan struktur elektronik perovskit ini dengan

menerapkan pendekatan GW, di mana perhitungan optimasi energi elektron menggunakan fungsi Green (G) dan interaksi Coulomb tertapis (W, *the screened Coulomb interaction*), meskipun beban komputasinya menjadi jauh lebih berat. (Tao, dkk., 2017; Umadevi dan Watson, 2019). Di samping aspek komputasi tersebut, dapat pula perbedaan tersebut berasal dari interaksi-interaksi khusus yang belum terlalu dikaji lebih dalam, seperti *spin-orbit coupling* dan efek Jahn Teller, yang ditemukan dapat memengaruhi energi pita konduksi dan besar celah pita energi pada beberapa material sejenis perovskit (Anandan dkk., 2023; Caretta dkk., 2013).



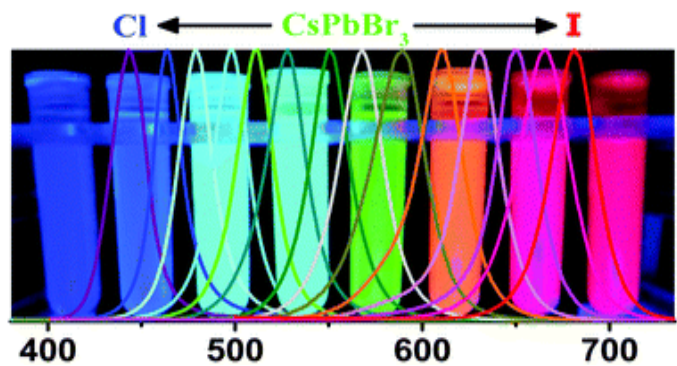
## 4 SEL SURYA PEROVSKIT: STRUKTUR DAN CACAT KRISTAL SERTA PENGARUHNYA PADA KARAKTERISTIK ELEKTRONIK DAN PERFORMANSI SEL SURYA

### 4.1 Struktur Bulk dan Permukaan Kristal Serta Kaitannya dengan Dinamika Relaksasi Keadaan Tereksitasi

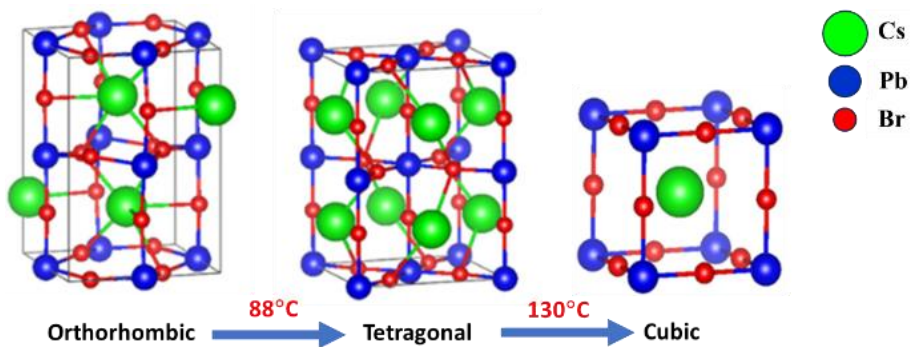
Pada sub-bab sebelumnya telah ditunjukkan bahwa struktur elektronik perovskit halida ini dapat dipengaruhi oleh struktur kristalnya, yang dapat berbentuk kubik, tetragonal, atau ortorombik. Struktur elektronik dari varian yang berbeda dapat memiliki struktur dan sifat elektronik yang berbeda jauh.  $\text{CsPbX}_3$  (dengan  $X = \text{Cl}, \text{Br}$  dan  $\text{I}$ ) adalah salah satu jenis perovskit yang menarik untuk dikaji karena memiliki sifat fotoluminesensi (PL) yang tinggi dan berpotensi untuk aplikasi devais pengemisi cahaya, laser dan bahkan optika non-linier. Di sisi lain, berbagai macam variasi struktur kristal  $\text{CsPbX}_3$ , yakni kubik, tetragonal dan ortorombik, dengan derajat dimensionalitas yang berbeda-beda mulai dari struktur dimensi nol (0D) atau titik kuantum (*quantum dot*) hingga struktur tiga dimensi (3D). (Tian, dkk., 2020; Yandri, dkk., 2024) Nanokristal 3D  $\text{CsPbBr}_3$  memiliki stabilitas kimia yang baik, tetapi lebih lemah sifat fotoluminesensinya (PL) dibandingkan dengan yang 0D-nya. Nanokristal perovskit  $\text{CsPbX}_3$  ini juga menarik karena spektrum absorbansi dan PL nya dapat diubah-ubah dengan pengaturan komposisi unsur pembentuknya atau bahkan dengan pertukaran ligan. (Akkerman, dkk., 2015; Liu, dkk., 2019; Wei, dkk., 2016) Akan tetapi, asal mula mekanisme perubahan tersebut, yang biasanya akan terkait dengan celah pita energi, masih belum dapat dipahami dengan baik, apakah akibat perubahan struktur kristal secara keseluruhan ataukah akibat perubahan atau deformasi kristal secara lokal saja. Hal ini tentunya menjadi kajian fisika yang menarik hingga saat ini.

Di lain hal, seperti telah disinggung pada bab sebelumnya, pada perovskit halida ini dikenal adanya transformasi perubahan struktur kristal dari kubik, tetragonal menjadi ortorombik. Untuk  $\text{CsPbBr}_3$ , transformasi perubahan struktur kristal terjadi dari orthorombik menjadi tetragonal pada suhu  $T=88$  °C dan kemudian berubah menjadi kubik pada suhu  $T=130$  °C. (M. Zhang, dkk., 2017) Pada nanokristal  $\text{CsPbBr}_3$  yang disintesis dengan metode *ligand-*

*assisted reprecipitation* (LARP), efek struktur kristal pada karakteristik PL dan relaksasi eksiton dapat teramati dengan jelas. (Yandri, dkk., 2024) Untuk pasangan ligan dan *anti-solvent* tertentu, hasil pengukuran XRD dan analisisnya menunjukkan bahwa CsPbBr<sub>3</sub> yang disintesis dengan toluen/asam linoleik memiliki struktur ortorombik *Pnma*, yang disintesis dengan toluen/asam oleik memiliki struktur tetragonal *P4mm*, sedangkan yang disintesis kloroform/asam oleik memiliki struktur kubik *Pm3m*. Proses sintesis ini tidak menggunakan ligan *oleylamine* sehingga kecenderungan untuk membentuk struktur tiga dimensi menjadi berkurang. Nanokristal CsPbBr<sub>3</sub> yang terbentuk cenderung memiliki bentuk seperti nanopelat, seperti terlihat pada citra *transmission electron microscopy* (TEM) dalam **Gambar 42** (a) dan (b).

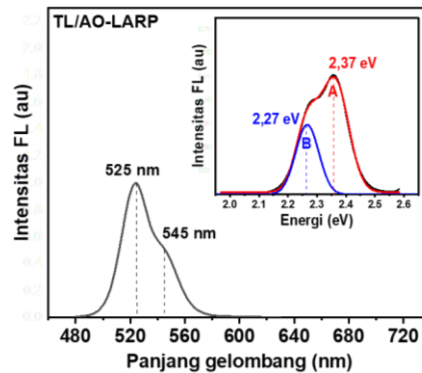
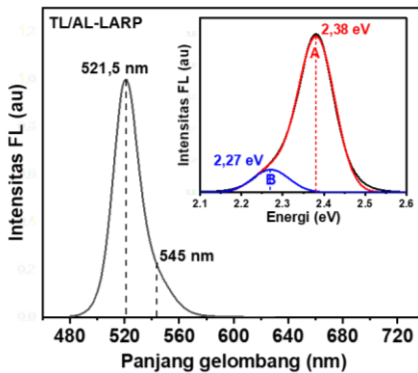
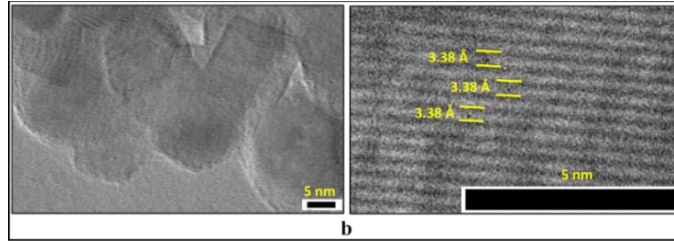
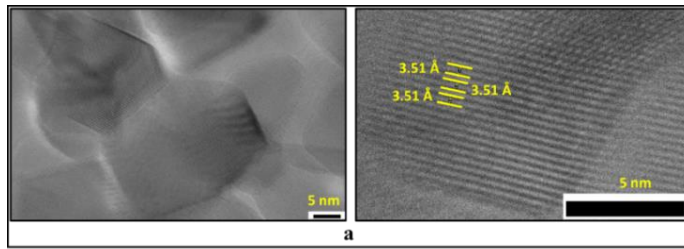


**Gambar 40** Variasi cahaya PL dari titik kuantum CsPbBr<sub>3</sub>. (Wei dkk., 2016)



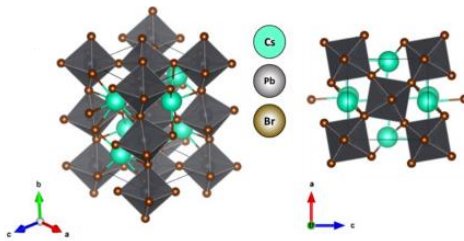
**Gambar 41** Perubahan struktur kristal CsPbBr<sub>3</sub> akibat pengaruh suhu.



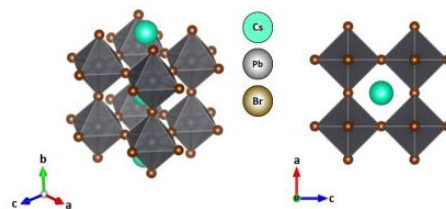


(c)

(d)



(e)



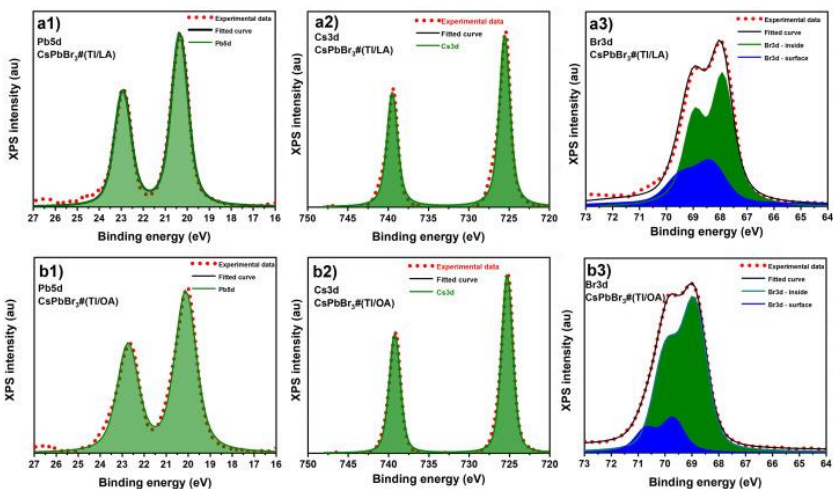
(f)

**Gambar 42** Citra TEM dari sampel (a)  $\text{CsPbBr}_3(\text{TL/AL-LARP})$  dan (b)  $\text{CsPbBr}_3(\text{TL/AO-LARP})$ . Spektrum PL dari (c)  $\text{CsPbBr}_3(\text{TL/AL-LARP})$  dan (d)  $\text{CsPbBr}_3(\text{TL/AO-LARP})$ . Struktur kristal untuk bentuk (e) ortorombik dan (f) kubik (Yandri dkk., 2024).

Hasil pengukuran PL menunjukkan ada perbedaan bentuk spektrum bergantung pada struktur kristalnya, seperti terlihat pada **Gambar 42** (c).  $\text{CsPbBr}_3$  ortorombik menghasilkan PL yang paling terang dengan puncak di

sekitar 520 nm sedangkan CsPbBr<sub>3</sub> tetragonal dan kubik menghasilkan PL yang lebih lemah dan bergeser ke panjang gelombang lebih besar. CsPbBr<sub>3</sub> tetragonal terlihat seperti terdiri atas dua puncak, yakni dengan puncak di 525 nm dan 545 nm.

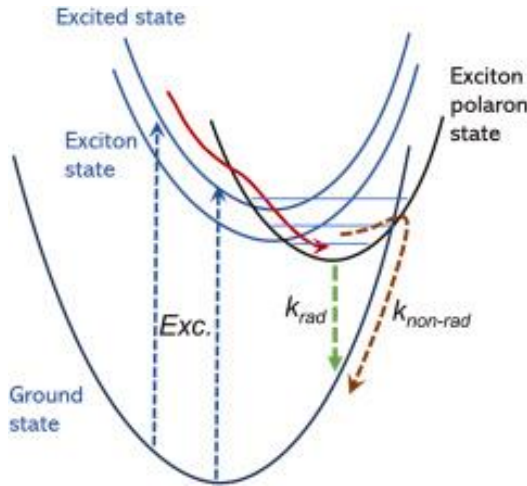
Hasil pengukuran *X-ray photoelectron spectroscopy* (XPS) memberikan informasi tersembunyi yang sangat berharga, seperti ditunjukkan dalam **Gambar 43**. Pemunculan puncak PL di 545 nm terkait dengan mengecilnya puncak XPS untuk Br-3d dengan energi ikat lebih tinggi (arsir warna biru), di sekitar 69 eV, yang dapat diasosiasikan dengan Br yang mengalami interaksi dengan ligan pada permukaan kristal. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur ortorombik yang stabil di permukaan kristal ditopang dengan kehadiran ligan yang menempel di permukaan nanokristal. Ligan tidak banyak menempel pada permukaan nanokristal tetragonal dan kubik.



**Gambar 43** Spektrum XPS dari dua sampel CsPbBr<sub>3</sub> berbeda, yakni TL/AL-LARP dan TL/AO-LARP, yang masing memiliki struktur kristal ortorombik dan tetragonal (Yandri dkk., 2024).

Kehadiran ligan juga dapat menyangga struktur ortorombik dengan sudut *tilting* PbBr<sub>6</sub> yang besar. Efek *tilting* grup oktahedral ini terlihat dapat mengisolir eksiton sehingga eksiton lebih cenderung menghasilkan rekombinasi radiatif. Akan tetapi, *tilting* grup oktahedral lebih kecil pada struktur tetragonal dan bahkan tidak ada pada struktur kubik yang ideal. Mengecilnya intensitas PL dan pergeseran ke panjang gelombang lebih besar (*red shift*) dapat ditafsirkan dengan relaksasi eksiton ke bentuk eksiton

polaron, di mana kemudian sebagian kembali ke keadaan dasar melalui peluruhan non-radiatif, seperti diilustrasikan pada **Gambar 44**.



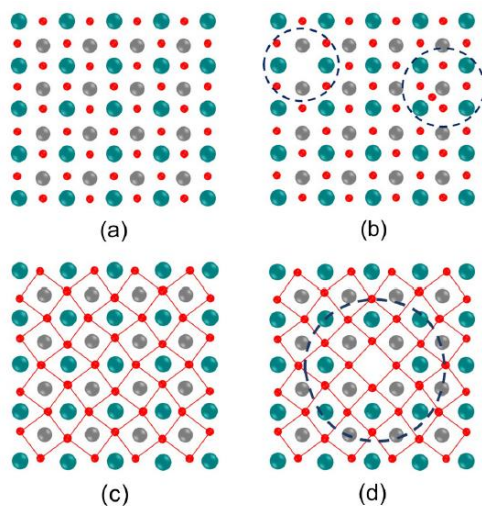
**Gambar 44** Relaksasi keadaan tereksitasi setelah proses fotoeksitasi dengan melibatkan proses pembentukan eksiton polaron di dalam perovskit CsPbBr<sub>3</sub> (Yandri, dkk., 2024).

## 4.2 Cacat Permukaan Kristal dan Kaitannya dengan Karakteristik dan Perfoma Sel Surya

Dikarenakan perovskit halida terbentuk dari ikatan ionik, selain ada cacat di dalam kristal (*bulk defect*), struktur permukaan perovskit ini dapat mengandung banyak cacat permukaan (*surface defect*). Cacat permukaan yang mungkin banyak terjadi, misalnya kation B<sup>2+</sup> tanpa pasangan ikatan (*uncoordinated B<sup>2+</sup>*), anion X<sup>-</sup> tanpa pasangan ikatan (*uncoordinated X<sup>-</sup>*), cacat vakansi X<sup>-</sup>, cacat penyisipan/interstisial hingga penumpukan kluster logam B, seperti diilustrasikan oleh **Gambar 45**. Secara umum, berdasarkan energi pembentukannya, vakansi termasuk cacat dangkal (*shallow trap*), sedangkan interstisial dan ion tanpa pasangan ikatan adalah perangkap dalam (*deep trap*). Kehadiran cacat ini akan memiliki pengaruh yang sangat besar pada proses transfer dan transpor muatan di dalam suatu devais, seperti sel surya dan dioda LED. Cacat-cacat tersebut dapat berperan sebagai pusat rekombinasi rugi, yang menyebabkan kehilangan pembawa muatan hasil fotogenerasi atau injeksi sehingga mengurangi performansi devais yang dibentuknya. Selain itu, kehadiran cacat dapat juga memicu ketidakstabilan lapisan perovskit itu sendiri dan memperpendek usia devaisnya.

Kehadiran cacat sangat dipengaruhi oleh:

1. Metode fabrikasi lapisan perovskit dan lapisan lainnya,
2. sifat antar lapisan yang terbentuk, dan
3. struktur pita energi devais (sel surya) yang dibuat.



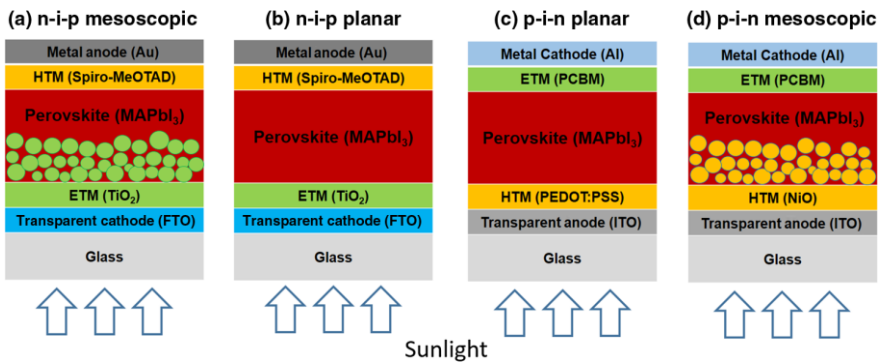
**Gambar 45** Ilustrasi sederhana dari struktur permukaan perovskit. (a) Kristal murni, (b) kristal dengan cacat kekosongan dan cacat penyisipan, (c) kristal murni dengan *tilting* oktahedral, dan (d) kristal dengan *tilting* oktahedral yang terjadi karena kehadiran cacat kekosongan. Segi empat titik merah melambangkan sub-grup oktahedral  $PbI_6$  dilihat dari arah sumbu vertikal kristal.

Faktor ke-1 dapat memengaruhi faktor ke-2, di mana selanjutnya faktor ke-2 dapat memengaruhi faktor ke-3. Ada beberapa macam metode pembuatan lapisan tipis perovskit halida yang telah dikembangkan. Metode yang pertama-tama dikenal dan banyak dilakukan pada skala laboratorium, khususnya untuk pembuatan sel surya, adalah metode deposisi larutan prekursor dengan teknik *spin coating*. Mudahnya proses pembuatan lapisan perovskit ini dapat terlihat secara ilustratif pada **Gambar 46**. Akan tetapi, proses kristalisasi terjadi secara cepat yang terjadi secara kompetitif dengan pembentukan produk lainnya. Dengan demikian, lapisan terbentuk dari susunan polikristalin dengan ukuran bulir (*grain*) dalam ukuran beberapa ratus nanometer yang mungkin disertai dengan kehadiran berbagai bentuk cacat di permukaannya.



**Gambar 46** Proses pembuatan lapisan perovskit dengan teknik *spin coating* larutan prekursor.

Terkait dengan faktor kedua, struktur sel surya perovskit juga memerlukan lapisan antarmuka yang dirancang untuk mengoptimalkan ekstraksi elektron-hole hasil fotogenerasi. Ada berbagai arsitektur struktur sel surya perovskit yang telah dikembangkan, seperti terlihat pada **Gambar 47**, misalnya struktur mesoskopik atau struktur planar dengan konfigurasi struktur normal (*n-i-p*) atau struktur terbalik (*p-i-n*). (Xiao dkk., 2016) Lapisan transpor elektron (ETL) dan lapisan transpor *hole* (HTL) disisipkan dalam struktur tersebut agar dapat mengoptimalkan ekstraksi elektron dan *hole* ke masing-masing kutub, dengan mengurangi rekombinasi rugi pada bidang antarmuka. Sifat antarmuka lapisan tersebut dapat bervariasi dipengaruhi oleh sifat adhesif, polaritas, uniformitas dll., yang terkait dengan kecocokan sifat kimia-fisika kedua material tersebut.



**Gambar 47** Struktur sel surya perovskit dalam bentuk struktur mesoskopik (a dan d) dan struktur planar (b dan c). Sel dapat berbentuk struktur normal atau *n-i-p* (a dan b) atau struktur terbalik atau *p-i-n* (c dan d) (Xiao dkk., 2016).

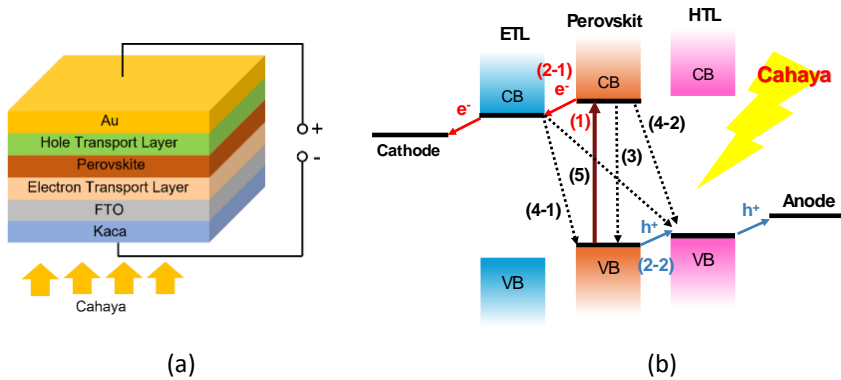
Terkait faktor ketiga, pemilihan material perovskit, ETL dan HTL harus diatur sehingga perbedaan tingkat energi pada bidang antarmuka ETL/perovskit dan perovskit/HTL tidak menyebabkan akumulasi muatan. Sebagai contoh, sel surya perovskit dengan struktur

FTO/TiO<sub>2</sub>(cp)|TiO<sub>2</sub>(mp)/MAPbI<sub>3</sub>/PTAA/Au (**Gambar 48** (a)), di mana TiO<sub>2</sub>(cp)|TiO<sub>2</sub>(mp) berperan sebagai HTL dan PTAA sebagai ETL. Susunan struktur pita energi dari sel tersebut ditunjukkan oleh **Gambar 48** (b). Perbedaan tingkat energi pita konduksi (CB) perovskit MAPbI<sub>3</sub> dan pita konduksi (CB) TiO<sub>2</sub> membentuk tangga yang menurun secara energi, sehingga elektron dapat berpindah secara spontan. Di sisi lain, pada bidang antarmuka perovskit MAPbI<sub>3</sub> dan PTAA terbentuk tangga yang mendaki sehingga hole dapat ditransfer dengan mudah. Dengan susunan tingkat energi seperti ini, sel surya perovskit MAPbI<sub>3</sub> ini dapat menghasilkan efisiensi konversi yang tinggi.

**Gambar 48** (b) menunjukkan proses yang terjadi di dalam sel surya, yang terdiri atas tahapan-tahapan:

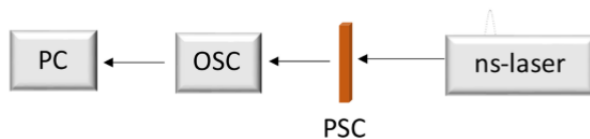
- a) fotogenerasi pembawa muatan (1),
- b) transfer pembawa muatan (elektron dan hole) melalui ETL (2-1) dan HTL (2-2)
- c) rekombinasi elektron dan hole (rekombinasi rugi) secara radiatif dan non-radiatif (3)
- d) rekombinasi balik (rekombinasi rugi), ETL ke perovskit (4-1) dan perovskit ke HTL (4-2)
- e) rekombinasi rugi di antarmuka ETL/HTL (5)

Berbagai cara telah dikembangkan untuk mengurangi efek rekombinasi rugi akibat kehadiran cacat kristal *bulk* dan permukaan. Akan tetapi, masih diperlukan pemahaman fisiknya yang dapat mengaitkan keberadaan cacat tersebut dengan kinetika transpor-ekstraksi muatan dan karakteristik sel suryanya. Untuk menjawab pertanyaan ini, mungkin diperlukan studi terperinci tentang seluruh proses fotovoltaik, dari fotoeksitasi hingga ekstraksi pembawa muatan, dan pengaruh cacat pada proses tersebut. Namun, hal ini tidak mudah karena belum ada metode untuk melakukan karakterisasi cacat kristal dan karakteristik fotovoltaik secara bersamaan dalam satu sel surya. Ada beberapa metode untuk memverifikasi keberadaan cacat atau keadaan perangkat secara tidak langsung dan pengaruhnya pada kinerja sel surya, seperti spektroskopi impedansi, pengukuran konduktivitas gelombang mikro, pengukuran fotoarus transien, dan fotoluminesensi transien. (Bou dkk., 2020, 2020; Geiger dkk., 2018; Hauff dan Klotz, 2022; Le Corre, dkk., 2021)



**Gambar 48** (a) Struktur sel surya perovskite berstruktur FTO/TiO<sub>2</sub>(cp)|TiO<sub>2</sub>(mp)/MAPbI<sub>3</sub>/PTAA/Au. (b) Diagram struktur pita energi untuk struktur tersebut dan proses optik-elektronik yang terlibat.

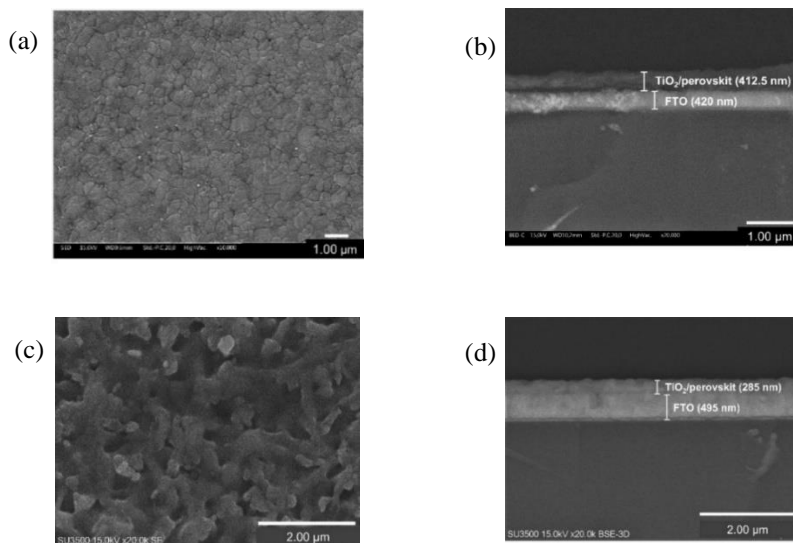
Untuk mengkaji efek rekombinasi rugi pada antarmuka lapisan sel surya perovskite, kami telah mengembangkan teknik pengukuran fototegangan transien (*transient photovoltage*, TPV), yang dapat dibangun dengan sistem sederhana seperti terlihat pada **Gambar 49**. Sistem pengukuran ini mencatat peluruhan (*decay*) tegangan buka ( $V_{oc}$ ) pada sampel sel surya setelah dikenai berkas cahaya laser berbentuk pulsa singkat dalam orde nanosekon. Sistem pengukuran ini hanya memanfaatkan sumber laser nanosekon dan osiloskop dengan laju sampling yang tinggi. Teknik pengukuran TPV ini berbeda dengan yang dilaporkan di beberapa referensi lain meskipun menggunakan istilah yang sama.



**Gambar 49** Skema diagram pengukuran TPV (Hidayat dkk., 2020).

TPV dapat memberikan informasi proses ekstraksi dan transpor elektron-hole pada domain mikrosekon. Untuk mengetahui proses yang terjadi lebih lambat, seperti proses yang terkait dengan perpindahan ion, metode pengukuran impedansi dengan sinar cahaya termodulasi, yang sering dikenal sebagai teknik *Impedance Modulated photo-Voltage Spectroscopy* (IMVS), dapat pula diterapkan pada sel surya perovskite ini. (Hidayat, dkk., 2020; Nurunnizar, dkk., 2021a)

### 4.3 Efek Morfologi Permukaan Dipindai dengan Teknik Pengukuran Fototegangan Transien

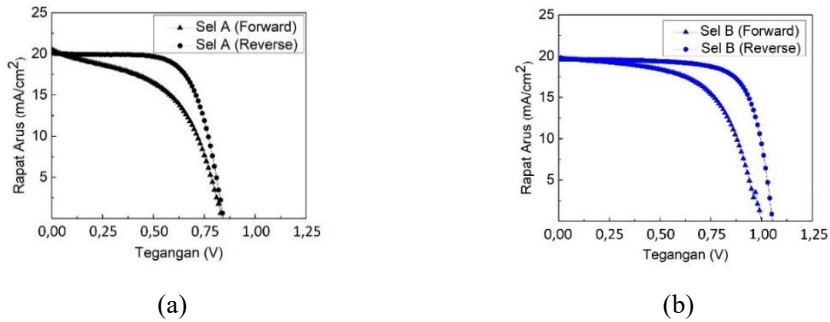


**Gambar 50** Citra mikroskop pemindaian elektron (*scanning electron microscopy*, SEM) dari (a) permukaan dan (b) penampang lintang lapisan nanokristal perovskit di atas lapisan mp-TiO<sub>2</sub>#A. Gambar (c) dan (d) serupa dengan (a) dan (b), tetapi untuk yang di atas lapisan mp-TiO<sub>2</sub>#B (Hidayat dkk., 2020).

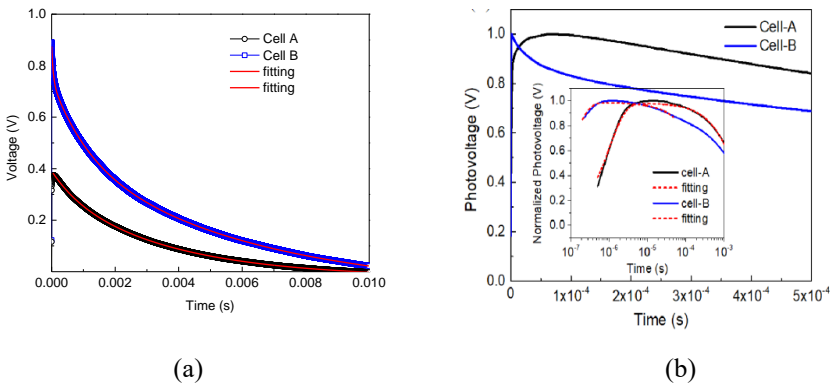
Metode karakterisasi TPV dan IMVS telah berguna dalam mengidentifikasi penyebab penampakan perbedaan karakteristik/performa pada sel surya yang berbeda. Perbedaan itu berasal dari perbedaan proses *trapping-detrapping* elektron dalam proses transpornya karena perbedaan karakter dan distribusi cacat kristal pada permukaan bulir dan bidang batas TiO<sub>2</sub>/perovskit. **Gambar 50** menunjukkan citra penampang lapisan TiO<sub>2</sub>/MAPbI<sub>3</sub> yang diukur dengan mikroskop pemindaian elektron (*scanning electron microscopy*, SEM) dari dua sel surya perovskit berstruktur FTO/TiO<sub>2</sub>/MAPbI<sub>3</sub>/PTAA/Au. Sel #A memiliki lapisan TiO<sub>2</sub> berstruktur mesopori yang rapat sedangkan sel #B memiliki lapisan TiO<sub>2</sub> berstruktur mesoskopik. Pada sel#A, perovskit nanokristal cenderung lebih banyak berada di atas permukaan lapisan TiO<sub>2</sub>. Pada sel#B, lapisan perovskit nanokristal dapat mengisi ke dalam rongga lapisan mesoskopik TiO<sub>2</sub>. Sepintas terlihat karakteristik *J-V* kedua macam sel surya tersebut tidak berbeda secara signifikan, seperti terlihat pada Gambar 51. Akan tetapi, sel #A menunjukkan performa yang lebih rendah dibanding sel #B karena tegangan rangkaian



buka-nya ( $V_{oc}$ ) lebih kecil. Sel #A menghasilkan  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$  dan  $PCE$  masing-masing sebesar 20 mA/cm<sup>2</sup>; 0,84 V; 68,1 % dan 11,5%. Sedangkan sel #B menghasilkan masing-masing sebesar 19,6 mA/cm<sup>2</sup>; 1.05 V; 73,4% dan 15,1%. Akan tetapi, pengukuran TPV dapat menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan di kedua sel tersebut, seperti terlihat dari kurva peluruhan TPV pada **Gambar 52**.



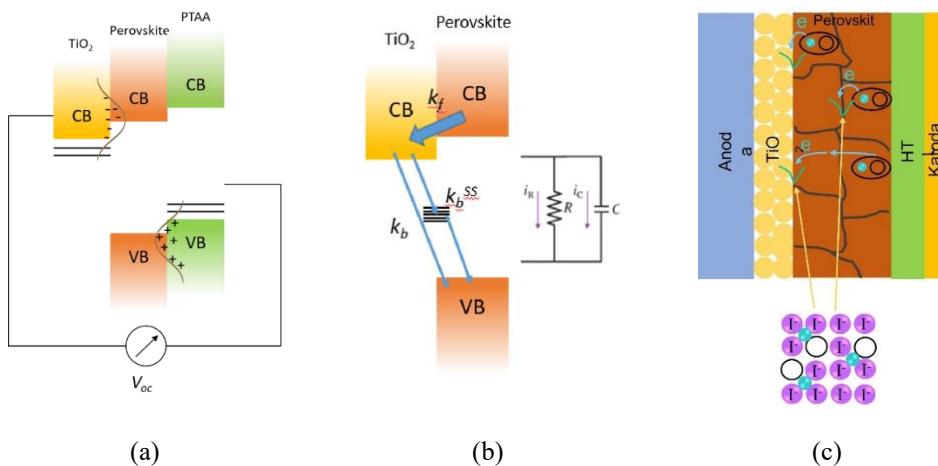
**Gambar 51** Karakteristik kurva  $J-V$  (a) sel #A dan (b) sel #B (Hidayat dkk., 2020).



**Gambar 52** Kurva peluruhan TPV dari sel #A dan sel #B untuk (a) interval waktu menyeluruh hingga 10 ms, dan (b) interval waktu lebih pendek (bagian awal peluruhan) hanya sampai 50  $\mu$ s dengan sumbu x dalam skala linier dan logaritmik (inset) yang dinormalisasi (Hidayat dkk., 2020).

Salah satu *problem* dari teknik TPV ini adalah, meskipun teknik pengukurannya sederhana, kurva peluruhan yang terukur dapat memberikan multi-interpretasi. Kami telah mencoba membangun gambaran fisis atas proses yang terjadi pada data TPV di atas seperti berikut. Sesaat setelah pulsa fotoeksitasi, pembawa muatan fotogenerasi di lapisan perovskit berpindah ke lapisan transpor melalui arus difusi atau arus *drift*. Tegangan sel kemudian berubah bergantung waktu sesuai dengan persamaan  $V(t) = \Delta Q(t)/C$  di mana  $\Delta Q(t) = e\Delta n(t) = e\Delta p(t)$  adalah total elektron terakumulasi di lapisan

TiO<sub>2</sub> atau *hole* di lapisan PTAA dan C adalah kapasitansi sel. Berbeda dengan TPC, peluruhan pembawa muatan yang terakumulasi ini tidak disebabkan ekstraksi pembawa muatan ke rangkaian luar, tetapi disebabkan rekombinasi internal seperti diilustrasikan pada **Gambar 53** (a). Laju transfer muatan elektron dari lapisan perovskit ke lapisan TiO<sub>2</sub> ( $k_f$ ) seharusnya sangat tinggi sehingga mempunyai konstanta waktu yang sangat kecil. Namun, mungkin ada beberapa jalur transfer balik (*back-transfer pathways*) untuk elektron yang terakumulasi tersebut, dengan laju transfer yang sangat lambat, juga oleh jalur dari TiO<sub>2</sub> ke lapisan perovskit atau melalui *surface trap states*. Kondisi seperti ini memunculkan karakteristik yang setara dengan sebuah rangkaian RC paralel, seperti yang diilustrasikan oleh gambar *inset* **Gambar 53** (b). Selama paparan laser yang sangat pendek, elektron hasil fotogenerasi secara cepat mengalir mengisi kapasitor. Setelah paparan pulsa laser usai, kapasitor secara perlahan mengosongkan elektron yang terakumulasi melalui resistor R. Laju transfer balik yang lebih rendah dapat dikaitkan dengan resistansi R yang lebih besar, yang terlihat sebagai peluruhan kurva TPV yang lambat.



**Gambar 53** (a) Akumulasi muatan di antarmuka dan pembentukan  $V_{oc}$  (b) akumulasi elektron dan relaksasi ke lapisan perovskit (c) rekombinasi elektron di antarmuka TiO<sub>2</sub>/perovskit dan *trapping-detrapping* di batas bulir (Hidayat dkk., 2020).

Model kinetika untuk proses di atas dapat dibuat sederhana dengan penggunaan sumber fotoeksitasi berupa laser pulsa pendek, menghasilkan durasi paparan cahaya hanya dalam beberapa nanosekon. Lebar durasi pulsa laser ini jauh lebih pendek dari respon TPV yang terukur. Oleh karena itu, kinetika populasi elektron di sisi TiO<sub>2</sub> dapat ditulis dengan sederhana sebagai berikut:

$$e \frac{\partial \Delta n(x)}{\partial t} = \frac{\partial J_n}{\partial x} - eR \quad (9)$$

di mana sisi kiri merepresentasikan perubahan terhadap waktu dari jumlah elektron terakumulasi ( $\Delta n$ ) yang berasal dari lapisan perovskit, sementara bagian pertama di sisi kanan terkait aliran elektron di dalam lapisan  $\text{TiO}_2$  ( $J_n$  adalah distribusi rapat arus di lapisan mp- $\text{TiO}_2$ ) dan bagian kedua di sisi kanan terkait laju rekombinasi ( $R$ ) elektron yang terakumulasi. Fotoeksitasi dengan pulsa singkat juga dapat menyuplai banyak elektron untuk mengisi lapisan  $\text{TiO}_2$  secara seragam. Jika laju rekombinasi  $R$  sebanding dengan  $n/\tau_{rec}$ , di mana  $\tau_{rec}$  adalah konstanta waktu laju rekombinasi, laju kinetik rekombinasi di antarmuka  $\text{TiO}_2$ /perovskit menjadi:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n}{\tau_{rec}} \quad (10)$$

Dengan pertimbangan lebar pulsa laser jauh lebih singkat daripada peluruhan TPV, solusi persamaan di atas akan menjadi fungsi eksponensial sederhana dalam bentuk  $\Delta n(t) = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau_{rec}}}$ , di mana  $n_0$  konsentrasi awal elektron yang disuplai dari lapisan perovskit setelah fotoeksitasi. Hal ini menjelaskan bahwa peluruhan TPV ( $\Delta V(t)$ ) akan berbentuk eksponensial sederhana. Akan tetapi, hal ini tidak bisa menjelaskan kemunculan *rising part* dengan profil berbeda di peluruhan TPV di atas.

Di sini kami mempertimbangkan bahwa  $\Delta n_0$  memiliki profil bergantung terhadap waktu, yang merepresentasikan suplai elektron dari lapisan perovskit yang dipengaruhi riwayat transport elektron itu sendiri. Solusi di atas kemudian harus dimodifikasi dalam bentuk konvolusi  $\Delta n_0(t)$  dan peluruhan eksponensial  $e^{-t/\tau_{rec}}$ . Dengan menggunakan teori konvolusi, untuk  $t \geq 0$ , solusi untuk  $V(t) = (e/C)n_{rec}(t) * n_t(t)$  di mana  $n_{rec}(t)$  dan  $n_t(t)$  merupakan fungsi eksponensial sebagai berikut

$$V(t) = V_0 \left( \frac{e^{-t/\tau_t} - e^{-t/\tau_{rec}}}{1/\tau_t - 1/\tau_{rec}} \right) \quad (11)$$

Parameter  $\tau_t$  adalah konstanta waktu transpor elektron di lapisan perovskit dan  $\tau_{rec}$  adalah rekombinasi balik elektron, yang diilustrasikan dalam Gambar 53, dan  $V_0$  adalah fototegangan awal. Kurva solusi ini terdiri atas bagian naik (*rising part*) di saat awal setelah fotoeksitasi, yang kemudian diikuti bagian peluruhan (*decaying part*). Fungsi ini ternyata dapat dipergunakan untuk pencocokan kurva

(*curve fitting*) peluruhan TPV di atas, yang menghasilkan  $\tau_t = 1,03 \mu s$  dan  $\tau_{rec} = 1,96 ms$  untuk sel #A, dan  $\tau_t = 0,01 \mu s$  dan  $\tau_{rec} = 0,37 ms$  untuk sel B. Sel A yang menunjukkan performa sel yang kurang baik ternyata menunjukkan  $\tau_{rec}$  yang lebih panjang, yang dapat dikaitkan proses rekombinasi elektron-hole melalui *surface defect states* dan *deep level defect state* yang lebih banyak di sel #A. Selain itu, elektron lebih berpeluang terperangkap di *defect surface state* dan tinggal beberapa saat di keadaan tersebut sebelum kembali ke pita valensi perovskit, sehingga membutuhkan waktu transpor ( $\tau_t$ ) lebih panjang. Di sini, laju rekombinasi melalui *deep level state* secara umum lebih lambat dibandingkan rekombinasi langsung ( $k_b^{SS} < k_b$ ).

Dengan menggunakan interpretasi di atas, karakteristik kurva TPV yang terdiri atas *rising part* dan *decaying part* itu sekarang dapat dipahami dengan lebih baik. Dengan simulasi sederhana dari fungsi  $V(t)$  di atas, efek besar waktu karakteristik transpor ( $\tau_t$ ) dan waktu karakteristik rekombinasi ( $\tau_{rec}$ ) pada kurva TPV dapat terlihat dengan jelas. Perkiraan waktu transit dapat dilakukan dengan memanfaatkan koefisien difusi dan mobilitas pembawa muatan di perovskit ini yang pernah dilaporkan oleh Wang, dkk., yakni masing-masing sekitar  $0.3 \text{ cm}^2 \text{ s}$  dan  $1-100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (H. Wang, dkk., 2019). Hasil perhitungan waktu transit sekitar beberapa nanosekon sampai ratusan nanosekon, yang hampir sesuai dengan nilai waktu karakteristik transpor  $\tau_t$  yang diperoleh dari pengukuran TPV di atas.

#### 4.4 Efek Rekombinasi Rugi pada Permukaan Bidang Batas dalam Sel Surya Dilihat dengan Teknik Pengukuran Fototegangan Transien

Metode pengukuran fototegangan transien (TPV) ini terbukti dapat juga digunakan untuk mengidentifikasi dua sel sejenis tetapi berbeda performansinya. Reprodusibilitas proses fabrikasi merupakan hal yang penting untuk manufakturisasi dalam skala besar. Proses pengujian dapat dilakukan dengan teknik sederhana seperti pengukuran kurva  $J-V$ . Akan tetapi, pengukuran kurva  $J-V$  tidak dapat memberikan informasi lebih jauh penyebab suatu sel gagal memenuhi performa sel surya yang diharapkan. **Gambar 54** menunjukkan kurva karakteristik dari dua sel surya perovskit yang dibuat pada batch yang sama, yang dinamai sebagai sel #B1 dan sel #B2. Tampak jelas bahwa ada perbedaan pada karakteristik kurva  $J-V$  nya, tetapi

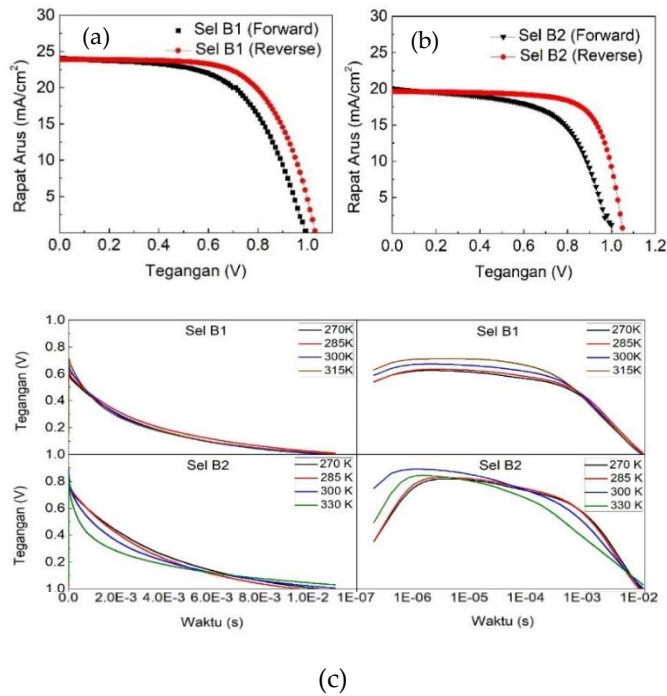
belum diketahui penyebabnya. Dengan pengukuran TPV, dapat terlihat adanya perbedaan karakteristik peluruhan di mana sel #B2 menunjukkan karakteristik peluruhan yang bergantung pada suhu dan memiliki pola peluruhan eksponensial tertekan (*stretched exponential decay*), seperti terlihat pada **Gambar 54** (c).

Kurva sel #B2 memiliki karakter fungsi peluruhan eksponensial tertekan, yang diberikan oleh fungsi:

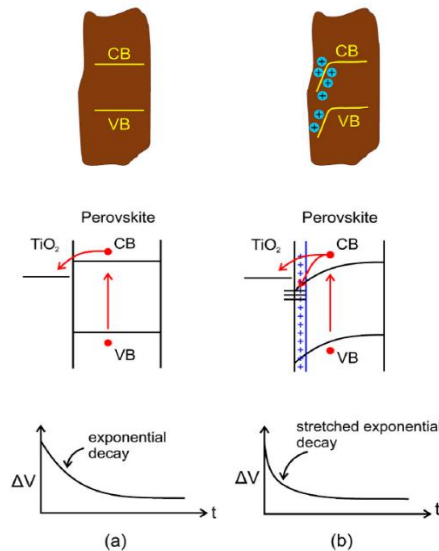
$$V(t) = \left[ V_1 \exp \left( - \left( \frac{t}{\tau_1} \right)^\beta \right) \right] + V_2 \exp \left( - \left( \frac{t}{\tau_2} \right) \right) \quad (12)$$

di mana  $0 < \beta < 1$ , di mana  $\beta = 1$  merepresentasikan bentuk peluruhan eksponensial normal (tidak tertekan). Fungsi ini dikenal juga sebagai dikenal dengan fungsi eksponensial tertekan Kohlrausch-Williams-Watts (KWW). (Murawski dan Barczyński, 1996; Phillips, 1996) Secara umum, fungsi ini muncul ketika terjadi penyimpangan dari proses peluruhan kinetika orde pertama, di mana laju peluruhan tidak konstan tetapi menurun seiring waktu. Karakter fungsi eksponensial tertekan KKW ini telah dilaporkan teramati pada proses transpor elektronik dalam semikonduktor, nanokristal, dan polimer terkonjugasi, yang terjadi akibat adanya relaksasi molekular kristal atau proses transpor yang melalui suatu sebaran keadaan perangkap (*trap states*).

Untuk kasus dalam sel surya perovskit ini, dengan bantuan ilustrasi pada **Gambar 54**, data TPV dapat ditafsirkan sebagai berikut. Pada sel #B1, cacat permukaan jumlahnya terbatas dan terpisahkan jauh satu dengan yang lainnya. Dalam keadaan demikian, elektron yang ditransferkan ke lapisan TiO<sub>2</sub>, baik yang berada di pita valensi ataupun keadaan perangkap, akan mengalami relaksasi turun kembali ke keadaan dasar melalui proses kinetika orde pertama sederhana. Fakta bahwa kurva peluruhan dapat dikenakan pencocokan kurva dengan bentuk multi-eksponensial menunjukkan bahwa ada beberapa situs asal yang berbeda dari proses relaksasi elektron tersebut. Pada sel #B2, keadaan perangkap cukup banyak dan berdekatan secara spasial dan energi sehingga elektron dapat mengalami *trapping-detrapping* yang mempercepat elektron meluruh turun kembali ke keadaan dasar, sehingga terlihat sebagai peluruhan eksponensial tertekan. Hasil ini menunjukkan kembali krusialnya efek rekombinasi rugi akibat cacat kristal dan permukaan pada sel surya perovskit, yang dapat diidentifikasi dengan pengukuran transien fototegangan sederhana.



**Gambar 54** Kurva J–V dari dua sel yang berbeda tetapi dibuat pada satu batch yang sama, yakni (a) sel #B1 dan (b) sel #B2. (c) Kurva TPV untuk kedua sel tersebut. Kurva sebelah kiri sumbu waktu dalam skala linier, sedangkan sebelah kanan dalam skala log (Nurunnizar, dkk., 2021b).



**Gambar 55** Ilustrasi untuk transfer muatan dan pemerangkap elektron di keadaan pemerangkap permukaan (*surface trap states*) di antarmuka  $\text{TiO}_2$ /perovskit dengan kondisi konsentrasi cacat kekosongan ion (anion) yang (a) rendah dan (b) tinggi (Nurunnizar, dkk., 2021b).

## 5 Penutup

Dari perjalanan penelitian yang telah dilakukan sampai saat ini, terlihat jelas bahwa penelitian tentang sel surya telah menjadi suatu topik penelitian yang luas, yang melibatkan berbagai bidang keilmuan. Juga terlihat bahwa kegiatan penelitian tingkat lanjut sangat berperan dalam menopang perkembangan sains dan teknologi sel surya ini. Perkembangannya semakin cepat dan kompetitif akhir-akhir ini seiring dengan perubahan dunia keilmuan yang lebih terbuka dengan kolaborasi antar bidang ilmu dan kemajuan teknologi informasi yang memfasilitasi keterbukaan informasi pengetahuan. Perkembangan sel surya generasi ketiga diwarnai dengan pemunculan beberapa tipe sel surya dan telah mengalami beberapa kali pergeseran fokus pengembangan dari satu tipe ke tipe lainnya. Sel surya tersensitasi pewarna (DSSC) termasuk yang telah lama dan banyak diteliti. Sementara itu, sel surya perovskit merupakan jenis sel surya terakhir dan paling banyak diteliti saat ini. Namun tidak berarti sel surya polimer dan DSSC telah ditinggalkan. Penelitian sel surya polimer dan DSSC masih banyak dilakukan dan tetap ada beberapa terobosan baru akhir-akhir ini. Dari paparan pada bab-bab sebelumnya, terlihat bahwa ketiga sel surya ini memiliki banyak variasi material aktif, yang menjadi bagian dari perkembangan material maju. Pengembangan material ini tidak hanya sekedar melihat sifat kimia fisika-nya pada skala makroskopis, tetapi juga hingga skala nano dan bahkan skala molekularnya. Hasil-hasil penelitian yang telah diuraikan di atas menunjukkan bahwa susunan molekul, polimer dan nanokristal serta morfologi lapisannya pada skala nanometer dapat memengaruhi secara signifikan kinetika transpor pembawa muatannya. Struktur sel-suryanya pun harus didesain dengan mempertimbangkan kinetika transpor pembawa muatan dalam orde beberapa ratus nanometer. Optimasi performa sel harus mempertimbangkan kinetika pembawa muatan yang bersifat multi-proses, mulai dari proses serapan cahaya hingga ekstraksi pembawa muatan, dalam domain waktu yang lebar, yakni dari nanosekon hingga milisekon.

Di tengah-tengah perkembangan besar dari ketiga jenis sel surya tersebut, kami telah mencoba ikut memberikan sedikit kontribusi pada perkembangan itu, baik dari segi sains maupun aplikasinya. Pada topik sel surya polimer, kami telah mencoba memberikan pemahaman akan efek krusial dari rekombinasi rugi di lapisan ETL, khususnya yang terbuat dari lapisan ZnO,

dan cara mengurangi efek tersebut. Pada topik sel surya DSSC, kami telah mencoba mengembangkan elektrolit gel polimer untuk dipakai pada DSSC semi-padat dan memberikan pemahaman atas penyebab yang membatasi performanya. Pada sel surya perovskit, kami telah mencoba ikut membangun pemahaman bagaimana sifat semikonduktor bisa muncul dalam perovskit halida, baik melalui studi komputasi maupun eksperimen. Pemahaman ini mungkin berguna untuk memodifikasi lebih lanjut bahan-bahan perovskit halida ini, saat ini tidak hanya ditujukan untuk sel surya saja. Akhir-akhir ini, bahan perovskit ini juga dikembangkan untuk aplikasi optoelektronika dan fotonika lainnya, yang membutuhkan strategi berbeda dalam memanfaatkan eksiton dan pembawa muatan di dalam piranti/devais aplikasinya. Terkait hal ini, melalui pembuatan dan kajian nanopelat perovskit timbal bromida telah ditemukan adanya perbedaan karakteristik fotoluminesensi bergantung pada struktur kristalnya. Perbedaan tersebut terkait dengan dinamika relaksasi eksiton yang berbeda pada struktur kristal yang berbeda, yakni kubik, tetragonal dan ortorombik. Selain itu, kami juga telah menunjukkan kembali efek krusial dari rekombinasi rugi pada sel surya perovskit, yang dalam hal ini disebabkan oleh kehadiran cacat permukaan. Cacat permukaan tersebut dapat terbentuk pada permukaan bulir maupun bidang antarmuka lapisan, yang memengaruhi kinetika transpor dan ekstraksi pembawa muatan. Pengukuran fototegangan transien (TPV) sederhana ternyata dapat mengungkap efek tersebut.

Sampai pada tahap ini, sepertinya masih banyak aspek sains yang masih bisa dikaji dan aspek teknologi yang dikembangkan lebih lanjut, baik untuk memperbaiki performa sel surya generasi baru ini maupun *up-scaling* untuk produksi massal. Walaupun sel surya silikon sudah lebih matang dari segi teknologi dan penguasaan pasar, peningkatan performa semikonduktor silikon terpatok pada batas Shockley-Queisser. Oleh karena itu, pengembangan ketiga sel surya generasi baru ini dan integrasinya dengan teknologi sel surya silikon akan tetap berlanjut. Untuk itu, pemahaman fisika, termasuk konsep-konsep fotonik dan fisika kuantum, sangat diperlukan untuk bisa ikut berkontribusi secara langsung, baik dari segi pengembangan material maupun piranti sel suryanya. Sejauh ini, lebih banyak peneliti dan saintis dari negara-negara belahan utara, yang terbatas paparan sinar mataharinya, yang justru berkontribusi besar pada pengembangan sains dan teknologi sel surya. Sangat disayangkan bahwa negara-negara tropis, seperti



negara kita Indonesia, masih berkontribusi secara minor. Padahal, negara-negara tropis bisa memanen energi matahari lebih banyak. Masih diperlukan komitmen yang lebih besar dari pemerintah dan industri untuk membangun kemampuan penelitian dan pengembangan industri sel surya pada level nasional saat ini ke level internasional. Seiring dengan program-program nasional terkait *net zero emission* dan *green energy*, melalui penggunaan sumber-sumber energi baru-terbarukan dan transisi elektrifikasi kendaraan bermotor, maka sudah saatnya Indonesia membangun kemampuan riset dan industri sel surya secara mandiri untuk membangun kemandirian energi.



## 6 UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puja puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan YME atas segala rahmat dan kasih karunia-Nya untuk angurah yang besar ini. Capaian ini bukanlah hasil dari upaya penulis sendiri semata, tetapi atas kontribusi besar dari para kolega, mahasiswa bimbingan, institusi, bahkan rekan-rekan sejawat di luar institusi. Dengan kerja sama dan kebersamaan untuk bersama-sama menghasilkan suatu kontribusi yang bermanfaat bagi diri sendiri dan sekitar. Dengan itu, perkenankan penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

- Rektor ITB dan jajarannya, Pimpinan dan Anggota Senat Akademik ITB serta Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB untuk dukungan besarnya dalam proses pengusulan Guru Besar.
- Dekan FMIPA ITB (Prof. Dr. Wahyu Srigutomo), Wakil Dekan Sumberdaya (Dr. Hanni Garminia Y, S.Si., M.Si.) dan Wakil Dekan Akademik (Prof. Dr. Rukman Hertadi) atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis dalam proses pengusulan Guru Besar.
- Dekan FMIPA ITB dan dekanat periode sebelumnya yang telah memberikan fasilitas untuk melaksanakan kegiatan penelitian dan dukungan-dukungan bentuk lainnya.
- Ketua Kelompok Keahlian (KK) Fisika Magnetik dan Fotonik (FMF) sekarang dan sebelumnya (Prof. Alexander Agustinus P. Iskandar, Ph.D., Prof. Dr. Agustinus Agung Nugroho, Dr. Herman) serta segenap rekan sejawat di dalam KK (Dr. Abdul Muizz Tri Pradipto, Dr. Andy Octavian Latief, Dr. Berlinson Dominikus Napitu, Dr. Daniel Kurnia, Dr. Herman, Prof. Dr. Inge Magdalena Sutjahja, Dr. Priastuti Wulandari) atas dukungan, kerja sama dan kebersamaan dalam pelaksanaan tugas tri-dharma perguruan tinggi.
- Dosen Pembimbing penulis pada program sarjana Fisika ITB, Prof. Tjia May On, Ph.D. dan pada program master hingga program doktor di Department of Electronic Engineering Osaka University, Prof. Dr. Katsumi Yoshino, yang telah banyak membimbing dan mengajarkan bagaimana melaksanakan kegiatan penelitian dengan kaidah-kaidah keilmuan dengan benar.
- Para Guru Besar yang telah memberikan rekomendasi usulan jabatan Guru Besar saya, yaitu Prof. Dr.rer.nat. Umar Fauzi, Prof. Dr. Toto Winata,

Prof. Dr. Bryan Yulianto, Prof. Dr. Made Arcana, yang kesemuanya dari dalam ITB dan Prof. Dr. Risdiana dari Universitas Padjadjaran serta Prof. Dr. Tsuyoshi Kawai dari Nara Institute of Science and Technology (NAIST) Japan.

- Para rekan peneliti yang telah bekerja sama di bidang sel surya: Prof. Dr. Natalita Maulani Nursam, dkk. (BRIN) dan Prof. Dr. Veinardi Suendo (Kimia ITB), di bidang komputasi DFT (Dr. Triati Dewi Kencana Wungu (Fisika ITB) dan Prof. Dr. Kohji Nakamura (Mie University)), di bidang grafena dan polimer terkonjugasi: Dr. Fitrilawati dkk. (Universitas Padjadjaran) dan Prof. Dr. Risidiana (Universitas Padjadjaran), di bidang material polimer: Dr. Mardiyati (Teknik Material ITB), di bidang gelas terdoping tanah jarang: Prof. Dr. Jakrapong Kaewkhao (Nakhon Pathom Rajabhat University, Thailand) dan Prof. Dr. Mitra Djamal (Fisika ITB), di bidang baterai litium: Prof. Dr. Evvy Kartini (BRIN), dan di bidang karakterisasi permukaan: Prof. Dr. Yoshiyuki Yamashita (NIMS, Japan). Secara khusus penulis berterima kasih kepada Prof. Dr. Masanori Ozaki (Osaka University, Japan) dan Prof. Dr. Akihiko Fujii (Osaka Institute of Technology, Japan) atas kerjasama penelitian yang berjalan cukup panjang.
- Para mantan mahasiswa bimbingan S-1, S-2, dan S-3 Fisika dan prodi lainnya yang telah dengan gigih dan kreatif menuntaskan penelitian Tugas Akhir/Tesis/Disertasi-nya masing-masing, yang juga terpakai untuk menghasilkan publikasi ilmiah kita bersama.
- Rekan-rekan dosen Fisika ITB atas kebersamaan, kekeluargaan, dan dukungannya selama ini. Seluruh staf tenaga kependidikan di lingkungan Prodi Fisika dan FMIPA ITB atas kelancaran dalam berbagai proses administrasi dll., termasuk proses pengajuan Guru Besar saya ini.
- Rekan-rekan di Himpunan Optika Indonesia (HOI) atas kerja samanya dalam berbagai kegiatan akademik dan pengabdian masyarakat.
- Istri dan anak-anak tercinta, Romlina Dewi, Andre dan Rima, untuk pengertian, kesabaran, dukungan moril dan doanya selama ini.
- Orang tua terkasih, Rudi Koesoemo (mendiang) & Roosmiati (alm.) dan Kasmin Silalahi (mendiang) & Mutiara (mendiang), yang telah membesarkan dan memberikan dorongan untuk selalu maju dengan penuh pengharapan. Terimakasih tak berhingga untuk ibunda Roosmiati

yang telah merawat dan membesarkan penulis dengan penuh perhatian, kasih dan doa.

- Serta lembaga pemberi dana penelitian sehingga penulis dan tim dapat melaksanakan kegiatan penelitian yang berkelanjutan: Kemdikbudristek, ITB dan LPPM ITB, *Asahi Gas Foundation Indonesia*, *Osaka Gas Foundation Indonesia*, *ITSF (Toray) Foundation Indonesia*, *Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)*, *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)*, dan *Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)*

Akhir kata, penulis menyampaikan permohonan maaf dan terima kasih kepada berbagai individu dan pihak yang terlewat dan tidak dapat disebutkan satu per satu atas semua perhatian, bantuan, dan kerja samanya dalam pencapaian akademik ini. Semoga Tuhan Yang Maha Pengasih membalas kebaikan Bapak/Ibu/Saudara semuanya.



# DAFTAR PUSTAKA

- Adhikari, G. C., Thapa, S., Zhu, H., Grigoriev, A., dan Zhu, P. (2019): Synthesis of CsPbBr<sub>3</sub> and Transformation into Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> Crystals for White Light Emission with High CRI and Tunable CCT, *The Journal of Physical Chemistry C*, **123**(18), 12023–12028. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03369>
- Afsari, M., Boochani, A., Hantezadeh, M., dan Elahi, S. M. (2017): Topological nature in cubic phase of perovskite CsPbI<sub>3</sub>: By DFT, *Solid State Communications*, **259**, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2017.04.014>
- Ahmed, U., Alizadeh, M., Rahim, N. A., Shahabuddin, S., Ahmed, M. S., dan Pandey, A. K. (2018): A comprehensive review on counter electrodes for dye sensitized solar cells: A special focus on Pt-TCO free counter electrodes, *Solar Energy*, **174**, 1097–1125. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.010>
- Akkerman, Q. A., D’Innocenzo, V., Accornero, S., Scarpellini, A., Petrozza, A., Prato, M., dan Manna, L. (2015): Tuning the Optical Properties of Cesium Lead Halide Perovskite Nanocrystals by Anion Exchange Reactions, *Journal of the American Chemical Society*, **137**(32), 10276–10281. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b05602>
- Alex, V., Finkbeiner, S., dan Weber, J. (1996): Temperature dependence of the indirect energy gap in crystalline silicon | *Journal of Applied Physics* | AIP Publishing, **79**, 6943–6946. <https://doi.org/10.1063/1.362447>
- Alkuam, E., Badrdeen, E., dan Guisbiers, G. (2018): Influence of CdS Morphology on the Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells, *ACS Omega*, **3**(10), 13433–13441. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01631>
- Anandan, P. R., Nadeem, M., Lin, C.-H., Singh, S., Guan, X., Kim, J., Shahrokhi, S., Rahaman, M. Z., Geng, X., Huang, J.-K., Nguyen, H., Hu, H., Sharma, P., Seidel, J., Wang, X., dan Wu, T. (2023): Spin-orbital coupling in all-inorganic metal-halide perovskites: The hidden force that matters, *Applied Physics Reviews*, **10**(4), 041312. <https://doi.org/10.1063/5.0150712>
- Anggraini, P. N., Nursam, N. M., Putra, R. A., Shobih, dan Retnaningsih, L. (2019): Study on the effect of PVDF and TiO<sub>2</sub> composition on quasi-solid state DSSC, *Journal of Physics: Conference Series*, **1245**(1), 012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1245/1/012068>
- Aprilia, A., Wulandari, P., Suendo, V., Herman, Hidayat, R., Fujii, A., dan Ozaki, M. (2013): Influences of dopant concentration in sol-gel derived AZO layer on the performance of P3HT:PCBM based inverted solar cell,

- Solar Energy Materials and Solar Cells, **111**, 181–188.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.12.033>
- Arsyad, W. O. S., Bahar, H., Prijamboedi, B., dan Hidayat, R. (2018): Revealing the limiting factors that are responsible for the working performance of quasi-solid state DSSCs using an ionic liquid and organosiloxane-based polymer gel electrolyte, Ionics, diperoleh 18 Agustus 2024 melalui situs internet:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11581-017-2230-7>, **24**, 901–914.
- Arsyad, W. S., Cassandra, F., Asharuddin, M., Suere, S., Ramadhan, L. O. A. N., dan Hidayat, R. (2022): Green synthesis of silver nanoparticles from anthocyanin extracts of purple cabbage (*brassica oleracea var capitata*) and its characteristics for dye-sensitized solar cells (DSSC) application, Journal of Physics: Conference Series, **2274**(1), 012001.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2274/1/012001>
- Arsyad, W. S., Pristianti, A., Agus, L., dan Hidayat, R. (2019): rGO based photo-anode in dye-sensitized solar cells (DSSC) and its photovoltaic characteristics, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **622**(1), 012008.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/622/1/012008>
- Arsyad, W. S., Suhardiman, R., Usman, I., Aba, L., Suryani, S., Ramadhan, L. O. A. N., Nurdin, Muh., dan Hidayat, R. (2024): Improvement of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) performance using Crude Brazilin Extract from Sappanwood (*Caesalpinia Sappan L.*) with the incorporation of ZnO nanoparticles, Journal of Molecular Structure, **1303**, 137548. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137548>
- Baby, R., Nixon, P. D., Kumar, N. M., Subathra, M. S. P., dan Ananthi, N. (2022): A comprehensive review of dye-sensitized solar cell optimal fabrication conditions, natural dye selection, and application-based future perspectives, Environmental Science and Pollution Research, **29**(1), 371–404. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16976-8>
- Bechtel, J. S., Thomas, J. C., dan Van der Ven, A. (2019): Finite-temperature simulation of anharmonicity and octahedral tilting transitions in halide perovskites, Physical Review Materials, **3**(11), 113605.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113605>
- Benedek, N. A. dan Craig J. Fennie (2013): Why Are There So Few Perovskite Ferroelectrics?, The Journal of Physical Chemistry C, **117**(26), 13339–13349. <https://doi.org/10.1021/jp402046t>
- Benedek, N. A., dan Fennie, C. J. (30 Juli 2013): Why Are There So Few Perovskite Ferroelectrics? (Versi 1), arXiv.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1307.8103>



- Bhalla, A. S., Guo, R., dan Roy, R. (2000): The perovskite structure—a review of its role in ceramic science and technology, *Materials Research Innovations*, **4**(1), 3–26. <https://doi.org/10.1007/s100190000062>
- Bharwal, A. K., Nguyen, N. A., Iojoiu, C., Henrist, C., dan Alloin, F. (2017): New polysiloxane bearing imidazolium iodide side chain as electrolyte for photoelectrochemical cell, *Solid State Ionics*, **307**, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2017.05.004>
- Borbón, S., Lugo, S., dan López, I. (2021): Dye-Sensitized Solar Cells, 1555–1587 dalam O. V. Kharissova, L. M. Torres-Martínez, dan B. I. Kharisov, ed., *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, Springer International Publishing, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3_38)
- Bou, A., Pockett, A., Raptis, D., Watson, T., Carnie, M. J., dan Bisquert, J. (2020): Beyond Impedance Spectroscopy of Perovskite Solar Cells: Insights from the Spectral Correlation of the Electrooptical Frequency Techniques, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **11**(20), 8654–8659. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c02459>
- Canham, L. (2020): Introductory lecture: origins and applications of efficient visible photoluminescence from silicon-based nanostructures, *Faraday Discussions*, **222**(0), 10–81. <https://doi.org/10.1039/D0FD00018C>
- Caretta, A., Miranti, R., Arkenbout, A. H., Polyakov, A. O., Meetsma, A., Hidayat, R., Tjia, M. O., Palstra, T. T. M., dan Loosdrecht, P. H. M. van (2013): Thermochromic effects in a Jahn–Teller active  $\text{CuCl}_6^{4-}$  layered hybrid system, *Journal of Physics: Condensed Matter*, **25**(50), 505901. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/50/505901>
- Cavallo, C., Di Pascasio, F., Latini, A., Bonomo, M., dan Dini, D. (2017): Nanostructured Semiconductor Materials for Dye-Sensitized Solar Cells, *Journal of Nanomaterials*, **2017**(1), 5323164. <https://doi.org/10.1155/2017/5323164>
- Celline, A. C., Ramadhanti, D., Subagja, A. Y., Aprilia, A., dan Safriani, L. (2023): Improving performance of dye sensitized solar cell (DSSC) by incorporating rGO to TiO<sub>2</sub> based photoanode, *AIP Conference Proceedings*, **2604**(1), 070006. <https://doi.org/10.1063/5.0114970>
- Chen, Q., De Marco, N., Yang, Y., Song, T. Bin, Chen, C. C., Zhao, H., Hong, Z., Zhou, H., dan Yang, Y. (2015): Under the spotlight: The organic-inorganic hybrid halide perovskite for optoelectronic applications, *Nano Today*, **10**(3), 355–396. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.009>
- Chung, I., Song, J.-H., Im, J., Androulakis, J., Malliakas, C. D., Li, H., Freeman, A. J., Kenney, J. T., dan Kanatzidis, M. G. (2012): CsSnI<sub>3</sub>:

- Semiconductor or Metal? High Electrical Conductivity and Strong Near-Infrared Photoluminescence from a Single Material. High Hole Mobility and Phase-Transitions, *Journal of the American Chemical Society*, **134**(20), 8579–8587. <https://doi.org/10.1021/ja301539s>
- Dhonde, M., Sahu, K., Das, M., Yadav, A., Ghosh, P., dan Murty, V. V. S. (2022): Review—Recent Advancements in Dye-Sensitized Solar Cells; From Photoelectrode to Counter Electrode, *Journal of The Electrochemical Society*, **169**(6), 066507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac741f>
- Diantoro, M., Maftuha, D., Suprayogi, T., Reynaldi Iqbal, M., Solehudin, Mufti, N., Taufiq, A., Hidayat, A., Suryana, R., dan Hidayat, R. (2019): Performance of Pterocarpus Indicus Willd Leaf Extract as Natural Dye TiO<sub>2</sub>-Dye/ITO DSSC, *Materials Today: Proceedings*, **17**, 1268–1276. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.015>
- Eshaghi, A., dan Aghaei, A. A. (2015): Effect of TiO<sub>2</sub>–graphene nanocomposite photoanode on dye-sensitized solar cell performance, *Bulletin of Materials Science*, **38**(5), 1177–1182. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-0998-5>
- Fauziah, N., Silmi, N., Nugroho, F. G., Putra, K. L. H., Benu, D. P., Steky, F. V., Sunarya, R. R., Yulianto, B., Hidayat, R., dan Suendo, V. (2023): Ultrasonication-modified electrochemically exfoliated graphene for counter electrode in dye-sensitized solar cells, *Carbon Trends*, **12**, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100292>
- Filip, M. R., Eperon, G. E., Snaith, H. J., dan Giustino, F. (2014): Steric engineering of metal-halide perovskites with tunable optical band gaps, *Nature Communications*, **5**(1), 5757. <https://doi.org/10.1038/ncomms6757>
- Geiger, M., Schwarz, L., Zschieschang, U., Manske, D., Pflaum, J., Weis, J., Klauk, H., dan Weitz, R. T. (2018): Quantitative Analysis of the Density of Trap States in Semiconductors by Electrical Transport Measurements on Low-Voltage Field-Effect Transistors, *Physical Review Applied*, **10**(4), 044023. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.044023>
- Giannozzi, P., Barone, O., Bonfà, P., Brunato, D., Car, R., Carnimeo, I., Cavazzoni, C., de Gironcoli, S., Delugas, P., Ferrari Ruffino, F., Ferretti, A., Marzari, N., Timrov, I., Urru, A., dan Baroni, S. (2020): Quantum ESPRESSO toward the exascale, *The Journal of Chemical Physics*, **152**(15), 154105. <https://doi.org/10.1063/5.0005082>
- Glazer, M. (2021): Helen D. Megaw (1907–2002) and Her Contributions to Ferroelectrics, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **68**(2), 334–338. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2020.3035268>

- Gorlov, M., dan Kloov, L. (2008): Ionic liquid electrolytes for dye-sensitized solar cells, *Dalton Transactions*, (20), 2655–2666.  
<https://doi.org/10.1039/B716419J>
- Götz, A. W., Wölfle, T., dan Walker, R. C. (2010): Chapter 2 - Quantum Chemistry on Graphics Processing Units, 21–35 dalam R. A. Wheeler, ed., *Annual Reports in Computational Chemistry*, Elsevier.  
[https://doi.org/10.1016/S1574-1400\(10\)06002-0](https://doi.org/10.1016/S1574-1400(10)06002-0)
- Grätzel, M. (2001): Photoelectrochemical cells, *Nature*, **414**(6861), 338–344.  
<https://doi.org/10.1038/35104607>
- Handayani, Y. S., Wulandari, P., dan Hidayat, R. (2018): Controlled synthesis of lead-free perovskite Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub> as hole transport layer in dye sensitized solar cells, *Journal of Physics: Conference Series*, **1080**(1), 012003.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1080/1/012003>
- Handayani, Yolla Sukma, Indari, E. D., Hidayat, R., Othsubo, Y., dan Kimura, S. (2019): Understanding the role of organic cations on the electronic structure of lead iodide perovskite from their UV photoemission spectra and their electronic structures calculated by DFT method, *Materials Research Express*, **6**(8), 084009. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1d3f>
- Handayani, Yolla Sukma, Wulandari, P., Herman, H., dan Hidayat, R. (2021): Electronic Structure of Lead-Free Halide Perovskite Material: Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub>, for Perovskite Solar Cells Applications, *Materials Science Forum*, **1028**, 210–214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1028.210>
- Hauff, E. von, dan Klotz, D. (2022): Impedance spectroscopy for perovskite solar cells: characterisation, analysis, and diagnosis, *Journal of Materials Chemistry C*, **10**(2), 742–761.  
<https://doi.org/10.1039/D1TC04727B>
- Heo, J. H., Song, D. H., Patil, B. R., dan Im, S. H. (2015): Recent Progress of Innovative Perovskite Hybrid Solar Cells, *Israel Journal of Chemistry*, **55**(9), 966–977. <https://doi.org/10.1002/ijch.201500002>
- Hidayat, R., Nurunnizar, A. A., Fariz, A., Herman, Rosa, E. S., Shobih, Oizumi, T., Fujii, A., dan 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>
- Hussain, I., Tran, H. P., Jaksik, J., Moore, J., Islam, N., dan Uddin, M. J. (2018): Functional materials, device architecture, and flexibility of perovskite solar cell, *Emergent Materials*, **1**(3), 133–154.  
<https://doi.org/10.1007/s42247-018-0013-1>
- Ismail, M., Ludin, N. A., Hamid, N. H., Ibrahim, M. A., dan Sopian, K. (2018): The Effect of Chenodeoxycholic Acid (CDCA) in Mangosteen (*Garcinia mangostana*) Pericarps Sensitizer for Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC),

- Journal of Physics: Conference Series, **1083**(1), 012018.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1083/1/012018>
- Ito, S. (2011): Investigation of Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells: Ruthenium-Complex Dyes, Metal-Free Dyes, Metal-Complex Porphyrin Dyes and Natural Dyes dalam Solar Cells - Dye-Sensitized Devices, IntechOpen.  
<https://doi.org/10.5772/19960>
- Khaerani, R., Herman, H., dan Wulandari, P. (2020): Performance of Air-Stable Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub> Perovskite as Electron Transport Layer in Inverted Bulk Heterojunction Solar Cell, Key Engineering Materials, **860**, 28–33.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.28>
- Kim, H.-S., Lee, C.-R., Im, J.-H., Lee, K.-B., Moehl, T., Marchioro, A., Moon, S.-J., Humphry-Baker, R., Yum, J.-H., Moser, J. E., Grätzel, M., dan Park, N.-G. (2012): Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%, Scientific Reports, **2**(1), 591. <https://doi.org/10.1038/srep00591>
- Koch, S. W., Kira, M., Khitrova, G., dan Gibbs, H. M. (2006): Semiconductor excitons in new light, Nature Materials, **5**(7), 523–531.  
<https://doi.org/10.1038/nmat1658>
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., dan 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>
- Kole, A., dan Chaudhuri, P. (2014): Growth of silicon quantum dots by oxidation of the silicon nanocrystals embedded within silicon carbide matrix, AIP Advances, **4**(10), 107106. <https://doi.org/10.1063/1.4897378>
- Kosyachenko, L. A. (2011): Solar Cells - Dye-Sensitized Devices.  
<https://doi.org/10.5772/1757>
- Lai, F.-I., Yang, J.-F., Hsu, Y.-C., dan Kuo, S.-Y. (2020): Enhanced omnidirectional light harvesting in dye-sensitized solar cells with periodic ZnO nanoflower photoelectrodes, Journal of Colloid and Interface Science, **562**, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.003>
- Le Corre, V. M., Duijnste, E. A., El Tambouli, O., Ball, J. M., Snaith, H. J., Lim, J., dan Koster, L. J. A. (2021): Revealing Charge Carrier Mobility and Defect Densities in Metal Halide Perovskites via Space-Charge-Limited Current Measurements, ACS Energy Letters, **6**(3), 1087–1094.  
<https://doi.org/10.1021/acsenerylett.0c02599>
- Lee, D. H., Sun, K. C., Qadir, M. B., dan Jeong, S. H. (2014): Optimized Performance of Quasi-Solid-State DSSC with PEO-Bismaleimide Polymer Blend Electrolytes Filled with a Novel Procedure, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, **14**(12), 9377–9382.  
<https://doi.org/10.1166/jnn.2014.10131>

- Liu, H., Liu, Z., Xu, W., Yang, L., Liu, Y., Yao, D., Zhang, D., Zhang, H., dan Yang, B. (2019): Engineering the Photoluminescence of CsPbX<sub>3</sub> (X = Cl, Br, and I) Perovskite Nanocrystals Across the Full Visible Spectra with the Interval of 1 nm, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**(15), 14256–14265. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b01930>
- Mahajan, U., Prajapat, K., Dhonde, M., Sahu, K., dan Shirage, P. M. (2024): Natural dyes for dye-sensitized solar cells (DSSCs): An overview of extraction, characterization and performance, *Nano-Structures & Nano-Objects*, **37**, 101111. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101111>
- Miao, F., Sun, B., Tao, B., Wang, Y., dan Chu, P. K. (2022): MoS<sub>2</sub>/Ag/TiO<sub>2</sub> for photoanode of dye sensitized solar cells, *Journal of Materials Research and Technology*, **20**, 781–790. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.134>
- Murawski, L., dan Barczyński, R. J. (1996): Dielectric relaxation in semiconducting oxide glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **196**, 275–279. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00599-4](https://doi.org/10.1016/0022-3093(95)00599-4)
- Nath, N. C. D., dan Lee, J.-J. (2019): Binary redox electrolytes used in dye-sensitized solar cells, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **78**, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.05.018>
- Noor, M. M., Buraidah, M. H., Yusuf, S. N. F., Careem, M. A., Majid, S. R., dan Arof, A. K. (2011): Performance of Dye-Sensitized Solar Cells with (PVDF-HFP)-KI-EC-PC Electrolyte and Different Dye Materials, *International Journal of Photoenergy*, **2011**(1), 960487. <https://doi.org/10.1155/2011/960487>
- NREL Transforming Energy, N. T. E. (21 Agustus 2024): Best Research-Cell Efficiency Chart, , diperoleh 16 Agustus 2024, melalui situs internet: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- Nurazizah, E. S., Fajariah, A. R., Aprilia, A., dan Safriani, L. (2023): Performance Improvement of Dye-Sensitized Solar Cells Using a Combination of TiO<sub>2</sub> and ZnO as Photoanodes, *Key Engineering Materials*, **950**, 25–30. <https://doi.org/10.4028/p-7pIJIE>
- Nursam, N. M. (2020): PENGARUH MATERIAL COUNTER ELECTRODE PADA DYE-SENSITIZED SOLAR CELL, *Metalurgi*, **34**(3). <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v34i3.489>
- Nurunnizar, A. A., Wulandari, P., Bahar, H., Fitrilawati, F., Khalil, M., dan Hidayat, R. (2021a): The influences of interfacial recombination loss on the perovskite solar cell performance studied by transient photovoltage spectroscopy, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **135**, 106095. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106095>
- Nurunnizar, A. A., Wulandari, P., Bahar, H., Fitrilawati, F., Khalil, M., dan Hidayat, R. (2021b): The influences of interfacial recombination loss

- on the perovskite solar cell performance studied by transient photovoltage spectroscopy, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **135**, 106095. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106095>
- Oku, T. (2015): Crystal Structures of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> and Related Perovskite Compounds Used for Solar Cells dalam *Solar Cells - New Approaches and Reviews*, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/59284>
- O'Regan, B., dan Grätzel, M. (1991): A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films, *Nature*, **353**(6346), 737–740. <https://doi.org/10.1038/353737a0>
- Pering, S. R. (2023): The differences in crystal structure and phase of lead-free perovskite solar cell materials, *Discover Materials*, **3**(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s43939-023-00055-5>
- Perovskite. (26 April 2024a): Wikipedia, diperoleh 6 Agustus 2024 melalui situs internet: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Perovskite&oldid=1220847144>.
- Phillips, J. C. (1996): Stretched exponential relaxation in molecular and electronic glasses, *Reports on Progress in Physics*, **59**(9), 1133. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/59/9/003>
- Pitriana, P., Wungu, T. D. K., Herman, dan Hidayat, R. (2019): The characteristics of band structures and crystal binding in all-inorganic perovskite APbBr<sub>3</sub> studied by the first principle calculations using the Density Functional Theory (DFT) method, *Results in Physics*, **15**, 102592. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102592>
- Polymer-fullerene bulk heterojunction solar cell. (5 Maret 2024b): Wikipedia, diperoleh 3 Agustus 2024 melalui situs internet: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polymer-fullerene\\_bulk\\_heterojunction\\_solar\\_cell&oldid=1211960509](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polymer-fullerene_bulk_heterojunction_solar_cell&oldid=1211960509).
- Prabakaran, K., Mohanty, S., dan Nayak, S. K. (2015): Improved electrochemical and photovoltaic performance of dye sensitized solar cells based on PEO/PVDF–HFP/silane modified TiO<sub>2</sub> electrolytes and MWCNT/Nafion® counter electrode, *RSC Advances*, **5**(51), 40491–40504. <https://doi.org/10.1039/C5RA01770J>
- Pujiarti, H., Bahar, H., dan Hidayat, R. (2019): Poly(ionic-liquid) from imidazoline-functionalized siloxane prepared by simple sol-gel route for efficient quasi-solid-state DSSC, *Materials Research Express*, **6**(7), 075507. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1282>
- Pujiarti, H., Hidayat, R., dan Wulandari, P. (2020a): Effect of Lead-Free Perovskite Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub> Addition in the Structure of Dye-Sensitized Solar Cell, *Key Engineering Materials*, **860**, 22–27. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.22>

- Pujiarti, H., Hidayat, R., dan Wulandari, P. (2020b): Effect of Lead-Free Perovskite Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub> Addition in the Structure of Dye-Sensitized Solar Cell, *Key Engineering Materials*, **860**, 22–27. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.22>
- Qian, J., Xu, B., dan Tian, W. (2016): A comprehensive theoretical study of halide perovskites ABX<sub>3</sub>, *Organic Electronics*, **37**, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.05.046>
- Rana, D., Jovanov, V., Wagner, V., Materny, A., dan Donfack, P. (2020): Insights into ultrafast charge-pair dynamics in P3HT:PCBM devices under the influence of static electric fields, *RSC Advances*, **10**(70), 42754–42764. <https://doi.org/10.1039/D0RA07935A>
- Ritchie, H., Rosado, P., dan Roser, M. (2024): Energy Production and Consumption, *Our World in Data*, diperoleh 28 Juli 2024 melalui situs internet: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>.
- Ritchie, H., dan Roser, M. (2024): CO<sub>2</sub> emissions, *Our World in Data*, diperoleh 28 Juli 2024 melalui situs internet: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>.
- Safriani, L., Nurfitriani, N., Celline, A. C., Aprilia, A., dan Furukawa, Y. (2023): Photocurrent Density Enhancement of DSSC with Existence of ZnO in TiO<sub>2</sub> Based Photoanode, *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, **13**(2), 252–261. <https://doi.org/10.13057/ijap.v13i2.74821>
- Saparov, B., Sun, J. P., Meng, W., Xiao, Z., Duan, H. S., Gunawan, O., Shin, D., Hill, I. G., Yan, Y., dan Mitzi, D. B. (2016): Thin-Film Deposition and Characterization of a Sn-Deficient Perovskite Derivative Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub>, *Chemistry of Materials*, **28**(7), 2315–2322. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00433>
- Sariciftci, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J., dan Wudl, F. (1992): Photoinduced Electron Transfer from a Conducting Polymer to Buckminsterfullerene, *Science*, **258**(5087), 1474–1476. <https://doi.org/10.1126/science.258.5087.1474>
- Sarker, S., Ahammad, A. J. S., Seo, H. W., dan Kim, D. M. (2014): Electrochemical Impedance Spectra of Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Spreadsheet Calculation, *International Journal of Photoenergy*, **2014**(1), 851705. <https://doi.org/10.1155/2014/851705>
- Scharber, M. C., Mühlbacher, D., Koppe, M., Denk, P., Waldauf, C., Heeger, A. J., dan Brabec, C. J. (2006): Design Rules for Donors in Bulk-Heterojunction Solar Cells—Towards 10 % Energy-Conversion Efficiency, *Advanced Materials*, **18**(6), 789–794. <https://doi.org/10.1002/adma.200501717>
- Senthil, R. A., Theerthagiri, J., Madhavan, J., Ganesan, S., dan Arof, A. K. (2017): Influence of organic additive to PVDF-HFP mixed iodide

- electrolytes on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **101**, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2016.10.007>
- Smith, R. (2010): Quantitative measurements of many-body exciton dynamics in gallium arsenide quantum-well structures.
- Snaith, H. J. (2013): Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **4**(21), 3623–3630. <https://doi.org/10.1021/jz4020162>
- S. Srivishnu, K., Prasanthkumar, S., dan Giribabu, L. (2021): Cu( ii / i ) redox couples: potential alternatives to traditional electrolytes for dye-sensitized solar cells, *Materials Advances*, **2**(4), 1229–1247. <https://doi.org/10.1039/D0MA01023E>
- Steinem, C., dan Janshoff, A. (2005): SENSORS | Piezoelectric Resonators, 269–276 dalam P. Worsfold, A. Townshend, dan C. Poole, ed., *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*, Elsevier, Oxford. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00556-2>
- Sunarya, R. R., Hidayat, R., Radiman, C. L., dan Suendo, V. (2020): Electrocatalytic Activation of a DSSC Graphite Composite Counter Electrode Using In Situ Polymerization of Aniline in a Water/Ethanol Dispersion of Reduced Graphene Oxide, *Journal of Electronic Materials*, **49**(5), 3182–3190. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07977-3>
- Tao, S. X., Cao, X., dan Bobbert, P. A. (2017): Accurate and efficient band gap predictions of metal halide perovskites using the DFT-1/2 method: GW accuracy with DFT expense, *Scientific Reports*, **7**(1), 14386. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14435-4>
- The Nobel Prize (3 Agustus 2000): The Nobel Prize in Chemistry 2000, , diperoleh 3 Agustus 2024, melalui situs internet: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2000/summary/>.
- Tian, J., Xue, Q., Yao, Q., Li, N., Brabec, C. J., dan Yip, H.-L. (2020): Inorganic Halide Perovskite Solar Cells: Progress and Challenges, *Advanced Energy Materials*, **10**(23), 2000183. <https://doi.org/10.1002/aenm.202000183>
- Umadevi, D., dan Watson, G. W. (2019): Quasiparticle GW Calculations on Lead-Free Hybrid Germanium Iodide Perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub> for Photovoltaic Applications, *ACS Omega*, **4**(3), 5661–5669. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03291>
- Usman, I., Arsyad, W. S., Herman, H., dan Hidayat, R. (2023): Low carrier recombination in polysiloxane gel electrolyte for high-performance DSSC, *Materials Research Express*, **10**(4), 046201. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acc5db>
- Wang, G., Mei, S., Liao, J., Wang, W., Tang, Y., Zhang, Q., Tang, Z., Wu, B., dan Xing, G. (2021): Advances of Nonlinear Photonics in Low-



- Dimensional Halide Perovskites, *Small*, **17**(43), 2100809. <https://doi.org/10.1002/sml.202100809>
- Wang, H., Guerrero, A., Bou, A., Al-Mayouf, A. M., dan Bisquert, J. (2019): Kinetic and material properties of interfaces governing slow response and long timescale phenomena in perovskite solar cells, *Energy & Environmental Science*, **12**(7), 2054–2079. <https://doi.org/10.1039/C9EE00802K>
- Wang, X., Li, Z., Shi, J., dan Yu, Y. (2014): One-Dimensional Titanium Dioxide Nanomaterials: Nanowires, Nanorods, and Nanobelts, *Chemical Reviews*, **114**(19), 9346–9384. <https://doi.org/10.1021/cr400633s>
- Wang, Y., Yang, J., Jia, H., Yu, M., dan Jin, H. (2016): Self-assembled urchin-like ZnO nanostructures fabricated by electrodeposition-hydrothermal method, *Journal of Alloys and Compounds*, **665**, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.060>
- Wei, S., Yang, Y., Kang, X., Wang, L., Huang, L., dan Pan, D. (2016): Room-temperature and gram-scale synthesis of CsPbX<sub>3</sub> (X = Cl, Br, I) perovskite nanocrystals with 50–85% photoluminescence quantum yields, *Chemical Communications*, **52**(45), 7265–7268. <https://doi.org/10.1039/C6CC01500J>
- Widiyandari, H., Prasetyo, A., Purwanto, A., Subagio, A., dan Hidayat, R. (2018): Platinum-free, carbon-based materials as efficient counter electrodes for dye-sensitized solar cells, *Japanese Journal of Applied Physics*, **57**(6), 068001. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.068001>
- Wikipedia (24 Maret 2024c): Shockley–Queisser limit, Wikipedia, Wikipedia, diperoleh 3 Agustus 2024melalui situs internet: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Shockley%E2%80%93Queisser\\_limit&oldid=1215284602](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Shockley%E2%80%93Queisser_limit&oldid=1215284602).
- Wikipedia (6 Juli 2024d): Black body, Wikipedia, diperoleh 3 Agustus 2024melalui situs internet: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Black\\_body&oldid=1232974653](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Black_body&oldid=1232974653).
- Wikipedia (16 Agustus 2024e): Sunlight, Wikipedia, Wikipedia, diperoleh 16 Agustus 2024melalui situs internet: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>.
- Xiao, Z., Yuan, Y., Wang, Q., Shao, Y., Bai, Y., Deng, Y., Dong, Q., Hu, M., Bi, C., dan Huang, J. (2016): Thin-film semiconductor perspective of organometal trihalide perovskite materials for high-efficiency solar cells, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **101**, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2015.12.002>
- Yandri, V. R., Nurunnizar, A. A., Debora, R., Wulandari, P., Nursam, N. M., Hidayat, R., Indari, E. D., dan 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).

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23276>

Yuan, F., Xi, J., Dong, H., Xi, K., Zhang, W., Ran, C., Jiao, B., Hou, X., Jen, A. K.-Y., dan Wu, Z. (2018): All-Inorganic Hetero-Structured Cesium Tin Halide Perovskite Light-Emitting Diodes With Current Density Over 900 A cm<sup>-2</sup> and Its Amplified Spontaneous Emission Behaviors, *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, **12**(5), 1800090. <https://doi.org/10.1002/pssr.201800090>

Yuliasari, F., Aprilia, A., dan Hidayat, R. (2022): Improved dye-sensitized solar cell performance with hedgehog-like shaped ZnO nanorods grown using ZnO nanoparticles seed layer, *Materials Today: Proceedings*, **52**, 248–251. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.193>

Zhang, D., Stojanovic, M., Ren, Y., Cao, Y., Eickemeyer, F. T., Socie, E., Vlachopoulos, N., Moser, J.-E., Zakeeruddin, S. M., Hagfeldt, A., dan Grätzel, M. (2021): A molecular photosensitizer achieves a Voc of 1.24 V enabling highly efficient and stable dye-sensitized solar cells with copper(II/I)-based electrolyte, *Nature Communications*, **12**(1), 1777. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21945-3>

Zhang, G., Zhang, J., Liao, Y., Pan, Z., Rao, H., dan Zhong, X. (2022): Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub> nanocrystals enhancing hole extraction for efficient carbon-based CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite solar cells, *Chemical Engineering Journal*, **440**, 135710. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135710>

Zhang, M., Zheng, Z., Fu, Q., Chen, Z., He, J., Zhang, S., Yan, L., Hu, Y., dan Luo, W. (2017): Growth and characterization of all-inorganic lead halide perovskite semiconductor CsPbBr<sub>3</sub> single crystals, *CrystEngComm*, **19**(45), 6797–6803. <https://doi.org/10.1039/C7CE01709J>

Zhu, K. (2016): Chem Soc Rev for optoelectronic and electronic applications, *Chemical Society Reviews*, **45**(Li), 655–689. <https://doi.org/10.1039/C4CS00458B>

# CURRICULUM VITAE



Nama : Rachmat Hidayat  
Tempat/tgl lahir : Jakarta, 11 Desember 1968  
Kel. Keahlian : Fisika Magnetik dan Fotonik  
Alamat Kantor : Jl. Ganesha 10, Bandung  
Nama Istri : Romlina Dewi Simarmata, S.H.  
Nama Anak : Andre Satya Tutamana, S.T.  
Rima Debora, S.Si. MBA.

## I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- **Doktor:** Electronic Engineering, Osaka University, Osaka, Japan (2001)  
Spesialisasi: Photophysics and Optoelectronics of Organic Materials
- **Master:** Electronic Engineering, Osaka University, Osaka, Japan (1998)  
Spesialisasi: Photophysics and Optoelectronics of Organic Materials
- **Sarjana:** Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.  
Bidang: Fisika

## II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Staf Pengajar Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 1995 – hingga sekarang
- Ketua Program Studi Magister dan Doktor Fisika FMIPA ITB 2020-2022
- Ketua Kelompok Keahlian Fisika Magnetik dan Fotonik FMIPA ITB, 2018-2020

## III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- Pembina Utama Muda IV/c, 1 April 2024
- Pembina Tingkat I IV/b, 1 Oktober 2014
- Pembina IV/a, 1 Oktober 2012
- Penata Tingkat I III/d, 1 Oktober 2008
- Penata III/c, 1 Oktober 2006
- Penata Muda III/a, 1 Maret 1994

#### **IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL**

- Guru Besar, Fisika Material Fotonik, 1 Agustus 2023
- Lektor Kepala, 1 Juni 2012
- Lektor, 1 Mei 2006

#### **V. KEGIATAN PENELITIAN**

1. Peneliti Utama, "Kajian struktur elektronik dan sifat elektronik dari grafene terinterkalasi logam", Penelitian Desentralisasi; Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, 2021-2022.
2. Peneliti Utama, "Peningkatan Yield Proses Pembuatan Nanopartikel Cs(Pb,Sn)X<sub>3</sub> (X= I, Br, Cl) dengan Bantuan Pemanasan Lokal Menggunakan Gelombang Mikro ", Penelitian Kompetitif Nasional; Penelitian Disertasi Doktor, 2021-2022.
3. Peneliti Utama, "Pengembangan Bahan Perovskait untuk Sel Surya dan Karakterisasi Rugi Rekombinasi (Recombination Loss) dengan Teknik Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy (IMVS)", Penelitian Kompetitif Nasional; Penelitian Disertasi Doktor, 2021-2022.
4. Peneliti Utama, "Studi Peningkatan Performansi Sel Surya Perovskite Bebas Timbal dan Inkorporasinya dengan Nanopartikel Emas dan Perak", Penelitian Kompetitif Nasional; Penelitian Disertasi Doktor, 2022.
5. Peneliti Utama, "Kajian struktur elektronik dan sifat elektronik dari grafene terinterkalasi logam transisi untuk pengayaan fungsionalitasnya", Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, 2021.
6. Peneliti Utama, "Pengembangan Sel Fotoelektrokimia Berbasis Perovskite dan Grafena untuk Reduksi CO<sub>2</sub> di Kota Besar", *Osaka Gas Foundation*, 2020
7. Peneliti Utama, "Pengembangan sel surya perovskit dengan lapisan pemblok dan lapisan transport berbasis material perovskite dan grafena", Program Penelitian Kolaborasi Indonesia 2020, 2020
8. Peneliti Utama, "Pengembangan Sel Surya DSSC dengan Elektrolit Poly(Ionic-Liquid) dan Struktur Elektroda ZnO Nano-rod/wire dengan High Aspect Crystal Ratio", Riset ITB Katagori B, 2020

9. Peneliti Utama, " Pengembangan nanostruktur plasmonik untuk aplikasi pemanenan energi cahaya", Kementerian Riset dan Teknologi Indonesia/ Badan Riset dan Inovasi Nasional di bawah Program *World Class University* (WCU) yang dikelola oleh Institut Teknologi Bandung, Program MIRA (Pendanaan Awal Batch II) 2020.
10. Peneliti Utama, " Pengembangan Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) berbasis pigmen organik murni dengan memanfaatkan elektroda nanorod", Penelitian Kompetitif Nasional; Penelitian Disertasi Doktor, 2019-2020.
11. Peneliti Utama, " Pengembangan baterai isi ulang Ni-Zn dengan elektrolit polyionic-liquid melalui proses insitu fotopolimerisasi untuk aplikasi kendaraan listrik dan stasiun pengisiannya", Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, 2019.
12. Peneliti Utama, " Pengembangan Sistem Deteksi Cepat Portabel Berbasis Kopleng Gelombang Plasmonik dan Vibrasi Raman untuk Aplikasi dalam Teknologi Kesehatan dan Obat Tradisional", Penelitian Dasar, 2019
13. Peneliti Utama, " Pengembangan sel surya perovskit dengan semikonduktor molekul semi-kristalin sebagai bahan lapisan transpornya", *World Class Research*, 2019.
14. Peneliti Utama, " Kajian Efek Kelembaban dan Oksigen Pada Proses Pembentukan Lapisan Kristal Perovskit Logam Halida dan Fotogenerasi Pembawa Muatan", Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, 2017-2019.
15. Peneliti, " Pembuatan Coating Anti Korosi Berbahan Dasar Lignin Hasil Pengolahan Limbah Black Liquor Industri Kertas", Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi, 2017-2019.
16. Peneliti, " Sel Surya Semi Padat Tersensitisasi Dye Menggunakan Fotoanoda Berbasis Aluminium Doped ZnO (AZO)", Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, 2018.
17. Peneliti, " Material Komposit Grafena/Polianilin Teraktivasi Zeolit Supercage Faujasit Sebagai Elektroda Lawan Pada DSSC", Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, 2018-2019.
18. Peneliti Utama, " Pengembangan Lanjutan Sel Surya Tersensitisasi Dye dengan Elektrolit Poliiionik dalam Struktur Elektroda Nano-rod/wire dan Kajian Karakteristik Performansinya", Riset ITB, 2018-2019.

19. Peneliti Utama, "Kajian tentang Peningkatan Fungsi Kerja dan Transpor Muatan pada Sel Surya Tersensitisasi Pewarna (Dye) dengan Bantuan Efek Plasmon dari Nanopartikel Logam", Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi, 2017.
20. Peneliti, "Desain dan Pembuatan Sistem Penguatan Optik dan Laser Menggunakan Medium Penguat Berbasis Gelas Fosfat dengan Metode Distributif Side-pumping", Penelitian Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul, 2017-2019
21. Peneliti Utama, "Investigasi dinamika pembawa muatan dalam sel surya berbasis perovskit melalui pengukuran transient photocurrent dan spektroskopi muon", Hibah penelitian kolaborasi luar negeri, 2015-2016.
22. Peneliti Utama, "Pengembangan dan Karakterisasi Sel Surya Tersensitisasi-Dye dengan Gel Poli-ionik berbasis Cairan Ionik", Riset ITB, 2016.
23. Peneliti Utama, "Peningkatan Sel surya tersensitisasi pewarna dengan menggunakan bahan Perovskit dalam nanostruktur ZnO", Kementerian Riset dan Teknologi, 2015.
24. Peneliti Utama, "Kajian derajat penetrasi molekul aktif dalam devais dengan lapisan nano-pori melalui spektroskopi Surface Plasmon Resonance", Riset ITB, 2015.
25. Peneliti Utama, "Kajian tentang fabrikasi dan karakteristik sel surya hibrida yang berbasis pada oksida logam dan bahan perovskit hibrida anorganik-organik.", Hibah Penelitian ITB, 2014.
26. Peneliti Utama, "Desain media laser berbasis kaca bismut borat yang didoping  $Nd^{3+}$ .", *Asahi Glass Foundation Indonesia*, 2014.
27. Peneliti Utama, "Pengembangan Sel Surya Quasi-Solid Dye-Sensitized untuk Mengatasi Masalah Kebocoran pada Struktur Konvensional", Kementerian Riset dan Teknologi, 2013-2014.
28. Peneliti Utama, "Pengembangan dan Kajian Efek Lapisan Transpor Elektron ZnO dengan Doping Metal Transisi untuk Peningkatan Performa Sel Surya Hibrid", Riset ITB, 2013-2014.
29. Peneliti Utama, "Pengembangan Sel Surya Berbasis Dye dengan Gel Elektrolit Hybrid dan Proses Fabrikasinya dengan Teknik Roll-printing Sederhana", Program Insentif Riset SINas DIKTI 2013-14, 2013-2014.

30. Peneliti Utama, "Kajian tentang pembuatan lapisan oksida logam sebagai bahan akseptor dalam sel surya dan penyelidikan tentang transportasi pembawa muatannya", Hibah Penelitian ITB, 2011.
31. Peneliti Utama, "Pengembangan metode pengukuran gula portabel berbasis spektroskopi resonansi plasmon permukaan untuk aplikasi dalam industri gula", Hibah Penelitian ITB, 2010.
32. Peneliti Utama, "Fabrikasi dan karakterisasi sel surya hibrida menggunakan lapisan oksida logam yang dibuat melalui rute sol-gel", Yayasan Asahi Glass Indonesia, 2010.
33. Peneliti Utama, "Penelitian dan pengembangan sumber pemancar cahaya organik baru", *JSPS-DGHE Exchange Research Project*, 2007-2010.
34. Peneliti Utama, "Kajian tentang penginderaan molekuler berdasarkan gelombang evanescent dan pengembangan sensor kimia berbasis Resonansi Plasmon Permukaan (SPR)", Hibah Penelitian ITB, 2009.
35. Peneliti Utama, "Pengembangan dan karakterisasi optik film tipis yang mengandung kompleks logam transisi untuk perangkat optik", Proyek Hibah Kompetitif (PHK) - B, Kementerian Pendidikan, 2007.
36. Anggota, "Perangkat fotonik untuk sistem komunikasi optik WDM dan sensor terintegrasi optik", Kementerian Riset dan Teknologi, 2006-2007.
37. Anggota, "Pengembangan penguat optik polimer berbasis kompleks lanthanida dalam molekul makrosiklik yang dapat dipolimerisasi untuk komunikasi optik", *Post-doctoral research of Global COE Tohoku University on Giant Molecules and Supra-Molecules*, 2003-2005.
38. Peneliti Utama, "Pembuatan dan Karakteristik Fotodiode Polimer dan Diode Pemancar Cahaya dari Polimer Terkonjugasi untuk Sistem Komunikasi Optik", *ITSF (Toray) Foundation*, 2002.
39. Anggota, "Perangkat Fotonik untuk Aplikasi pada Sistem Gigabit Ethernet", Kementerian Riset dan Teknologi, 2002-2003.

## **VI. PUBLIKASI**

### **PUBLIKASI JURNAL INTERNASIONAL PEER-REVIEW**

1. Valdi Rizki Yandri, Adhita Asma Nurunnizar, Rima Debora, Priastuti Wulandari, Natalita Maulani Nursam, Rahmat Hidayat, Efi Dwi Indari, Yoshiyuki Yamashita, Crystal structures and photoluminescence characteristics of cesium lead bromide perovskite nanoplatelets

- depending on the antisolvent and ligand used in their syntheses, *Heliyon* (2024), 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23276>
2. Waode Sukmawati Arsyad, Rizal Suhardiman, Ida Usman, La Aba, Suryani Suryani, Muh Nurdin, Rahmat Hidayat, Improvement of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) performance using Crude Brazilein Extract from Sappanwood (*Caesalpinia Sappan* L.) with the incorporation of ZnO nanoparticles, *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1303 (2024) 137548. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137548>
  3. Diyan Unmu Dzujah, Abdul-Muizz Pradipto, Rahmat Hidayat, Kohji Nakamura, Modification of plasmonic properties in several transition metal-doped graphene studied by the first principles method, *RSC advances*, Vol. 13 (2023) 1446-1454. <https://doi.org/10.1039/d2ra06446d>
  4. Rahmat Hidayat, Jalu Setiya Pradana, Alvin Fariz, Susi Komalasari, Siti Chalimah, Herman Bahar, Dual plasmonic modes in the visible light region in rectangular wave-shaped surface relief plasmonic gratings, *Scientific Reports* (2023), 13 (5274). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30083-3>
  5. Adhita Asma Nurunnizar, Priastuti Wulandari, Herman Bahar, Fitri Fitrilawati, Munawar Khalil, Rahmat Hidayat, The influences of interfacial recombination loss on the perovskite solar cell performance studied by transient photovoltage spectroscopy, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 135 (2021) 106095. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106095>
  6. L Yuliantini, M Djamal, R Hidayat, K Boonin, P Yasaka, S Kothan, J Kaewkhao, IR emission of Er<sup>3+</sup> ion-doped fluoroborotellurite glass for communication application, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 566 (2021) 120849. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120849>
  7. Rahmat Hidayat, Adhita Asma Nurunnizar, Alvin Fariz, Herman, Erlyta Septa Rosa, Shobih, Tomohisa Oizumi, Akihiko Fujii, Masanori Ozaki, Revealing the charge carrier kinetics in perovskite solar cells affected by mesoscopic structures and defect states from simple transient photovoltage measurements, *Scientific Reports*, Vol. 10 (2020) 19197. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74603-x>
  8. Devita Rachmat, Intan Paramudita, Nur Fadhillah, Muhammad Husain Haekal, Ruri Agung Wahyuono, Rachmat Hidayat, Rozalina Zakaria, Veinardi Suendo, Doty Dewi Risanti, Au-doped mesoporous SiO<sub>2</sub> scattering layer enhances light harvesting in quasi Solid-State dye-



- sensitized solar cells, Journal of King Saud University-Engineering Sciences (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.07.007>
9. Risa Rahmawati Sunarya, Rahmat Hidayat, Cynthia Linaya Radiman, Veinardi Suendo, Electrocatalytic activation of a DSSC graphite composite counter electrode using in situ polymerization of aniline in a water/ethanol dispersion of reduced graphene oxide, Journal of Electronic Materials, Vol. 49 (2020) 3182-3190. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07977-3>
  10. M Djamal, L Yuliantini, R Hidayat, N Rauf, M Horprathum, R Rajaramakrishna, K Boonin, P Yasaka, J Kaewkhao, V Venkatramu, S Kothan, Spectroscopic study of Nd<sup>3+</sup> ion-doped Zn-Al-Ba borate glasses for NIR emitting device applications, Optical Materials, Vol. 107 (2020) 110018. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110018>
  11. Diyan Unmu Dzujah, Rahmat Hidayat, Fitrilawati Fitrilawati, Norman Syakir, Rolled supercapacitor device model using carbon-sheet as electrodes in kcl electrolyte system, Key Engineering Materials, 860 (2020) 53-58.
  12. Nur Fadhilah Syarif, Rahmat Hidayat, Priastuti Wulandari, Photovoltaic Characterization of Hybrid Bulk Heterojunction Solar Cell Incorporated Gold Nanoparticles Embedded in Active Layer, Key Engineering Materials, 860 (2020) 34-41.
  13. Pina Pitriana, Triati Dewi Kencana Wungu, Herman, and Rahmat Hidayat, The characteristics of band structures and crystal binding in all-inorganic perovskite APbBr<sub>3</sub> studied by the first principle calculations using the Density Functional Theory (DFT) method, Results in Physics, Vol. 15 (2019) 102592. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102592>
  14. L Yuliantini, M Djamal, R Hidayat, K Boonin, P Yasaka, E Kaewnuam, V Venkatramu, J Kaewkhao, Optical and X-ray induced luminescence of Sm<sup>3+</sup>-doped borotellurite and fluoroborotellurite glasses: A comparative study, Journal of Luminescence, Vol. 213 (2019) 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.04.016>
  15. Rida Nurul Shelni Rofika, Wagiyong Honggowiranto, Heri Jodi, Sudaryanto Sudaryanto, Evvy Kartini and Rahmat Hidayat, The effect of acetonitrile as an additive on the ionic conductivity of imidazolium-based ionic liquid electrolyte and charge-discharge capacity of its Li-ion battery, Ionics (2019) <https://doi.org/10.1007/s11581-019-02919-4> .

16. Herlin Pujiarti, Rahmat Hidayat, Priastuti Wulandari, Enhanced efficiency in dye-sensitized solar cell by localized surface plasmon resonance effect of gold nanoparticles, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, Vol. 28 (2019) 1950040. <https://doi.org/10.1142/S0218863519500401>
17. H. Pujiarti, H. Bahar, R. Hidayat, Poly(ionic-liquid) from imidazoline-functionalized siloxane prepared by simple sol-gel route for efficient quasi-solid-state DSSC, *Mater. Res. Express.* 6 (2019) 075507. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1282>
18. Y.S. Handayani, E.D. Indari, R. Hidayat, Y. Ohtsubo, S. Kimura, Understanding the role of organic cations on the electronic structure of lead iodide perovskite from their UV photoemission spectra and their electronic structures calculated by DFT method, *Mater. Res. Express.* (2019). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1d3f>
19. Juniastel Rajagukguk, Wuttichai Chaiphaksa, Jakrapong Kaewkhao, Rahmat Hidayat, Fitrilawati Fitrilawati, Photopumped laser diode continuous wave for optical gain determination of Nd: YVO<sub>4</sub> and Nd: YAG crystal medium, *Journal of Metals, Materials and Minerals* (2019), 29
20. Yuliantini, L., Kaewnuam, E., Hidayat, R., Djamal, M., Boonin, K., Yasaka, P., Wongdeeying, C., Kiwsakunkran, N., Kaewkhao, J. Yellow and blue emission from BaO-(ZnO/ZnF<sub>2</sub>)-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TeO<sub>2</sub> glasses doped with Dy<sup>3+</sup> for laser medium and scintillation material applications (2018) *Optical Materials*, 85, pp. 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.09.007>
21. Widiyandari, H., Prasetio, A., Purwanto, A., Subagio, A., Hidayat, R. Platinum-free, carbon-based materials as efficient counter electrodes for dye-sensitized solar cells (2018) *Japanese Journal of Applied Physics*, 57 (6), art. no. 068001. <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.57.068001>
22. Wulandari, P., Handayani, Y.S., Hidayat, R., Wang, P., Ryuzaki, S., Okamoto, K., Tamada, K. Surface plasmon resonance effect of silver nanoparticles on the enhanced efficiency of inverted hybrid organic-inorganic solar cell (2018) *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, 27 (2), art. no. 1850017. <https://doi.org/10.1142/S0218863518500170>
23. Arsyad, W.O.S., Januari, A., Jumalia, Ilmawati, W.S., Usman, I., Hidayat, R. Non-ohmic resistance effects of the AZO and TiZO as a blocking layer in dye-sensitized solar cells (DSSCs) (2018) *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, 27 (2), art. no. 1850019.

24. Arsyad, W.O.S., Bahar, H., Prijamboedi, B., Hidayat, R. Revealing the limiting factors that are responsible for the working performance of quasi-solid state DSSCs using an ionic liquid and organosiloxane-based polymer gel electrolyte (2018) *Ionics*, 24 (3), pp. 901-914. <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2230-7>
25. Yuliantini, L., Hidayat, R., Djamal, M., Boonin, K., Yasaka, P., Kaewnuam, E., Kaewkhao, J. Development of Sm<sup>3+</sup> doped ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses for optical gain medium (2018) *Journal of Non-Crystalline Solids*, 482, pp. 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.12.012>
26. N.S. Aminah, C. Themistos, R. Hidayat, M. Djamal, B.M.A. Rahman, Evolution of surface plasmon supermodes in metal-clad microwire and its potential for biosensing, *Journal of Lightwave technology*, 2017, 35(21), 8039176, 4684-4691. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2753318>
27. J. Rajagukguk, J. Kaewkhao, M. Djamal, R. Hidayat, Suprijadi, Y. Ruangtawee, Structural and optical characteristics of Eu<sup>3+</sup> ions in sodium-lead-zinc-lithium-borate glass system, *Journal of Molecular Structure*, 1121 (2016) 180-187.
28. J. Rajagukguk, R. Hidayat, Suprijadi, M. Horprathum, J. Kaewkhao, Structural and optical properties of Nd<sup>3+</sup> doped Na<sub>2</sub>O-PbO-ZnO-Li<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses system, *Key Engineering Materials*, 675-676 (2016) 424-429.
29. Tulus, Rahmat Hidayat, The investigation of CuOx anode interlayer effect in working performance and charge carrier transport in hybrid solar cells with inverted structure, *Macromolecular Symposia* 353(1) (2015) 121-127.
30. Zeily Nurachman, Hartini H, Wiwit Ridhani Rahmanyah, Dewi Kurnia, Rahmat Hidayat, Bambang Prijamboedi, Veinardi Suendo, Enny Ratnaningsih, Lily Maria Goretty Panggabean, Santi Nurbaiti, Tropical marine *Chlorella* sp. PP1 as a source of photosynthetic pigments for dye-sensitized solar cells, *Algal Research* 10 (2015) 25-32.
31. A Caretta, R Miranti, A H Arkenbout, A O Polyakov, A Meetsma, R Hidayat, M O Tjia, T T M Palstra and P H M van Loosdrecht, Thermo-chromic effects in a Jahn-Teller active CuCl<sub>6</sub><sup>4-</sup> layered hybrid system, *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 25 (2013) 505901. <https://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/25/50/505901>
32. Annisa Aprilia, Priastuti Wulandari, Veinardi Suendo, Herman, Rahmat Hidayat, Akihiko Fujii, Masanori Ozaki, Influences of dopant concentration in sol-gel derived AZO layer on the performance of

- P3HT:PCBM based inverted solar cell, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 111 (2013) 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.12.033>
33. Rahmat Hidayat, Sahrul Hidayat, Fitri Fitrilawati, Herman, May On Tjia, Akihiko Fujii and Masanori Ozaki, Distributed feedback grating fabricated from hybrid polymer precursor gel by employing short-pulse laser interference for photopumped polymer laser applications, *Polymer for Advanced Technology*, Vol. 23 (2012) 1264–1270. <https://doi.org/10.1002/pat.2039>
34. Rahmat Hidayat, Widiyanta Gomulya, Pina Pitriana, Ryan Irmansyah, Rany Miranti, Herman, Sahrul Hidayat, Fitrilawati, Akihiko Fujii & Masanori Ozaki, Siloxane based Organic-Inorganic Hybrid Polymers and their Applications for Nanostructured Optical/Photonic Components, *ITB J. Eng. Sci.*, Vol. 44, No. 3, 2012, 207-219.
35. Wismanto, W.Y., Hidayat, R., Tjia, M.O., Fujiwara, Y., Murata, K., Ogawa, Y., Yoshida, H., Ozaki, M., Emission enhancement characteristics of oxazine in pmma matrix influenced by surface plasmon polariton induced on sinusoidal silver grating, *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials* Vol. 21 (2012) art. no. 1250013.
36. R. Hidayat, Herman, Fitrilawati, M. Ojima, M. Ozaki, Fabrication of distributed feedback grating from hybrid polymer which exhibits photo-pumped lasing action, *International Journal of Nanoscience*, Vol. 9, (2010) 307-310
37. Risdiana, Fitrilawati, R. Hidayat, A.A.Nugroho, R.E.Siregar, M.O.Tjia, I.Watanabe, Intra- and inter-chain polaron diffusion in regio-random polythiophene studied by muon spin relaxation, *Physica B* 405 (2010) S381-S383. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2010.01.080>
38. Masuyama, K; Yamasaki, N; Fujii, A; Asao, T; Fukumoto, H; Yamamoto, T; Hidayat, R; Ozaki, M, Time-Resolved Photoluminescence Study and Microcapillary Laser of Blue-Emissive pi-Conjugated Polymers Based on 9,10-Dihydrophenanthrene Unit, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48 (2009)
39. Masuyama, K., Fujii, A., Nakao, T., Asao, T., Fukumoto, H., Yamamoto, T., Sakai, J., Hidayat, R., Ozaki, M., Optical Properties and Microcapillary Laser of Blue-Emissive  $\pi$ -Conjugated Polymers Based on 9,10-Dihydrophenanthrene Unit, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47 (2008), p. 4724-4727

40. Hendro, Wirawan, R. Hidayat and M. Djamal, Development of Visible Light Absorption Measurement for Concentrated Dye Solution based on ATR Technique and Improvement on its Analysis Method, Indonesian Journal of Physics, Vol. 19 No. 2, April 2008
41. R. Hidayat, O. Sugihara, M. Tsuchimori, M. Kagami, T. Nishikubo, and T. Kaino, Binding of Europium Complex to Polymerizable Macrocyclic Molecules and its Optical Properties, Optical Materials Vol. 29 (2007) p. 1367-1374. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2006.06.016>
42. R. Hidayat, O. Sugihara, M. Tsuchimori, M. Kagami, T. Nishikubo, and T. Kaino, Complexation of Lanthanide Ions with Polymerizable Macrocyclic Calixarene Derivatives for Polymer Optical Device Applications, Journal of Nonlinear Optics, Nonlinear Optics, Quantum Optics, 2005.
43. H. Taunamang, R. Hidayat, Herman, M.O.Tjia, Effects of Substrate temperature and external poling field on molecular orientation and aggregation effects in vacuum deposited photorefractive DR1 film, Journal of Non-linear Optics Photonic Materials (JNOPM) Vol 12 (2003) p. 213
44. Rahmat Hidayat, Yusuke Nishihara, Akihiko Fujii, Masanori Ozaki, Katsumi Yoshino, and Eugene Frankevich, Time-resolved optical and electrical study of second-order processes responsible for the formation of free polarons in conjugated polymers, Physical Review B 66, 2002 (075214)
45. Rahmat Hidayat, Akihiko Fujii, Masanori Ozaki, Katsumi Yoshino, Masahiro Teraguchi, and Toshio Masuda, Influences of Interchain Interaction on Exciton Dynamics in Poly(3-Alkylthiophene), Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 40 (2001) pp. 7103–7109
46. R. Hidayat, A. Fujii, M. Ozaki, M. Teraguchi, T. Masuda, and K. Yoshino, Exciton Dynamics in Disubstituted Polyacetylene, Synthetic Metals, Vol. 119 (1-3), 2001, pp. 597-598
47. A. Fujii, R. Hidayat, T. Sonoda, T. Fujisawa, M. Ozaki, Z. V. Vardeny, M. Teraguchi, T. Masuda, K. Yoshino, Optical Properties of Disubstituted Polyacetylene Thin Films, Synthetic Metals, Vol. 116, 2001, pp. 95-99
48. I. Gontia, S. V. Frolov, M. Liess, Z. V. Vardeny, E. Ehrenfreund, K. Tada, H. Kajii, R. Hidayat, A. Fujii, K. Yoshino, M. Teraguchi, T. Masuda, Photoexcitation in Disubstituted Polyacetylene: Solitons and Polarons, Synthetic Metals, Vol. 116, 2001, pp. 91-94
49. Rahmat Hidayat, Satoshi Tatsuhara, Dong Wook Kim, Masanori Ozaki, and Katsumi Yoshino, Time-Resolved Study of Luminescence in Highly Luminescent Disubstituted Polyacetylene and its Blend with Poorly

- Luminescent Monosubstituted Polyacetylene, *Physical Review B*, Vol. 61, 2000, pp. 10167-10173
50. Ryoji Nomura, S. M. Abdul Karim, Hirotake Kajii, Rahmat Hidayat, Katsumi Yoshino, and Toshio Masuda, Metathesis Polymerization of 9-(10-Hexoxycarbonyl)-anthrylacetylene. A Route to a Widely Conjugated Polyacetylene with Excellent Stability and Solubility, *Macromolecules*, Vol. 33, 2000, pp. 4313-4315
  51. K Yoshino, SB Lee, T Sonoda, H Kawagishi, R Hidayat, K Nakayama, M Ozaki, K Ban, K Nishizawa, K Ohta, H Shirai, Optical properties of substituted phthalocyanine rare-earth metal complexes, *Journal of Applied Physics*, Vol. 88 (2000) 7137-7143. <https://doi.org/10.1063/1.1316050>
  52. R. Hidayat, M. Hirohata, S. Tatsuhara, M. Ozaki, K. Yoshino, M. Teraguchi, and T. Masuda, PL and EL Characteristics of Mixture of Polyacetylene Derivatives and Dynamics of Excitons, *Synthetic Metals*, Vol. 101, 1999, pp. 210-211
  53. T. Sonoda, R. Hidayat, M. Ozaki, Katsumi Yoshino, W. Schneider, K. K. Lee, A. Naka, and M. Ishikawa, Photoinduced Luminescence Quenching and Insolubilization of Star-Like Branched Organosilicon Compounds, *Applied Physics Letters*, Vol. 75, 1999, pp. 2193-2195
  54. I. Gontia, Sergey V. Frolov, M. Liess, E. Ehrenfreund, Z. V. Vardeny, K. Tada, H. Kajii, R. Hidayat, A. Fujii, K. Yoshino, M. Teraguchi, and T. Masuda, Excitation Dynamics in Disubstituted Polyacetylene, *Physical Review Letters*, Vol. 82, 1999, pp. 4058-4061
  55. R. Hidayat, M. Hirohata, K. Tada, M. Teraguchi, T. Masuda, and K. Yoshino, Photoluminescence and Electroluminescence in Polymer Mixture of Poly(Alkylphenylacetylene) And Poly(Diphenylacetylene) Derivatives, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 37, 1998, L180-L183
  56. Sergey V. Frolov, Akihiko Fujii, Douglas Chinn, Masaharu Hirohata, Rahmat Hidayat, Masahiro Taraguchi, Toshio Masuda, Katsumi Yoshino, Z. V. Vardeny, Microlasers and Micro-LEDs from Disubstituted Polyacetylene, *Advanced Materials*, Vol. 10 (1998), 869-872. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199808\)10:11<869::AID-ADMA869>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199808)10:11<869::AID-ADMA869>3.0.CO;2-Y)
  57. R. Hidayat, M. Hirohata, K. Tada, M. Teraguchi, T. Masuda, and K. Yoshino, Effect of Molecular Structure of Substituents on Green Electroluminescence in Disubstituted Acetylene Polymers, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 36, 1997, pp. 3740-3743

58. S. V. Frolov, M. Shkunov, Z. V. Vardeny, K. Tada, R. Hidayat, M. Hirohata, M. Teraguchi, T. Masuda, K. Yoshino, Spectral Narrowing of Emission in Disubstituted Polyacetylene, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 36, 1997, L1268-L1271
59. M. Hirohata, K. Tada, R. Hidayat, T. Masuda, K. Yoshino, Effect of Alkyl and Aromatic Substituents on Blue Electroluminescence in Polyacetylene Derivatives, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 36, 1997, L302-L305
60. K. Yoshino, M. Hirohata, R. Hidayat, K. Tada, T. Sada, M. Teraguchi, T. Masuda, S. V. Frolov, M. Shkunov, Z. V. Vardeny, M. Hamaguchi, Optical Properties and Electroluminescence Characteristics of Polyacetylene Derivatives Dependent on Substituent and Layer Structure, *Synthetic Metals*, Vol. 91, 1997, pp. 283-287
61. K. Yoshino, K. Tada, M. Hirohata, R. Hidayat, S. Tatsuhara, M. Ozaki, A. Naka, M. Ishikawa, Emission Characteristics of Poly[(tetraalkyldisilanylene)-p-oligophenylene]s, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 36, 1997, pp. L1548-L1551
62. K. Tada, K. Hosoda, M. Hirohata, R. Hidayat, T. Kawai, M. Onoda, M. Teraguchi, T. Masuda, A. Zakhidov, K. Yoshino, Donor Polymer (PAT6)-Acceptor Polymer (CNPPV) Fractal Network Photocells, *Synthetic Metals*, Vol. 85, 1997, pp.1305-1306
63. K. Tada, R. Hidayat, M. Hirohata, T. Kawai, S. B. Lee, I. U. Bakhadirov, A. A. Zakhidov, K. Yoshino, Conducting Polymer-Fullerene D-A Photocell with Decreased Serial Resistance: ITO/PAT(C60)/C60/Al Structure, *Synthetic Metals*, Vol. 85, 1997, pp. 1349-1350
64. K. Tada, R. Hidayat, M. Hirohata, M. Teraguchi, T. Masuda, K. Yoshino, Optical Properties and Blue and Green Electroluminescence in Soluble Disubstituted Acetylene Polymers, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 35, 1996, L1138-L1141

## **PROSIDING KONFERENSI INTERNASIONAL**

### **(Prosiding online terindeks Scopus)**

1. L Yuliantini, M Djamal, R Hidayat, K Boonin, P Yasaka, J Kaewkhao, Development of Trivalent Samarium Ion-Doped Barium Fluoroborotellurite Glasses for Solid-State Lighting and Scintillation Material, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1209 (2023) 012014.

2. Valdi Rizki Yandri, Priastuti Wulandari, Rachmat Hidayat, Photoluminescence properties of CsPbCl<sub>3</sub> and CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals synthesized by LARP method with various ligands and anti-solvents, *Journal of Physics: Conference Series* 2243 (2022) 012120.
3. Alvin Fariz, Rahmat Hidayat, Calculation of spectra and plasmon wave distribution in one-dimensional periodic structure, *Journal of Physics: Conference Series* 2243 (2022) 012088.
4. H Herman, IG Narayana, R Hidayat, The Effect of Molecular Orientation in Disperse Red-1 Film on Its Refractive Index, *Journal of Physics: Conference Series* 2243 (2022) 012089.
5. M Djamal, L Yuliantini, R Hidayat, K Boonin, P Yasaka, J Kaewkhao, Development of optical material based on glass doped rare earth for photonic devices, *Materials Today: Proceedings*, 43 (2021) 2531-2537.
6. Herlin Pujiarti, Yolla Sukma Handayani, Annisa Aprilia, Rahmat Hidayat, The Cell Performances of DSSCs with ZnO Nanorod Electrodes, *Materials Science Forum*, Vol. 1028 (2021) 168-172.
7. Yolla Sukma Handayani, Priastuti Wulandari, Herman Herman, Rahmat Hidayat, Electronic Structure of Lead-Free Halide Perovskite Material: Cs<sub>2</sub>SnI<sub>6</sub>, for Perovskite Solar Cells Applications, *Materials Science Forum*, 1028 MSF (2021), 210-214.
8. L Yuliantini, M Djamal, R Hidayat, K Boonin, J Kaewkhao, P Yasaka, Luminescence and Judd-Ofelt analysis of Nd<sup>3+</sup> ion doped oxyfluoride boro-tellurite glass for near-infrared laser application, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43 (2021) 2655-2662.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.631>
9. L Yuliantini, M Djamal, R Hidayat, P Yasaka, J Kaewkhao, K Boonin, Development of Eu<sup>3+</sup> doped boro-tellurite oxyfluoride glass and their Judd-Ofelt analysis for red laser gain medium application, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 17 (2019) 1815-1822.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.218>.
10. P Pitriana, TDK Wungu, H Herman, R Hidayat, Electronic structure calculations of alkali lead iodide APbI<sub>3</sub> (A= Li, Na, K, Rb or Cs) using density functional theory (DFT) method, *Journal of Physics: Conference Series* 1204 (2019) 012107.
11. Pina Pitriana, TDK Wungu, Rahmat Hidayat, H Herman, Ab-initio calculation of APbI<sub>3</sub> (A=Li, Na, K, Rb and Cs) perovskite crystal and their



- lattice constants optimization using density functional theory, *Journal of Physics: Conference Series* 1170 (2019) 012023.
12. Waode Sukmawati Arsyad, Aricia Pristianti, La Agus, Rahmat Hidayat, rGO based photo-anode in dye-sensitized solar cells (DSSC) and its photovoltaic characteristics, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 622 (2019) 012008.
  13. Waode Sukmawati Arsyad, Ahmad Wardianto, Visca Inda Variani, Waode Sitti Ilmawati, La Agus, Rahmat Hidayat, A Preliminary result on the rGO functionalization as counter-electrode in dye-sensitized solar cells (DSSC), *Journal of Physics: Conference Series* 1245 (2019) 012067.
  14. L Yuliantini, M Djamal, R Hidayat, K Boonin, J Kaewkhao. Spectroscopy properties of Er<sup>3+</sup> ion doped ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass for photonic application. *Materials Today: Proceedings* 5 (7), 15076-15080.
  15. M Djamal, L Yuliantini, R Hidayat, K Boonin, P Yasaka, J Kaewkhao. Glass medium doped rare earth for sensor material. *Materials Today: Proceedings* 5 (7), 15126-15130.
  16. Pitriana, P., Wungu, T.D.K., Herman, H., Hidayat, R. The computation parameters optimizations for electronic structure calculation of LiPbI<sub>3</sub> perovskite by the density functional theory method (2018) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 434 (1), art. no. 012026.
  17. Septiana, A.R., Honggowiranto, W., Sudaryanto, S., Kartini, E., Hidayat, R. Comparative study on the ionic conductivities and redox properties of LiPF<sub>6</sub> and LiTFSI electrolytes and the characteristics of their rechargeable lithium ion batteries (2018) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 432 (1), art. no. 012061.
  18. Djamal, M., Yuliantini, L., Hidayat, R., Rauf, N., Kaewkhao, J. Development of Glass for Radiation Shielding Material (2018) *Proceedings of 2017 5th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering, ICICI-BME 2017*, art. no. 8537747, pp. 91-94.
  19. Yuliantini Lia, Rahayu Eka Sylvianti, Djamal Mitra, Hidayat Rahmat, Chanthima Natthakridta, Kaewkhao Jakrapong, Effect of Borate and Silicate Glass on Nd<sup>3+</sup> iondoped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Li<sub>2</sub>O- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Glass for Light Sensing Application, 2018 3rd International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM) (2018) 44-47.
  20. Yuliantini, L., Hidayat, R., Djamal, M., Yasaka, P., Boonin, K., Kaewkhao, J. White Emission from Dy<sup>3+</sup> Doped Borate Glass and their Judd-Ofelt

- Analysis (2018) Proceedings of 2017 5th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering, ICICI-BME 2017, art. no. 8537758, pp. 76-80.
21. Handayani, Y.S., Wulandari, P., Hidayat, R. Controlled synthesis of lead-free perovskite  $\text{Cs}_2\text{SnI}_6$  as hole transport layer in dye sensitized solar cells (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1080 (1), art. no. 012003.
  22. Aprilia, A., Fernando, H., Bahtiar, A., Safriani, L., Hidayat, R. Influences of Al dopant atoms to the structure and morphology of Al doped ZnO nanorod thin film (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1080 (1), art. no. 012009.
  23. Chalimah, S., Pradana, J.S., Hidayat, R. Detection of Dye Molecules Adsorbed in a Mesoporous Layer by Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and its Comparison with Simulation Results (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1057 (1), art. no. 012002.
  24. Nurunnizar, A.A., Muslihun, Hidayat, R. Preparations of Organo-Lead Halide Perovskite Layers in Humid Air Atmosphere and their Characteristics (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1057 (1), art. no. 012007.
  25. Pradana, J.S., Chalimah, S., Hidayat, R. Fabrication of nanostructure grating polymer based coupling element for Surface Plasmon Resonance (SPR) sensors and its spectral reflectance characteristics (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1057 (1), art. no. 012009.
  26. Indari, E.D., Wungu, T.D.K., Hidayat, R. Ab-Initio Computations of Electronic Structures of Methylammonium Lead Bromide/Iodide Perovskites as Wide Bandgap Active Materials in Solar Cells (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1057 (1), art. no. 012004.
  27. Rahmawati, R., Suendo, V., Hidayat, R. Reduced Graphene Oxide/Polyaniline Nanocomposite as Efficient Counter Electrode for Dye Sensitized Solar Cells (2018) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 384 (1), art. no. 012040.
  28. Pradana, J.S., Hidayat, R. Reflectance spectra characteristics from an SPR grating fabricated by nano-imprint lithography technique for biochemical nanosensor applications (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1011 (1), art. no. 012064.
  29. Fajar, M.N., Hidayat, R., Triwikantoro, Endarko Experimental Study of Acid Treatment Toward Characterization of Structural, Optical, and

- Morphological Properties of TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> Composite Thin Film (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1011 (1), art. no. 012006.
30. Pujiarti, H., Arsyad, W.S., Shobih, Muliani, L., Hidayat, R. Efficient and Stable Photovoltaic Characteristics of Quasi-Solid State DSSC using Polymer Gel Electrolyte Based on Ionic Liquid in Organosiloxane Polymer Gels (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1011 (1), art. no. 012020.
  31. T. Dewinggih, Shobih, L. Muliani, Herman, R. Hidayat, The temperature effect on the working characteristics of solar cells based on organometal halide perovskite crystals, 2017, Journal of Physics: conference series, 877(1), 012043.
  32. E.D. Indari, T.D.K. Wungu, R. Hidayat, Ab-initio calculation of electronic structure of lead halide perovskites with formamidinium cation as an active material for perovskite solar cells, 2017, Journal of Physics: conference series, 877(1), 012054.
  33. M.I. Alturisa, J. Wira, Mardiyati, Herman, R. Hidayat, Influence of precursor solution concentration and temperature on CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite layer morphology and the unconverted PbI<sub>2</sub> proportion to their perovskite solar cell characteristics, 2017, Journal of Physics: conference series, 877(1), 012046.
  34. A. Aprilia, A. Erdienzy, A. Bahtiar, R. Hidayat, R.E. Siregar, Self-assembly of ZnO-nanorods and its performance in quasi solid dye sensitized solar cells, 2017, Journal of Physics: conference series 877 (1), 012023.
  35. A. Aprilia, L. Safriani, W.O.S. Arsyad, FitriLawati, R. Hidayat, Zinc oxide/TiO<sub>2</sub> bilayer heterojunction as a working electrode in quasi solid dye sensitized solar cells, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 214(1) (2017) 012033.
  36. N.S. Aminah, S. Chalimah, Hendro, R. Hidayat, M. Djamal, A simulation of surface plasmon resonance-based tapered fiber and sensing, Journal of Physics: Conference series, 853(1) (2017) 012005.
  37. V. Marcelina, N. Syakir, S. Wyantuti, R. Hidayat, FitriLawati, Characteristic of thermally reduced graphene oxide as supercapacitors electrode materials, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 196(1) (2017), 012034.
  38. O.F.T. Maryana, R. Hidayat, Modelling and calculation of optical amplification in one dimensional case of laser medium using finite difference time domain method, Journal of Physics: Conference Series, 739(1) (2016) 012100.

39. T. Apriani, W. S. Arsyad, P. Wulandari, R. Hidayat, Investigation on the influences of layer structure and nanoporosity of light scattering TiO<sub>2</sub> layer in DSSC, *Journal of Physics: Conference Series*, 739(1) (2016) 012134.
40. Rahmat Hidayat, Yolla Sukma Handayani, Priastuti Wulandari, Study of interfacial charge transfer loss in hybrid solar cells by impedance spectroscopy, *Materials Science Forum* 08/2015; 827:162-167.
41. Wa Ode Sukmawati Arsyad, Herlin Pujiarti, Pardi Sampe Tola, Herman, and Rahmat Hidayat, Fabrications and characterizations of dye-sensitized solar cells (DSSCs) with sol-gel derived gel electrolytes, *AIP Conf. Proc.* Vol. 58 (2013) doi: 10.1063/1.4820283.
42. Aprilia, A., Wulandari, P., Hidayat, R., Effect of solvent used in the preparation of aluminum-doped ZnO as electron acceptor layer on the characteristic of its hybrid solar cell, *Materials Science Forum*, Vol. 737 (2013) 74-79.
43. Annisa Aprilia, Veinardi Suendo, Herman, Priastuti Wulandari, Rahmat Hidayat, Akihiko Fujii, Masanori Ozaki, Influences of aluminum concentration to the characteristics of ZnO electron transport layer and its hybrid polymer solar cells, *AIP Conf. Proc.* 1454, 223 (2012); doi: 10.1063/1.4730726.
44. Rahmat Hidayat, Annisa Aprilia, Herman Bahar, and Bambang Prijamboedi, Some Considerations on Photocurrent Characteristics Of Poly(alkylthiophene) and Photovoltaic Characteristics of Poly(alkylthiophene)/ ZnO Based Hybrid Solar Cells, *AIP Conference Proceedings Volume 1325* (2010) pp. 32-35 (as an Invited Speaker).
45. Risdiana, Fitrilawati, Hidayat, R., Siregar, R.E., Tjia, M.O., Watanabe, I.,  $\mu$ SR Study of Electron Radical Dynamics in Regio-Regular Polythiophene, *Journal of Physics: Conference Series* 200 (2010) 052024.
46. Wilzuard Yonan, Rahmat Hidayat, May On Tjia, Martijn Kuik, Bert de Boer, Fabrication and Characterization of Unipolar Devices based on the MEH-PPV/PFO Blend Polymer, *Proceeding of The 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences*, Bandung, 2009.
47. Widiananta Gomulya, Rahmat Hidayat, Alexander A. Iskandar, May On Tjia, Calculation of Photonic Density of States and Light Amplification for Simple 2D Photonic Crystal based on Polymeric Materials, *Proceeding of The 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences*, Bandung, 2009.

48. Hendro, Mitra Djamal, Daniel Kurnia, Rahmat Hidayat, Absorption Measurement of Conjugated Polymer Nanolayer Based on Attenuated Total Reflection Method, Proceeding of The 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences, ITB, Bandung, Indonesia, July 22-23, 2009.
49. P. Pitriana, F. Fitrilawati, Pardi Sampe Tola, R. Miranti, R. Hidayat, Preparation of Hybrid Organic-Inorganic Polymers doped with Luminescent Molecules and their Characterizations, Proceeding of The 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences, ITB, Bandung, Indonesia, July 22-23, 2009.
50. Rahmat Hidayat, Waode Sukmawati, Wilzuard Yonan, Okihiro Sugihara, Toshikuni Kaino, Probing of Binding and Local Ligand Field Effect of Europium Complex in Polymers by NMR Spectroscopy and Optical Spectroscopy, Proceeding of International Conference on Mathematics and Natural Sciences, 29-30 Nov. 2006, Bandung, Indonesia.
51. Waode Sukmawati, Wilzuard Yonan, Herman, Rahmat Hidayat, Tjia May On, Photopolymerization and Spectroscopic Characteristic of Europium (III) Complex Doped Hybrid Polymer Ormocer, Proceeding of International Conference on Mathematics and Natural Sciences, 29-30 Nov. 2006, Bandung, Indonesia.
52. Wirawan and Rahmat Hidayat, Preliminary Study on the Development of Model and Simulation of Absorption Effect in ATR Measurement, Proceeding of International Conference on Mathematics and Natural Sciences, 29-30 Nov. 2006, Bandung, Indonesia.

### **KONFERENSI INTERNASIONAL**

1. Rahmat Hidayat, Adhita Asma Nurunnizar, Valdi Rizki Yandri, Alvin Fariz, Natalita Maulani Nursam, Akihiko Fujii, Masanori Ozaki, Crucial effects of surface defect states on the halide perovskites properties and their solar cells characteristics, Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023, Nagoya, Japan 2023 (as a Guest Speaker)
2. Rahmat Hidayat, Toward durable and flexible dye-sensitized solar cells through the use of polyionic-liquids and nanostructured electrodes, International Conference on Energy Sciences, ICES-2018, Bandung (as an Invited Speaker)
3. R. Hidayat, A. Aprilia, P.S. Tola, P. Wulandari, Herman, A. Fujii, and M. Ozaki, Hybrid polymer solar cells with Al doped ZnO as its transport layer

- and their characteristics investigated by impedance spectroscopy, IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012), September 2012, Yokohama, Japan. (as an Invited Speaker)
4. Rahmat Hidayat, Widiyanta Gomulya, Ryan Irmansyah, Pina Pitriana, Herman, Hendro, Sahrul Hidayat, Fitrilawati, Akhihiko Fujii and Masanori Ozaki, Organic-Inorganic Hybrid Polymers and their Applications for Micro- and Nano-Structured Optical Components, International Conference on Advanced Photonics Polymers, Yokohama, Japan, December 2011. (as an Invited Speaker)
  5. Rahmat Hidayat, Organic-Inorganic Hybrid Polymers for Photonics, The 5th International Conference on Electrical and Electronic Materials Engineering (ICEME) 2011, Osaka, Japan, December , 2011
  6. Sahrul Hidayat, Rahmat Hidayat, Fitrilawati, A. Bahtiar, R.E. Siregar, and M.Ozaki, Application Of Hybrid Polymer As Two-Dimensional Grating And Its Laser Characteristics, Malaysia, December 7 - 8, 2009
  7. Risdiana, Fitrilawati, R. Hidayat, R. E. Siregar, M. O. Tjia, Y. Ishii and I. Watanabe, "Spin Dynamics in Regio-regular Poly(3-octylthiophene-2,5-diyl) Studied by Muon Spin Relaxation", ASR 2009, Advanced Science Research Symposium 2009, Japan, November 10-12, 2009
  8. Norman Syakir, Pina Pitriana, Rahmatul Hidayati, Danil Purba, Fitrilawati, Herman, Rahmat Hidayat, "Preparation of Hybrid Organic-Inorganic Polymer Doped with RGB Organic Chromophores and Their Characterizations", 7th International Symposium of Modern Optics and its Application (ISMOA 2009), Bandung, Indonesia 10 – 14 August 2009
  9. Rahmat Hidayat, Widiyanta Gomulya, Hendro, Daniel Kurnia, Herman, Akihiko Fujii, Masanori Ozaki, Surface Plasmon Generation in Hybrid Polymer Grating Covered by Thin Metal Layer and their Characteristics for Molecular Sensing Applications, presented in The 7th International Symposium on Modern Optics and Its Application. Bandung, 10-14 Agustus 2009.
  10. Sahrul Hidayat, Rahmat Hidayat, Fitrilawati, Ayi Bahtiar, R.E. Siregar, Masanori Ozaki. Fabrications on Two Dimensional Grating by Laser Interference Method and Its Lasing Characteristics, presented in The 7th International Symposium on Modern Optics and Its Application. Bandung, 10-14 Agustus 2009.
  11. R. Miranti, A. Caretta, A.H. Arkenbout, Rahmat Hidayat, M.O.Tjia, T.T.M. Palstra, P.H.M. Loosdrecht. Nature of the Structural Phase Transition in

- $\text{CuCl}_4(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)_2$ , presented in The 7th International Symposium on Modern Optics and Its Application. Bandung, 10-14 Agustus 2009.
12. Hendro, Daniel Kurnia, Mitra Djamal, Rahmat Hidayat, Masayoshi Ojima, Koji Murata, Masanori Ozaki, presented in Characteristics of Polymer Layer in Polymer Light Emitting Diode Investigated by SPR Spectroscopy, presented in The 7th International Symposium on Modern Optics and Its Application. Bandung, 10-14 Agustus 2009
  13. P. Pitriana, R. Hidayati, D. Purba, N. Syakir, F. Fitrilawati, Herman, R. Hidayat, "Preparation and Characterization of Hybrid Inorganic-Organic Polymer", on Chemistry 2008 , Bandung 30-31 October 2008
  14. Silvia, S. Hidayat, Y. Yuliah, F. Fitrilawati, R. Hidayat, "Preparation of Hybrid Inorganic-Organic Polymer Doped with Rhodamin G6 and Its Characterization", International Seminar on Chemistry 2008 , Bandung 30-31 October 2008
  15. Rahmat Hidayat, Waode Sukmawati, Herman, and Tjia May On, Organic-Inorganic Hybrid Polymer Containing Light Emitting Molecules for Light Amplification Applications, presented in The 6th International Symposium on Modern Optics and Its Applications, August 8-10, 2007, Bandung Institute of Technology, Indonesia
  16. Waode Sukmawati, Rahmat Hidayat, Herman, and Tjia May On, Organic-Inorganic Hybrid Polymer Containing Europium (III) complexes and Its Optical Spectroscopic Characteristics, poster presentation in The 6th International Symposium on Modern Optics and Its Applications, August 8-10, 2007, Bandung Institute of Technology, Indonesia
  17. R. Hidayat, O. Sugihara, M. Tsuchimori, M. Kagami, T. Nishikubo, and T. Kaino, Incorporation of Europium Complex into Macrocyclic Polymers and Its Optical Properties, presented in The 5th International Symposium on Modern Optics and Its Applications, August 18-20, 2005, Bandung Institute of Technology, Indonesia
  18. R. Hidayat, O. Sugihara, M. Tsuchimori, M. Kagami, T. Nishikubo, and T. Kaino, Modification of Luminescence Characteristics of Lanthanide Ions Embedded in Macrocyclic Polymers, presented in The 2nd International COE Symposium, Nov. 22-23, 2004, Sendai, Japan

## VII. PENGHARGAAN

- Penghargaan Dies Natalis FMIPA ITB, FMIPA ITB, 2023

- Penghargaan Dies Natalis ITB ke-62 2021, Penghargaan Bidang Karya Inovasi, ITB, 2021
- Penghargaan 25 Tahun ITB, ITB, 2019
- Penghargaan/tanda jasa Satya Lencana 20 tahun, Presiden RI 2018
- Penghargaan/tanda jasa Satya Lencana 10 tahun, Presiden RI 2010

## **VIII. SERTIFIKASI**

- Sertifikasi Dosen, Departemen Pendidikan Nasional (24 Agustus 2011)







📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎️ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉️ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132  
E-mail: [sekretariat-fgb@itb.ac.id](mailto:sekretariat-fgb@itb.ac.id)  
Telp. (022) 2512532  
🌐 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)    [FgbItb](#)    [FGB\\_ITB](#)  
 [@fgbitb\\_1920](#)    [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-567-5

