

Analisis Sifat Optik dan *Band Gap* Lapisan Perovskit MAPbI₃ *doping Phenethylammonium Iodide* (PEAI) pada Aplikasi Solar Cells

Optical Properties and Band Gap Analysis of MAPbI₃ Perovskite Layer doped Phenethylammonium Iodide (PEAI) in Solar Cells Applications

Anla Fet Hardi^{1,*}, Nasrullah Idris¹, Erin Ficrah Huda², Dahyunir Dahlan², Muldarisnur², Nural Fajri³

Received 24 May 2025
Accepted 1 August 2025
Published August 2025

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala

²Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas

³Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Abstrak. Material perovskit MAPbI₃ menjadi kandidat utama untuk *solar cell* generasi ketiga karena memiliki nilai *absorbansi* yang tinggi dan *band gap* yang sesuai. Namun efisiensi dan stabilitas masih menjadi masalah utama. Dalam penelitian ini akan dilakukan *doping phenethylammonium iodide* (PEAI) terhadap sifat optik dan energi *gap* dari material perovskit MAPbI₃. Lapisan perovskit difabrikasi dengan metode *spin coating* dua tahap (*two-step spin coating*) yang dikenal efektif dalam menghasilkan lapisan tipis terkontrol dan homogen. Karakterisasi lapisan dilakukan dengan spektroskopi UV-Vis untuk mendapatkan data spektrum absorbansi, dan selanjutnya dianalisis menggunakan metode *Tauc Plot* untuk memperoleh nilai *band gap*. Hasil menunjukkan bahwa *doping* PEAi mampu meningkatkan intensitas serapan pada wilayah cahaya tampak dan menginduksi pergeseran biru pada tepi serapan. Nilai *band gap* meningkat setelah diberi *doping* dari 1,61 eV pada sampel murni tanpa *doping* menjadi 1,68 eV untuk konsentrasi *doping* tertinggi. Temuan mengindikasikan bahwa *doping* PEAi berperan terhadap modifikasi struktur pita energi dan memperbaiki karakteristik optik lapisan Perovskit. Penelitian ini menunjukkan bahwa *doping* PEAi merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja optik lapisan perovskit dalam aplikasi solar cell.

Abstract. MAPbI₃ perovskite material is a leading candidate for third-generation solar cells because it has high absorbance and a suitable band gap. However, efficiency and stability remain major issues. In this study, phenethylammonium iodide (PEAI) doping will be performed on the optical properties and energy gap of MAPbI₃ perovskite material. The Perovskite layers were fabricated by two-step spin coating method which is known to be effective in producing controlled and homogeneous thin layers. Characterization of the coating was carried out by UV-Vis spectroscopy to obtain absorbance spectrum data, and then analyzed using the Tauc Plot method to obtain the energy Gap value. The results show that the addition of PEAi can increase the intensity of absorption in the visible light region and cause a blue shift at the absorption edge. The energy Gap value increased after doping from 1.61 eV in the pure sample without doping to 1.68 eV for the highest doping concentration. This indicates that PEAi doping plays a role in modifying the energy band structure and improving the optical characteristics of Perovskite layers. This study shows that PEAi doping is a promising approach to improving the optical performance of perovskite layers in solar cell applications.

Keywords: MAPbI₃, PEAi, Spin Coating, Optic Propertis, Band Gap

Pendahuluan

Perkembangan teknologi *solar cells* telah menjadi fokus utama para peneliti di seluruh dunia dalam mencari solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan mengatasi krisis energi dunia. Dalam sepuluh tahun terakhir, *Perovskite solar cells* (PSC) telah menjadi salah satu teknologi *solar cells* yang paling berkembang diantara jenis *solar cells* lainnya. Efisiensi PSC berbasis *methylammonium lead iodide* (MAPbI₃) telah meningkat dari sekitar 3,8% menjadi lebih dari 25% (Gholami, Røstvik and Steemers, 2021) sejak diperkenalkan pertama kali oleh Kojima pada tahun 2009 (Kojima *et al.*, 2009). Dengan demikian, PSC adalah calon utama untuk generasi baru teknologi fotovoltaik dari generasi ketiga yang berkinerja tinggi dan berbiaya relatif lebih murah.

Salah satu material Perovskit yang paling banyak diteliti adalah material MAPbI₃. Material Perovskit MAPbI₃ sendiri memiliki banyak keunggulan jika diaplikasikan pada sel surya generasi baru dibandingkan dengan jenis Perovskit lainnya. Keunggulan utama yang dimiliki material MAPbI₃ adalah koefisien serapan yang tinggi sehingga memungkinkan film tipis MAPbI₃ menyerap hampir seluruh spektrum cahaya. Selain itu, energi celah optik (*band Gap*) MAPbI₃ adalah ~1,50–1,70 eV, merupakan nilai yang ideal untuk mencapai efisiensi tinggi berdasarkan batas teori Shockley–Queisser. Keunggulan ini didukung oleh difusi eksiton yang panjang dan mobilitas muatan yang baik yang

memungkinkan pemisahan dan transportasi muatan yang efisien dalam perangkat (Stranks and Snaith, 2015). Selain itu proses fabrikasi MAPbI₃ juga relatif lebih sederhana dan memungkinkan pengembangan teknologi fotovoltaik yang ringan dan fleksibel serta produksi massal murah (Park, 2015). Tetapi, karena sifat higroskopis, sensitivitas terhadap panas, dan kemungkinan terbentuknya cacat kristal (*defect states*), yang memperburuk absorbansi dan memperluas distribusi energi celah, stabilitas struktur kristal dan kendali atas sifat optik MAPbI₃ masih menjadi masalah dalam praktik (Niu, Guo and Wang, 2015).

Dalam hal ini, pendekatan yang dapat dilakukan untuk memperbaiki sifat optik dan menyetel ulang nilai energi *gap* salah satunya dengan melakukan modifikasi struktur melalui *doping* kation atau aditif organik. Senyawa organik aromatik bermuatan positif adalah salah satu kandidat yang semakin diperhatikan, karena memiliki kemampuan untuk mengubah interaksi antar lapisan Perovskit, memperbaiki morfologi kristal, dan mengubah sifat elektronik di sekitar pita valensi dan pita konduksi. *Penenethylammonium iodide* (PEAI), sebuah molekul organik bermuatan positif dengan struktur aromatik, dianggap memiliki kemampuan untuk berinteraksi dengan permukaan kristal MAPbI₃ dan mengubah lingkungan lokal di sekitar ion Pb²⁺ dan I⁻. Secara teoritis, ini dapat mengubah transisi elektronik, memperbaiki struktur kristal, dan mengubah sifat optik seperti absorbansi dan band *Gap* (Zhang et al., 2023). Namun, laporan sistematis yang menjelaskan secara rinci tentang perubahan sifat optik dan energi celah MAPbI₃ setelah di *doping* dengan PEAi belum banyak dilakukan dan belum sepenuhnya dipahami, terutama jika divariasikan dan dikontrol dengan konsentrasi tertentu. Sedangkan, memahami pengaruh PEAi pada absorbansi spektrum UV-Vis dan posisi energi celah optik sangat penting karena dapat memungkinkan rekayasa *band gap* yang lebih baik dan optimalisasi efisiensi konversi energi dalam perangkat PSC yang akan datang.

Selain masalah komposisi pada lapisan, hal penting yang mempengaruhi sifat optik adalah metode fabrikasi. Metode dua tahap (*two-step spin coating*) adalah metode yang sering digunakan dalam menghasilkan lapisan yang berkualitas tinggi. Dalam proses ini prekursor PbI₂ dilapisi terlebih dahulu di atas substrat kemudian dibuat lapisan selanjutnya dari larutan MAI. Metode dua tahap ini memungkinkan terbentuknya lapisan yang lebih seragam dan memiliki orientasi yang baik, serta lebih mudah untuk dilakukan proses *doping* dengan bahan aditif (Burschka et al., 2013; Chen et al., 2014). Pendekatan dengan metode ini juga dapat mengontrol bentuk morfologi dan distribusi fasa pada lapisan yang akan berdampak langsung terhadap sifat optik lapisan MAPbI₃.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui pengaruh *doping* PEAi terhadap sifat optik dan *band gap* lapisan Perovskit MAPbI₃ pada aplikasi *solar cells*. Lapisan Perovskit akan di fabrikasi dengan metode *spin coating* dua tahap (*two-step spin coating*). Selanjutnya lapisan akan dikarakterisasi dengan spektroskopi UV-Vis untuk mengetahui spektrum absorbansi, dan *band gap* akan dihitung dengan metode *Tauc Plot*. Penelitian ini menawarkan kebaruan dalam hal pengaruh doping rendah terhadap sifat optik material, khususnya nilai absorbansi dan *band gap*. Studi ini juga menekankan penggunaan analisis spektroskopi UV-Vis untuk menilai kualitas film perovskit secara lebih detail sebagai langkah awal untuk meningkatkan efisiensi perangkat optoelektronik. Diharapkan studi ini akan memberi kontribusi dalam hal strategi rekayasa material aktif PSC melalui modifikasi aditif yang terkontrol, sehingga menghasilkan performa optik yang lebih baik dan efisien.

Metodologi

Persiapan Substrat Kaca

Kaca substrat *indium tin oxide* (ITO) dengan ukuran 1,5 cm x 1,5 cm dibersihkan dengan etanol untuk menghilangkan kotoran organik maupun anorganik (Hardi and Dahlan, 2020). Kaca dimasukkan ke dalam gelas beker yang sudah berisi larutan kemudian digetarkan dengan *ultrasonic cleaners* selama 30 menit. Kemudian dengan cara yang sama kaca dibersihkan dengan aquades selama 10 menit sebanyak 2 kali pengulangan. Selanjutnya dibersihkan dengan larutan aseton selama 5 menit, dan dengan etanol selama 10 dan 15 menit secara berurutan. Terakhir kaca dikeringkan dengan nitrogen gas dan disimpan di cawan petri agar terhindar dari debu dan kotoran.

Preparasi Larutan Perovskit

Larutan timbal iodida dan *metilamonium iodida* digunakan sebagai prekursor dasar dalam proses pembentukan lapisan Perovskit MAPbI₃. Sebanyak 900 mg serbuk PbI₂ merek Aldrich dilarutkan ke dalam pelarut campuran yang terdiri dari 1,2 mililiter dimetil formamida (DMF) dan 0,3 mililiter dimetil sulfoksida (DMSO) (Dahlan et al., 2023). Kemudian proses pelarutan dilakukan di atas *hotplate* selama empat jam dengan kecepatan pengadukan sebesar 700 rpm dan suhu konstan 60°C. Kemudian larutan prekursor metilamonium iodida (MAI) dibuat dengan melarutkan 180 gram metilamonium iodida (MAI) ke dalam 1 mililiter isopropil alkohol (IPA). Larutan campuran ini kemudian diaduk selama 4 jam dengan kecepatan 700 rpm menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu ruang. Sementara itu, larutan *doping* yaitu *phenethylammonium iodide* (PEAI) dibuat menggunakan larutan IPA dengan konsentrasi stok 3 mg/ml dengan menggunakan *ultrasonic cleaner* dan digetarkan selama 30 menit. Larutan

PEAI yang sudah siap kemudian dicampurkan langsung ke dalam larutan MAI dengan volume yang disesuaikan sehingga diperoleh konsentrasi akhir *doping* 0,5 0,75 1,0 dan 1,5 mg/mL.

Pelapisan Perovskit MAPbI₃ doping PEAI

Sintesis lapisan dengan metode *spin coating* dua tahap digunakan untuk menghasilkan lapisan Perovskit MAPbI₃ pada substrat kaca ITO. Sebanyak 80 µL Larutan PbI₂ 0,1 M ditetaskan ke substrat kemudian diputar selama 60 detik menggunakan *spin coater* (Anla et al., 2023). Selanjutnya substrat kaca yang sudah dilapisi PbI₂ dipanaskan pada suhu 100°C selama 60 detik guna untuk percepatan proses penguapan pelarut. Setelah didinginkan hingga suhu ruang, sebanyak +/- 0,5 mL isopropil alkohol (IPA) ditetaskan secara langsung ke permukaan yang telah dilapisi PbI₂. Kemudian, dengan parameter yang sama, diputar kembali. Tujuan dari perlakuan ini adalah untuk mengurangi sisa pelarut utama (DMF dan DMSO) pada lapisan PbI₂.

Langkah kedua yaitu sebanyak 0,8 ml larutan MAI 0,1 M yang sebelumnya sudah dicampurkan dengan larutan PEAI dengan konsentrasi *doping* dari 0,5 hingga 1,5 mg/ml dan heksamin ditetaskan ke substrat kaca. Heksamin sendiri digunakan sebagai agen pengontrol morfologi atau penstabil permukaan dalam tahap awal sintesis. Proses ini dilakukan selama 30 detik dan diputar dengan *spin coater* dengan kecepatan yang sama yaitu 2200 rpm. Perubahan warna dari kuning (PbI₂) menjadi hitam pekat menunjukkan pembentukan lapisan perovskit (Alias et al., 2023). Selanjutnya substrat dipanaskan di atas *hot plate* selama 15 menit pada suhu 150°C, hal ini dilakukan untuk meningkatkan kristalisasi dan stabilitas film Perovskit. Seluruh proses fabrikasi ini dilakukan di dalam *Glove Box* dengan kelembaban antara 20 dan 35 persen. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh paparan uap air.

Karakterisasi UV-Vis dan Perhitungan Energi Gap

Penggunaan UV-Vis untuk mengukur kemampuan penyerapan pada sampel dengan menggunakan hasil pengukuran spektra difusi absorbansi. Spektrum serapan diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis Shimadzu UV-2600 dalam mode absorbansi. Sampel diukur dengan panjang gelombang 300-900 nm, dan menghasilkan grafik panjang gelombang dan tingkat absorbansi. Selanjutnya, data diproses menggunakan aplikasi origin untuk menentukan kemampuan penyerapan lapisan. Berdasarkan data serapan, *band gap* kemudian dihitung menggunakan metode *touch plot*. Pada metode *Tauc Plot* ini pertama-tama data koefisien serapan “α” diekstrak dari data serapan yang diukur dari UV-Vis. Koefisien penyerapan diberikan oleh Pers (1), namun nilai α digunakan dalam satuan relatif berdasarkan absorbansi, tanpa konversi eksplisit.

$$\alpha = \frac{A(h\nu - E_g)^n}{h\nu} \quad (1)$$

Band gap kemudian dapat dihitung dengan menarik garis ekstrapolasi pada daerah linier dari grafik hubungan hingga memotong sumbu energi. Perhitungan tersebut menggunakan Pers (2) (Abdullah and Khairurrijal, 2009) :

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = A^{\frac{1}{n}} h\nu - A^{\frac{1}{n}} E_g \quad (2)$$

Dimana α adalah koefisien abspsi linier, hv adalah energi foton yang datang A adalah absorbansi, E_g adalah *band gap* masing-masing pita optik. Nilai n setara dengan ½ dan 2, masing-masing untuk *band gap* tidak langsung dan langsung. Perlu dicatat bahwa metode turunan ini cara yang belum sempurna untuk mendapatkan *band gap* (Gholipour and Saliba, 2020). Pada penelitian ini metode *Tauc Plot* akan disandingkan dengan model transisi langsung (*direct transition*) yang merupakan sifat dasar dari material MAPbI₃. Berdasarkan penelitian sebelumnya bahwa material ini termasuk kategori semikonduktor dengan celah pita langsung. Transisi elektron yang terjadi dari vita valensi ke vita konduksi pada MAPbI₃ terjadi tanpa perubahan momentum yang merupakan karakter utama dari semikonduktor tipe langsung (Jeong, Choi, Go, Cho, Kim, Lee, Jeong, Jo, Choi, Lee, J.-H. Bae, et al., 2020). Oleh karena itu, dalam perhitungan *band gap* menggunakan metode *Tauc Plot*, nilai eksponen n yang digunakan adalah n=1/2, hal ini sejalan dengan karakter transisi langsung yang diizinkan (*allowed direct transition*). Dalam penelitian ini, karakterisasi difokuskan pada analisis optik menggunakan UV-Vis untuk mengevaluasi pengaruh doping PEAI terhadap spektrum serapan dan perubahan energi celah optik. Meskipun identifikasi struktur kristal dan homogenitas lapisan secara struktural dapat dikaji lebih lanjut melalui difraksi sinar-X (XRD), pengukuran tersebut

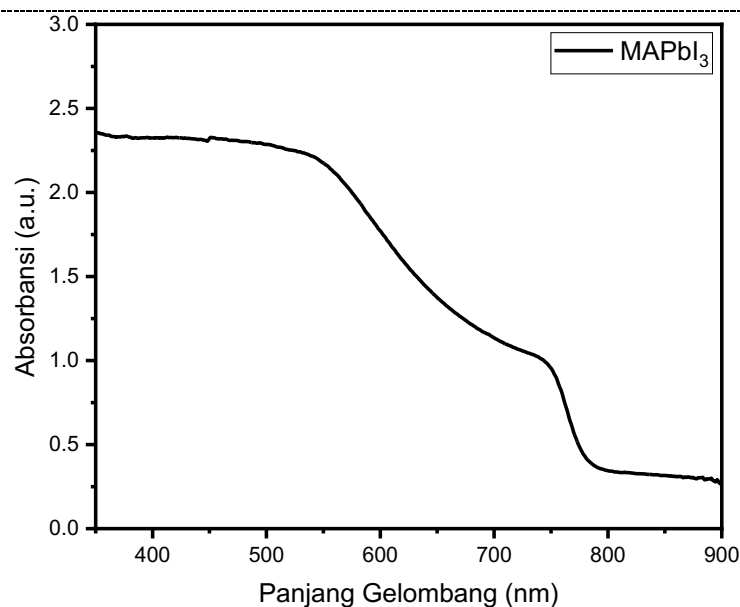
belum dilakukan dalam studi ini. Analisis XRD akan direncanakan dalam studi berikutnya untuk mengkaji hubungan antara fase kristal, tingkat kristalinitas, dan sifat optoelektronik dari lapisan MAPbI₃ secara lebih menyeluruh, sebagaimana juga disarankan dalam literatur (Jeon *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2018).

Hasil dan Diskusi

Material Perovskit metilamonium timbal iodida (MAPbI₃) memiliki karakteristik optik yang sangat menarik dan menjanjikan untuk diaplikasi pada sel surya generasi ketiga. Dari hasil pengukuran UV-Vis kemudian diolah menjadi grafik serapan pada gambar (1), terlihat bahwa lapisan Perovskit MAPbI₃ memiliki rentang serapan yang luas yaitu berkisar dari 350 nm hingga 800 nm. Rentang panjang gelombang ini merupakan wilayah *ultraviolet* (UV), *visible* (VIS) atau cahaya tampak, dan sedikit bagian *near-infrared* (NIR), dan hasil ini sesuai dengan spektrum iradiasi matahari yang lebih dominan yaitu berada pada panjang gelombang 400 hingga 750 nm (Martin A. Green *et al.*, 2022).

Hasil rentang serapan yang luas ini juga sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya (Jeon *et al.*, 2014) yang menginformasikan bahwa lapisan Perovskit MAPbI₃ ini mampu menyerap foton pada cahaya tampak hampir sebesar 90%. Selain rentang serapan yang luas nilai absorbansi yang dihasilkan juga relatif tinggi yaitu sekitar 2,4 a.u., dengan puncak maksimum berada direntang panjang gelombang 350-500 (rentang cahaya tampak). Hal ini semakin meyakinkan bahwa material ini memiliki koefisien serapan optik yang tinggi dan dapat menyerap foton dengan baik sehingga sangat potensial untuk aplikasi teknologi sel surya.

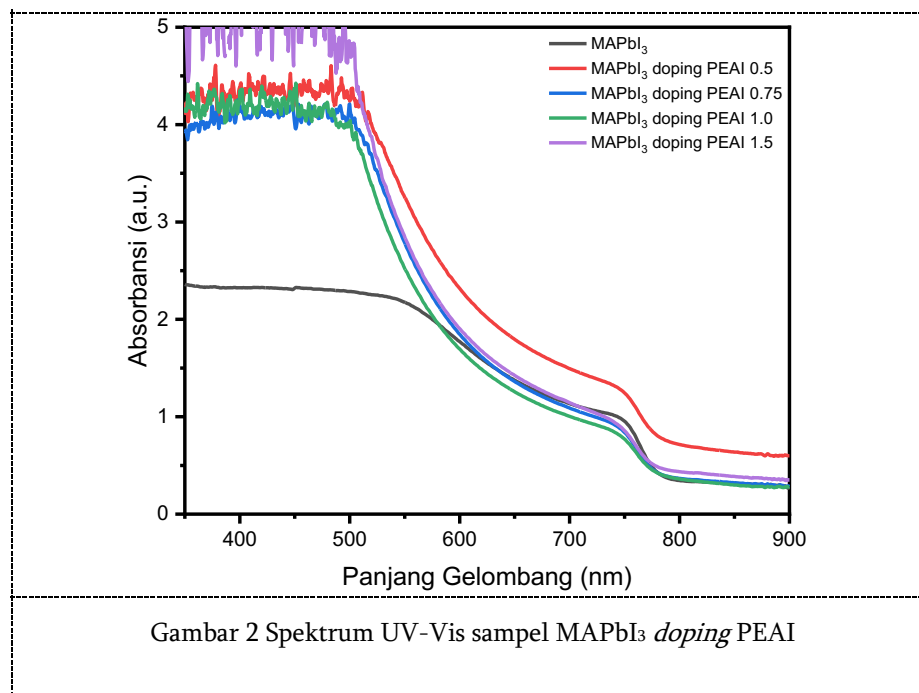
Grafik absorbansi turun secara bertahap dan spektrum juga memiliki karakteristik yang halus dan tanpa fluktuasi tajam, menginformasikan bahwa transisi optik yang terjadi pada lapisan adalah transisi langsung yang diizinkan. Dengan kata lain elektron akan sangat mudah berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga hasilnya adalah struktur pita energi lapisan sangat potensial untuk mampu meningkatkan *power conversion efficiency* (Jeong, Choi, Go, Cho, Kim, Lee, Jeong, Jo, Choi, Lee, J. H. Bae, *et al.*, 2020). Gambar (1) juga memperlihatkan bahwa tepi serapan muncul pada pajang gelombang 750-800 nm yang artinya nilai tersebut adalah batas energi foton dapat diserap oleh lapisan.



Gambar 1 Spektrum UV-Vis sampel MAPbI₃ tanpa *doping* PEAI

Kurva absorbansi juga memiliki bentuk yang lebih halus dan stabil, artinya lapisan Perovskit memiliki kualitas morfologi dan ketebalan yang cukup baik. Selain itu bentuk kurva yang tidak menunjukkan lonjakan dan acak juga menandakan bahwa lapisan memiliki kualitas kristalinitas yang tinggi dan sebaran ukuran butir juga seragam (Kojima *et al.*, 2009). Hal ini juga dipengaruhi oleh proses fabrikasi lapisan yang menggunakan metode *spin coating* dua tahap yang mampu mengontrol kristalisasi lapisan. Hasilnya lapisan menjadi lebih homogen dan penyerapan yang lebih stabil dibandingkan metode *spin* satu tahap atau metode *evaporation thermal* (Xiao *et al.*, 2014). Kualitas

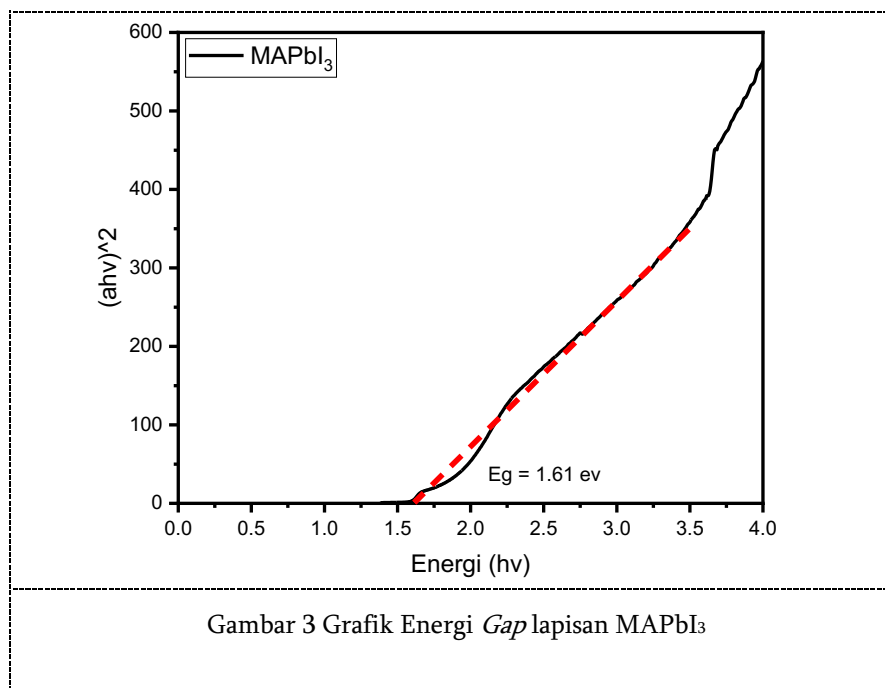
morfologi lapisan ini sangat penting sekali dalam hal efisiensi dan stabilitas *solar cell*. Sehingga semua keunggulan ini menandakan lapisan memiliki performa optik yang sangat baik untuk diaplikasikan pada material aktif *solar cell*.



Berdasarkan spektrum absorbansi pada gambar (2) terlihat bahwa material MAPbI₃ mengalami peningkatan *absorbansi* signifikan setelah diberi *doping* PEAI dengan berbagai konsentrasi. MAPbI₃ mengalami peningkatan nilai absorbansi dari 2,4 a.u. menjadi kurang lebih 4 a.u. Dengan *doping* PEAI, kurva absorbansi meningkat di rentang panjang gelombang 450 hingga 750 nm. Hasil ini menunjukkan terjadi peningkatan kualitas lapisan Perovskit secara optik, memperluas rentang penyerapan, dan densitas serapan cahaya meningkat setelah *doping* PEAI (Jeong, Choi, Go, Cho, Kim, Lee, Jeong, Jo, Choi, Lee, J. H. Bae, *et al.*, 2020).

Unsur PEAI sendiri merupakan kation organik yang sangat besar dan mampu menempati antarmuka permukaan butir kristal MAPbI₃ dan membuat struktur kuasi-2D ketika unsur PEAI ini dijadikan bahan *doping*. PEAI juga dapat membantu pasivasi cacat dan mengurangi rekombinasi pembawa muatan. Hal ini terlihat jelas pada *doping* PEAI 0,5 – 1,0 mg/ml kualitas lapisan Perovskit mengalami peningkatan sehingga terjadi juga peningkatan kemampuan absorbansi (Zhao, Kim and Jung, 2018). Namun setelah *doping* dinaikkan menjadi 1,5 mg/ml, terlihat ada fluktuasi spektral pada panjang gelombang dibawah 500 nm. Hasil ini diduga kuat terjadi ketidakseragaman pada lapisan atau terbentuknya fase minor akibat *overdoping* tersebut. Temuan ini juga pernah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya (Fu, Chen and Jen, 2021) yang menyatakan bahwa konsentrasi PEAI yang terlalu tinggi dapat mengganggu kestabilan optik material dan menyebabkan ketidakaturan kristal. Sehingga dari fenomena ini dapat disimpulkan bahwa pemberian *doping* untuk kondisi optimal dalam menghasilkan lapisan dengan performa optik terbaik, baik dalam hal absorbansi maupun kestabilan spektral adalah *doping* PEAI dengan konsentrasi 0,5 hingga 1,0 mg/ml.

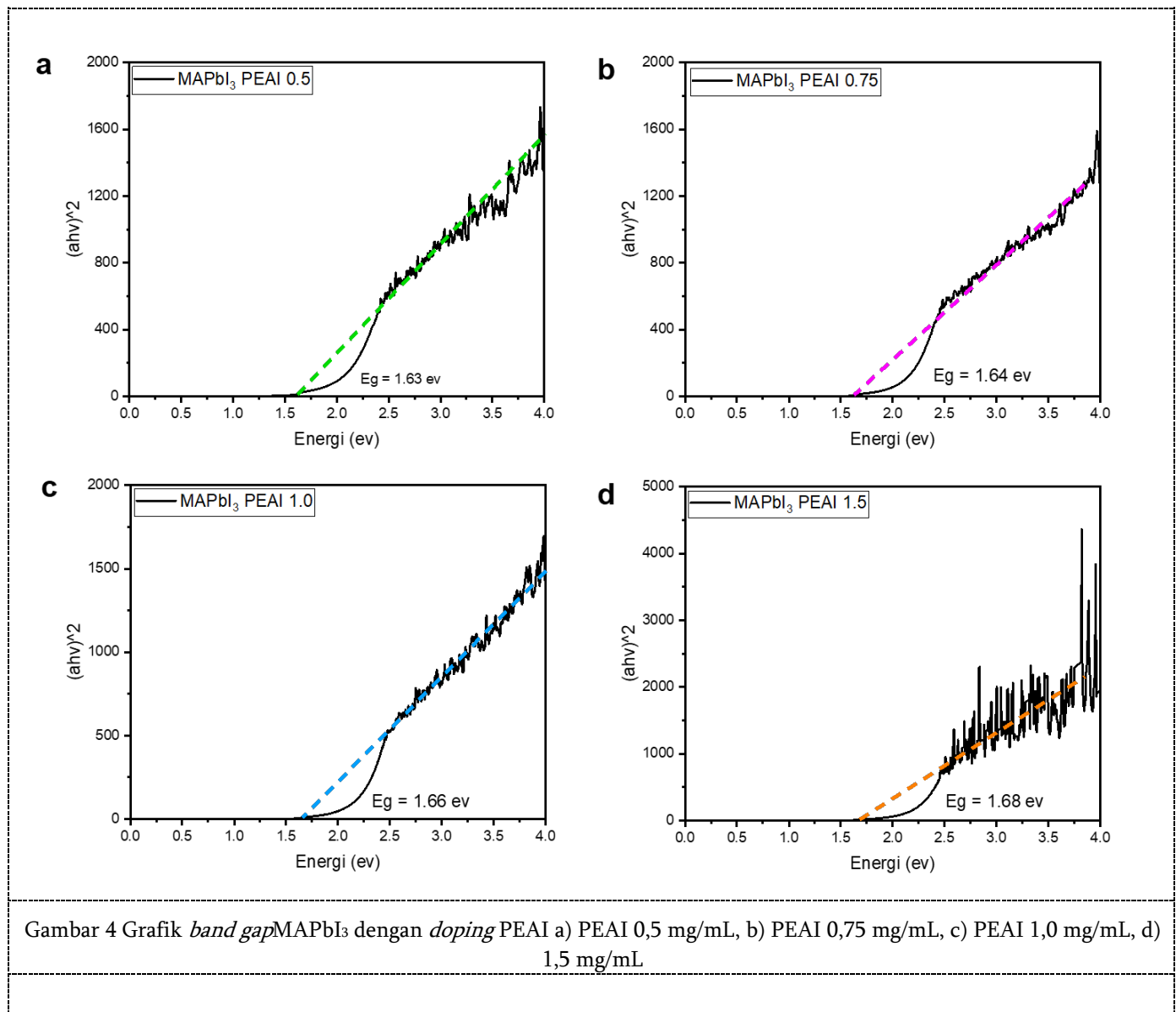
Absorbansi yang cukup tinggi ini menunjukkan keunggulan PEAI dibandingkan bahan *doping* lain. Meskipun terlihat ada sedikit *blue shift* (pergeseran tepi serapan ke arah panjang gelombang yang lebih pendek) seiring peningkatan konsentrasi *doping* namun absorbansi yang tinggi di wilayah *UV-Visible* menyebabkan lapisan tidak rugi dalam hal mencapai efisiensi (PCE). Dibandingkan bahan *doping* lain yang pernah dilaporkan sebelumnya (Yu *et al.*, 2021) bahwa *doping* logam Cu²⁺ dan Fe³⁺ dapat menimbulkan cacat dalam kisi kristal, sehingga akan menghasilkan *trap states* yang akan merugikan dalam hal konversi energi karena akan mengurangi efisiensi penyerapan. Dengan demikian, *doping* PEAI pada lapisan Perovskit MAPbI₃ tidak hanya meningkatkan sifat optik, tetapi juga akan mempengaruhi peningkatan efisiensi perangkat pada aplikasi teknologi *solar cell*.

Gambar 3 Grafik Energi *Gap* lapisan MAPbI₃

Berdasarkan hasil analisis grafik lapisan Perovskit MAPbI₃ tanpa *doping* (gambar 3) dengan metode *Tauc Plot* yang diperoleh dengan menarik garis ekstrapolasi energi foton $h\nu$ terhadap nilai $(\alpha h\nu)^2$ yang berada pada titik potong sumbu energi diperoleh nilai *band gap* sebesar 1,61 eV. Nilai energi ini menunjukkan bahwa MAPbI₃ tergolong ke dalam semikonduktor tipe *direct band gap*, artinya transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi terjadi langsung tanpa adanya perubahan momentum. Alasan lebih lanjut terkait penentuan tipe *direct band gap* ini yaitu berdasarkan hasil kurva absorbansi yang diperoleh menunjukkan tepi serapan yang tajam dan kurva yang halus, tidak terdapat fluktuasi acak. Ciri ini menunjukkan indikasi transisi optik yang terbentuk dominan transisi langsung. Dengan demikian, hasil ini sesuai antara eksperimen dan teori. Sifat ini penting untuk aplikasi *solar cell* karena sifat ini memungkinkan penyerapan cahaya yang tinggi juga efisien pada lapisan tipis (Li et al., 2024).

Nilai *band gap* 1,61 eV untuk aplikasi sel surya berarsitektur *junction* tunggal merupakan nilai yang berada pada kondisi ideal yang diprediksi oleh batas teori Shockley–Queisser, yang berkisar antara 1,34 sampai 1,7 eV. Dalam konteks nyata, nilai ini memungkinkan MAPbI₃ untuk menyerap spektrum cahaya tampak secara efektif hingga pada panjang gelombang 770 nm, dengan koefisien serapan yang tinggi, lapisan dapat memanfaatkan sebagian besar spektrum cahaya matahari untuk menghasilkan generasi pasangan *electron-hole*. Dengan demikian kombinasi yang menarik antara serapan yang tinggi, transportasi muatan yang efisien, dan *band gap* yang ideal menjadikan lapisan Perovskit MAPbI₃ mencapai konversi daya yang optimal hingga 20% tanpa struktur kompleks pada konfigurasi *planar heterojunction* (Martin A Green et al., 2022).

Hal menarik selanjutnya adalah ketika lapisan Perovskit ini didoping dengan *Phenethylammonium iodide* (PEAI) terjadi peningkatan *band gap* secara linear sesuai dengan kenaikan konsentrasi *doping* terlihat pada gambar (4). Nilai *band gap* tanpa *doping* yaitu 1,61 eV, menjadi 1,63 ketika di *doping* 0,5 mg/mL PEAi kemudian naik secara berkala 1,65 eV (PEAI 0,75), 1,66 eV (PEAI 1,0), dan 1,68 eV ketika konsentrasi PEAi dinaikkan menjadi 1,5 mg/mL, lebih detailnya pada tabel 1. Fenomena kenaikan energi ini, menandakan terjadinya peristiwa *blue shift*, artinya terjadi pergeseran penyerapan optik ke energi yang lebih tinggi atau panjang gelombang yang lebih pendek. Hal ini disebabkan oleh terjadinya interaksi sterik kation aromatik PEAi yang lebih besar daripada MA⁺ yang menyebabkan struktur kristal tertekan sehingga pita energi menjadi lebih lebar (Ou et al., 2023). Efek pasivasi permukaan PEAi juga mengurangi densitas cacat di batas butir, yang juga meningkatkan kualitas optik dan nilai E_g (Dai et al., 2024).



Secara praktis, kenaikan *band gap* akibat *doping* PEAi dari 1,61 eV menjadi 1,68 eV masih berada di rentang ideal untuk material penyerap cahaya dalam sel fotovoltaik *single junction* Perovskit. Nilai energi yang sedikit lebih tinggi akibat pemberian *doping* PEAi sebenarnya dapat mengurangi kehilangan energi panas, yaitu kehilangan energi yang disebabkan oleh eksitasi elektron oleh foton yang memiliki energi lebih tinggi dari energi murni (Green, 2003). Selain itu, peningkatan *band gap* ini juga punya peluang akan meningkatkan nilai *open circuit voltage* (Voc) pada *solar cell*, karena nilai Voc maksimum berhubungan langsung dengan nilai *band gap* (Miah et al., 2024). Dengan demikian, modifikasi Eg dengan *doping* PEAi bukan hanya akan mempengaruhi perilaku absorptif lapisan, tetapi juga berpengaruh terhadap parameter kelistrikan penting lainnya pada kinerja perangkat *solar cell*.

Tabel 1 Nilai energi Gap Lapisan Perovskit *doping* PEAi

Parameter	PEAi 0 mg/mL	PEAi 0,5 mg/mL	PEAi 0,75 mg/mL	PEAi 1,0 mg/mL	PEAi 1,5 mg/mL
Nilai Eg (eV)	1,61	1,63	1,64	1,66	1,68

Selain evaluasi *band gap*, analisis *urbach energy* (E_u) juga penting untuk mengetahui tingkat ketidakteraturan kristal dan keberadaan *trap state* pada material. Analisis ini akan menggambarkan lebar ekor eksponensial pada kurva absorpsi yang berkaitan langsung dengan jumlah cacat pada struktur kristal. Meskipun dalam pembahasan ini belum dilakukan perhitungan *energi urbach* (E_u), namun indikasi dari kurva absorpsi telah menunjukkan

adanya peningkatan kualitas lapisan setelah dilakukan proses *doping* dengan PEAI 0,5–1,0 mg/mL, hal ini terlihat dari bentuk kurva yang halus tanpa fluktuasi yang lebih tajam. Fenomena ini mengisyaratkan adanya kemungkinan pengurangan *trap state* dan penurunan *disorder*, sebagaimana dilaporkan oleh penelitian sebelumnya (Ugur *et al.*, 2022; Li, Huang and Zhong, 2023). *Doping* PEAI diyakini dapat memberikan efek pasivasi terhadap cacat dan meningkatkan keteraturan antarmuka kristal, yang akan memberi pengaruh terhadap peningkatan kualitas optik lapisan Perovskit.

Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat optik material dan energi celah (*band gap*) dipengaruhi secara signifikan oleh *doping phenethylammonium iodide* (PEAI) pada material Perovskit MAPbI₃. Konsentrasi PEAI yang lebih tinggi meningkatkan absorbansi di rentang panjang gelombang 400–750 nm, menurut analisis spektrum serapan UV-Vis. Ini menunjukkan bahwa material memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menyerap cahaya. Dengan menggunakan metode *tauc plot*, analisis menunjukkan bahwa *doping* PEAI menyebabkan pergeseran biru (*blue shift*) pada tepi serapan. Kemudian, nilai *band gap* meningkat dari 1,61 eV pada MAPbI₃ murni menjadi 1,68 eV pada konsentrasi PEAI 1,5 mg/mL. Hasil ini menunjukkan bahwa PEAI mengubah struktur optoelektronik untuk mengubah pita energi MAPbI₃, yang dapat meningkatkan efisiensi perangkat sel surya Perovskit di masa depan. Karakterisasi struktur kristal lebih lanjut seperti XRD akan direncanakan dalam studi lanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah mendukung dalam publikasi hasil penelitian ini.

Referensi

- Abdullah, M. and Khairurrijal, K. (2009) 'Review: Karakterisasi Nanomaterial', *J. Nano Saintek*, 2(1), pp. 1–9.
- Alias, N. *et al.* (2023) 'Air-Processable Perovskite Solar Cells by Hexamine Molecule Phase Stabilization', *ACS Omega*, 8(21), pp. 18874–18881. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01236>.
- Anla, A.F.H. *et al.* (2023) 'Particle Size Improvement and Layer Absorption of Metil Halida MAPbI₃ Perovskite Doping Phenethylammonium Iodide (PEAI)', *Jurnal Ilmu Fisika | Universitas Andalas*, 16(1), pp. 13–21. Available at: <https://doi.org/10.25077/jif.16.1.13-21.2024>.
- Burschka, J. *et al.* (2013) 'Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells', *Nature*, 499(7458), pp. 316–319. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature12340>.
- Chen, Q. *et al.* (2014) 'Controllable self-induced passivation of hybrid lead iodide perovskites toward high performance solar cells', *Nano letters*, 14(7), pp. 4158–4163. Available at: <https://doi.org/10.1021/nl501838y>.
- Dahlan, D. *et al.* (2023) 'Improving the optoelectrical properties of humid stable, hexamined perovskite lattice by phenethylammonium cation additive', *Optical Materials*, 145. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114489>.
- Dai, W. *et al.* (2024) 'Enhancing the Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells Via Hybrid Electron Transport Layer Strategy', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(48), pp. 66117–66124. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsmi.4c14573>.
- Fu, W., Chen, H. and Jen, A.K.-Y. (2021) 'Two-dimensional perovskites for photovoltaics', *Materials Today Nano*, 14, p. 100117. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2021.100117>.
- Gholami, H., Røstvik, H. and Steemers, K. (2021) 'The Contribution of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) to the Concept of Nearly Zero-Energy Cities in Europe: Potential and Challenges Ahead', *Energies*, 14, p. 6015. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14196015>.
- Gholipour, S. and Saliba, M. (2020) 'Bandgap tuning and compositional exchange for lead halide perovskite materials', *Characterization Techniques for Perovskite Solar Cell Materials*, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814727-6.00001-3>.
- Green, M.A. (ed.) (2003) 'Energy, Entropy and Efficiency BT - Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion', in: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 21–34. Available at: https://doi.org/10.1007/3-540-26563-5_3.
- Green, Martin A. *et al.* (2022) 'Solar cell efficiency tables (Version 60)', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(7), pp. 687–701. Available at: <https://doi.org/10.1002/pip.3595>.
- Green, Martin A *et al.* (2022) 'Solar cell efficiency tables (Version 60)', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(7), pp. 687–701. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pip.3595>.
- Hardi, A.F. and Dahlan, D. (2020) 'Pengaruh Doping Al Pada ZnO Menggunakan Metode LPD Terhadap Efisiensi Dye Sensitized Solar Cells (DSSC)', *Jurnal Fisika Unand*, 9(3), pp. 360–367. Available at: <https://doi.org/10.25077/jfu.9.3.360-367.2020>.
- Jeon, N.J. *et al.* (2014) 'Solvent engineering for high-performance inorganic–organic hybrid perovskite solar cells', *Nature Materials*, 13(9), pp. 897–903. Available at: <https://doi.org/10.1038/nmat4014>.
- Jeong, M., Choi, I.W., Go, E.M., Cho, Y., Kim, M., Lee, B., Jeong, S., Jo, Y., Choi, H.W., Lee, J., Bae, J.-H., *et al.* (2020) 'Stable

- perovskite solar cells with efficiency exceeding 24.8% and 0.3-V voltage loss', *Science*, 369(6511), pp. 1615–1620. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb7167>.
- Jeong, M., Choi, I.W., Go, E.M., Cho, Y., Kim, M., Lee, B., Jeong, S., Jo, Y., Choi, H.W., Lee, J., Bae, J.H., et al. (2020) 'Stable perovskite solar cells with efficiency exceeding 24.8% and 0.3-V voltage loss', *Science*, 369(6511). Available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb7167>.
- Kojima, A. et al. (2009) 'Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells.', *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), pp. 6050–6051. Available at: <https://doi.org/10.1021/ja809598r>.
- Li, B. et al. (2024) 'Fundamental understanding of stability for halide perovskite photovoltaics: The importance of interfaces', *Chem*, 10(1), pp. 35–47. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chempr.2023.09.002>.
- Li, M., Huang, P. and Zhong, H. (2023) 'Current Understanding of Band-Edge Properties of Halide Perovskites: Urbach Tail, Rashba Splitting, and Exciton Binding Energy', *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 14(6), pp. 1592–1603. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.2c03525>.
- Miah, M.H. et al. (2024) 'Band gap tuning of perovskite solar cells for enhancing the efficiency and stability: issues and prospects', *RSC Advances*, 14(23), pp. 15876–15906. Available at: <https://doi.org/10.1039/d4ra01640h>.
- Niu, G., Guo, X. and Wang, L. (2015) 'Review of recent progress in chemical stability of perovskite solar cells', *Journal of Materials Chemistry*, 3, pp. 8970–8980. Available at: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:97768742>.
- Ou, Y. et al. (2023) 'Collaborative interfacial modification and surficial passivation for high-efficiency MA-free wide-bandgap perovskite solar cells', *Chemical Engineering Journal*, 469, p. 143860. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143860>.
- Park, N.-G. (2015) 'Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology', *Materials Today*, 18(2), pp. 65–72. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>.
- Stranks, S.D. and Snaith, H.J. (2015) 'Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices', *Nature Nanotechnology*, 10(5), pp. 391–402. Available at: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.90>.
- Ugur, E. et al. (2022) 'Life on the Urbach Edge', *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 13(33), pp. 7702–7711. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.2c01812>.
- Xiao, Z. et al. (2014) 'Efficient, high yield perovskite photovoltaic devices grown by interdiffusion of solution-processed precursor stacking layers', *Energy Environ. Sci.*, 7(8), pp. 2619–2623. Available at: <https://doi.org/10.1039/C4EE01138D>.
- Yu, X. et al. (2021) 'Dopant-free dicyanofluoranthene-based hole transporting material with low cost enables efficient flexible perovskite solar cells', *Nano Energy*, 82, p. 105701. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2020.105701>.
- Zhang, D. et al. (2023) 'Multi-functional buried interface engineering derived from in-situ-formed 2D perovskites using π -conjugated liquid-crystalline molecule with aggregation-induced emission for efficient and stable NiOx-based inverted perovskite solar cells', *Chemical Engineering Journal*, 469, p. 143789. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143789>.
- Zhao, P., Kim, B.J. and Jung, H.S. (2018) 'Passivation in perovskite solar cells: A review', *Materials Today Energy*, 7, pp. 267–286. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.01.004>.