

EKSPLORASI PENGARUH Sn PADA SIFAT STRUKTURAL DAN OPTOELEKTRONIK PEROVSKITE CsPbBr_3

ARTIKEL

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna Memperoleh
Gelar Sarjana Sains dalam Ilmu Fisika



Diajukan oleh:
MOHAMMAD SYAOQI RAMADHAN
NIM: 2108026017

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
SEMARANG
2025**

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mohammad Syaoqi Ramadhan

NIM : 2108026017

Jurusan : Fisika Murni

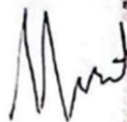
Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul:

EKSPLORASI PENGARUH Sn PADA SIFAT STRUKTURAL DAN OPTOELEKTRONIK PEROVSKITE CsPbBr₃

Secara keseluruhan adalah hasil penelitian/karya saya sendiri, kecuali bagian tertentu yang dirujuk sumbernya.

Semarang, 10 Juni 2025

Pembuat



Mohammad Syaoqi Ramadhan
NIM. 2108026017



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Prof. Dr. Hamka Ngaliyan Semarang
Telp. 024-7601295 Fax. 7615387

PENGESAHAN

Naskah skripsi berikut ini:

Judul : **"Eksplorasi Pengaruh Sn Pada Sifat Struktural dan Optoelektronik Perovskite CsPbBr₃"**

Penulis : Mohammad Syaqi Ramadhan

NIM : 2108026017

Telah diujikan dalam sidang *tugas akhir* oleh Dewan Penguji Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang dan dapat diterima sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana dalam Ilmu Fisika.

Semarang, 09 Juli 2025

DEWAN PENGUJI

Penguji I,

Alwiyah Nurhayati, Ph. D
NIP. 198112112011012006

Penguji III,

Sheilla Rully Anggita, M.Si
NIP. 199005052019032017

Pembimbing I,

Alwiyah Nurhayati, Ph. D
NIP. 198112112011012006

Penguji II,

Agus Sudarmanto, M. Si
NIP. 197708232009121001

Penguji IV,

Istikomah, M. Sc
NIP. 199011262019032021

Pembimbing II,

TT ELEKTRONIK

Wilman Septina, Ph. D
NIP. 19850923202211002

Pembimbing III,

Istikomah, M. Sc
NIP. 199011262019032021



Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSR E, silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code

NOTA DINAS

Semarang, 10 Juni 2025

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : EKSPLORASI PENGARUH Sn PADA
SIFAT STRUKTURAL DAN
OPTOELEKTRONIK PEROVSKITE
CsPbBr₃

Nama : Mohammad Syaoqi Ramadhan

NIM : 2108026017

Jurusan : Fisika

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo untuk diajukan dalam Sidang *Munaqosah*.

Wasssalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Pembimbing I



Alwiyah Nurhayati, Ph. D

NIP. 198112112011012006

NOTA DINAS

Semarang, 10 Juni 2025

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisono Semarang

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan
bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : EKSPLORASI PENGARUH Sn PADA
SIFAT STRUKTURAL DAN
OPTOELEKTRONIK PEROVSKITE
CsPbBr₃

Nama : Mohammad Syaoqi Ramadhan

NIM : 2108026017

Jurusan : Fisika

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah
dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN
Walisongo untuk diajukan dalam Sidang *Munaqosah*.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Pembimbing II



Wilman Septina, Ph. D

NIP. 19850923202211002

NOTA DINAS

Semarang, 10 Juni 2025

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisono Semarang

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan
bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : EKSPLORASI PENGARUH Sn PADA
SIFAT STRUKTURAL DAN
OPTOELEKTRONIK PEROVSKITE
CsPbBr₃

Nama : Mohammad Syaoqi Ramadhan

NIM : 2108026017

Jurusan : Fisika

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah
dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN
Walisongo untuk diajukan dalam Sidang *Munaqosah*.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Pembimbing III



Istikomah, M. Sc

NIP. 199011262019032021

ABSTRAK

Permintaan listrik yang terus meningkat sementara sumber energi tak terbarukan yang semakin menipis masih menjadi sumber utama, sehingga transisi menuju energi terbarukan menjadi sangat penting. Salah satu teknologi energi terbarukan ialah sel surya yang sudah berkembang generasi ke-3 yaitu sel surya perovskit halida CsPbBr_3 yang berpotensi memiliki stabilitas dan performa pada kondisi ambient yang baik, namun toksisitas timbal menjadi masalah yang perlu dirubah secara parsial atau total dengan unsur yang lebih ramah lingkungan seperti timah (Sn). Penelitian ini dilakukan untuk eksplorasi pengaruh Sn pada sifat struktural, optoelektronik, morfologi, dan kinerja sel surya perovskit CsPbBr_3 yang difabrikasi pada kondisi ambient. Metode *two-step* dengan *spin-coater* pada lapisan sel Surya FTO/ SnO_2 /perovskite/Carbon tanpa HTL. Uji xrd menghasilkan CsPbBr_3 dengan struktur kristal orthorhombic dan pada setiap pengaruh variasi Sn terdapat fase sekunder Cs_4PbBr_6 . Hasil uji uv-vis dan PL untuk setiap variasi tidak terjadi perubahan panjang gelombang, hanya perubahan intensitas. hasil SEM variasi Sn 5% dihasilkan *vacancies* yang bertambah, pada Sn 10% terjadi segregasi fase, dan Sn 20% terbentuk cacat impuritas interstitial. Penurunan performa sel surya secara bertahap dengan meningkatnya kadar Sn dengan PCE terbaik *baseline* CsPbBr_3 , Sn 5%, Sn 10%, dan Sn 20% berturut-turut ialah 7,2%; 1,9%; 1,19%; dan 0,81%.

Kata kunci: energi terbarukan, sel surya, perovskite, CsPbBr_3

TRANSLITERASI ARAB-LATIN

Penulisan transliterasi huruf-huruf Arab Latin dalam skripsi ini berpedoman pada SKB Menteri Agama dan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan R.I. Nomor: 158/1987 dan Nomor: 0543b/U/1987. Penyimpangan penulisan kata sandang [al-] disengaja secara konsisten supaya sesuai teks Arabnya.

Arab	Indonesia	Arab	Indonesia
ا	a	ض	ḍ
ب	b	ط	ṭ
ت	t	ظ	ẓ
ث	ṡ	ع	‘
ج	j	غ	g
ح	ḥ	ف	f
خ	kh	ق	q
د	d	ك	k
ذ	z	ل	l
ر	r	م	m
ز	z	ن	n
س	s	و	w
ش	sy	ه	h
ص	ṣ	ي	y

Bacaan Madd :

a > = a panjang

i > = i panjang

u > = u panjang

Bacaan Diftong :

au = اُوْ

ai = اِيْ

iv = اِيْ

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, puji dan syukur atas segala rahmat, hidayah, dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Eksplorasi Pengaruh Sn pada Sifat Struktural dan Optoelektronik Perovskite CsPbBr₃”. Shalawat serta salam tak lupa dipanjatkan kepada baginda Rasulullah SAW, keluarga, serta sahabatnya hingga akhir zaman. Skripsi ini disusun guna memenuhi sebagian syarat kelulusan di Prodi Fisika UIN Walisongo Semarang.

Kontribusi berupa doa, dukungan, bantuan, arahan, serta bimbingan sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu, dengan ketulusan dan penuh hormat, terima kasih banyak diucapkan kepada:

1. Kedua orang tua tersayang, bapak H. Zahron Afandi dan ibu Hj. Fatmah yang selalu mendoakan, memberikan kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang tak dapat digantikan.
2. Bapak Prof. Dr. H. Nizar Ali, M. Ag selaku Rektor UIN Walisongo Semarang.
3. Bapak Prof. Dr. H. Musahadi, M. Ag selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi.

4. Ibu Alwiyah Nurhayati, Ph. D selaku Ketua Program Studi Fisika dan dosen pembimbing yang dengan sabar dan tulus telah meluangkan waktu serta pikiran untuk menyalurkan ilmunya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
5. Ibu Istikomah, M. Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak waktu, arahan, serta pikiran dalam penulisan skripsi sehingga menjadi lebih baik dalam banyak aspek.
6. Ibu Sheilla Rully Anggita, M. Si selaku Wali Dosen yang telah memberikan bimbingan kepada penulis.
7. Bapak Wilman Septina, Ph. D selaku Peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan kontribusi baik dari segi material dan non-material.
8. Mas Bening Tirta Muhammad, Ph. D selaku peneliti pascadoktoral di BRIN yang telah memberikan waktu, arahan, bimbingan, dan ilmu pengetahuan.
9. Segenap Dosen dan staff FST terkhusus bapak/ibu Dosen Prodi Fisika UIN Walisongo Semarang yang telah memberikan banyak ilmu selama masa perkuliahan.

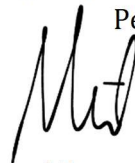
10. Segenap Peneliti dan staff di Pusat Riset Elektronika BRIN Cisit, Bandung yang telah memberikan banyak ilmu dan pengetahuan selama masa riset Tugas Akhir.
11. Semua teman-teman Fisika 2021 terkhusus peminatan Fisika Material, teman-teman riset di BRIN dan semua pihak yang secara langsung dan tidak langsung membantu dan tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih belum sempurna, sehingga penulis menerima kritik dan saran untuk tercapainya hasil yang lebih baik. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak dan Program Studi Fisika UIN Walisongo dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Semarang, 10 Juni 2025

Penulis



Mohammad Syaoqi Ramadhan

NIM. 2108026017

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
NOTA DINAS.....	iii
NOTA DINAS.....	v
NOTA DINAS.....	vi
ABSTRAK	vii
TRANSLITERASI ARAB-LATIN.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	11
C. Tujuan Penelitian	11
D. Batasan Masalah	12
E. Manfaat Penelitian	12
BAB II LANDASAN PUSTAKA.....	15
A. Kajian Teori.....	15
1. Energi Terbarukan dan Sel Surya	15

2.	Perovskite	19
3.	Prinsip Kerja Sel Surya	25
4.	<i>Sun Simulator Parameter</i>	27
5.	<i>Ultraviolet-Visible (UV-Vis)</i>	31
6.	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	35
7.	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	37
8.	<i>Photoluminescence (PL)</i>	39
9.	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	40
B.	Kajian Penelitian yang Relevan	43
C.	Kerangka Berpikir	47
BAB III METODE PENELITIAN		51
A.	Jenis dan Desain Penelitian	51
B.	Tempat dan Waktu Penelitian	51
C.	Alat dan Bahan	51
D.	Variabel Penelitian	53
E.	Prosedur Penelitian	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		59
A.	Hasil Pengujian XRD	59
B.	Hasil Uji Optoelektronik Perovskite	68
C.	Hasil Uji Morfologi Permukaan Perovskite...	73
D.	Hasil Uji Perangkat Sel Surya	78

E. Hasil Uji EIS	84
BAB V_KESIMPULAN	89
DAFTAR PUSTAKA.....	92
LAMPIRAN.....	110

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Judul	Halaman
Gambar 2.1	(a) tampak samping, dan (b) tampak atas CsPbBr ₃ orthorhombic) (Ezzeldien et al., 2021)	19
Gambar 2.2	Struktur lapisan PSC (a) n-i- p dan (b) p-i-n	24
Gambar 2.3	Alat uji sun simulator	29
Gambar 2.4	Skema UV-Vis double beam (Agilent, 2021)	30
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	48
Gambar 3.2	Lapisan sel surya CsPbBr ₃ : Sn	51
Gambar 4.1	Pola xrd referensi CsPbBr ₃ Orthorhombic, Cs ₄ PbBr ₆ Trigonal dan perovskite CsPbBr ₃ : Sn dengan Sn= 0,05; 0,1; dan 0,20	62
Gambar 4.2	Pola XRD CsPbBr ₃ : Sn 10% metode <i>two-step</i> dan metode <i>multi-step</i>	63
Gambar 4.3	Estimasi celah pita metode tauc plot hasil serapan uv- vis metode <i>two-step</i>	69
Gambar 4.4	Estimasi celah pita metode tauc plot metode <i>two-step</i> dan <i>multi-step</i>	70

Gambar 4.5	(a) Spektrum PL variasi Sn, (b) Spektrum PL metode <i>two-step</i> dan <i>multi-step</i>	72
Gambar 4.6	Morfologi permukaan CsPbBr ₃ : Sn a). baseline, b) Sn 5%, c) Sn 10%, d) Sn 20%	73
Gambar 4.7	Morfologi permukaan (a) CsPbBr ₃ : Sn 10% <i>two-step</i> (b) CsPbBr ₃ : Sn 10% <i>multi-step</i>	75
Gambar 4.8	Sebaran luas permukaan morfologi SEM	76
Gambar 4.9	Sebaran luas permukaan dengan metode (a) <i>two-</i> <i>step</i> , dan (b) <i>mutl</i> ti- <i>step</i>	77
Gambar 4.10	Sebaran data parameter perovskite sel surya baseline dan variasi CsPbBr ₃ : Sn	79
Gambar 4.11	Sebaran parameter perangkat sel surya dengan metode <i>two-step</i> dan <i>multi-</i> <i>step</i>	80
Gambar 4.12	Kurva <i>J-V</i> perangkat sel surya bias maju dan bias mundur (a) variasi penambahan Sn, (b) variasi metode	81
Gambar 4.13	Nyquist plot EIS dengan rangkain Rs, Rrec, dan CPE (a) variasi CsPbBr ₃ : Sn, (b) variasi metode	85

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Alat yang digunakan untuk sintesis dan uji	52
Tabel 3.2	Bahan yang digunakan untuk sintesis	53
Tabel 3.3	Variasi komposisi sampel	54
Tabel 4.1	Sebaran ukuran kristalit dan <i>d-spacing</i>	73
Tabel 4.2	Parameter kisi dan indeks persen kristalinitas	83
Tabel 4.3	Goldschmidt tolerance factor perovskite CsPbBr ₃ : Sn	83
Tabel 4.4	Sebaran kinerja sel terbaik dan rata-rata dari parameter sel surya seluruh purnangkat	83

DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lampiran 1	Pola xrd batch 2 (<i>liquid-mix</i>), batch 4 (<i>powder-mix</i>)	110
Lampiran 2	Layer pertama metode <i>two-step</i> pelarut air (H ₂ O) (a) di atas tisu, (b) di atas aluminium foil	110
Lampiran 3	Perangkat sel surya untuk uji karakterisasi (a) CsPbBr ₃ , (b) Sn 5%, (c) Sn 10%, (d) Sn 20%	111
Lampiran 4	Hasil Match! analisis fase CsPbBr ₃	111
Lampiran 5	Hasil Match! analisis fase pada sampel Sn 5%	112
Lampiran 6	Hasil Match! analisis fase pada sampel Sn 10%	113
Lampiran 7	Hasil Match! analisis fase pada sampel Sn 20%	114
Lampiran 8	SEM variasi Sn 10% <i>zoom in</i> 2500x	115

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar belakang

Permintaan listrik terus meningkat sebagai akibat dari pertumbuhan populasi dan industri. Para ilmuwan dan insinyur berupaya menghasilkan energi terbarukan yang ramah lingkungan secara berkelanjutan dengan menggunakan metode produksi energi konvensional (Patel et al., 2020). Energi tak terbarukan dan terbarukan dibedakan menurut ketersediaannya. Energi terbarukan adalah energi yang tersedia di alam dan dapat diperbarui dan dimanfaatkan secara berkelanjutan, sedangkan energi tak terbarukan adalah sumber daya energi yang diambil dari alam dan membutuhkan waktu untuk dibentuk. Energi tak terbarukan seperti minyak bumi dan batu bara masih menjadi sumber energi utama Indonesia (Viendyasari et al., 2022). Di sisi lain, transisi ke energi terbarukan diharapkan dapat terjadi secara berkelanjutan, sehingga diperlukan pemahaman yang lebih baik tentang potensi efek positif dan

negatif dari sistem energi terbarukan (Tian et al., 2024).

Seluruh alam raya diciptakan untuk dimanfaatkan manusia, Allah tidak menciptakan hal yang melainkan dengan haq sebagai contoh menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya dan ditetapkan *manzilah* atau tempatnya. Hal ini sesuai dengan firman Allah Surat Yunus ayat 5:

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسُ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ
لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ وَالْحِسَابَ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ
لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ (٥)

“Dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya dan ditetapkan-Nya manzilah-manzilah baginya, supaya kamu mengetahui bilangan tahun dan perhitungan. Allah tidak menciptakan itu melainkan dengan haq. Dia menjelaskan ayat-ayat (-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui.”

Ayat di atas menjelaskan bahwa Allah swt yang mengatur sistem dan bukan kebetulan apalagi diciptakan tanpa tujuan, agar manusia menggunakannya untuk tujuan *haq* dan benar pula (Shihab, 2002a). Hanafi ahmad menulis tafsir tentang ayat-ayat *kauniyah* membuktikan bahwa

al-Qur'an menggunakan kata *dhiya'* dalam berbagai bentuknya untuk benda-benda yang cahayanya bersumber dari dirinya sendiri, di sisi lain Asy-Sya'rawi menulis bahwa *dhiya'* bisa dipahami makna tunggal dan dapat pula arti jamak. Yang mengisyaratkan sinar matahari memiliki banyak spektrum, dan pada firman-Nya menjanjikan tersingkapnya tanda-tanda kebesaran Allah swt setiap saat dan secara bersinambung sepanjang masa bagi mereka yang ingin mengetahui yaitu dengan jalan terus-menerus berupaya mengetahuinya, yang berarti rahasia-rahasia alam masih terus dapat terungkap bagi para peneliti (Shihab, 2002a).

Energi matahari adalah sumber energi terbarukan yang bersih dan berkelanjutan yang tidak mengeluarkan zat beracun. Para ilmuwan dan insinyur menciptakan metode terbaik untuk memanfaatkan energi sinar matahari, salah satunya ialah sel surya yang dapat diakses oleh semua orang. Sel surya menawarkan banyak manfaat dibandingkan dengan energi angin, air, dan panas bumi. Kesenjangan sel surya adalah keuntungan

utamanya. Sel surya adalah sumber energi terbarukan yang sangat fleksibel karena dapat ditempatkan di berbagai tempat (Al-Shahri et al., 2021). Sel surya memiliki dampak lingkungan yang rendah, yang merupakan sebuah keuntungan. Untuk menghasilkan listrik, sel surya tidak menghasilkan emisi berbahaya atau kontaminan yang merusak lingkungan. Ini membedakannya dari pembangkit listrik menggunakan bahan bakar fosil atau yang tak terbarukan lainnya. Selain itu, karena umurnya yang panjang dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak, sel surya adalah investasi yang hemat biaya dalam jangka panjang (Liang et al., 2021).

Perkembangan kemajuan sel surya yang begitu cepat menghasilkan empat generasi sel surya, yaitu sel surya generasi pertama terbuat dari silikon, sebagai dasar untuk kemajuan berikutnya dan sudah dikomersialkan. Sel surya generasi kedua, yang terdiri dari film tipis, meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya produksi. Namun, mereka masih menghadapi masalah seperti toksisitas dan efisiensi yang rendah (Rehman et al.,

2023). Sel surya generasi ketiga yang masih dalam pengembangan ialah terdiri dari bahan organik yang lebih ramah lingkungan dibanding generasi sebelumnya yaitu *Organic solar cells* (OSCs)(Riede et al., 2021), *quantum dots solar cells* (QDSC)(Sanglee et al., 2022), *dye-sensitized solar cells* (DSSC)(Vidal et al., 2021), *perovskite solar cells* (PSC)(Pastuszak & Wegierek, 2022). Dan generasi keempat, yang juga masih dalam pengembangan, berharap untuk melampaui keterbatasan generasi sebelumnya dengan menggunakan bahan dan teknologi baru (*hybrid*) seperti tenaga surya organik dan perovskite, *graphene*, *carbon nano tube*, dan *metal nanowires* (Pastuszak & Wegierek, 2022; Rehman et al., 2023). Secara keseluruhan, pembuatan teknologi sel surya memiliki kemampuan untuk mentransplantasi bahan dan teknologi baru ke dalam sel. Namun demikian, penelitian dan pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk menghasilkan energi surya yang lebih efisien, murah, dan bisa dimiliki oleh semua orang (Sudha Gulati & Richa Jain, 2023).

Perkembangan *power conversion efficiency* (PCE) sel surya berbahan perovskite selama satu dekade mulai dari 3,8% hingga mencapai 26.0% untuk *single junction* FAPbI₃ (Noman et al., 2023), tertinggi untuk perovskite/Si tandem *solar cell* mencapai 33.7% diikuti dengan perovskite/perovskite yang memiliki PCE 29,1% (Green et al., 2023; Rehman et al., 2023; L. Zhang et al., 2023), telah memicu minat para peneliti (Q. Jiang & Zhu, 2024). Dengan kemajuan ini, sel surya perovskite muncul sebagai pesaing yang menjanjikan untuk sel surya berbasis silikon konvensional dengan tingginya koefisien serapan, rendahnya energi pengikatan eksiton, panjang difusi pembawa yang panjang (L. Zhang et al., 2023), mobilitas pembawa yang tinggi, dan celah pita yang dapat diatur antara bahan sel surya menyebabkan peningkatan PCE (Bello et al., 2022). Tantangan yang dihadapi untuk komersialisasi PSC yaitu ketidakstabilan kelembapan dan panas, *inferior phase stability*, toksisitas lingkungan dari bahan timbal dan untuk CsPbBr₃ memiliki PCE yang

rendah (Maafa, 2022; Pastuszak & Wegierek, 2022; Wang et al., 2023; Yang et al., 2023).

Perovskite MAPbI_3 memiliki keunggulan dalam efisiensi 20,4% (J. Y. Kim et al., 2020) tetapi kelemahannya dalam hal stabilitas termal dan ketahanannya terhadap air dan oksigen, bahan ini tetap mengalami transisi fase menjadi non-perovskite berwarna kuning pada suhu kamar (Jian et al., 2020). FAPbI_3 dengan MAPbBr_3 dapat menghasilkan perovskite fase- α pada suhu rendah, sedangkan pada perovskite kation dan halida campuran, stabilitas cahaya menjadi masalah karena halida campuran (Br dan I) cenderung mengalami segregasi di bawah paparan sinar matahari penuh, dapat diatasi dengan menambahkan ion cesium (Cs) anorganik seperti pada perovskite CsPbI_3 memiliki celah pita yang diinginkan sebesar 1,73 eV dengan efisiensi yang diraih 18%. Namun, nilai *Goldschmidt tolerance factor* (t) untuk perovskite CsPbI_3 adalah 0,81 yang berada di ujung bawah rentang toleransi, ukuran Cs^+ tidak cukup untuk menahan oktahedron PbI_6 (J. Y. Kim et al., 2020; Tao et al., 2021). Jadi, pada suhu

kamar dalam kondisi sekitar, ia cenderung berubah menjadi fase orthorhombik dengan celah pita $\sim 2,82$ eV, sedangkan fase kubik hitam (α -CsPbI₃) biasanya dipertahankan pada suhu tinggi (>315 °C) (J. Y. Kim et al., 2020; Tao et al., 2021), pemilihan penggunaan struktur Cs(B)Br₃ dipilih untuk mendapatkan kestabilan penggunaan Cs yang saling mengikat dengan Br⁻.

Sebagian besar sel surya efisiensi tinggi yang dilaporkan menggabungkan bahan perovskite berbasis Pb. Namun, karena masalah toksisitas yang terkait dengan Pb, upaya untuk pengembangan kation B alternatif yang sejauh ini, perovskite berbasis Sn yang telah menunjukkan potensi untuk menggantikan perovskite berbasis Pb sampai tingkat tertentu. Sn memiliki konfigurasi elektron kulit valensi yang identik dengan Pb (4 elektron valensi dalam orbital s dan p, s^2p^2), hal ini memungkinkan perovskite berbasis Sn untuk menghasilkan sifat optoelektronik yang sebanding dengan perovskite berbasis Pb (J. Y. Kim et al., 2020). Sn²⁺ memiliki jari-jari ionik yang lebih kecil yaitu 118 pm dibandingkan dengan Pb²⁺ (119 pm),

sehingga menghasilkan struktur pita yang berbeda dan celah pita yang sesuai dari bahan-bahan tersebut, celah pita perovskite iodida berbasis Sn ditemukan lebih kecil daripada celah pita perovskite iodida berbasis Pb. Misalnya, celah pita CsSnI_3 , MASnI_3 , dan FASnI_3 diukur sebesar 1,3–1,4 eV (J. Y. Kim et al., 2020). Perovskite berbasis Sn menunjukkan toksisitas bawaan yang lebih rendah (Arayro et al., 2023), mobilitas muatan yang lebih tinggi, celah pita yang lebih sempit sehingga menghasilkan arus hubung singkat yang lebih tinggi mendekati batas efisiensi teoritis (Xu et al., 2021), tetapi rendah untuk PCE berbasis Sn karena *open circuit voltage (V_{oc}) losses* atau rugi tegangan sirkuit terbuka yang besar disebabkan oleh cacat, dan stabilitas perangkat yang buruk (G. Y. Kim et al., 2023).

Penelitian ini mengevaluasi proses fabrikasi pada ambient atau terbuka bukan dalam kondisi *inert* dengan atmosfer yang terkontrol, untuk eksplorasi batas kemampuan Sn teroksidasi yang masih menjadi tantangan meskipun dalam atmosfer *inert*, dilakukan eksplorasi pada ambient

yaitu ruang terbuka tanpa atmosfer yang diatur ketat untuk mengevaluasi oksidasi Sn, dan untuk menanggulangi masalah stabilitas pada organik seperti FA atau MA digunakan Cs pada kation A dan dilakukan campuran sistem Pb-Sn secara sistematis pada Pb sebagai kation B menjadi struktur CsPbBr_3 : Sn untuk mendapatkan hasil yang lebih murah dalam fabrikasi dan lebih baik dalam sifat optik dan efisiensi dari Pb serta ramah lingkungan dengan pengurangan jumlah Pb. Penggantian elektroda logam dengan bahan berbasis karbon telah banyak mendapat perhatian akhir-akhir ini, karena kestabilan kimianya, ketersediaannya yang melimpah, biaya persiapan yang rendah, konduktivitas listrik yang baik, dan sifat hidrofobiknya (Pradid et al., 2021), dibandingkan menggunakan logam mulia seperti emas (Au) atau perak (Ag) yang relatif mahal, dan menggunakan Br^- sebagai anion X sebagai pencegah perubahan fase dibanding menggunakan unsur I⁻.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana struktur kristal film perovskite CsPbBr_3 dengan pencampuran variasi prekursor SnBr_2 pada kondisi ambient?
2. Bagaimana sifat optoelektronik dan karakteristik morfologi film CsPbBr_3 dengan pencampuran variasi prekursor SnBr_2 pada kondisi ambient?
3. Bagaimana performa perangkat sel surya sistem Pb-Sn dari film CsPbBr_3 yang difabrikasi pada kondisi ambient?

C. Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui struktur kristal CsPbBr_3 yang dicampur dengan variasi prekursor SnBr_2 pada kondisi ambient;
2. Untuk mengetahui sifat optoelektronik dan karakteristik morfologi CsPbBr_3 dengan pencampuran variasi prekursor SnBr_2 pada kondisi ambient;

3. Untuk mengetahui performa perangkat sel surya sistem Pb-Sn dalam perovskite CsPbBr_3 yang difabrikasi pada kondisi ambient.

D. Batasan Masalah

1. Eksplorasi tantangan proses fabrikasi pada sistem Pb-Sn struktur CsPbBr_3 : Sn dalam kondisi ambient untuk aplikasi sel surya dengan variasi Sn= 0,05; 0,1; dan 0,2;
2. SnO_2 sebagai *electron transport layer* (ETL),
3. Tanpa *hole transport layer* (HTL) dan carbon sebagai elektroda;
4. Karakterisasi sifat fisis dan kimia CsPbBr_3 : Sn yaitu XRD, UV-Vis, *photoluminescence* (PL), *Sun simulator*, *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), dan SEM.

E. Manfaat Penelitian

1. Manfaat penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pencampuran percursor SnBr_2 pada kondisi ambient terhadap struktur,

sifat optoelektronik, morfologi, dan performa sel surya pada perovskite $\text{CsPbBr}_3:\text{Sn}$.

2. Memberikan salah satu solusi yaitu pengurangan biaya dan lebih ramah lingkungan.
3. Berkontribusi terhadap pengembangan teori atau pengetahuan dan hasil eksperimen di bidang sel surya, khususnya untuk perovskite $\text{CsPbBr}_3:\text{Sn}$.

BAB II

LANDASAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. Energi Terbarukan dan Sel Surya

Penipisan bahan bakar fosil yang cepat, yang mencakup hampir 80% dari konsumsi energi global, menuntut kebutuhan mendesak untuk penelitian yang bertujuan menemukan alternatif energi yang berkelanjutan dan terbarukan (Pourasl et al., 2023). Energi matahari adalah sumber energi yang tersebar luas, berkelanjutan, dan terbarukan, sebagai sumber daya terbarukan yang memiliki kemampuan untuk menggantikan sumber daya bahan bakar fosil yang banyak digunakan dalam waktu dekat (Ali & Windarta, 2020).

Anugerah dari Allah swt yang melimpah dan menerangi bumi sebagai pelita dijelaskan dalam al-Qur'an surat al-Furqan ayat 61 sebagai berikut:

تَبَارَكَ الَّذِي جَعَلَ فِي السَّمَاءِ بُرُوجًا وَجَعَلَ فِيهَا سِرَاجًا وَقَمَرًا
مُنِيرًا

“Maha Melimpah anugerah Dia yang menjadikan di langit gugusan-gugusan bintang dan Dia menjadikan padanya sirâj dan bulan yang bercahaya.”

Ayat di atas menjelaskan bahwa sungguh melimpahnya anugerah ar-Rahman yang menjadikan langit gugusan-gugusan bintang dan di antara gugusan bintang itu diciptakan garis orbit tempatnya beredar dan menjadikan juga *sirâj* yakni pelita yang terang benderang yaitu matahari yang bersinar dan bulan yang bercahaya, sesuai tafsiran QS. Yunus ayat 5 yang menyatakan bahwa Allah menjadikan mataari *dhiyâ'* dan bulan *nûr* (bercahaya), mengisyaratkan bahwa sinar bulan bukan dari dirinya tetapi pantulan dari cahaya matahari (Shihab, 2002b).

Sel surya adalah teknologi energi terbarukan yang paling banyak dipasang kedua, setelah teknologi tenaga air (Pourasl et al., 2023). Sejak 2015, sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, air, panas bumi, dan biomassa telah meningkat pesat. Energi fosil,

energi nuklir, dan energi terbarukan telah berkembang pada tingkat yang berbeda, menandakan pergeseran ke arah struktur energi global yang lebih beragam dan berkelanjutan dengan laju transisi ini berbeda untuk setiap negara, termasuk ketersediaan sumber daya, kemajuan teknologi, kerangka kebijakan, dan kesadaran publik (Hassan et al., 2024). Sel surya adalah perangkat dengan fungsi utama untuk mengubah energi cahaya secara langsung menjadi listrik melalui efek *photovoltaic* (PV), energi matahari diubah menjadi energi listrik ketika elektron yang dilepaskan bereaksi dengan foton yang ada dalam energi matahari (Pathak et al., 2023). Modul PV atau panel surya dibuat dari kumpulan sel surya. Selain itu, sel surya digunakan dalam industri fotovoltaik sebagai blok penyusun modul fotovoltaik, sebagai detektor *foto* untuk menyalakan lampu jalan dan perangkat lainnya yang peka terhadap cahaya (seperti detektor inframerah), dan

sebagai sensor cahaya untuk penelitian (Kenu E. Sarah, 2020).

Concentrated solar power, solar collectors, solar heaters, solar photovoltaics (PV), solar desalination and solar-based appliances yang merupakan beberapa teknologi surya yang dapat digunakan untuk membuat panas atau listrik. Teknologi PV menyumbang 3,6% dari produksi listrik di seluruh dunia, tercatat pada tahun 2021 peningkatan 22% dibandingkan tahun sebelumnya, teknologi PV yang tersedia di pasaran, memiliki efisiensi sekitar 10% hingga 20% (Muchlishah et al., 2023; Ramanan et al., 2024). Beberapa faktor memengaruhi efisiensi dan hasil energi surya yang relatif rendah ini, salah satunya adalah suhu sel. Penurunan kinerja yang disebabkan oleh suhu ini lebih jelas terlihat pada skala besar di mana ada akumulasi panas yang signifikan yang menyebabkan peningkatan suhu sel yang signifikan. Oleh karena itu, banyak pendekatan telah digunakan, salah satunya pendinginan, untuk menjaga suhu pada tingkat yang paling

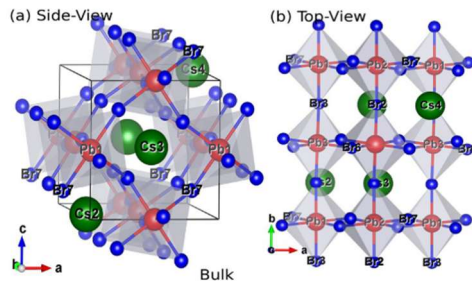
ideal, dan yang lain yang masih dalam tahap penelitian dilakukan untuk meningkatkan stabilitasnya (Ramanan et al., 2024). Teknologi yang mampu memanfaatkan sumber energi terbarukan dalam skala kecil dan dengan biaya yang lebih terjangkau terus dikembangkan dengan bertujuan untuk mengurangi ketergantungan penggunaan daya listrik yang dihasilkan dari bahan bakar fosil seperti batu bara dan minyak. Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai teknik hibrida telah digunakan untuk mengintegrasikan berbagai jenis pembangkit listrik (Syahputra & Soesanti, 2021).

2. Perovskite

Studi tentang perovskite dimulai ketika mineral senyawa kalsium titanat (CaTiO_3) pertama kali ditemukan pada tahun 1839, namanya diubah menjadi "perovskite" untuk menghormati ahli mineralogi Rusia Lev Perovski, yang menunjuk pada material dengan struktur kristal yang sama dengan CaTiO_3 , dalam komunitas optoelektronik, berawal dari

rumus ABO_3 lalu bertransformasi menjadi ABX_3 , di mana A adalah singkatan dari kation logam monovalen, B adalah singkatan dari kation logam divalen, dan X adalah singkatan dari ion halida (Jena et al., 2019), perovskite oksida digunakan dalam berbagai aplikasi yaitu bahan dielektrik, piezoelektrik, ferroelektrik dan piroelektrik, tetapi menampilkan efek PV yang rendah (Jena et al., 2019; T. Li et al., 2023).

Perubahan halogen untuk struktur X dan tersusunlah menjadi ABX_3 dan pada struktur ini, kation A^+ yang lebih besar menempati ruang kosong kubo-oktahedral (*cubo-octahedral void*), sedangkan kation B^{2+} yang lebih kecil menempati ruang kosong oktahedral (*octahedral void*) karena berkolaborasi dengan enam anion X^- (*six X^- anions*) ditunjukkan pada gambar 2.1 $CsPbBr_3$ dalam bentuk ortorombik (Ezzeldien et al., 2021; Goel et al., 2021; Katz, 2020; L. Zhang et al., 2023).



Gambar 2. 1 (a) tampak samping, dan (b) tampak atas CsPbBr₃ orthorhombic) (Ezzeldien et al., 2021)

Kinerja PSC ditentukan oleh sifat intrinsik yaitu koefisien serapan yang tinggi, *band gap* yang dapat diatur, mobilitas pembawa, panjang difusi pembawa yang besar, kemampuan transport pembawa yang ambipolar (Kumar & Naidu, 2021). Dilaporkan efisiensi yang dicapai untuk perovskite organik-anorganik mencapai 18,82% untuk struktur MAPbI₃ (S. Liu et al., 2022), untuk efisiensi FAPbI₃ dilaporkan yaitu 20,12% (Z. Jiang et al., 2024), dan untuk FAPbBr₃ dengan modifikasi antarmuka menghasilkan efisiensi 9,4% (Y. Liu et al., 2021). Perangkat fotovoltaik harus stabil pada suhu yang panas karena tuntutan

operasionalnya, untuk mengatasi keterbatasan pada material perovskite hibrida organik-anorganik, berbagai kelompok penelitian telah berusaha mengganti komponen organik dengan komponen anorganik seperti cesium (Cs^+) (Kumar & Naidu, 2021). Hal tersebut terbukti mampu meningkatkan stabilitas material perovskite anorganik terhadap cahaya, panas, dan kelembapan, yang pada akhirnya membuka jalan untuk menuju sel surya perovskite yang lebih stabil. Perovskite anorganik tidak sensitif cahaya seperti perovskite organik-anorganik, sehingga cenderung lebih stabil di bawah pencahayaan matahari. Selain itu, celah pita yang besar dari perovskite anorganik menghasilkan tegangan sirkuit terbuka yang tinggi dalam sel surya (Pastuszak & Wegierek, 2022).

Penambahan cesium telah diakui dapat secara signifikan meningkatkan stabilitas termal material perovskite hibrida. Misalnya, $\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$ menunjukkan stabilitas yang baik terhadap panas dan kelembapan,

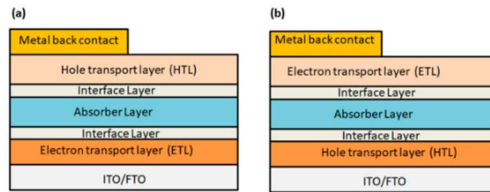
bahkan dalam kondisi terbuka. Dilaporkan nilai *open circuit voltage* (V_{oc}) hingga 1,3 V untuk CsPbI_2Br anorganik dan 1,594 V untuk CsPbBr_3 anorganik (Maafa, 2022). Namun, masih diperlukan upaya tambahan untuk mengoptimalkan perangkat guna meningkatkan parameter lainnya. Baru-baru ini, perovskite halida logam anorganik berbasis cesium, seperti CsPbI_3 , CsPbBr_3 , $\text{CsSn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{I}_{3-x}\text{Br}_x$, $\text{CsPb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{I}_2\text{Br}$, $\text{Rb}_{1-x}\text{Cs}_x\text{PbI}_3$, dan $\text{CsPbI}_{3-x}\text{Br}_x$, serta beberapa perovskite ganda bebas timbal seperti $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ dan CsAgInCl_6 , telah muncul sebagai kandidat yang stabil secara termal dan efisien untuk pemanenan cahaya (Maafa, 2022; W. Wu et al., 2020). Di antara berbagai perovskite halida anorganik, perovskite CsPbI_3 dengan fase kubik dan celah pita (E_g) 1,73 eV adalah yang paling berhasil. Namun, diperlukan suhu tinggi untuk mempertahankan fase kubik α -nya, karena pada suhu sekitar dan dalam atmosfer lembap, material ini terurai menjadi fase non-perovskite ortorombik (δ) berwarna kuning

dengan E_g 2,82 eV yang memiliki sifat fotovoltaiik lebih rendah dengan PCE 15,05% (Maafa, 2022; Yao et al., 2020).

Sn (Timah) diproyeksikan sebagai pengganti alami Pb (Timbal) karena jari-jari ionik yang hampir sama dan konfigurasi elektron valensi yang identik dan penggunaannya dalam sel surya menunjukkan hasil yang menjanjikan, akan tetapi ketidakstabilan Sn^{2+} yang mudah teroksidasi menjadi Sn^{4+} dan adanya banyak cacat kekosongan Sn menyebabkan kinerja dan stabilitas sel surya perovskite berbasis Sn tertinggal dibandingkan dengan yang berbasis Pb. Penelitian lebih lanjut umumnya difokuskan pada lapisan tipis polikristalin, meskipun pendekatan kristal tunggal lebih ideal karena mobilitas pembawa tinggi dan konsentrasi perangkat rendah (Abate, 2023; Bhardwaj et al., 2024; Xu et al., 2021).

3. Prinsip Kerja Sel Surya

Sel surya memiliki kemampuan untuk menyerap radiasi cahaya matahari dan menghasilkan atau membangkitkan elektron (Bello et al., 2022). Proses yang disebut efek fotovoltaiik ialah proses cahaya yang diubah menjadi listrik (Miyasaka et al., 2021). Singkatnya, perovskite menyerap cahaya dan menciptakan eksitasi, kemudian menghasilkan pasangan *electron-hole* yang berdifusi dan terpisah melalui kontak anoda dan katoda, lalu muatan diekstraksi menjadi beban eksternal daya pada rangkaian, untuk panjang difusi pembawa muatan dan panjang penyerapan optik yang sebanding menghasilkan kinerja yang optimal (Shah et al., 2023) proses kerja sel surya perovskite ditunjukkan oleh gambar 2.2 tipe n-i-p dan p-i-n.



Gambar 2. 2 Struktur lapisan PSC (a) n-i-p dan (b) p-i-n

Tahapan kerja sel surya perovskite dapat terbagi menjadi empat tahap:

- Proses penyerapan cahaya energi pengikatan eksitasi yang rendah oleh lapisan perovskite, dan terciptanya pasangan *electron-hole*.
- Pasangan tersebut mengalami pemisahan dan transportasi muatan ke ETL untuk elektron dan hole menuju HTL yang akan diteruskan ke elektroda logam.
- Terjadinya rekombinasi muatan yang mempengaruhi kinerja dari PSC, ketika elektron dan hole bertemu kembali sebelum mencapai elektroda masing-masing.

- d. Ekstraksi muatan sebagai akhir mekanisme proses fotovoltaiik, setelah *elcetron-hole* mencapai elektroda yang sesuai dan menimbulkan perbedaan potensial yang menghasilkan arus listrik yang mengalir ke rangkaian luar (Sum & Mathews, 2018).

4. *Sun Simulator Parameter*

Parameter penting pada teknologi berbasis tenaga surya ialah mengetahui kemampuan penyerapan cahaya atau PCE, *short-circuit current density* (J_{sc}), *fill factor* (FF), *incident photon to current efficiency* (IPCE), *open-circit voltage* (V_{oc}), dan resistansi seri atau R_s . PCE bergantung pada kondisi operasi yang perlu ditentukan (Inamuddin et al., 2021). Nilai J_{sc} menggambarkan seberapa banyak foton yang berhasil diubah menjadi pembawa muatan (elektron) yang dapat digunakan dalam rangkaian listrik eksternal dan dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk efisiensi penyerapan cahaya oleh material perovskite, difusi pembawa muatan, serta desain lapisan-

lapisan penunjang seperti ETL dan HTL (Shah et al., 2023). Nilai J_{sc} yang tinggi biasanya menunjukkan bahwa material perovskite mampu menyerap foton dengan baik dan mengkonversinya menjadi elektron dan lubang dengan sedikit kehilangan akibat rekombinasi (Al-Ezzi & Ansari, 2022). J_{sc} juga dipengaruhi oleh spektrum cahaya yang digunakan selama pengujian. PCE sel surya biasanya dilaporkan dalam spektrum terrestrial standar yang disimulasikan AM1.5G, yang memiliki daya terintegrasi $1 \text{ kWm}^{-2} = 100 \text{ mWcm}^{-2}$ (Saif et al., 2023). Jenis penerangan ini biasanya disebut "1 matahari/ simulasi sinar matahari standar" ditunjukkan oleh gambar 2.3 sebagai contoh. Efisiensi meningkat ketika arus hubung singkat J_{sc} dan tegangan hubung terbuka V_{oc} meningkat, tetapi η PCE juga sangat bergantung pada *maximum power point* (mpp) (Tan & Mohamad-Saleh, 2023). Bentuk kurva j - V menentukan pada tegangan mana kita mengekstrak elektron sebagai arus listrik, ada *trade-off* antara arus dan tegangan, pada

tegangan rendah, ekstraksi mudah, dan arus ditentukan oleh hasil kuantum (konversi foton menjadi pembawa elektron) dari penyerap, tetapi tegangan tinggi menghasilkan arus yang berlawanan dengan arus foton, dan akhirnya daya menurun, yang secara umum, jika kita mengekstrak elektron pada energi yang tinggi (tegangan), ada harga dalam penurunan jumlah yang dapat kita ekstrak. Jika titik ini dekat dengan V_{oc} , maka tegangan dan arus operasional jauh lebih besar daripada jika V_{mpp} terjadi pada tegangan rendah yang dekat dengan $V_o/2$ (Arayro et al., 2023).

Fill factor (FF) merupakan merupakan perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan oleh sel surya dengan produk V_{oc} dan J_{sc} , dan selalu < 1 .

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.1)$$

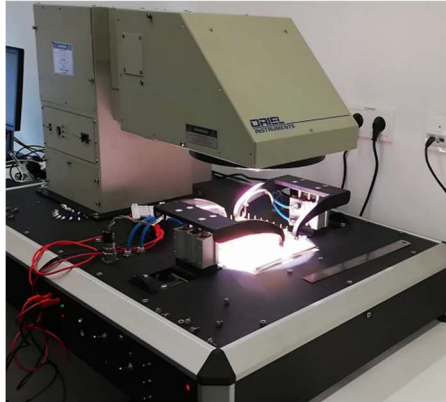
Nilai efisiensi sel surya juga dapat dihitung setelahnya dengan

$$\eta_p = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.2)$$

η_p	= PCE atau efisiensi sel surya
FF	= <i>fill factor</i>
$P_{\max}$	= daya listrik maksimum atau mpp
P_{in}	= input cahaya yang diterima oleh sel surya
J_{sc}	= densitas arus hubung singkat
V_{oc}	= tegangan rangkaian terbuka

Incident Photon to Current (IPCE) didefinisikan sebagai rasio jumlah insiden foton N_{photon} dan jumlah pembawa muatan yang diinduksi foto N_{charge} yang dapat diekstraksi dari sel surya. IPCE merupakan parameter penting yang mengukur seberapa banyak arus listrik dihasilkan per jumlah foton yang mengenai perangkat, tergantung pada panjang gelombang cahaya. Ini menggambarkan seberapa efisien perangkat mengubah cahaya yang datang menjadi arus listrik. Idealnya, IPCE dapat digunakan untuk memperkirakan potensi efisiensi maksimum perangkat dengan mengintegrasikan data spektrum surya, tetapi hanya valid dalam kondisi tanpa bias (hubung

singkat, dua elektroda) (Bisquert, 2020; Inamuddin et al., 2021).

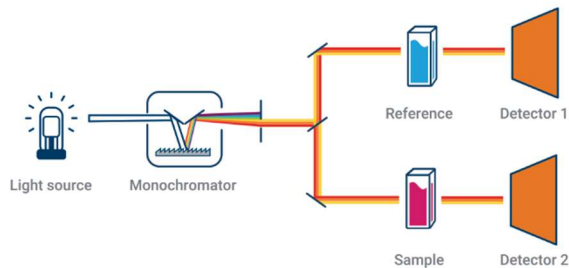


Gambar 2. 3 Alat uji *sun simulator*

5. *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis)

Rentang panjang gelombang ultraviolet dekat adalah $\pm 200\text{-}400\text{ nm}$, dan ultraviolet jauh adalah $\pm 10\text{-}200\text{ nm}$. Beberapa hewan, seperti burung, reptil, dan serangga seperti lebah, dapat melihat sinar pada panjang gelombang ultraviolet, tetapi manusia tidak dapat melihatnya. Interaksi senyawa organik dengan sinar ultraviolet dan sinar tampak dapat digunakan untuk menentukan struktur molekul

senyawa organik (Suharti, 2017). Eksitasi elektron ini dicatat dalam spektrum dalam bentuk panjang gelombang dan absorbansi, sesuai dengan jenis elektron yang ada dalam molekul yang dianalisis. Semakin mudah elektron bereksitasi, semakin panjang gelombang yang diabsorpsi dan semakin banyak elektron yang bereksitasi, semakin tinggi absorban (Gaiglitz, 2008; Suharti, 2017).



Gambar 2. 4 Skema UV-Vis double beam (Agilent, 2021)

Instrumen spektrofotometer biasanya dibagi menjadi dua kategori yaitu *single-beam* dan *double-beam*. Instrumen satu gelombang dapat digunakan untuk pengukuran kuantitatif untuk mengukur absorbansi pada panjang gelombang tunggal (Suharti, 2017). Skema yang

ditunjukkan gambar 2.4, secara sederhana terdiri dari sumber cahaya, monokromator, kompartmen sampel dan detektor. Sumber cahaya dalam spektrofotometer UV-Vis harus menghasilkan intensitas konstan pada semua panjang gelombang dengan noise rendah dan stabilitas jangka panjang. Meskipun sumber cahaya ideal seperti itu tidak ada, beberapa jenis lampu digunakan untuk mencapai hasil yang optimal. Lampu busur deuterium digunakan untuk wilayah UV karena memberikan kontinum intensitas yang baik, sementara lampu tungsten-halogen digunakan untuk wilayah tampak dan sebagian UV karena menghasilkan intensitas yang baik pada rentang tersebut. Baru-baru ini, lampu kilat Xenon telah digunakan sebagai sumber tunggal, menawarkan keuntungan signifikan dibandingkan penggunaan dua lampu konvensional (Agilent, 2021).

Monokromator adalah komponen penting dalam spektrofotometer UV-Vis yang berfungsi untuk memisahkan cahaya menjadi pita

panjang gelombang yang dipilih. Monokromator terdiri dari celah masuk, perangkat dispersi (seperti prisma atau kisi difraksi), dan celah keluar (Suharti, 2017).

Kompartemen sampel dalam spektrofotometer UV-Vis biasanya berupa kotak berwarna hitam dengan tutup yang dapat ditutup untuk mengurangi cahaya yang menyimpang. Bagian dalam kompartemen berwarna hitam matte untuk menyerap cahaya yang tidak diinginkan. Sampel cair ditempatkan dalam kuvet kaca, plastik, atau kuarsa, sementara sampel padat ditahan oleh dudukan khusus. Bagian terakhir ialah detektor, berfungsi untuk mengubah cahaya yang melewati sampel menjadi sinyal listrik. Detektor harus memberikan respons linier pada rentang panjang gelombang yang luas, dengan gangguan rendah dan sensitivitas tinggi. Spektrofotometer umumnya menggunakan *photomultiplier tube* (PMT) dan detektor fotodioda. PMT dikenal karena sensitivitasnya yang tinggi dan kemampuannya

untuk mendeteksi cahaya pada intensitas yang sangat rendah, sementara detektor fotodioda menawarkan keandalan dan stabilitas yang baik serta respons cepat (Agilent, 2021).

6. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah alat yang sangat penting dalam ilmu material dan berbagai bidang lainnya untuk mendapatkan citra dengan resolusi tinggi dari permukaan sampel. SEM berfungsi untuk memperbesar objek kecil yang tidak terlihat oleh mata manusia dengan menggunakan berkas elektron, bukan cahaya seperti pada mikroskop optik. Karena panjang gelombang elektron lebih pendek, SEM dapat menguraikan detail material yang lebih halus dibandingkan cahaya optik., SEM modern dapat memperbesar objek hingga satu juta kali dan menguraikan fitur sekecil 1 nm (Ul-Hamid, 2018). Interaksi berkas elektron dengan spesimen juga memancarkan sinar-X yang dapat digunakan untuk menentukan komposisi material (Reimer, 1998). SEM adalah alat karakterisasi

material yang memberikan informasi tentang struktur permukaan, komposisi, dan cacat material, memungkinkan pengamatan pada tingkat submikron dan nano. Alat ini sangat berharga bagi ilmuwan material dan kehidupan di berbagai industri. Deteksi dan analisis menggunakan sinyal yang dihasilkan di deteksi oleh detektor khusus dan diubah menjadi citra atau informasi komposisi (Ul-Hamid, 2018). Karakterisasi SEM yang secara luas digunakan untuk karakterisasi berbagai jenis material, dengan aplikasi utama untuk morfologi permukaan, memberikan detail tinggi dari permukaan material yang memungkinkan studi struktur dan tekstur dengan resolusi nanometer. Untuk analisis komposisi, dengan detektor sinar X energi-dispersif (EDS), SEM dapat menganalisis elemen-elemen yang ada dalam sampel, memberikan informasi tentang distribusi elemen di permukaan. Pengukuran dimensi pada SEM digunakan untuk pengukuran dimensi pada skala mikrometer dan nanometer, seperti ukuran partikel,

ketebalan lapisan, dan fitur permukaan lainnya (Surowiak & Wahman, 2024).

7. *X-Ray Diffraction (XRD)*

XRD adalah teknik analisis material yang digunakan untuk mempelajari struktur kristal suatu bahan. Prinsip dasar dari XRD melibatkan interaksi sinar-X dengan susunan atom dalam kristal. Ketika sinar-X dengan panjang gelombang tertentu dipancarkan ke dalam material kristalin, sebagian dari sinar tersebut akan difraksi atau dibiaskan oleh bidang-bidang atom dalam kristal. Difraksi ini terjadi karena gelombang sinar-X yang menyentuh bidang atom-atom dalam kristal akan mengalami interferensi konstruktif atau destruktif, tergantung pada sudut datangnya sinar dan jarak antar bidang kristal (Hakim et al., 2019). Pola difraksi yang dihasilkan dalam eksperimen XRD merupakan hasil dari superposisi gelombang-gelombang ini, yang dapat ditangkap dan diubah menjadi data berupa intensitas terhadap sudut difraksi (2 θ). Dari pola difraksi ini, informasi mengenai jarak

antar bidang kristal (yang berhubungan dengan parameter kisi), orientasi kristal, ukuran kristalit, serta kemungkinan adanya cacat dalam kristal dapat diperoleh (Lee, 2017).

XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal yang ada dalam suatu material. Dalam perovskite solar cells, fase kristal yang terbentuk selama proses sintesis sangat menentukan efisiensi perangkat. Identifikasi fase ini memungkinkan peneliti untuk memahami bagaimana variasi dalam komposisi kimia dan kondisi sintesis mempengaruhi struktur kristal dan performa perangkat (Muttaqin, 2023). Memberikan informasi tentang parameter kisi kristal, seperti panjang sumbu a , b , dan c dalam sel unit. Informasi ini penting untuk memahami bagaimana substitusi atom dalam kisi kristal (misalnya, menggantikan ion logam dengan ion lain) mempengaruhi sifat material. XRD juga mendeteksi adanya cacat struktural dan regangan dalam kristal, yang dapat mempengaruhi sifat elektronik dan optik

material. Regangan dalam struktur kristal dapat mengubah jarak antar bidang kristal dan menggeser posisi puncak difraksi, yang dapat dideteksi melalui pergeseran dalam pola difraksi XRD. Untuk menentukan ukuran butir kristal dalam material polikristalin. Informasi tentang ukuran butir ini dapat membantu dalam memahami hubungan antara mikrostruktur material dengan performa fungsionalnya, seperti efisiensi konversi energi dalam perovskite solar cells (He, 2018; Misture & Snyder, 2011).

8. *Photoluminescence* (PL)

Photoluminescence merupakan proses pemancaran ulang cahaya setelah terjadi penyerapan cahaya, di mana terjadi pergeseran Stokes (*Stokes shift*) yaitu panjang gelombang emisi lebih pendek dari panjang gelombang yang diserap. Terdapat beberapa jenis PL yaitu fluoresensi dan fosforesensi, di mana emisi fluoresensi akan lebih cepat berhenti setelah sumber pengeksitasi tidak mengenai sampel, sedangkan pada fosforesensi di mana emisi akan

berkurang secara perlahan setelah sumber tidak mengenai sampel (Beale, 1973; Grattan, 2004), memungkinkan pengukuran tanpa terjadi sentuhan langsung dengan permukaan sampel (Miyasaka et al., 2021).

PL digunakan secara luas untuk mempelajari struktur pita dan struktur cacat pada material semikonduktor, memberikan wawasan terhadap mekanisme rekombinasi serta kualitas material penyerap, dan emisi cahaya berperan sebagai indikator seberapa baik perangkat menghindari kehilangan energi non-radiatif dan rekombinasi pasangan *electron-hole* (Grattan, 2004). Foton yang diserap melebihi pita energi akan menciptakan pasangan elektron dan lubang yang menyebar mendekati pita konduksi lalu elektron akan terperangkap oleh ketidakmurnian bahan (Beale, 1973).

9. *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Electrochemical Impedance Spectroscopy merupakan teknik karakterisasi yang mengukur respons sistem elektrokimia terhadap sinyal AC

kecil dalam berbagai frekuensi. EIS sangat berguna untuk mempelajari proses transfer muatan, difusi ion, serta pembentukan lapisan antarmuka dalam berbagai sistem seperti baterai, sel surya, dan sensor (Bisquert, 2020; Orazem & Tribollet, 2008). Berbeda dengan teknik seperti voltametri siklik yang hanya memberikan data arus puncak dan potensial, EIS menyediakan informasi lebih dalam pada tiap frekuensi pengukuran, sehingga fenomena yang tumpang tindih dapat dianalisis secara terpisah (Barsoukov & Macdonald, 2005; Lasia, 2014). Untuk memahami EIS, perlu penguasaan dasar-dasar rangkaian listrik seperti resistor, kapasitor, dan induktor, baik dalam kondisi tunak maupun transien. Setiap elemen ini memiliki impedansi kompleks yang dijelaskan melalui fungsi matematika berbasis bilangan kompleks (Barsoukov & Macdonald, 2005; Lasia, 2014; Srinivasan & Fasmin, 2021). Oleh karena itu, transformasi Fourier

dan Laplace menjadi alat penting dalam menganalisis sinyal pada domain frekuensi.

Plot Nyquist dan Bode adalah metode visual utama dalam interpretasi data EIS. Diagram Nyquist menunjukkan hubungan antara resistansi nyata dan reaktansi imajiner, sedangkan diagram Bode menampilkan magnitude dan fasa terhadap frekuensi (Abdulrahim et al., 2020; Peter, 2023). Kompleksitas yang dapat disederhanakan dengan perangkat lunak seperti ZView atau Maple yang dirancang khusus untuk mengolah data impedansi. Disarankan bagi peneliti pemula untuk memulai dari sistem yang sederhana agar model setara dapat dikonstruksi dengan benar untuk mengetahui resistansi rekombinasi yaitu ketika elektron tertangkap oleh cacat atau keadaan permukaan dalam material, elektron (atau lubang) berpindah dari pita konduksi (atau pita valensi) menuju ke cacat energi di dalam celah pita yang sangat

dipengaruhi oleh jumlah pembawa muatan (elektron dan lubang), yang bergantung pada seberapa besar tegangan yang diberikan serta seberapa kuat cahaya yang menyinari material tersebut (Abdulrahim et al., 2020; Peter, 2023; Von Hauff & Klotz, 2022).

B. Kajian Penelitian yang Relevan

Susunan kristal yang didasarkan pada rumus kimia umum ABX_3 , bahan sintesis maupun alami yang memiliki struktur kristal yang sama disebut perovskite yang sama dan Victor Goldschmidt menjelaskan struktur kristal ini pada tahun 1926 juga menambahkan faktor toleransi untuk menentukan stabilitas bahan perovskite (Bello et al., 2022). Sekarang diakui sebagai kelas mineral paling melimpah di dunia, perovskite telah lama menarik perhatian para ahli geosains dalam upaya mereka untuk memahami struktur Bumi. Mulai dari feroelektrik, superkonduktor, dan sel bahan bakar hingga spintronik, termoelektrik, dan dimulainya penelitian mengenai fotovoltaiik, perovskite diteliti dalam berbagai bidang material

karena toleransi kimianya yang terkenal dan fleksibilitas strukturalnya yang dikombinasikan dengan sifat fisik dan kimia yang baik, aplikasi ini sangat beragam (Thoppil & Alankar, 2022). Meskipun telah dipelajari selama hampir 200 tahun, perovskite masih menarik karena sifat listrik dan magnetiknya, termasuk sifat feroelektrik, piezoelektrik, sifat optik, superkonduktivitas suhu tinggi dan kemampuan untuk menampung 90% ion logam dalam tabel periodik dengan berbagai jenis anion membuatnya sangat populer (Talapatra et al., 2021). Namun, akibat rangsangan eksternal seperti kelembaban, oksigen, cahaya, dan panas, dekomposisi kisi perovskite tetap menjadi beban stabilitas. Perovskite CsPbX_3 ($X = \text{I}^-$, Br^- , atau Cl^-) anorganik secara bertahap dianggap sebagai alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi masalah ini. Hal ini disebabkan oleh toleransi lingkungannya yang unggul (Z. Li et al., 2021). Perovskite CsPbBr_3 tri-brominasi, yang memiliki celah pita yang besar sekitar 2,3 eV dibandingkan dengan bahan yang mengandung I, memiliki potensi yang sangat besar untuk digunakan dalam

fotovoltaik semitransparan atau elektronik yang membutuhkan tegangan tinggi, karena keluaran tegangan teoretis ultratinggi sekitar 2,0 V yang sampai saat ini, PCE *minimum loss* pada *perovskite solar cell* (PSC) CsPbBr_3 anorganik masih jauh lebih besar dibandingkan dengan perangkat lain (Xue et al., 2020).

CsPbX_3 ($>300^\circ\text{C}$) lebih unggul dalam hal stabilitas termal dibandingkan dengan FAPbX_3 ($>200^\circ\text{C}$) dan MAPbX_3 ($>100^\circ\text{C}$), namun perovskite berbasis Cs masih belum bisa mengungguli dalam hal kinerja dibandingkan dengan sel surya berbasis organik karena memiliki *band gap* yang lebih tinggi (untuk CsPbX_3 1,8 eV – 3,2 eV) dibanding dengan yang diinginkan ialah 1,1 – 1,4 eV untuk *single junction cell* (Kunwu Fu et al., 2019).

Sifat struktural dan elektronik dari perovskite campuran Sn–Pb anorganik telah diteliti bahwa struktur kristal tunggal $\text{CsPb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Br}_3$ dapat disintesis dengan menggunakan metode hidrotermal sederhana, suhu dekomposisi berkurang untuk $\text{CsPb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Br}_3$ ($x < 1$) dibandingkan dengan CsPbBr_3 murni dengan

transisi fase dari CsPbBr_3 ortorombik ke CsSnBr_3 kubik diamati ketika kandungan doping Sn lebih dari 75% dengan nilai celah pita minimum ditemukan untuk $\text{CsPb}_{0,25}\text{Sn}_{0,75}\text{Br}_3$ (Abib et al., 2021). Dilakukan juga studi menggunakan *density functional theory* (DFT) untuk dibandingkan dengan hasil eksperimen pada $\text{CsPb}_{0,25}\text{Sn}_{0,75}\text{Br}_3$ menghasilkan tren anomali dalam perovskite hibrida campuran Sn-Pb, sedangkan dalam karya teoritis untuk hasil celah pita CsPbBr_3 : Sn menghasilkan tren yang linier (D. Liu et al., 2021). CsPbBr_3 tanpa enkapsulasi dilaporkan dapat mempertahankan 80% dari PCE awlanya setelah 120 hari pada suhu 25°C , dengan nilai *Goldschmidt's tolerance factor* (t) ialah 0,862 (Park et al., 2023). Hasil teoritis DFT juga menunjukkan struktur kubik stabil yang ideal terbentuk ketika nilai t berada dalam kisaran 0,9–1,0. Jari-jari ionik Cs, Pb, Sn, dan Br masing-masing adalah 1,67, 1,19, 1,18, dan 1,96 Å, dengan nilai t terhitung dari CsPbBr_3 dan CsSnBr_3 masing-masing adalah 0,815 dan 0,833 (D. Liu et al., 2021). Hasilnya menunjukkan bahwa perovskite anorganik ini

stabil dan tiga campuran perovskite halida Pb-Sn tidak memiliki kecenderungan untuk pemisahan fase, untuk peningkatan kandungan doping Sn menyebabkan berkurangnya kontribusi Pb terhadap pita konduksi minimal dalam $\text{CsPb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Br}_3$, untuk atom Cs tidak memberikan kontribusi pada tepi pita. Ketika kandungan doping Sn meningkat, spektrum serapan mengalami pergeseran merah karena celah pita yang berkurang, dan ada enam kemungkinan struktur untuk paduan $\text{CsPb}_{0.50}\text{Sn}_{0.50}\text{Br}_3$ (D. Liu et al., 2021).

C. Kerangka Berpikir

Populasi dan industri yang semakin meningkat dan disertai dengan peningkatan permintaan energi, tetapi bahan bakar utama yang digunakan yaitu energi tak terbarukan. Diperlukan adanya energi alternatif untuk penyediaan energi yaitu energi surya sebagai salah satu energi terbarukan. Mengubah cahaya menjadi arus listrik dengan kemampuan efek fotovoltaiik sudah diteliti dan menghasilkan empat generasi untuk mencapai

efisiensi tertinggi dan biaya fabrikasi yang lebih murah untuk komersialisasi.

Penelitian ini merupakan eksperimen untuk mengevaluasi pengaruh secara sistematis dengan stannum (Sn) pada perovskite CsPbBr_3 : Sn dengan metode *spin-coating* untuk sel surya perovskite. Bahan sel surya terdiri dari lapisan konduktif yang digunakan yaitu *fluorine-doped tin oxide* (FTO), lapisan ETL yaitu SnO_2 , lapisan perovskite CsPbBr_3 : Sn dengan variasi $x = 0,05; 0,1; \text{ dan } 0,2$ dengan lapisan terakhir untuk elektroda menggunakan carbon. Pemilihan susunan lapisan tanpa *hole transport layer* (HTL) pada perangkat sel surya dengan pertimbangan biaya dalam fabrikasi yang lebih murah dan pemilihan SnO_2 untuk ETL juga mempengaruhi kinerja terhadap transportasi elektron karena SnO_2 memiliki celah pita yang tinggi yaitu 3,6 eV. Penggunaan elektroda logam yang biasanya digunakan logam mulia seperti emas (Au) dan perak (Ag) diganti dengan carbon yang memiliki sifat konduktif yang tinggi dan pembuatannya yang relatif murah dan

pembentukan ETL menggunakan metode *spin-coating*.

Fabrikasi yang diharapkan dapat mengeksplorasi keterbatasan pengaruh Sn yang diproses di kondisi ambient dan pengurangan dalam biaya produksi untuk komersialisasi.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium, bertujuan untuk eksplorasi batasan kemampuan substitusi yang dilakukan dalam kondisi ambient secara sistematis pada senyawa timbal (Pb) dengan Stannum (Sn) pada perovskite CsPbBr_3 : Sn untuk aplikasi sel surya. Diawali dengan studi literatur, preparasi prekursor, fabrikasi sampel, dan uji karakterisasi sampel.

B. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Pusat Riset Elektronika dan Komunikasi Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Cisit, Bandung. Waktu penelitian 21 Oktober 2024 s/d 28 Februari 2025.

C. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada tabel 3.1 dan tabel 3.2.

Tabel 3. 1 Alat yang digunakan untuk sintesis dan uji

No	Alat	Kegunaan
1	Sarung tangan latex	Menjaga sampel dari kontaminan
2	Amplas	Mengamplas kaca FTO
3	<i>Ultrasonic cleaner</i>	Membersihkan kaca FTO
4	<i>Air compressor</i>	Mengeringkan kaca FTO
5	Neraca digital	Menimbang material
6	<i>Hot plate magnetic stirrer</i>	Memanaskan kaca FTO
7	<i>UV ozone cleaner</i>	Membersihkan substrat
8	<i>Spin-coater</i>	Membuat film tipis di substrat
9	Glass petri dish	Tempat meletakkan substrat
10	D8 Advance (Bruker) CuK α 1 1.54060 Å	Mengetahui fase kristal pada lapisan perovskite CsPbBr ₃ : Sn
11	Spektrofotometer UV-Vis (Ocean Optics Maya 2000)	Mengetahui estimasi <i>band gap</i> pada CsPbBr ₃ : Sn
12	Spektrofotometer <i>photoluminesensi</i> (PL) (Ocean Optics USB400)	Mengetahui emisi dari bahan yang dapat menunjukkan sifat optoelektronik bahan
13	SEM JSM-IT300HR	Mengetahui struktur morfologi CsPbBr ₃ : Sn
14	<i>Sun simulator</i>	Mengetahui efisiensi sel surya dan parameter penyerapan cahaya perovskite CsPbBr ₃ : Sn
15	EmStat4S Galvanostat with EIS	Mengetahui resistansi rekombinasi yang terjadi pada permukaan bahan

Tabel 3. 2 Bahan yang digunakan untuk sintesis

No	Bahan	Kegunaan
1	<i>Fluorine-doped tin oxide</i> (FTO)	Sebagai substrat
2	Aseton	Membersihkan kaca FTO
3	<i>Ethanol</i>	Membersihkan kaca FTO
4	Thiourea	Material pembentuk SnO ₂
5	<i>SnCl₂·2H₂O</i>	Prekursor SnO ₂
6	<i>Dimethylformamide</i> (DMF)	Pelarut prekursor perovskite CsPbBr ₃ : Sn
7	2-propanol Sigma Aldrich 99,99%	Pelarut prekursor perovskite CsPbBr ₃ : Sn
8	<i>Cesium bromide</i> (CsBr) Sigma Aldrich 99,99%	Prekursor perovskite CsPbBr ₃ : Sn
9	<i>Lead (II) bromide</i> (PbBr ₂) Sigma Aldrich 99,99%	Prekursor perovskite CsPbBr ₃ : Sn
10	<i>Tin (II) bromide</i> (SnBr ₂) Sigma Aldrich 99,99%	Prekursor perovskite CsPbBr ₃ : Sn
11	<i>Deionized water</i>	Membersihkan FTO
12	Karbon <i>dyenamo</i> komersial	Sebagai material elektroda

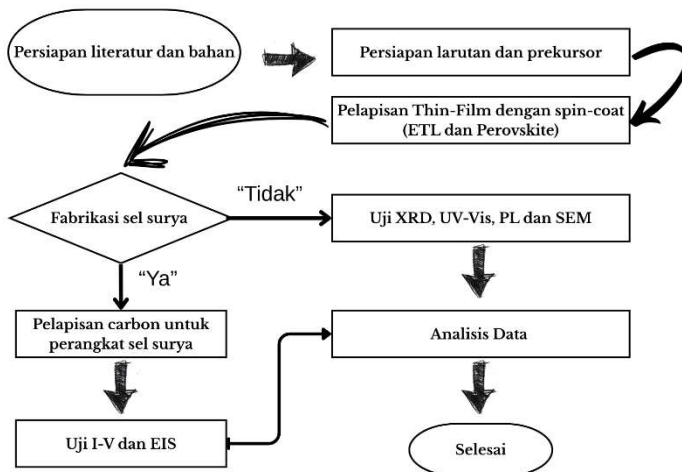
D. Variabel Penelitian

Penelitian yang dilakukan dengan variabel bebas yaitu pemilihan bahan perovskite CsPbBr₃: Sn, efisiensi sel surya dan stabilitas yang dihasilkan sebagai variabel terikat dan *sun simulator* sebagai variabel kontrol. Untuk variasi x pada perovskite ditunjukkan pada tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Variasi komposisi sampel

Kode Sampel	<i>Cesium bromide (CsBr)</i>	<i>Lead (II) bromide (PbBr₂)</i>	<i>Tin (II) bromide (SnBr₂)</i>
X01	1 mmol	0.95 mmol	0,05 mmol
X02	1 mmol	0.9 mmol	0,1 mmol
X03	1 mmol	0.8 mmol	0,2 mmol

E. Prosedur Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

1. Preparasi Lapisan ETL

FTO diamplas dan dibersihkan dalam *ultrasonic cleanser* menggunakan aseton, *deionized water* dan etanol. Larutan $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,678 gram

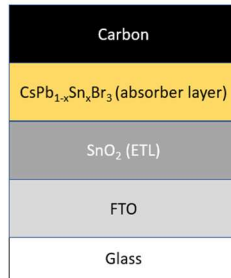
dalam 20 mL *deionized water* disiapkan sebagai prekursor ditambah thiourea 0,226 gram, kemudian diaduk ± 36 jam. Pelapisan SnO_2 sebagai ETL menggunakan *spin-coating* selama 30 detik dengan kecepatan 2000 rpm, lalu dianil 200 °C selama ± 60 menit (Abib et al., 2021).

2. Preparasi Perovskite CsPbBr_3 : Sn

- Larutan *Pb-based* disiapkan dengan PbBr_2 1 mmol untuk dilarutkan menggunakan DMF, kemudian diaduk hingga homogen yaitu larutan bening, sembari dihangatkan 90° C;
- Larutan *Sn-based* disiapkan dengan SnBr_2 1 mmol untuk dilarutkan dengan DMF, kemudian diaduk hingga homogen yaitu larutan bening, sembari dihangatkan <60° C untuk mempercepat proses terlarut;
- Larutan PbBr_2 dan SnBr_2 dicampurkan dengan persentase Sn 5%, 10%, dan 20%;

- Preparasi uv ozone selama 15 menit sebelum proses *spin-coating*;
- Untuk variasi molar dilakukan pada langkah pembuatan larutan *Pb-based* dan *Sn-based*;
- Deposisi *thin film* menggunakan *spin-coating* dengan pengaturan alat seperti lapisan ETL;
- Lapisan Pb-Sn dengan *pre* dan *post-treatment* dengan suhu 90° C, dengan anneal *post-treatment* selama ± 30 menit;
- Prekursor CsBr ± 1 mmol dilarutkan dengan pelarut untuk variasi *2-step (water based)* dan *multi-step (methanol based)*;
- Tinta karbon *dynamo* komersial dengan luas aktif 0,09 cm² dilapiskan sebagai counter elektroda. Selama ± 10 menit, film ini dianil pada suhu 110-120 °C (Abib et al., 2021). Lapisan yang akan terbentuk seperti ditunjukkan oleh

gambar 3.2 dengan struktur perovskite CsPbBr_3 : Sn sebagai *absorber layer*.



Gambar 3. 2 lapisan sel surya CsPbBr_3 : Sn

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian XRD

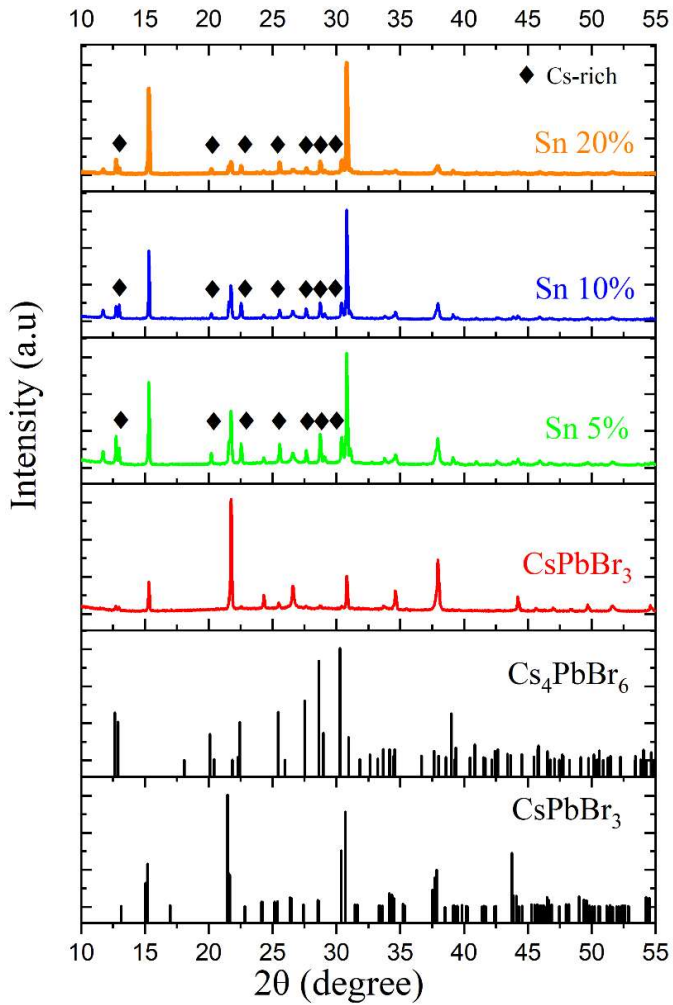
Uji XRD dengan spesifikasi alat D8 Advance (Bruker) sumber $\text{CuK}\alpha 1$ 1.54060 Å, Bragg-Bentano Diffraction dan detector Lynxeeyexe-t dengan 2θ pada rentang $10^\circ - 80^\circ$. Dipilih cara *liquid mix* setelah dilakukan perbandingan hasil *liquid mix* dan *powder mix* dengan persentase molar 5% Sn untuk mengetahui hasil pola xrd yang dipengaruhi metode pencampuran, ditampilkan dalam lampiran, dan dilakukan alternatif metode dengan *multi-step* pelarut methanol.

Hasil dari difraksi semua variasi bahan (Gambar 4.1 dan gambar 4.2), terkonfirmasi struktur kristal orthorhombic CsPbBr_3 dengan *space group* (*Pnma*) pada derajat $2\theta \sim 15,21^\circ$; $21,78^\circ$; $24,34^\circ$; $30,84^\circ$; $34,35^\circ$; $37,96^\circ$ dengan kesesuaian *hkl* pada bidang (020), (002), (102), (202), (222), dan (211) berturut-turut sesuai dengan ICSD-97851 (ICSD *release* 2004.1) (Rodová et al., 2003). Pertumbuhan kristal yang

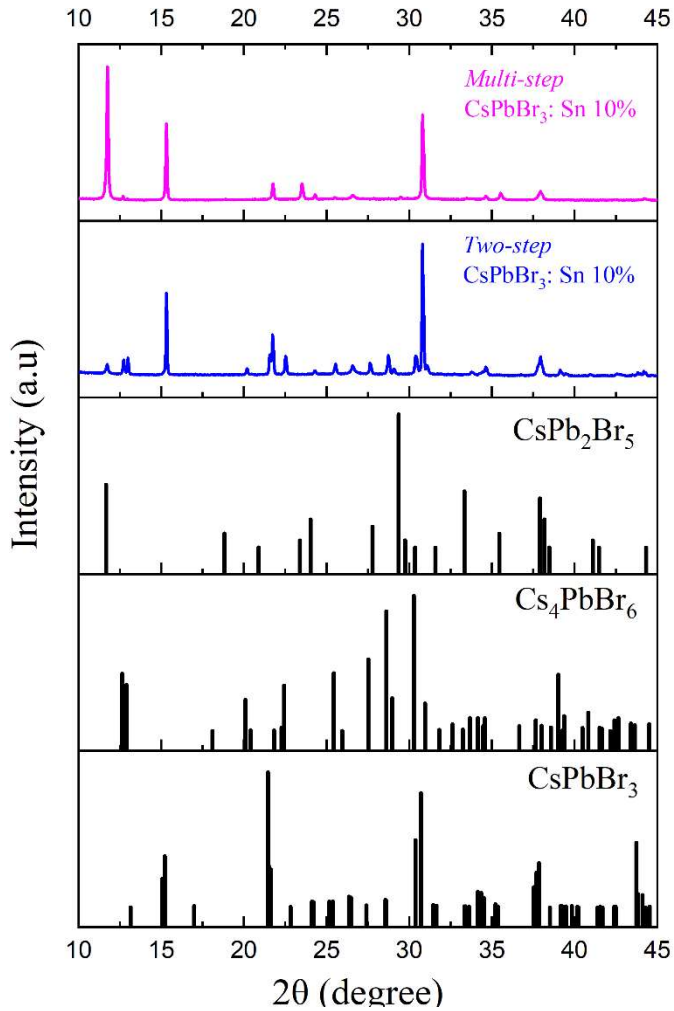
terganggu pada penambahan prekursor Pb-Sn dengan CsBr menunjukkan kemunculan puncak sekunder pada setiap variasi dengan intensitas rendah mengakibatkan kecenderungan fase *Cs-rich* (Ji et al., 2022), yaitu Cs_4PbBr_6 dengan *space group* trigonal ($R\text{-}3c$) ICSD-162158 (ICSD release 2017.1) (De Bastiani et al., 2017). Puncak Cs_4PbBr_6 $12,72^\circ$; $20,08^\circ$; $22,41^\circ$; $25,43^\circ$; $27,51^\circ$; $28,60^\circ$; $30,27^\circ$ pada *hkl* bidang (012), (113), (300), (022), (131), (214), dan (223) berturut-turut sesuai dengan referensi.

Hasil metode *multi-step* kemunculan peak derajat 2θ pada $11,64^\circ$ dengan intensitas yang tinggi akibat prekursor PbBr_2 yang tidak bereaksi dengan CsBr sehingga membentuk fase *Pb-rich* yang terkonfirmasi dengan penurunan ukuran partikel yang teragregasi (Feng et al., 2020; J. Li et al., 2020). Fase CsPb_2Br_5 sesuai dengan ICSD-254290 dengan *space group* [$I4/mcm$] struktur kristal tetragonal (Nazarenko et al., 2017), dengan derajat 2θ pada $11,75^\circ$; $21,68^\circ$; $23,5^\circ$; dan $30,34^\circ$ dengan kesesuaian *hkl* pada bidang (002),

(200), (210), dan (221) berturut-turut. Fase terbentuknya struktur pada pemrosesan larutan thin film yaitu $\text{PbBr}_2 - \text{CsPb}_2\text{Br}_5 - \text{CsPbBr}_3 - \text{Cs}_4\text{PbBr}_6$, proses metode *multi-step* dengan pelapisan yang dilakukan tujuh kali berulang dan dalam waktu yang relatif singkat akan menghasilkan fase CsPb_2Br_5 (Feng et al., 2020). Transisi fase selama proses *multi-step* dihasilkan oleh proses $2\text{PbBr}_2 + \text{CsBr}$ membentuk CsPb_2Br_5 (Y. Zhang et al., 2024), namun pada penelitian ini penambahan prekursor yang memiliki kemiripan SnBr_2 ($1,18 \text{ \AA}$) dengan PbBr_2 ($1,19 \text{ \AA}$) + CsBr sehingga fase sekunder CsPb_2Br_5 yang terbentuk hanya dominan pada peak $11,64^\circ$ (J. Li et al., 2018, 2020; Y. Zhang et al., 2024). Waktu hidup PL (peningkatan intensitas), pengurangan panjang difusi eksiton, penurunan agregasi ukuran, dan densitas perangkat yang berkurang mengkonfirmasi fase *Pb-rich* yang terbentuk (Feng et al., 2020; Y. Zhang et al., 2024). Dengan konfirmasi puncak intensitas PL $\sim 526 \text{ nm}$ sesuai referensi pada $\sim 527 \text{ nm}$ (Su et al., 2018).



Gambar 4. 1 Pola xrd referensi CsPbBr_3 Orthorhombic, Cs_4PbBr_6 Trigonal dan perovskite CsPbBr_3 : Sn dengan Sn= 0,05; 0,1; dan 0,20



Gambar 4. 2 Pola XRD CsPbBr_3 : Sn 10% metode *two-step* dan metode *multi-step*

Tabel 4. 1 sebaran ukuran kristalit dan *d-spacing*

Sample	2Theta(deg)	<i>d-spacing</i>	FWHM	Ukuran Kristalit
CsPbBr ₃	15.307	5.784	0.08616	97.168
	21.744	4.084	0.09726	86.871
	30.805	2.900	0.11373	75.677
	37.948	2.369	0.18625	47.110
CsPbBr ₃ : Sn 5%	15.313	5.784	0.08425	99.371
	21.735	4.084	0.15392	54.891
	30.818	2.936	0.12284	70.065
	37.928	2.369	0.27047	32.438
CsPbBr ₃ : Sn 10%	15.317	5.784	0.07194	116.375
	21.736	4.088	0.14063	60.079
	30.816	2.900	0.10727	80.234
	37.928	2.369	0.26063	33.663
CsPbBr ₃ : Sn 20%	15.313	5.784	0.07257	115.365
	21.717	4.084	0.23948	35.279
	30.813	2.900	0.1048	82.124
	37.924	2.370	0.31364	27.973
<i>Multi-step</i> CsPbBr ₃ : Sn 10%	11.746	7.522	0.09916	84.118
	15.312	5.784	0.08674	96.518
	21.756	4.084	0.10595	79.747
	30.822	2.90	0.11678	73.701

Hasil perhitungan ukuran kristalit dan *d-spacing* bahan ditampilkan pada tabel 4.1 dihasilkan persebaran dengan rata-rata ukuran dari setiap variasi ialah 78,33 nm, 66,80 nm, 71,05 nm dan 68,02 nm berturut-turut pada CsPbBr₃, CsPbBr₃: Sn 5%, CsPbBr₃: Sn 10%, dan

CsPbBr₃: Sn 20%, sedangkan untuk metode *multi-step* dihasilkan 62,66 nm.

Tabel 4. 2 Parameter kisi dan indeks persen krsistalinitas

Sample	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Kristalinitas
CsPbBr ₃	8.239	11.567	8.168	80.81%
CsPbBr ₃ : Sn 5%	8.447	11.567	8.168	65.14%
CsPbBr ₃ : Sn 10%	8.239	11.567	8.175	50.47%
CsPbBr ₃ : Sn 20%	8.239	11.567	8.168	58.40%
<i>Multi-step</i> CsPbBr ₃ : Sn 10%	8.239	11.567	8.168	63.41%

Pengaruh penambahan Sn mengakibatkan ukuran kristalit yang lebih kecil sehingga memperbanyak batas butir dari material yang memperbesar terbentuknya rongga atau kekosongan pada permukaan (Abib et al., 2021). Krtalinitas yang tinggi diharapkan pada bahan untuk sel surya yang berperan penting dalam pembawa muatan yang efisien, mengurangi rekombinasi batas butir, dan cacat permukaan (Abib et al., 2021; M. Li et al., 2025). Penurunan kristalinitas pengaruh Sn ditunjukkan pada tabel 4.2 dan cacat yang

terbentuk sebagai penyebab penurunan performa perangkat sel surya.

Tingginya kristalinitas dan ukuran butir dari film perovskite akan secara signifikan menaikkan performa PCE sel surya dan mencapai perangkat tanpa histeresis (M. Li et al., 2025). Perlakuan panas dan rekayasa dalam fabrikasi dapat meningkatkan kristalinitas dan sifat optoelektronik film, deposisi larutan lebih efektif karena dapat mengatur konsentrasi, laju aliran dan temperatur (Guo et al., 2019; M. Li et al., 2025).

Peningkatan kristalinitas pada metode *multi-step* secara signifikan mempengaruhi performa sel surya dan cacat yang terbentuk berkurang ditampilkan pada hasil karakterisasi SEM. Ukuran kristalit rata-rata hasil *multi-step* ialah 62,65 nm yang lebih kecil dari semua variasi, namun melapisi semua permukaan film dibanding dengan pelarut air yang mempercepat proses oksidasi Sn (Zhou et al., 2024) sehingga membentuk lapisan yang lebih

rapat dan menaikkan pembawa muatan yang lebih efisien.

Tabel 4. 3 Goldschmidt tolerance factor perovskite CsPbBr₃: Sn

Sample	Goldschmidt tolerance factor (<i>t</i>)
CsPbBr ₃	0,8620
CsPbBr ₃ : Sn 5%	0,8621
CsPbBr ₃ : Sn 10%	0,8623
CsPbBr ₃ : Sn 20%	0,8625

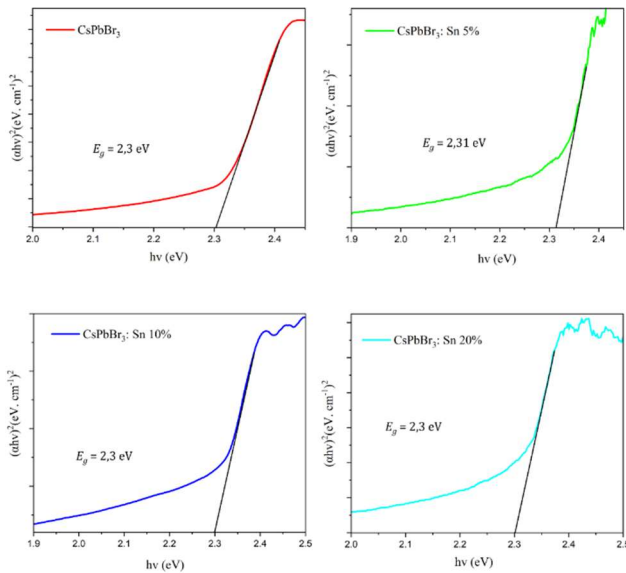
Goldschmidt tolerance factor (*t*) merupakan indikator penting untuk memprediksi kestabilan perovskite ABX₃. Perovskite halida stabil pada rentang $0,813 < t < 1,107$, jika lebih rendah akan membentuk fase orthorhombic, dan jika lebih tinggi akan membentuk fase hexagonal (Yadegarifard et al., 2023; Zhao & Zhu, 2016). Ditampilkan pada tabel 4.3 nilai *t* untuk setiap variasi penambahan Sn pada sampel CsPbBr₃ dengan perhitungan mengikuti rumus *Goldschmidt* pada lampiran membentuk perovskite halida yang stabil sesuai rentang (Bartel et al., 2019; Yadegarifard et al., 2023; Zhao & Zhu, 2016).

B. Hasil Uji Optoelektronik Perovskite

Uji sifat optoelektronik semua variasi dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Visible (Ocean Optics Maya 2000) untuk mengukur absorbansi, dan spektrofotometer *photoluminesensi* (PL) (Ocean Optics USB400) untuk memperoleh intensitas emisi sebagai fungsi panjang gelombang. Sampel pada uji PL dieksitasi dengan laser dioda 405 nm. Analisis Tauc plot sebagai estimasi nilai celah pita, dan pengukuran PL mengungkap mekanisme eksitasi elektron terperangkap (radiatif maupun non-radiatif) yang umumnya diinduksi oleh cacat struktural dan memengaruhi interaksi pembawa muatan dalam film optoelektronik (M. Li et al., 2025).

Hasil serapan spektrum UV-Vis sampel metode *two-step* diolah dengan analisis tauc plot (Gambar 4.3), didapatkan estimasi celah pita tanpa adanya perubahan yang signifikan dengan nilai 2,3 eV, hanya variasi CsPbBr₃: Sn 5% didapatkan lebih lebar 0,01 eV. Peningkatan yang sama terjadi pada variasi metode *multi-*

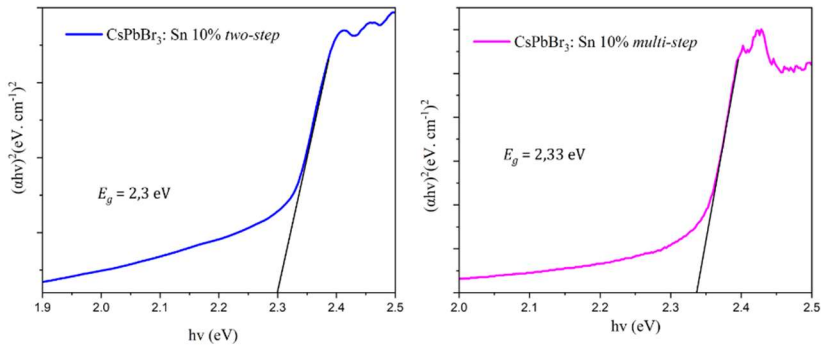
step dengan nilai 0,03 eV disebabkan efek penambahan Sn yang mengisi situs kosong Pb sehingga meningkatnya konsentrasi pembawa dan penurunan mobilitas pembawa (Munna et al., 2023).



Gambar 4. 3 estimasi celah pita metode tauc plot hasil serapan uv-vis metode *two-step*

Hasil puncak PL penambahan variasi Sn metode *two-step* pada ~ 528 nm (2,35 eV), ~ 530 nm (2,34 eV), ~ 529 nm (2,34 eV), dan ~ 530 nm (2,34 eV) untuk variasi CsPbBr₃,

CsPbBr₃: Sn 5%, CsPbBr₃: Sn 10%, dan CsPbBr₃: Sn 20%. Sedangkan metode *multi-step* pada ~526 nm (2,36 eV) dengan hasil estimasi metode tauc plot didapatkan celah pita 2,33 eV. Terjadinya PL *blueshift* peningkatan nilai celah pita yang disebabkan penurunan ukuran kristal dan situs kosong Pb yang tersisipkan oleh Sn sehingga menyebabkan level Fermi bergerak menuju pita konduksi akibat pergeseran Burstein-Moss (Munna et al., 2023; C. Wu et al., 2023).



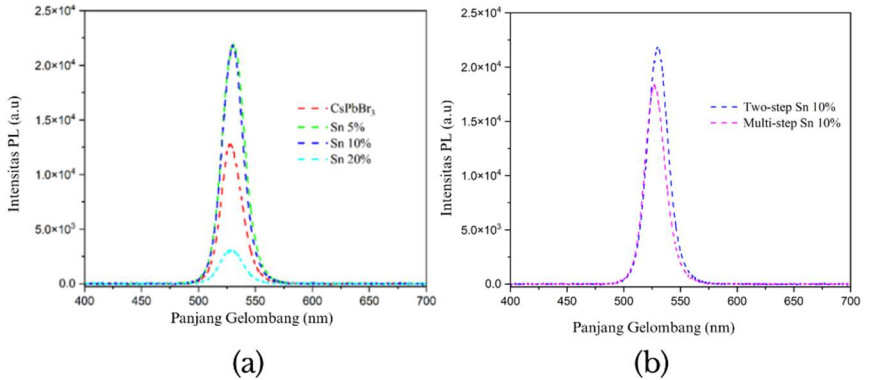
Gambar 4.4 Estimasi celah pita metode tauc plot metode *two-step* dan *multi-step*

Spektrum PL (Gambar 4.5) menunjukkan peningkatan intensitas pada doping Sn 5 % dan 10 %. Hal ini dikarenakan efek pasivasi tidak

langsung yang mengisi *shallow trap state* Pb dan menghambat rekombinasi non-radiatif sehingga pendaran emisi radiatif mendominasi dan terjadi peningkatan intensitas PL (Anusha et al., 2025). Sebaliknya, pada Sn 20% oksidasi Sn^{2+} ke Sn^{4+} menciptakan trap baru, meningkatkan transisi non-radiatif, menghasilkan *deep trap state* Pb dan terjadi penghambatan rekombinasi secara masif sehingga penurunan intensitas PL. Cacat tingkat dalam (*deep traps*) akibat impuritas yang berkontribusi pada pembatasan muatan di wilayah tengah celah pita (Anusha et al., 2025; Hahn et al., 2023; Lei et al., 2021).

Intensitas PL berhubungan dengan laju rekombinasi *loss* (kehilangan), dengan rekombinasi non-radiatif berdampak pada penurunan intensitas PL, sebaliknya laju rekombinasi radiatif yang lebih tinggi berkontribusi terhadap peningkatan intensitas PL (Campanari et al., 2022). Terlepas dari nilai waktu hidup pembawa, proses rekombinasi menyebabkan kehilangan energi dan dari

kedua jalur rekombinasi tersebut yang lebih cepat lebih diunggulkan (Campanari et al., 2022; M. Li et al., 2025).

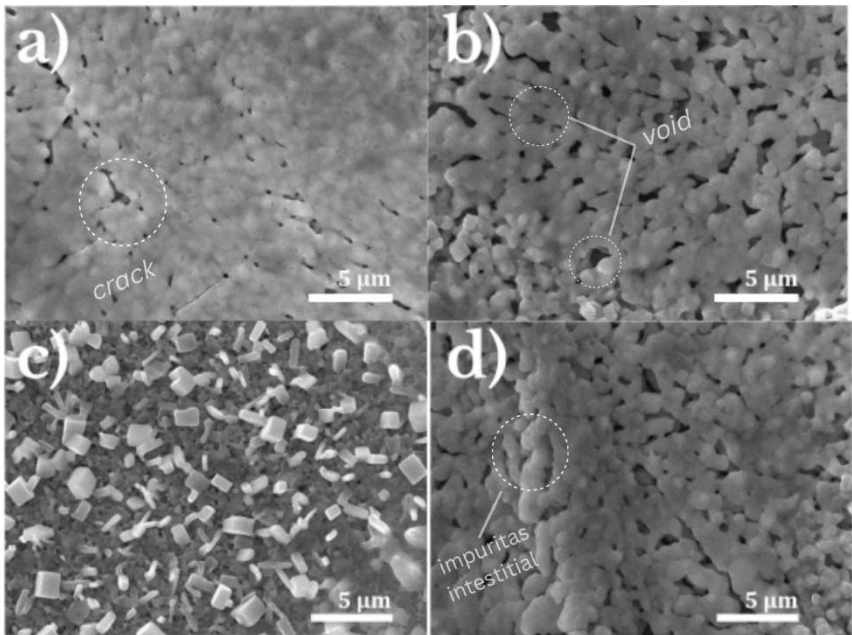


Gambar 4. 5 (a) Spektrum PL variasi Sn, (b) Spektrum PL metode *two-step* dan *multi-step*

PL yang tinggi pada Sn 5% dan Sn 10% mengakibatkan waktu pembawa ekstraksi yang lebih lama, sebaliknya pada Sn 20% didominasi oleh rekombinasi non-radiatif sehingga terjadi *mismatch* yang mengakibatkan *energy loss* dan penurunan performa parameter V_{oc} (Kirchatz et al., 2020; M. Li et al., 2025).

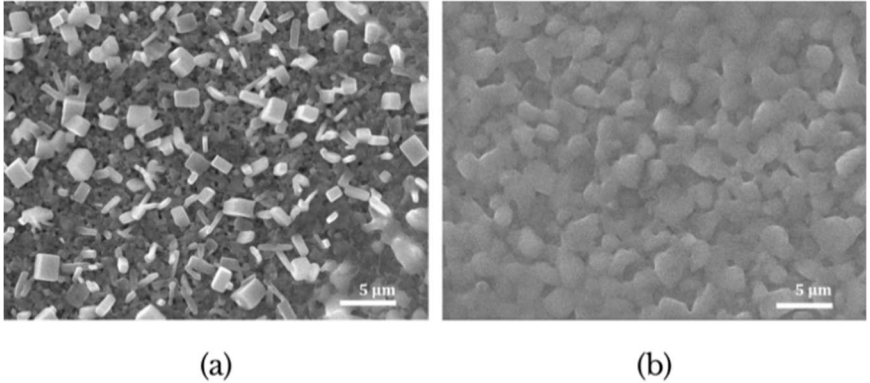
C. Hasil Uji Morfologi Permukaan Perovskite

Karakterisasi morfologi perovskite menggunakan SEM JSM-IT300HR. Film CsPbBr_3 menunjukkan morfologi permukaan yang homogen, suatu karakteristik krusial untuk efisiensi konversi cahaya pada perangkat sel surya (M. Zhang et al., 2023).



Gambar 4. 6 Morfologi permukaan CsPbBr_3 : Sn a). baseline, b) Sn 5%, c) Sn 10%, d) Sn 20%

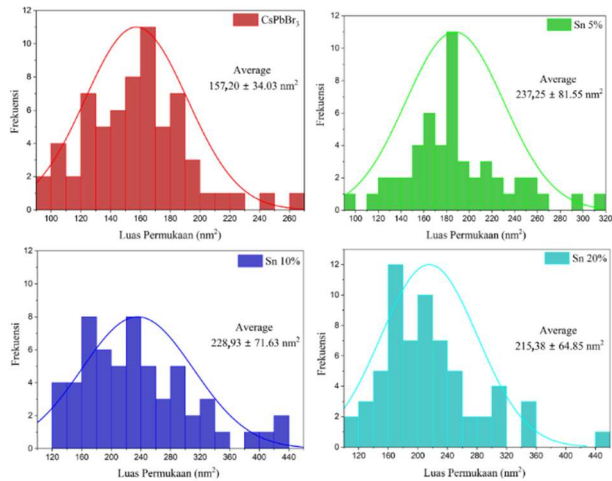
Morfologi *baseline* CsPbBr₃ berkorelasi dengan efisiensi penyerapan cahaya yang optimal, cacat minor pada film disebabkan oleh ketidaksempurnaan dalam proses fabrikasi. Pada semua variasi Sn terjadi peningkatan signifikan cacat kekosongan, *pinholes* dan impuritas, yang berkontribusi pada pembentukan *deep traps* yang secara signifikan menurunkan kinerja perangkat sel surya (Pan et al., 2021). Distribusi larutan CsBr yang tidak merata, diperburuk oleh pelarut berbasis air yang mempercepat kristalisasi, sehingga meningkatkan cacat pada permukaan dan batas butir, mempercepat oksidasi Sn²⁺ menjadi Sn⁴⁺ meningkatkan cacat serta memicu rekombinasi non-radiatif (Gao et al., 2024; Hahn et al., 2023; M. Li et al., 2025; Zhou et al., 2024)., dilakukan pembandingan dengan pelarut methanol metode *multi-step* dengan permukaan yang lebih rapat tanpa cacat *vacancies*.



Gambar 4. 7 Morfologi permukaan (a) CsPbBr₃: Sn 10% *two-step* (b) CsPbBr₃: Sn 10% *multi-step*

Variasi film menunjukkan morfologi permukaan yang seragam pada CsPbBr₃ gambar a (Gambar 4.6), pengaruh kenaikan Sn 5% pada gambar (b) menambah *vacancies* permukaan, pada gambar (c) dengan Sn 10% menghasilkan pembentukan lapisan perovskite tidak optimal sehingga lebih tipis dan menampakkan lapisan Pb-Sn yang kurang seragam (lampiran), gambar (d) pada Sn 20% gangguan pertumbuhan kristal dominan sehingga terjadi *interstitial impurity defect*. Pada gambar 4.7 hasil metode *multi-step* dengan pelarut methanol berkurangnya cacat

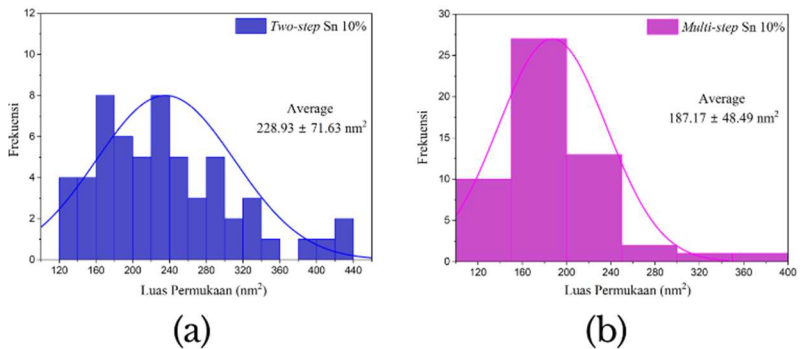
pinholes dengan permukaan yang lebih rapat mereduksi oksidasi Sn (Zhou et al., 2024).



Gambar 4. 8 Sebaran luas permukaan morfologi SEM

Morfologi permukaan yang dianalisis dengan perangkat lunak *imageJ* didapatkan sebaran yang bervariasi (Gambar 4.8 dan 4.9). Pada CsPbBr₃: Sn 5% terbentuk cacat berupa *pinholes*. Pada CsPbBr₃: Sn 10% segregasi fase sehingga didominasi fase sekunder pada permukaan tersebut, terjadi reduksi kemampuan dalam efisiensi pengumpulan muatan dan pembawa muatan (Abib et al.,

2021). konsentrasi Sn 20%, tidak hanya seperti tetapi juga *interstitial defect impurities*, keberadaan ion asing atau Sn sebagai doping yang menempati posisi interstisial dalam struktur kristal, sehingga memengaruhi karakteristik intrinsik material (Abbas et al., 2024; Gao et al., 2024; Hahn et al., 2023).



Gambar 4. 9 Sebaran luas permukaan dengan metode (a) two-step, dan (b) mutlti-step

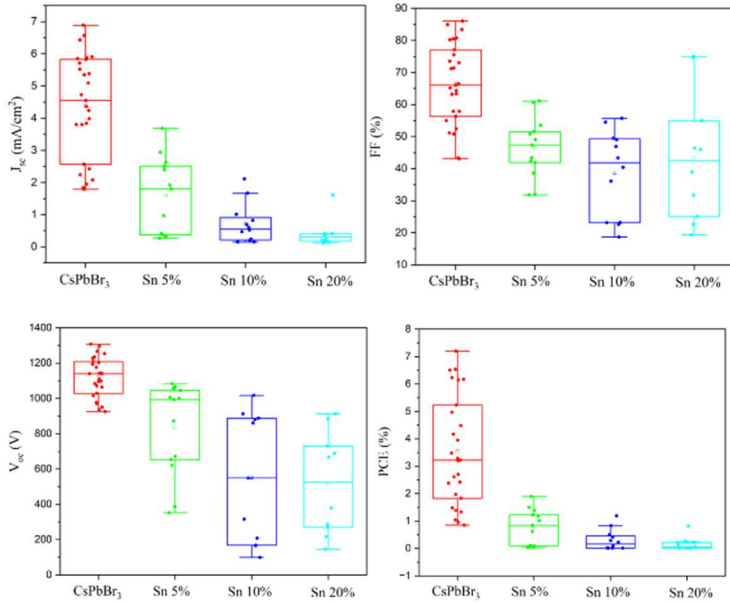
Sebaran permukaan metode *two-step* (gambar 4.8) dan *multi-step* (gambar 4.9) pada variasi penambahan Sn 5% dan Sn 10% terjadi peningkatan ukuran butir sehingga kerapatan batas butir yang berkurang, yang merupakan

pusat rekombinasi non-radiatif didukung dengan intensitas PL yang tinggi (M. Li et al., 2025). Pada Sn 20% peningkatan ukuran butir juga meningkat, namun pada konsentrasi Sn yang lebih tinggi didominasi oksidasi sehingga membentuk cacat *interstitial* dan antarmuka sehingga signifikan mempengaruhi performa, stabilitas, dan histeresis kurva J - V (Abbas et al., 2024).

D. Hasil Uji Perangkat Sel Surya

Pengujian kemampuan sel surya menggunakan *sun simulator*, karakterisasi parameter $J - V$ dengan intensitas penyinaran 100 mW/cm^2 , dengan diameter sel surya $0,16 \text{ cm}^2$ dan konfigurasi perangkat FTO/SnO₂/CsPbBr₃: Sn/carbon. Gambar 4. 10 dan tabel 4.4 sebaran kinerja sel surya dari berbagai variasi Sn diperoleh tren penurunan untuk setiap parameter sel surya. Dari semua parameter V_{oc} , J_{sc} , FF , dan PCE setiap variasi, hanya FF pada variasi Sn 20% yang lebih tinggi dari variasi lain, disebabkan rendahnya

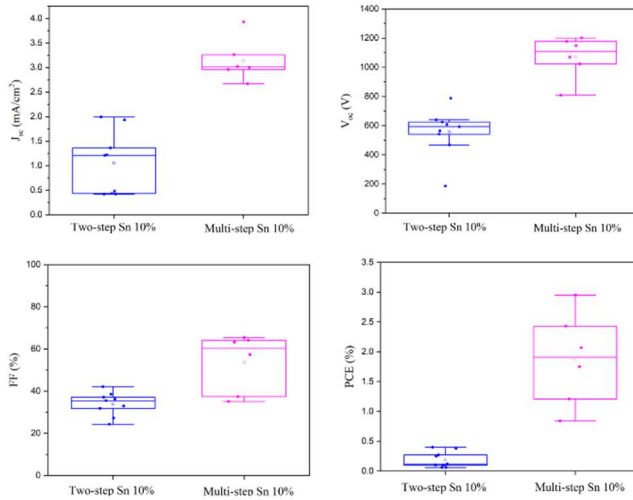
rekombinasi yang terjadi didukung dengan nyquist plot hasil EIS (M. Li et al., 2025).



Gambar 4. 10 Sebaran data parameter perovskite sel surya baseline dan variasi CsPbBr₃: Sn

Performa perangkat yang semakin menurun disebabkan banyaknya cacat yang terbentuk pada *film* dikonfirmasi karakterisasi sifat optoelektronika dan morfologi yang telah dilakukan, terbentuk cacat secara masif yaitu

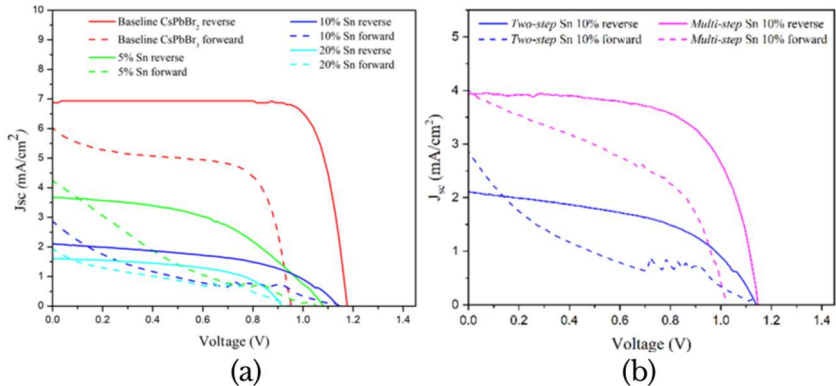
vacancies, cracks, pinholes, dan interstitial impurity defect (Byranvand & Saliba, 2021; Gao et al., 2024; Hahn et al., 2023; Lei et al., 2021).



Gambar 4. 11 Sebaran parameter perangkat sel surya dengan metode *two-step* dan *multi-step*

Sebaran data performa sel surya (gambar 4.10 & 4.11) yaitu *box chart* dengan garis di tengah *box* menunjukkan nilai median data, sedangkan *box* sebagai 25% ~ 75% data, dengan titik-titik sebagai sebaran data dan

garis di ujung ialah nilai minimal dan maksimal dari data hasil.



Gambar 4. 12 Kurva J - V perangkat sel surya bias maju dan bias mundur (a) variasi penambahan Sn, (b) variasi metode

Cacat dalam *film* memiliki dampak krusial terhadap histeresis performa perangkat sel surya, V_{oc} bergantung pada pemisahan pasangan *electron-hole* yang ditentukan oleh kerapatan muatan pembawa, tetapi terdapat cacat yang penurunan V_{oc} , sementara J_{sc} dipengaruhi kualitas *film* dalam penyerapan cahaya dan ekstraksi muatan yang buruk akan memperlambat transport muatan yang disebabkan cacat. FF dipengaruhi oleh kualitas

kristal butir yang buruk akan membuat kontak permukaan antar lapisan dan nilai resistansi rekombinasi menurun (Abbas et al., 2024; Gao et al., 2024; Lei et al., 2021; M. Li et al., 2025).

Tabel 4. 4 Sebaran kinerja sel terbaik dan rata-rata dari parameter sel surya seluruh purnangkat

Sample		J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	PCE (%)
CsPbBr ₃	Terbaik	6,57	1,27	86	7,2
	Rata-rata	4,29 ± 1,62	1,12 ± 0,11	65,63 ± 12,79	3,45 ± 1,97
Sn 5%	Terbaik	3,68	1,08	47,4	1,9
	Rata-rata	1,58 ± 1,14	0,83 ± 0,25	46,46 ± 9	0,70 ± 0,62
Sn 10%	Terbaik	2,11	1,14	49,5	1,19
	Rata-rata	0,71 ± 0,59	0,60 ± 0,37	38,58 ± 12,91	0,29 ± 0,2
Sn 20%	Terbaik	1,61	0,91	54,9	0,81
	Rata-rata	0,40 ± 0,41	0,51 ± 0,27	43,48 ± 19,04	0,15 ± 0,23
Multi-step CsPbBr ₃ : Sn 10%	Terbaik	3,93	1,14	65,4	2,95
	Rata-rata	3,14 ± 0,39	1,07 ± 0,13	53,75 ± 12,64	1,87 ± 0,71

Untuk kurva J - V bias maju (*forward*) dan mundur (*reverse*) (gambar 4.13), dan perbedaan antara bias maju dengan bias mundur antara kurva J - V ialah histeresis, meskipun tak seperti *deep traps* yang signifikan terhadap terjadinya rekombinasi non-radiatif, *shallow traps* menyebabkan penumpukan ion

pada batas butir dan permukaan yang memicu ketidakseimbangan distribusi muatan yang berakibat histeresis yang muncul (M. Li et al., 2025).

Performa perangkat sel surya dengan metode *multi-step* mengalami peningkatan yang signifikan dengan PCE terbaik pada bias maju 2.95% dan bias mundur 1.85%, dengan FF 65.4%, V_{oc} 1.14 V, dan J_{sc} 3.93 mA/cm².

Sebaran performa perangkat sel surya antara *two-step* dan *multi-step* ditampilkan pada gambar 4.14, dengan kurva J - V lebih tinggi pada gambar 4.15 dan didukung hasil EIS pada gambar 4.16 yang konsisten dengan peningkatan antara PCE dengan nilai resistansi rekombinasi yang terjadi pada permukaan film. Tabel 4.4 menampilkan kinerja sel surya terbaik dan rata-rata dengan standar deviasi pada setiap parameter, dengan kenaikan performa yang signifikan pada pelarut berbasis methanol menunjukkan keseragaman kristalinitas yang lebih merata dan lebih baik untuk performa sel surya, meskipun air

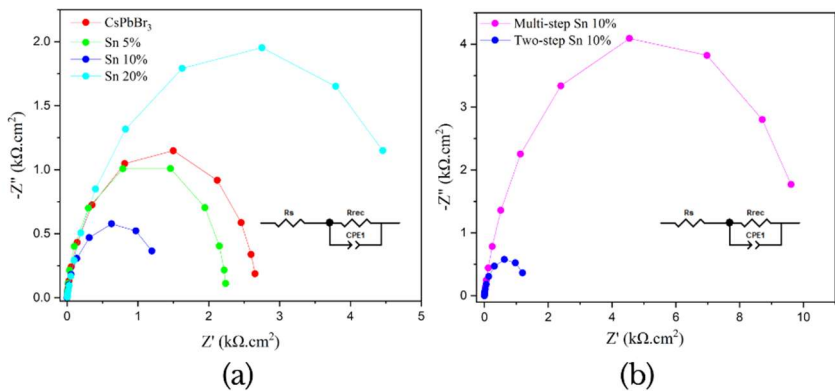
meminimalkan kerusakan atau *damage* yang lebih rendah pada lingkungan dibanding methanol, air menyebabkan Sn lebih banyak teroksidasi (Park et al., 2023; Ullah et al., 2021).

Kurva J - V dihasilkan perbedaan dominan bias maju dan mundur akibat cacat permukaan sehingga membentuk histeresis pada kurva. Disosiasi ion menyebabkan transportasi muatan yang tidak seimbang sehingga berdampak pada stabilitas sel, sifat fotoelektronik, dan kinerja perangkat karena cacat atau ion dapat bermigrasi melintasi antarmuka perangkat di bawah bias atau iradiasi, menyebabkan penurunan kinerja sel (Ayaydah et al., 2023).

E. Hasil Uji EIS

Kemampuan fotovoltaiik pada perangkat sel surya ditampilkan sebagai PCE yang dapat dipengaruhi oleh rekombinasi muatan sehingga menurunkan efisiensi fotokonversi perangkat. Resistansi rekombinasi (R_{rec}) digambarkan

sebagai proses penangkapan elektron, dengan kata lain sebagai transisi elektron (atau lubang) dari pita konduksi (atau valensi) ke cacat yang berada dalam celah pita atau *surface state* (Von Hauff & Klotz, 2022).



Gambar 4. 13 Nyquist plot EIS dengan rangkain R_s , R_{rec} , dan $CPE1$ (a) variasi CsPbBr $_3$: Sn, (b) variasi metode

Nyquist plot hasil pengukuran *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) dilakukan untuk investigasi kemampuan resistansi rekombinasi muatan pada perangkat sel surya dengan tegangan bias 0 V dan dalam keadaan gelap, sehingga memungkinkan analisis hambatan intrinsik dan antarmuka

material, pada perangkat sel surya yang menggunakan elektroda karbon sebagai pengumpul *hole* menunjukkan hambatan rekombinasi yang responsif baik dengan ulasan yang terstruktur bahwa pemilihan ETL sangat krusial dalam perangkat HTL-*free* (Abdulrahim et al., 2020).

Analisis dengan Nyquist plot hasil EIS (gambar 4.13) dengan semi lingkaran lebih besar menunjukkan kemampuan R_{rec} lebih baik yang berarti rekombinasi muatan pada permukaan mengalami penurunan (Abdulrahim et al., 2020). Penurunan semi lingkaran hasil nyquist plot pada setiap variasi pengaruh Sn menurun, kecuali Sn 20% R_{rec} yang tinggi pada perangkat berkinerja buruk menandakan bahwa film perovskite yang cacat dan memiliki konduktivitas yang sangat buruk (Prochowicz et al., 2021). Cacat masif seperti *vacancies*, *interstitial impurities*, dan *grain boundaries* secara drastis membatasi aliran pembawa muatan. R_{rec} tinggi karena sangat sedikit pembawa muatan yang dapat bergerak

dan berekomendasi, bukan karena material secara intrinsik memiliki sifat rekombinasi yang baik (Abbas et al., 2024; Ryu et al., 2019; Von Hauff & Klotz, 2022). Pada performa sel surya yang buruk disebabkan *defect* yang dominan yaitu *vacancies*, *interstitial impurity*, dan *grain boundaries* membuat pasangan *electron-hole* yang terperangkap dan tidak terjadi aliran arus maupun tegangan sehingga tidak menghasilkan nilai yang baik untuk kinerja perangkat sel surya (Abbas et al., 2024; Hahn et al., 2023; Islam et al., 2021; M. Li et al., 2025).

Permukaan film perovskite dengan metode *multi-step* yang lebih seragam dan tanpa *vacancies* meningkatkan hambatan rekombinasi permukaan yang ditunjukkan dengan *semicircle* nyquist plot yang lebih besar (gambar 4.13), sehingga parameter kinerja sel surya meningkat. Histeresis yang berkurang pada performa perangkat menunjukkan minimnya cacat pada permukaan yang terbentuk (Y. Zhang et al., 2024).

.

BAB V

KESIMPULAN

Penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Struktur kristal orthorhombik (*Pnma*) pada bahan CsPbBr_3 terbentuk dengan kesesuaian yang baik dengan referensi ICSD-97851, dan pada hasil variasi Sn tendensi membentuk fase sekunder Cs_4PbBr_6 trigonal (*R-3c*) dengan referensi ICSD-162158. Penambahan Sn menginduksi segregasi fasa, membentuk fasa sekunder Cs_4PbBr_6 dan menyebabkan distorsi lokal pada kisi serta penurunan kristalinitas.
2. Sifat optoelektronik hasil uji uv-vis dan PL tidak terjadi perubahan panjang gelombang. Namun, perubahan intensitas PL terjadi kenaikan pada variasi Sn 5% dan 10% yang bertindak sebagai efek pasivasi tidak langsung,

sedangkan penurunan intensitas pada Sn 20% terjadi karena rekombinasi non-radiatif. Morfologi CsPbBr₃ dihasilkan distribusi yang seragam, pada Sn 5% terbentuk cacat *vacancies*, terjadi segregasi fase yang dominan pada variasi Sn 10%, dan impuritas cacat interstitial pada Sn 20% dengan lapisan permukaan yang bertumpuk.

3. Performa sel surya mengalami penurunan secara bertahap dengan peningkatan kandungan Sn. Diharapkan PCE terbaik untuk CsPbBr₃, Sn 5%, Sn 10%, dan Sn 20% berturut-turut yaitu 7,2%; 1,9%; 1,19%; dan 0,81%.

Saran untuk penelitian lebih lanjut yang diperoleh dari penelitian ini adalah diperlukan karakterisasi dan analisis lebih mendalam pada sifat perovskite dengan XPS, TRPL dan memaksimalkan metode dalam substitusi Sn dengan pelarut non-air atau kombinasi dengan methanol/air sebagai pelarut lalu dilakukan

defect passivation untuk meningkatkan keberhasilan dalam substitusi dan improvisasi kualitas film.

DAFTAR PUSTAKA

- Abate, A. (2023). Stable Tin-Based Perovskite Solar Cells. *ACS Energy Letters*, 8(4), 1896–1899.
<https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.3c00282>
- Abbas, M., Xu, X., Rauf, M., & Kyaw, A. K. K. (2024). A Comprehensive Review on Defects-Induced Voltage Losses and Strategies toward Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Photonics*, 11(1).
<https://doi.org/10.3390/photonics11010087>
- Abdulrahim, S. M., Ahmad, Z., Bahadra, J., & Al-Thani, N. J. (2020). Electrochemical impedance spectroscopy analysis of hole transporting material free mesoporous and planar perovskite solar cells. *Nanomaterials*, 10(9), 1–23.
<https://doi.org/10.3390/nano10091635>
- Abib, M. H., Li, J., Yang, H., Wang, M., Chen, T., Enzexu, E., & Jiang, Y. (2021). Direct deposition of Sn-doped CsPbBr₃ perovskite for efficient solar cell application. *RSC Advances*, 11(6), 3380–3389.
<https://doi.org/10.1039/d0ra09202a>
- Agilent. (2021). The Basics of UV-Vis Spectrophotometry. In *The basics of UV-Vis Spectrophotometry* (p. 36).
- Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation*, 5(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
- Al-Shahri, O. A., Ismail, F. B., Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Al-Shetwi, A. Q., Begum, R. A., Al-Muhsen, N. F. O., & Soujeri, E. (2021). Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 125465.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465>
- Ali, M., & Windarta, J. (2020). Pemanfaatan Energi

- Matahari Sebagai Energi Bersih yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 1(2), 68–77.
<https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10059>
- Anusha, A., Yadav, A., Vishnoi, P., & Sharma, D. K. (2025). Mixed metal halide perovskite CsPb_{1-x}Sn_xBr₃ quantum dots: insight into photophysics from photoblinking studies. *Nanoscale*, 5150–5160.
<https://doi.org/10.1039/d4nr04879b>
- Arayro, J., Mezher, R., & Sabbah, H. (2023). Comparative Simulation Study of the Performance of Conventional and Inverted Hybrid Tin-Based Perovskite Solar Cells. *Coatings*, 13(7).
<https://doi.org/10.3390/coatings13071258>
- Ayaydah, W., Raddad, E., & Hawash, Z. (2023). Sn-Based Perovskite Solar Cells towards High Stability and Performance. *Micromachines*, 14(4).
<https://doi.org/10.3390/mi14040806>
- Barsoukov, E., & Macdonald, J. R. (2005). *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Application*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Bartel, C. J., Sutton, C., Goldsmith, B. R., Ouyang, R., Musgrave, C. B., Ghiringhelli, L. M., & Scheffler, M. (2019). New tolerance factor to predict the stability of perovskite oxides and halides. *Science Advances*, 5(2), 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0693>
- Beale, J. R. A. (1973). Solid State Electronic Devices. In *Physics Bulletin* (Vol. 24, Issue 3).
<https://doi.org/10.1088/0031-9112/24/3/014>
- Bello, S., Urwick, A., Bastianini, F., Nedoma, A. J., & Dunbar, A. (2022). An introduction to perovskites for solar cells and their characterisation. *Energy Reports*, 8, 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.205>
- Bhardwaj, A., Marongiu, D., Demontis, V., Simbula, A.,

- Quochi, F., Saba, M., Mura, A., & Bongiovanni, G. (2024). Single Crystal Sn-Based Halide Perovskites. In *Nanomaterials* (Vol. 14, Issue 17). <https://doi.org/10.3390/nano14171444>
- Bisquert, J. (2020). The Physics of Solar Energy Conversion. In *The Physics of Solar Energy Conversion*. <https://doi.org/10.1201/9780429505874>
- Byranvand, M. M., & Saliba, M. (2021). Defect Passivation of Perovskite Films for Highly Efficient and Stable Solar Cells. *Solar RRL*, 5(8). <https://doi.org/10.1002/solr.202100295>
- Campanari, V., Martelli, F., Agresti, A., Pescetelli, S., Nia, N. Y., Di Giacomo, F., Catone, D., O'Keeffe, P., Turchini, S., Yang, B., Suo, J., Hagfeldt, A., & Di Carlo, A. (2022). Reevaluation of Photoluminescence Intensity as an Indicator of Efficiency in Perovskite Solar Cells. *Solar RRL*, 6(8). <https://doi.org/10.1002/solr.202200049>
- De Bastiani, M., Dursun, I., Zhang, Y., Alshankiti, B. A., Miao, X. H., Yin, J., Yengel, E., Alarousu, E., Turedi, B., Almutlaq, J. M., Saidaminov, M. I., Mitra, S., Gereige, I., Alsaggaf, A., Zhu, Y., Han, Y., Roqan, I. S., Bredas, J. L., Mohammed, O. F., & Bakr, O. M. (2017). Inside Perovskites: Quantum Luminescence from Bulk Cs₄PbBr₆ Single Crystals. *Chemistry of Materials*, 29(17), 7108–7113. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02415>
- Ezzeldien, M., Al-Qaisi, S., Alrowaili, Z. A., Alzaid, M., Maskar, E., Es-Smairi, A., Vu, T. V., & Rai, D. P. (2021). Electronic and optical properties of bulk and surface of CsPbBr₃ inorganic halide perovskite a first principles DFT 1/2 approach. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99551-y>
- Feng, J., Han, X., Huang, H., Meng, Q., Zhu, Z., Yu, T., Li, Z., &

- Zou, Z. (2020). Curing the fundamental issue of impurity phases in two-step solution-processed CsPbBr₃ perovskite films. *Science Bulletin*, 65(9), 726–737.
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.01.025>
- Gao, Z., Jiang, Y., Meng, Y., Du, M., & Liu, F. (2024). A Review of the Fabrication of Pinhole-Free Thin Films Based on Electrodeposition Technology: Theory, Methods and Progress. *Molecules*, 29(23).
<https://doi.org/10.3390/molecules29235615>
- Gaiglitz, G. (2008). Ultraviolet and Visible Spectroscopy. In *Handbook of Analytical Techniques* (Vols. 1–2).
<https://doi.org/10.1002/9783527618323.ch16>
- Goel, P., Sundriyal, S., Shrivastav, V., Mishra, S., Dubal, D. P., Kim, K. H., & Deep, A. (2021). Perovskite materials as superior and powerful platforms for energy conversion and storage applications. *Nano Energy*, 80, 105552.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105552>
- Grattan, K. T. . (2004). Optoelectronics of solar cells. In *Optics & Laser Technology* (Vol. 36, Issue 6).
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.01.014>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(7), 651–663. <https://doi.org/10.1002/pip.3726>
- Guo, H., Pei, Y., Zhang, J., Cai, C., Zhou, K., & Zhu, Y. (2019). Doping with SnBr₂ in CsPbBr₃ to enhance the efficiency of all-inorganic perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(36), 11234–11243. <https://doi.org/10.1039/c9tc03359a>
- Hahn, Y. B., Mahmoudi, T., & Wang, Y. (2023). Next-generation solar cells: Principles and materials. In

- Next-Generation Solar Cells: Principles and Materials* (Vol. 4, Issue 1). JENNY STANFORD PUBLISHING.
<https://doi.org/10.1201/9781003372387>
- Hakim, L., Dirgantara, M., & Nawir, M. (2019). Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C Dengan Menggunakan X-Ray Diffraction (X-RD) Di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika Dan Sains*, 1(1), 44–51.
<https://doi.org/10.36873/jjms.v1i1.136>
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Al-Musawi, T. J., Al-Jiboory, A. K., Salman, H. M., Ali, B. M., & Jaszczur, M. (2024). A comprehensive review of international renewable energy growth. *Energy and Built Environment*, December 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.12.002>
- He, B. B. (2018). Two-dimensional X-ray Diffraction. In *Two-dimensional X-ray Diffraction*.
<https://doi.org/10.1002/9781119356080>
- Inamuddin, Ahamed, M. I., Boddula, R., & Rezakazemi, M. (2021). *Fundamentals of Solar Cell Design*. John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA and Scrivener Publishing LLC, 100 Cummings Center, Suite 541J, Beverly, MA 01915, USA © 2021 Scrivener Publishing LLC. <https://doi.org/DOI:10.1002/9781119725022>
- Islam, M. S., Sobayel, K., Al-Kahtani, A., Islam, M. A., Muhammad, G., Amin, N., Shahiduzzaman, M., & Akhtaruzzaman, M. (2021). Defect study and modelling of SnX3-based perovskite solar cells with SCAPS-1D. *Nanomaterials*, 11(5).
<https://doi.org/10.3390/nano11051218>
- Jena, A. K., Kulkarni, A., & Miyasaka, T. (2019). Halide Perovskite Photovoltaics: Background, Status, and Future Prospects [Review-article]. *Chemical Reviews*,

- 119(5), 3036–3103.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00539>
- Ji, S. G., Park, I. J., Chang, H., Park, J. H., Hong, G. P., Choi, B. K., Jang, J. H., Choi, Y. J., Lim, H. W., Ahn, Y. J., Park, S. J., Nam, K. T., Hyeon, T., Park, J., Kim, D. H., & Kim, J. Y. (2022). Stable pure-iodide wide-band-gap perovskites for efficient Si tandem cells via kinetically controlled phase evolution. *Joule*, 6(10), 2390–2405.
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.006>
- Jian, W., Jia, R., Zhang, H. X., & Bai, F. Q. (2020). Arranging strategies for A-site cations: impact on the stability and carrier migration of hybrid perovskite materials. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 7(8), 1741–1749.
<https://doi.org/10.1039/d0qi00102c>
- Jiang, Q., & Zhu, K. (2024). Rapid advances enabling high-performance inverted perovskite solar cells. *Nature Reviews Materials*, 9(6), 399–419.
<https://doi.org/10.1038/s41578-024-00678-x>
- Jiang, Z., Li, J., Li, K., Zhang, R., Qin, Z., Zhang, Y., Wu, B., Ma, Q., Zhang, Y., & Zhang, W. (2024). Controllable Crystallization of Perovskite Films during the Blade-Coating Fabrication Process for Efficient and Stable Solar Cells. *Coatings*, 14(9), 1113.
<https://doi.org/10.3390/coatings14091113>
- Katz, E. A. (2020). Perovskite: Name Puzzle and German-Russian Odyssey of Discovery. In *Helvetica Chimica Acta* (Vol. 103, Issue 6).
<https://doi.org/10.1002/hlca.202000061>
- Kenu E. Sarah. (2020). A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *International Journal of Engineering Research And*, V9(07), 741–749.
<https://doi.org/10.17577/ijertv9is070244>
- Kim, G. Y., Kim, K., Kim, H. J., Jung, H. S., Jeon, I., & Lee, J. W.

- (2023). Sustainable and environmentally viable perovskite solar cells. *EcoMat*, 5(4), 1–25.
<https://doi.org/10.1002/eom2.12319>
- Kim, J. Y., Lee, J. W., Jung, H. S., Shin, H., & Park, N. G. (2020). High-Efficiency Perovskite Solar Cells. *Chemical Reviews*, 120(15), 7867–7918.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00107>
- Kirchatz, T., Marquez, J. S., Stolterfoht, M., & Unold, T. (2020). *Photoluminescence-Based Characterization of Halide Perovskites for Photovoltaics*. Advanced Energy Materials.
- Kumar, S. N., & Naidu, C. B. K. (2021). A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. *Journal of Materiomics*, 7(5), 940–956.
<https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.04.002>
- Kunwu Fu, Ho-Baillie, A. W. Y., Mulmudi, H. K., & Trang, P. T. T. (2019). PEROVSKITE SOLAR CELLS Technology and Practices. In *Apple Academic Press, Inc* (Vol. 4, Issue 1).
- Lasia, A. (2014). Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. In *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications* (Vol. 9781461489). Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8933-7>
- Lee, M. (2017). X-RAY DIFFRACTION FOR MATERIALS RESEARCH: From Fundamentals to Applications. In *X-Ray Diffraction for Materials Research: from Fundamentals to Applications*.
<https://doi.org/10.1201/9781315365282>
- Lei, Y., Xu, Y., Wang, M., Zhu, G., & Jin, Z. (2021). Origin, Influence, and Countermeasures of Defects in Perovskite Solar Cells. *Small*, 17(26), 1–26.
<https://doi.org/10.1002/smll.202005495>
- Li, J., Zhang, H., Wang, S., Long, D., Li, M., Wang, D., & Zhang,

- T. (2018). Inter-conversion between different compounds of ternary Cs-Pb-Br system. *Materials*, 11(5), 1–9. <https://doi.org/10.3390/ma11050717>
- Li, J., Zhao, H., Li, J., Zheng, C., Li, M., Wang, S., Ren, K., Zhang, Y., & Yao, J. (2020). Photoresponse properties and energy gap of CsPbBr₃-CsPb₂Br₅ compound thin film prepared by one-step thermal evaporation method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(6), 4956–4962. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03062-x>
- Li, M., Fan, B., Qiu, Y., & Zhao, X. (2025). Defect Passivation and Doping Engineering for Highly Efficient Perovskite Solar Cells. In *Defect Passivation and Doping Engineering for Highly Efficient Perovskite Solar Cells*. <https://doi.org/10.1201/9781032614182>
- Li, T., Guo, W., & Shi, Q. (2023). Nano-sized double perovskite oxide as bifunctional oxygen electrocatalysts. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(5), 100103. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100103>
- Li, Z., Zhou, F., Yao, H. H., Ci, Z., Yang, Z., & Jin, Z. (2021). Halide perovskites for high-performance X-ray detector. *Materials Today*, 48(xx), 155–175. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.01.028>
- Liang, X., Ge, C., Fang, Q., Deng, W., Dey, S., Lin, H., Zhang, Y., Zhang, X., Zhu, Q., & Hu, H. (2021). Flexible Perovskite Solar Cells: Progress and Prospects. *Frontiers in Materials*, 8(March), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.634353>
- Liu, D., Peng, H., & Sa, R. (2021). The structural, electronic and optical properties of all-inorganic CsPb_{1-x}Sn_xBr₃ perovskite: A theoretical study. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1205(June),

5–10.

<https://doi.org/10.1016/j.comptc.2021.113444>

Liu, S., Zhang, D., Sheng, Y., Zhang, W., Qin, Z., Qin, M., Li, S., Wang, Y., Gao, C., Wang, Q., Ming, Y., Liu, C., Yang, K., Huang, Q., Qi, J., Gao, Q., Chen, K., Hu, Y., Rong, Y., ... Han, H. (2022). Highly oriented MAPbI₃ crystals for efficient hole-conductor-free printable mesoscopic perovskite solar cells. *Fundamental Research*, 2(2), 276–283.

<https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.09.008>

Liu, Y., Kim, B. J., Wu, H., Boschloo, G., & Johansson, E. M. J. (2021). Efficient and Stable FAPbBr₃ Perovskite Solar Cells via Interface Modification by a Low-Dimensional Perovskite Layer. *ACS Applied Energy Materials*, 4(9), 9276–9282.

<https://doi.org/10.1021/acsaem.1c01512>

Maafa, I. M. (2022). All-Inorganic Perovskite Solar Cells: Recent Advancements and Challenges. *Nanomaterials*.

Misture, S. T., & Snyder, R. L. (2011). X-ray Diffraction Crystallography. In *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*.

Miyasaka, T., Jena, A. K., Takeoka, Y., Mitzi, David B., Zhou, Y., & Padture, N. P. (2021). Perovskite Photovoltaics and Optoelectronics: From Fundamentals to Advanced Applications. In T. Miyasaka (Ed.), *Perovskite Photovoltaics and Optoelectronics: From Fundamentals to Advanced Applications*. WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany.

<https://doi.org/10.1002/9783527826391>

Muchlishah, M., Nadhiroh, N., Nugroho, D. A., & Imaduddin, A. (2023). Peningkatan efisiensi sistem PLTS melalui optimasi susunan array panel surya. *Jurnal Eltek*, 21(2), 50–57.

- <https://doi.org/10.33795/eltek.v21i2.3191>
- Munna, N., Abdur, R., Islam, R., Bashar, M. S., Farhad, S. F. U., Kamruzzaman, M., Aziz, S., Shaikh, M. A. A., Hossain, M., & Jamal, M. S. (2023). Influence of Sn doping on the optoelectronic properties of ZnO nanoparticles. *Nanoscale Advances*, 5(18), 4996–5004. <https://doi.org/10.1039/d3na00409k>
- Muttaqin, R. (2023). Pengembangan Buku Panduan Teknik Karakterisasi Material : X-ray Diffractometer (XRD) Panalytical Xpert3 Powder. *Indonesian Journal of Laboratory*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.22146/ijl.v1i1.78970>
- Nazarenko, O., Kotyrba, M. R., Wörle, M., Cuervo-Reyes, E., Yakunin, S., & Kovalenko, M. V. (2017). Luminescent and Photoconductive Layered Lead Halide Perovskite Compounds Comprising Mixtures of Cesium and Guanidinium Cations. *Inorganic Chemistry*, 56(19), 11552–11564. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b01204>
- Noman, M., Shahzaib, M., Jan, S. T., Shah, S. N., & Khan, A. D. (2023). 26.48% efficient and stable FAPbI₃ perovskite solar cells employing SrCu₂O₂ as hole transport layer. *RSC Advances*, 13(3), 1892–1905. <https://doi.org/10.1039/d2ra06535e>
- Orazem, M. E., & Tribollet, B. (2008). Electrochemical Impedance Spectroscopy. In *The Electrochemical Society Series*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9783527809080.catatz0886>
- Pan, J., Zhang, X., Zheng, Y., & Xiang, W. (2021). Morphology control of perovskite film for efficient CsPbIBr₂ based inorganic perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 221(November), 110878.

- <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110878>
- Park, J. H., Yoon, Y. S., & Kim, J. Y. (2023). *Fabrication processes for all-inorganic CsPbBr₃ perovskite solar cells - Park - EcoMat - Wiley Online Library*.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eom2.12407>
- Pastuszak, J., & Wegierek, P. (2022). Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. *Materials*, 1–30.
- Patel, P., Patel, B., Vekaria, E., & Shah, M. (2020). Biophysical economics and management of biodiesel, a harbinger of clean and sustainable energy. *International Journal of Energy and Water Resources*, 4(4), 411–423. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00087-0>
- Pathak, P. K., Roy, D. G., Yadav, A. K., Padmanaban, S., Blaabjerg, F., & Khan, B. (2023). A State-of-the-Art Review on Heat Extraction Methodologies of Photovoltaic/Thermal System. *IEEE Access*, 11(April), 49738–49759.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3277728>
- Peter, L. M. (2023). Electrochemical Impedance Spectroscopy and Related Techniques: From Basics to Advanced Applications. In *Electrochemical Impedance Spectroscopy and Related Techniques: From Basics to Advanced Applications*.
<https://doi.org/10.1142/q0428>
- Pourasl, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports*, 10(September), 3474–3493.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>
- Pradid, P., Sanglee, K., Thongprong, N., & Chuangchote, S. (2021). Carbon electrodes in perovskite

- photovoltaics. *Materials*, 14(20), 1–14.
<https://doi.org/10.3390/ma14205989>
- Prochowicz, D., Trivedi, S., Parikh, N., Saliba, M., Kalam, A., Mahdi Tavakoli, M., & Yadav, P. (2021). In the Quest of Low-Frequency Impedance Spectra of Efficient Perovskite Solar Cells. *Energy Technology*, 9(7).
<https://doi.org/10.1002/ente.202100229>
- Ramanan, C. J., Lim, K. H., Kurnia, J. C., Roy, S., Bora, B. J., & Medhi, B. J. (2024). Towards sustainable power generation: Recent advancements in floating photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 194(February), 114322.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114322>
- Rehman, F., Syed, I. H., Khanam, S., Ijaz, S., Mehmood, H., Zubair, M., Massoud, Y., & Mehmood, M. Q. (2023). Fourth-generation solar cells: a review. *Energy Advances*, 2(9), 1239–1262.
<https://doi.org/10.1039/d3ya00179b>
- Reimer, L. (1998). *Scanning Electron Microscopy Physics of Image Formation and Microanalysis* (Peter W. Hawkes (ed.); Issue 112). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-3896>
- Riede, M., Spoltore, D., & Leo, K. (2021). Organic Solar Cells—The Path to Commercial Success. *Advanced Energy Materials*, 11(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202002653>
- Rodová, M., Brožek, J., Knížek, K., & Nitsch, K. (2003). Phase transitions in ternary caesium lead bromide. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 71(2), 667–673.
- Ryu, S., Nguyen, D. C., Ha, N. Y., Park, H. J., Ahn, Y. H., Park, J. Y., & Lee, S. (2019). Light Intensity-dependent Variation in Defect Contributions to Charge

- Transport and Recombination in a Planar MAPbI₃ Perovskite Solar Cell. *Scientific Reports*, 9(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-56338-6>
- Saif, O. M., Zekry, A. H., Abouelatta, M., & Shaker, A. (2023). A Comprehensive Review of Tandem Solar Cells Integrated on Silicon Substrate: III/V vs Perovskite. *Silicon*, 15(15), 6329–6347.
<https://doi.org/10.1007/s12633-023-02466-8>
- Sanglee, K., Nukunudompanich, M., Part, F., Zafiu, C., Bello, G., Ehmoser, E. K., & Chuangchote, S. (2022). The current state of the art in internal additive materials and quantum dots for improving efficiency and stability against humidity in perovskite solar cells. *Heliyon*, 8(12).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11878>
- Shah, N., Shah, A. A., Leung, P. K., Khan, S., Sun, K., Zhu, X., & Liao, Q. (2023). A Review of Third Generation Solar Cells. *Processes*, 11(6).
<https://doi.org/10.3390/pr11061852>
- Shihab, M. Q. (2002a). Tafsir Al-Mishbah: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an Jilid-06. In *Jakarta : Lentera Hati* (Vol. 6).
- Shihab, M. Q. (2002b). Tafsir Al-Mishbah: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an Jilid 9. In *Jakarta : Lentera Hati* (Vol. 9). <https://archive.org/details/tafsir-al-mishbah-prof-dr.-m.-quraish-shihab-/Tafsir-Al-Mishbah-Jilid-09-Dr.-M.-Quraish-Shihab-pages-deleted/>
- Srinivasan, R., & Fasmin, F. (2021). An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy. *An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy*.
<https://doi.org/10.1201/9781003127932>
- Su, X., Zhang, J., & Bai, G. (2018). Facile synthesis and

- characterization of CsPbBr₃ and CsPb₂Br₅ powders.
Bulletin of Materials Science, 41(2), 5–10.
<https://doi.org/10.1007/s12034-018-1566-6>
- Sudha Gulati, & Richa Jain. (2023). Solar Cells for Ecological Sustainable Development: A Review. *Journal of Advanced Zoology*, 44(S6), 1109–1121.
<https://doi.org/10.17762/jaz.v44is6.2366>
- Suharti, T. (2017). *Dasar-dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrometri Massa untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik* (T. A. Creative (ed.); Issue 112). Aura Anurah Utama Raharja, AURA CV. Anugrah Utama Raharja Anggota IKAPI No.003/LPU/2013.
- Sum, T., & Mathews, N. (2018). Halide Perovskites Photovoltaics, Light Emitting Devices, and Beyond. In T. Sum & N. Mathews (Eds.), *Halide Perovskites*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527800766>
- Surowiak, A., & Wahman, M. (2024). Thermal – Mechanical Delamination for Recovery of Tempered Glass from Photovoltaic Panels. *Energies*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en17174444>
- Syahputra, R., & Soesanti, I. (2021). Renewable energy systems based on micro-hydro and solar photovoltaic for rural areas: A case study in Yogyakarta, Indonesia. *Energy Reports*, 7, 472–490.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.015>
- Talapatra, A., Uberuaga, B. P., Stanek, C. R., & Pilania, G. (2021). A Machine Learning Approach for the Prediction of Formability and Thermodynamic Stability of Single and Double Perovskite Oxides. *Chemistry of Materials*, 33(3), 845–858.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c03402>
- Tan, W. H., & Mohamad-Saleh, J. (2023). Critical Review on Interrelationship of Electro-Devices in PV Solar

- Systems with Their Evolution and Future Prospects for MPPT Applications. *Energies*, 16(2).
<https://doi.org/10.3390/en16020850>
- Tao, L., Qiu, J., Sun, B., Wang, X., Ran, X., Song, L., Shi, W., Zhong, Q., Li, P., Zhang, H., Xia, Y., Müller-Buschbaum, P., & Chen, Y. (2021). Stability of mixed-halide wide bandgap perovskite solar cells: Strategies and progress. *Journal of Energy Chemistry*, 61, 395–415.
<https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.03.038>
- Thoppil, G. S., & Alankar, A. (2022). Predicting the formation and stability of oxide perovskites by extracting underlying mechanisms using machine learning. *Computational Materials Science*, 211, 1–26.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2022.111506>
- Tian, J., Anthony Culley, S., Maier, H. R., & Zecchin, A. C. (2024). Is renewable energy sustainable? Potential relationships between renewable energy production and the Sustainable Development Goals. *Npj Climate Action*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s44168-024-00120-6>
- Ul-Hamid, A. (2018). A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy. In *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-98482-7>
- Ullah, S., Wang, J., Yang, P., Liu, L., Yang, S. E., Xia, T., Guo, H., & Chen, Y. (2021). All-inorganic CsPbBr₃perovskite: A promising choice for photovoltaics. *Materials Advances*, 2(2), 646–683.
<https://doi.org/10.1039/d0ma00866d>
- Vidal, R., Alberola-Borràs, J. A., Sánchez-Pantoja, N., & Mora-Seró, I. (2021). Comparison of Perovskite Solar Cells with other Photovoltaics Technologies from the Point of View of Life Cycle Assessment. In *Advanced Energy and Sustainability Research* (Vol. 2, Issue 5).

- <https://doi.org/10.1002/aesr.202000088>
- Viendyasari, M., Syukri, M., Yandri, E., & Rahmawati, D. (2022). Public Perception of Renewable Energy in Indonesia: Implication for Communication Strategy. *Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi, & Akuntansi (MEA)*, 6(3), 1582–1596. <https://doi.org/10.31955/mea.v6i3.2517>
- Von Hauff, E., & 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>
- Wang, L., Yang, S., Xi, T., Yang, Q., Yi, J., Li, H., & Zhong, J. (2023). Performance Optimization of CsPb(I1-xBrx)3 Inorganic Perovskite Solar Cells with Gradient Bandgap. *Energies*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/en16104135>
- Wu, C., Li, Y., Xia, Z., Ji, C., Tang, Y., Zhang, J., Ma, C., & Gao, J. (2023). Enhancing Photoluminescence of CsPb(Cl_xBr_{1-x})₃ Perovskite Nanocrystals by Fe²⁺ Doping. *Nanomaterials*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/nano13030533>
- Wu, W., Cong, W. Y., Guan, C., Sun, H., Yin, R., Yu, G., & Lu, Y. B. (2020). Investigation of the Mn dopant-enhanced photoluminescence performance of lead-free Cs₂AgInCl₆ double perovskite crystals. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(4), 1815–1819. <https://doi.org/10.1039/c9cp05236d>
- Xu, L., Feng, X., Jia, W., Lv, W., Mei, A., Zhou, Y., Zhang, Q., Chen, R., & Huang, W. (2021). Recent advances and challenges of inverted lead-free tin-based perovskite solar cells. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 14, Issue 8, pp. 4292–4317). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1ee00890k>
- Xue, D. J., Hou, Y., Liu, S. C., Wei, M., Chen, B., Huang, Z., Li,

- Z., Sun, B., Proppe, A. H., Dong, Y., Saidaminov, M. I., Kelley, S. O., Hu, J. S., & Sargent, E. H. (2020). Regulating strain in perovskite thin films through charge-transport layers. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15338-1>
- Yadegarifard, A., Lee, H., Seok, H. J., Kim, I., Ju, B. K., Kim, H. K., & Lee, D. K. (2023). FA/Cs-based mixed Pb–Sn perovskite solar cells: A review of recent advances in stability and efficiency. *Nano Energy*, 112(February), 108481. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108481>
- Yang, H., Wang, H., Wang, K., Liu, D., Zhao, L., Chen, D., Zhu, W., Zhang, J., & Zhang, C. (2023). Recent Progress of Film Fabrication Process for Carbon-Based All-Inorganic Perovskite Solar Cells. *Crystals*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/cryst13040679>
- Yao, H., Zhou, F., Li, Z., Ci, Z., Ding, L., & Jin, Z. (2020). Strategies for Improving the Stability of Tin-Based Perovskite (ASnX₃) Solar Cells. In *Advanced Science* (Vol. 7, Issue 10). <https://doi.org/10.1002/advs.201903540>
- Zhang, L., Mei, L., Wang, K., Lv, Y., Zhang, S., Lian, Y., Liu, X., Ma, Z., Xiao, G., Liu, Q., Zhai, S., Zhang, S., Liu, G., Yuan, L., Guo, B., Chen, Z., Wei, K., Liu, A., Yue, S., ... Ding, L. (2023). Advances in the Application of Perovskite Materials. *Nano-Micro Letters*, 15(1), 1–48. <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01140-3>
- Zhang, M., Chen, K., Wei, Y., Hu, W., Cai, Z., Zhu, J., Ye, Q., Ye, F., Fang, Z., Yang, L., & Liang, Q. (2023). Strategies for Optimizing the Morphology of CsSnI₃ Perovskite Solar Cells. *Crystals*, 13(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/cryst13030410>
- Zhang, Y., Jiang, Z., Li, J., Meng, G., Guo, J., & Zhang, W.

(2024). Preparation of Highly Efficient and Stable All-Inorganic CsPbBr₃ Perovskite Solar Cells Using Pre-Crystallization Multi-Step Spin-Coating Method. *Coatings*, 14(7).

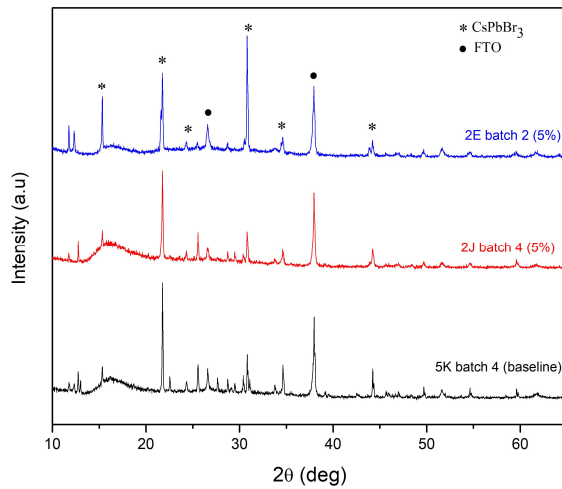
<https://doi.org/10.3390/coatings14070918>

Zhao, Y., & Zhu, K. (2016). Organic-inorganic hybrid lead halide perovskites for optoelectronic and electronic applications. *Chemical Society Reviews*, 45(3), 655–689. <https://doi.org/10.1039/c4cs00458b>

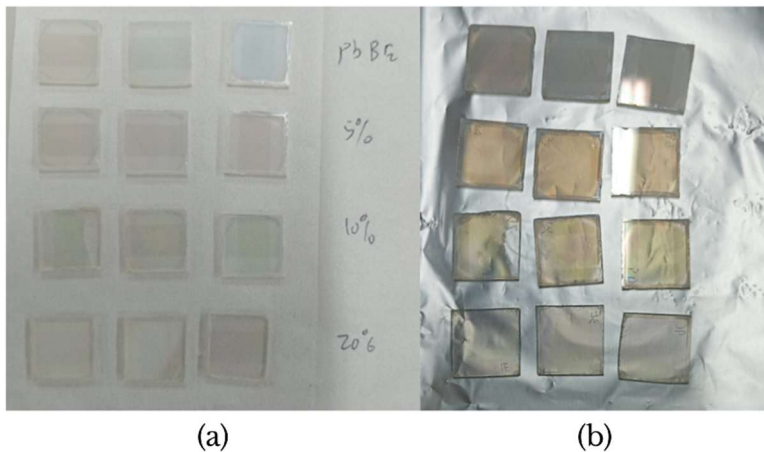
Zhou, J., Fu, S., Zhou, S., Huang, L., Wang, C., Guan, H., Pu, D., Cui, H., Wang, C., Wang, T., Meng, W., Fang, G., & Ke, W. (2024). Mixed tin-lead perovskites with balanced crystallization and oxidation barrier for all-perovskite tandem solar cells. *Nature Communications*, 15(1), 1–10.

<https://doi.org/10.1038/s41467-024-46679-w>

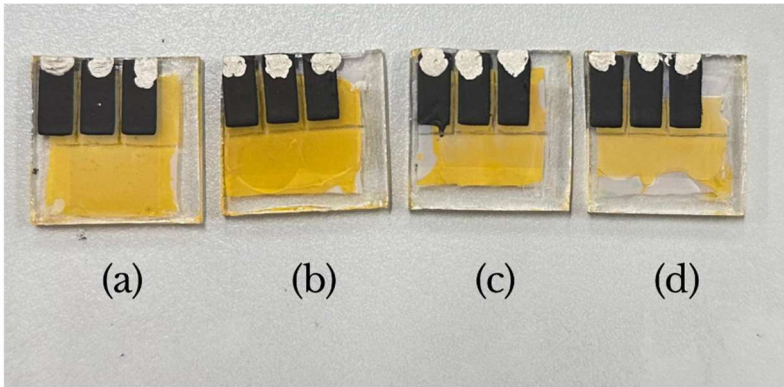
LAMPIRAN



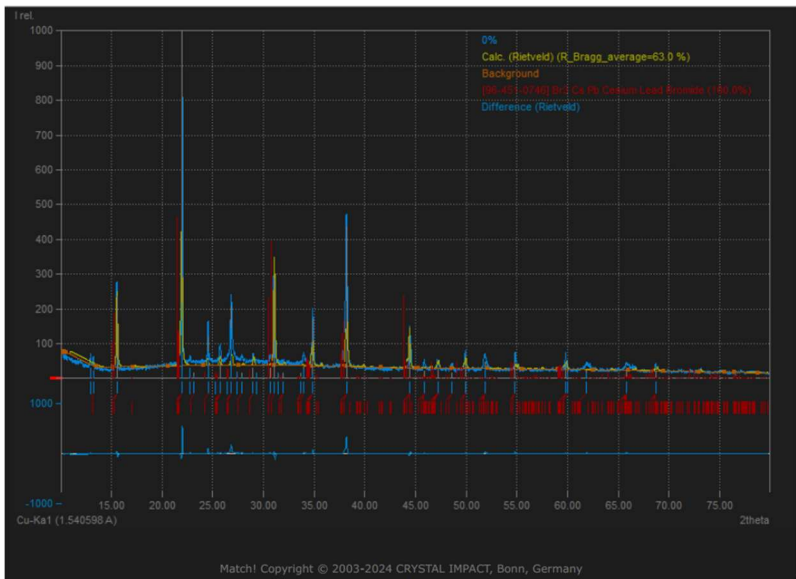
Lampiran 1 Pola xrd batch 2 (*liquid-mix*), batch 4 (*powder-mix*)



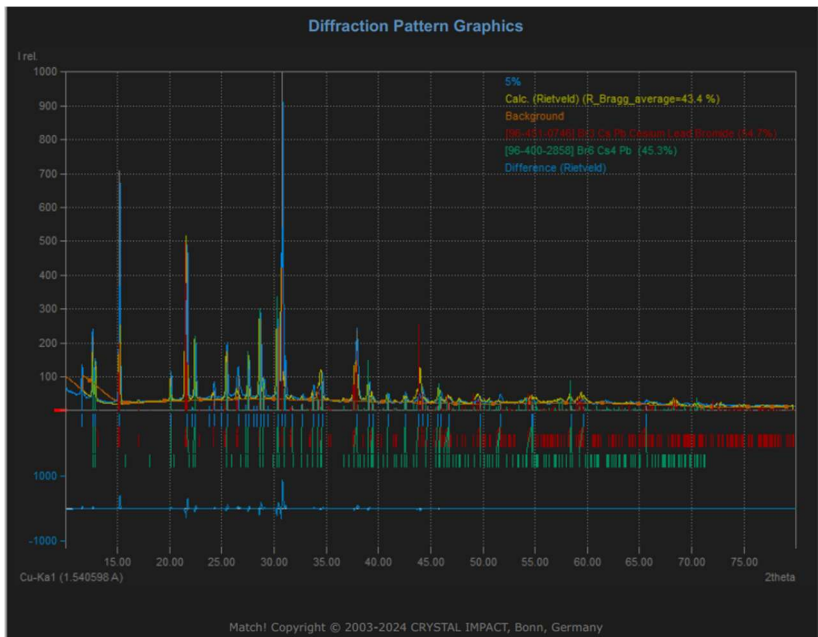
Lampiran 2 *layer pertama* meotde *two-step* pelarut air (H_2O) (a) di atas *tisu*, (b) di atas *aluminium foil*



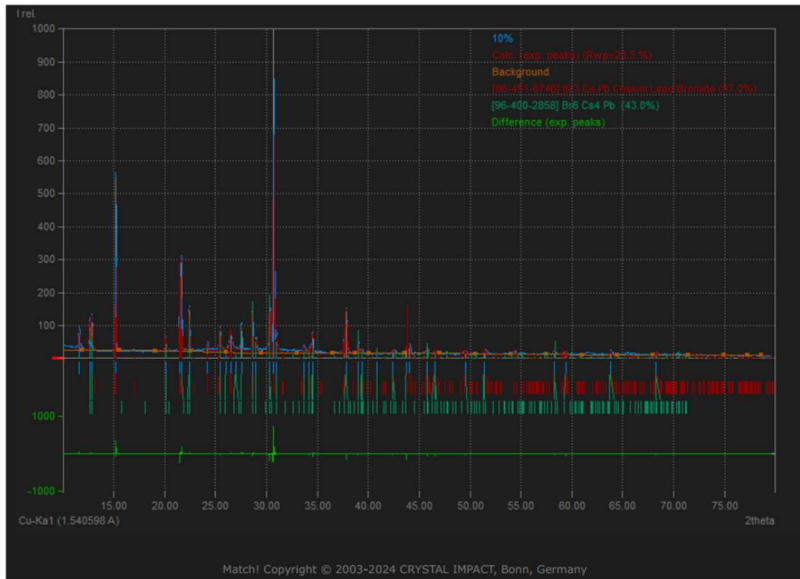
Lampiran 3 Device sel surya untuk uji karakterisasi (a) CsPbBr_3 , (b) Sn 5%, (c) Sn 10%, (d) Sn 20%



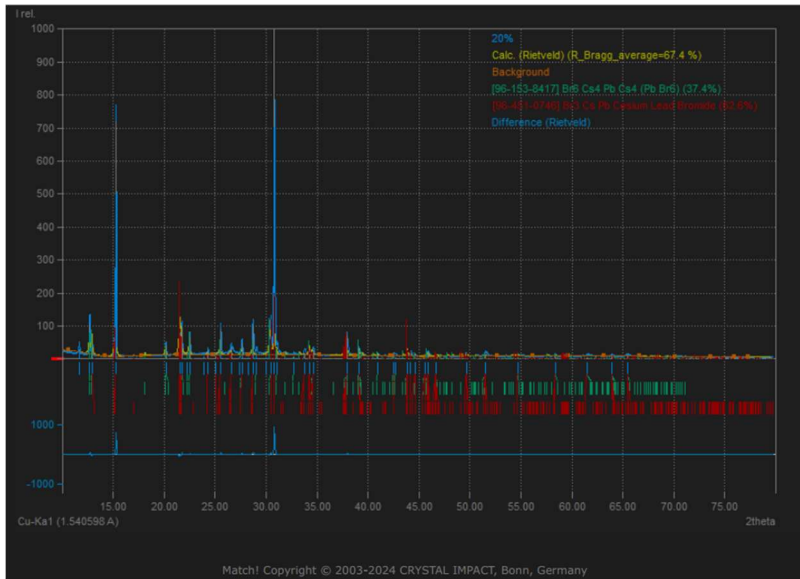
Lampiran 4 hasil Match! analisis fase pada sampel CsPbBr_3



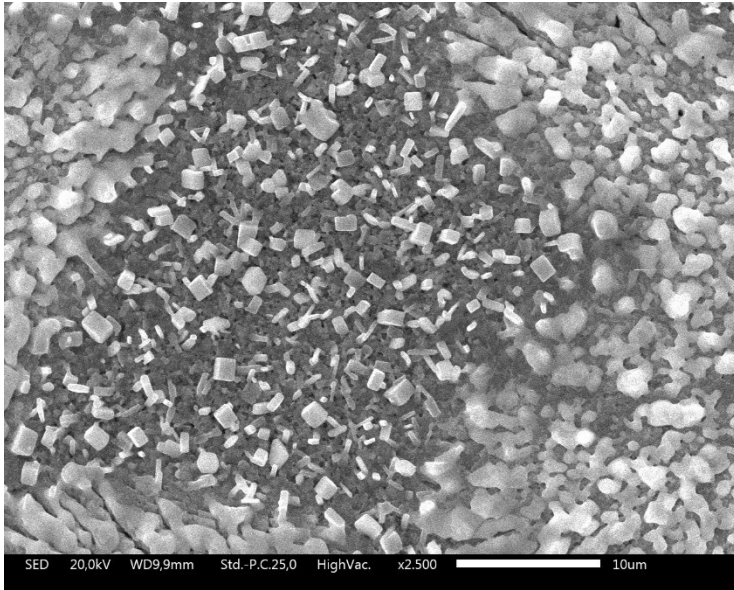
Lampiran 5 Hasil Match! analisis fase pada sampel Sn 5%



Lampiran 6 Hasil Match! analisis fase pada sampel Sn 10%



Lampiran 7 Hasil Match! analisis fase pada sampel Sn 20%



Lampiran 8 SEM variasi Sn 10% *xoom in* 2500x

Lampiran perhitungan

Untuk mengetahui nilai *d-spacing* dari hasil uji xrd digunakan persamaan untuk perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\frac{\theta}{2})}$$

Untuk mengetahui parameter kisi hasil uji xrd pada struktul kristal orthorhombik dan ukuran kristalit menggunakan:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

D = ukuran kristalit

K = konstanta *Scherrer* (0,94)

λ = panjang gelombang x-ray (1,5406 Å)

β = *Full width at half maximum* (FWHM)
dari 2theta dalam radian

d = jarak antar bidang (*interplanar space*)

h, k, l = indeks miller

a, b, c = panjang unit sel (Å)

- *Goldschmidt tolerance factor*

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

$r_A = \text{Cs}^+ = 1,88 \text{ Å}$

$r_X = \text{Br}^- = 1,96 \text{ Å}$

$r_B = \text{Pb}^{2+} \text{ dan } \text{Sn}^{2+} = 1,19 \text{ Å dan } 1,18 \text{ Å}$

- CsPbBr₃

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

$$t = \frac{1,88 \text{ Å} + 1,96 \text{ Å}}{\sqrt{2(1,19 \text{ Å} + 1,96 \text{ Å})}}$$

$$t = \frac{3,84}{1,414 \times 3,15}$$

$$t = 0,86199$$

- CsPbBr₃: Sn 5%

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

$$t = \frac{1,88 + 1,96}{\sqrt{2} [(0,95 \times 1,19) + (0,05 \times 1,18)] + 1,96}$$

$$t = \frac{3,84}{\sqrt{2} (1,1895 \text{ Å} + 1,96 \text{ Å})}$$

$$t = 0,86213$$

- CsPbBr₃: Sn 10%

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

$$t = \frac{1,88 + 1,96}{\sqrt{2} [(0,90 \times 1,19) + (0,10 \times 1,18)] + 1,96}$$

$$t = \frac{3,84}{\sqrt{2 (1,1890 \text{ \AA} + 1,96 \text{ \AA})}}$$

$$t = 0,86227$$

- CsPbBr₃: Sn 20%

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

$$t = \frac{1,88 + 1,96}{\sqrt{2([(0,80 \times 1,19) + (0,20 \times 1,18)] + 1,96)}}$$

$$t = \frac{3,84}{\sqrt{2 (1,1880 \text{ \AA} + 1,96 \text{ \AA})}}$$

$$t = 0,86254$$

- Perhitungan manual parameter Sel Surya
Sel Surya terbaik dari setiap variasi

- CsPbBr₃

$$\text{PCE} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}}{100 \text{ mW}} = \frac{6,57 \times 1,275 \times 86}{100} = 7,204$$

$$= 7,2\%$$

- CsPbBr₃: Sn 5%

$$\text{PCE} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}}{100 \text{ mW}} = \frac{3,68 \times 1,081 \times 47,4}{100} = 1,886$$

$$= 1,9\%$$

- CsPbBr₃: Sn 10%

$$\text{PCE} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}}{100 \text{ mW}} = \frac{2,11 \times 1,141 \times 0,5}{100} = 1,192$$

$$= 1,19\%$$

CsPbBr₃: Sn 20%

$$\text{PCE} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}}{100 \text{ mW}} = \frac{1,61 \times 0,913 \times 0,549}{100} = 0,807$$

$$= 0,81\%$$

- Ukuran kristalit, *d-spacing*, dan Parameter Kisi

$$\blacksquare \quad D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

CsPbBr₃

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)	G(Y)
Long Name	K	A	peak positi	FWHM	L	L	Col(K)*Col
Units		λ			nm	nm	
Comments							
1	0.94	1.5406	12.71307	0.09284	89.9255	88.82321	88.82321
2	0.94	1.5406	15.31001	0.08616	97.16769	95.44351	95.44351
3	0.94	1.5406	21.74956	0.09726	86.87115	83.77907	83.77907
4	0.94	1.5406	24.31469	0.10002	84.86015	81.09651	81.09651
5	0.94	1.5406	26.59497	0.16575	51.4386	48.71733	48.71733
6	0.94	1.5406	30.82	0.11373	75.6773	70.33377	70.33377
7	0.94	1.5406	34.62832	0.13127	66.20842	60.34419	60.34419
8	0.94	1.5406	37.9545	0.18625	47.11011	42.1282	42.1282
9	0.94	1.5406	44.22674	0.14701	60.92216	52.28903	52.28903
10	0.94	1.5406	49.69371	0.17914	51.04252	42.03029	42.03029
11	0.94	1.5406	51.6395	0.31675	29.10042	23.58018	23.58018
12	0.94	1.5406	54.61693	0.17591	53.08449	41.91128	41.91128
13	0.94	1.5406	59.59438	0.1417	67.47694	50.81413	50.81413
14							
15							
16			CsPbBr3				
17							
18							
19							
20							
21							
22							

CsPbBr₃: Sn 5%

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	G(Y) μ	E(Y) μ	F(Y)
Long Name	K	A	peak position 2 θ	FWHM	L	L	
Units							
Comments							
1	0.94	1.5406	11.72133	0.11714	71.20501	70.4626	
2	0.94	1.5406	12.7397	0.09617	86.81398	85.74538	
3	0.94	1.5406	12.98531	0.1042	80.14316	79.11844	
4	0.94	1.5406	15.31302	0.08425	99.37089	97.60693	
5	0.94	1.5406	20.20012	0.10226	82.41703	79.88239	
6	0.94	1.5406	21.73473	0.15392	54.89136	52.9402	
7	0.94	1.5406	22.54083	0.11038	76.64897	73.72123	
8	0.94	1.5406	24.30757	0.10986	77.25832	73.8338	
9	0.94	1.5406	25.55337	0.12343	68.92993	65.5587	
10	0.94	1.5406	26.59221	0.24627	34.62013	32.78898	
11	0.94	1.5406	27.64866	0.1194	71.56514	67.47912	
12	0.94	1.5406	28.74447	0.11979	71.50367	67.09809	
13	0.94	1.5406	30.42702	0.14722	58.40716	54.3851	
14	0.94	1.5406	30.81802	0.12284	70.06463	65.11802	
15	0.94	1.5406	37.92811	0.27047	32.43821	29.01246	
16							
17							
18			CsPbBr ₃ : Sn 5%				
19							

CsPbBr₃: Sn 10%

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y) μ	F(Y) μ	G(Y)
Long Name	K	A	peak position 2 θ	FWHM	L	L	
Units							
Comments							
1	0.94	1.5406	11.72263	0.1312	63.57442	62.91143	
2	0.94	1.5406	12.28018	2.09201	3.9891	3.94346	
3	0.94	1.5406	12.9856	0.07184	116.24332	114.75695	
4	0.94	1.5406	15.31692	0.07194	116.37525	114.3084	
5	0.94	1.5406	20.20219	0.09431	89.36479	86.61592	
6	0.94	1.5406	21.73605	0.14063	60.07891	57.94309	
7	0.94	1.5406	22.53581	0.11526	73.40308	70.60056	
8	0.94	1.5406	24.30827	0.13077	64.90487	62.02776	
9	0.94	1.5406	25.54999	0.13239	64.2644	61.12217	
10	0.94	1.5406	26.59213	0.20806	40.97807	38.81065	
11	0.94	1.5406	27.64653	0.12438	68.69946	64.77765	
12	0.94	1.5406	28.7421	0.13034	65.71566	61.66735	
13	0.94	1.5406	29.09004	0.17479	49.04221	45.94904	
14	0.94	1.5406	30.42112	0.15778	54.49729	50.74589	
15	0.94	1.5406	30.8161	0.10727	80.23398	74.5701	
16	0.94	1.5406	31.09013	0.16487	52.23752	48.48572	
17	0.94	1.5406	33.80282	0.19343	44.83239	41.04309	
18	0.94	1.5406	34.62933	0.19494	44.58399	40.63486	
19	0.94	1.5406	37.92862	0.26063	33.66296	30.10777	
20	0.94	1.5406	39.15102	0.13972	63.02862	55.95317	
21							
22			CsPbBr ₃ : Sn 10%				
23							
24							

CsPbBr₃: Sn 20%

	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)
Long Name	K	A	peak position 2thet	FWHM	L	L
Units			2θ			
Comments						
1	0.94	1.5406	11.72427	0.11	75.82706	75.03606
2	0.94	1.5406	12.74321	0.08172	102.16506	100.90682
3	0.94	1.5406	12.9864	0.10512	79.44184	78.42592
4	0.94	1.5406	15.31346	0.07257	115.3645	113.31651
5	0.94	1.5406	20.20152	0.09664	87.2101	84.52769
6	0.94	1.5406	21.71738	0.23948	35.27907	34.02702
7	0.94	1.5406	22.54003	0.10762	78.61458	75.61197
8	0.94	1.5406	25.55581	0.10718	79.38106	75.49796
9	0.94	1.5406	26.60782	0.24577	34.69168	32.85463
10	0.94	1.5406	27.65217	0.11335	75.38547	71.08025
11	0.94	1.5406	28.74411	0.11768	72.78567	68.30121
12	0.94	1.5406	30.44524	0.19375	44.38232	41.32247
13	0.94	1.5406	30.81266	0.1048	82.12431	76.32825
14	0.94	1.5406	37.92353	0.31364	27.97297	25.01947
15					--	--
16					--	--
17					--	--
18			CsPbBr ₃ : Sn 20%		--	--
19					--	--
20					--	--
21						
22						
23						
24						

Multi-step CsPbBr₃: Sn 10%

	G1(Y)	A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)
Long Name	K	lambda	2theta	FWHM		crystallite size	
Units							
Comments							
1	0.94	1.5406	11.74615	0.09916		84.11799	
2	0.94	1.5406	15.31159	0.08674		96.51814	
3	0.94	1.5406	21.75578	0.10595		79.74682	
4	0.94	1.5406	23.51527	0.1201		70.5677	
5	0.94	1.5406	26.59964	0.23654		36.04477	
6	0.94	1.5406	30.82161	0.11678		73.70109	
7	0.94	1.5406	35.54912	0.18237		47.77807	
8	0.94	1.5406	37.9441	0.26183		33.51023	
9	0.94	1.5406	47.99383	0.21648		41.95478	
10						--	
11						--	
12						--	
13			--			--	
14						--	
15			Multi-step CsPbBr ₃ Sn 10%			--	
16						--	
17						--	
18						--	
19						--	
20						--	
21							
22							
23							
24							

d-spacing

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

CsPbBr₃

Peak 15,3072/21,744/30,8049/37,9484

Peak 15,3072

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin\left(\frac{15,3072}{2}\right)}$$

$$d = 5,78384$$

Peak 21,744

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin(\frac{21,744}{2})}$$

$$d = 4,08389$$

Peak 30,8049

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin(\frac{30,8049}{2})}$$

$$d = 2,90025$$

Peak 37,9484

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin(\frac{37,9484}{2})}$$

$$d = 2,36912$$

CsPbBr₃: Sn 5%

Peak 15,3072/21,744/30,4215/37,9484

Peak 30,4215

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin(\frac{30,4215}{2})}$$

$$d = 2,93593$$

CsPbBr₃: Sn 10%

Peak 15,3072/21,7242/30,8049/37,9484

Peak 21,7242

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin(\frac{21,7242}{2})}$$

$$d = 4,08765$$

CsPbBr₃: Sn 20%

Peak 15,3072/21,744/30,8049/37,9282

Peak 37,9282

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin(\frac{37,9282}{2})}$$

$$d = 2,37033$$

Multi-step CsPbBr₃: Sn 10%

Peak

11,7557 15,3072/21,744/30,8049/37,9484

Peak 11,7557

$$d = \frac{1,5406}{2 \cdot \sin(\frac{11,7557}{2})}$$

$$d = 7,52187$$

Parameter Kisi

Kisi struktur kristal Oorthorhombik

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

Misal: $X = \frac{1}{a^2}, Y = \frac{1}{b^2}, Z = \frac{1}{c^2}$

CsPbBr₃

Peak 15,307 dengan hkl (020)

$$\begin{aligned}\frac{1}{d^2} &= \frac{4}{b^2} \\ \frac{1}{5,78374^2} &= 4Y \\ Y &= \frac{0,0298}{4} \\ \frac{1}{b^2} &= 0,00747347326 \\ b &= \sqrt{\frac{1}{0,00747}} \\ b &= 11,567 \text{ \AA}\end{aligned}$$

Peak 21,744 dengan hkl (002)

$$\begin{aligned}\frac{1}{d^2} &= \frac{4}{c^2} \\ \frac{1}{4,08389^2} &= 4Z \\ Z &= \frac{0,0599586}{4} \\ \frac{1}{c^2} &= 0,01498966535\end{aligned}$$

$$c = \sqrt{\frac{1}{0,01498}}$$

$$c = 8,167 \text{ \AA}$$

Peak 30,804 dengan hkl (202)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{a^2} + \frac{4}{c^2}$$

$$\frac{1}{2,90025^2} = 4X + 4Z$$

$$0,1188855658 = 4X + 4(0,01498966535)$$

$$4X = 0,1188855658 - 0,0599586614$$

$$X = \frac{0,0589269044}{4}$$

$$X = 0,0147317261$$

$$\frac{1}{a^2} = 0,0147317261$$

$$a = \sqrt{\frac{1}{0,0147317261}} = 8,239 \text{ \AA}$$

CsPbBr₃: Sn 5%

Peak 30,4215 dengan hkl (202)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{a^2} + \frac{4}{c^2}$$

$$\frac{1}{2,90025^2} = 4X + 4Z$$

$$0,1160135207 = 4X + 4(0,01498966535)$$

$$4X = 0,1160135207 - 0,0599586614$$

$$X = \frac{0,0560548593}{4}$$

$$X = 0,01401371483$$

$$\frac{1}{a^2} = 0,01401371483$$

$$a = \sqrt{\frac{1}{0,01401371483}} = 8,447 \text{ \AA}$$

CsPbBr₃: Sn 20%

Peak 21,7242 dengan hkl (002)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{c^2}$$

$$\frac{1}{4,08765^2} = 4Z$$

$$Z = \frac{0,0598484069}{4}$$

$$\frac{1}{c^2} = 0,01496210172$$

$$c = \sqrt{\frac{1}{0,01496210172}}$$

$$c = 8,175 \text{ \AA}$$

DAFTAR RIWAYAT HIDUP**A. Identitas Diri**

Nama : Mohammad Syaoqi Ramadhan
Tempat, Tanggal lahir : Indramayu, 24 Nopember 2001
Alamat : Desa Sukawera, Kecamatan.
Kertasemaya, Kabupaten
Indramayu, Jawa Barat
No. Telepon : 0895393822292
Email : MSyaoqi24@gmail.com

B. Riwayat Pendidikan

1. SD N Sukawera (2008 – 2014)
2. SMP N 1 Jatibarang (2014 – 2017)
3. SMA A Wahid Hasyim Jombang (2017 – 2020)

Semarang, 10 Juni 2025



Mohammad Syaoqi Ramadhan

NIM. 2108026017