

Studi Kelayakan

Halide Perovskite sebagai Penanda Kimia dalam Industri Minyak dan Gas



Tim Penulis:

Ir. Gede W.P. Adhyaksa, Ph.D.
Dr. Fayza Yulia, S.T., M.T.
Muhammad Suryadika
M Zaki Ramdhan



UNIVERSITAS PERTAMINA

Studi Kelayakan

**Halide Perovskite sebagai Penanda Kimia
dalam Industri Minyak dan Gas**

*Ir. Gede W.P. Adhyaksa, Ph.D.
Dr. Fayza Yulia, S.T., M.T.
Muhammad Suryadika
M Zaki Ramdhan*

EDISI PERTAMA

2026

Studi Kelayakan - Halide Perovskite sebagai Penanda Kimia dalam Industri Minyak dan Gas

Penulis: Ir. Gede W.P. Adhyaksa, Ph.D.; Dr. Fayza Yulia, S.T., M.T.; Muhammad Suryadika; M Zaki Ramdhan

ISBN:

Editor: Uha Julacha

Penerbit: Universitas Pertamina

Cetakan Pertama, 2026

Edisi Pertama, 2026



Universitas Pertamina Jl. Teuku Nyak Arief, Simprug,
Kebayoran Lama, Jakarta Selatan 12220
Telepon : 021-29044308
Website : <https://universitaspertamina.ac.id/>
Email : info@universitaspertamina.ac.id

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk tidak terbatas pada memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

UNDANG-UNDANG NO.28 TAHUN 2014 TENTANG HAK CIPTA

1.	Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa ijin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta yang meliputi penerjemahan dan pengadaptasian Ciptaan untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah) .
2.	Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa ijin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta yang meliputi penerbitan, penggandaan dalam segala bentuknya, dan pendistribusian Ciptaan untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah) .
3.	Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada poin kedua di atas yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah) .

Adhyaksa, G.W.P.

Studi Kelayakan - Halide Perovskite sebagai Penanda Kimia dalam Industri Minyak dan Gas

Jakarta: Penerbit Universitas Pertamina, 2026
1 jil., ix, 83 hlm., 18 × 25 cm

ISBN.

1. Teknik Kimia
I. Judul

2. Studi Kelayakan
II. Adhyaksa, G.W.P

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku Studi Kelayakan yang berjudul **Halide Perovskite sebagai Penanda Kimia dalam Industri Minyak dan Gas** dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai bahan referensi dan pedoman dalam memahami konsep, metode, serta tahapan analisis studi kelayakan yang diperlukan dalam pengambilan keputusan suatu rencana usaha atau proyek.

Studi kelayakan merupakan aspek penting dalam perencanaan karena berfungsi untuk menilai kelayakan suatu kegiatan dari berbagai sudut pandang, baik teknis, pasar, finansial, manajemen, maupun aspek lingkungan. Oleh karena itu, buku ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif dan sistematis, khususnya bagi mahasiswa, akademisi, maupun praktisi yang berkecimpung dalam bidang perencanaan dan pengembangan proyek.

Penyusunan buku ini tidak terlepas dari berbagai sumber pustaka dan masukan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam proses penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi pembaca dalam memahami dan menerapkan studi kelayakan secara tepat.

Akhir kata, semoga buku ini dapat digunakan sebagaimana mestinya dan menjadi referensi yang berguna dalam kegiatan akademik maupun praktis.

Jakarta, Januari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan	2
1.2.1 Tujuan Umum.....	2
1.2.2 Tujuan Khusus	2
BAB 2 KERANGKA REGULASI	4
2.1 Regulasi Line Tacer Di Industri Minyak Dan Gas	4
2.1.1 Internasional	4
2.1.2 Indonesia.....	7
2.2 Standar Atau Prosedur Analisis Dampak Lingkungan (Amdal).....	11
2.2.1 Tujuan EIA	11
2.2.2 Regulasi dan Standar Terkait EIA	12
BAB 3 TEKNOLOGI YANG DITERAPKAN	13
3.1 Gambaran umum line tracer	13
3.2. Material yang digunakan pada aplikasi line tracer	14
3.2.1 Uranine	14
3.2.2 Eosine Y.....	14
3.2.3 Sulpho-Rhodamine G	15
3.2.4 Sulpho-Rhodamine B	15
3.2.5 Rhodamine B.....	15
3.2.6 Rhodamine WT.....	16

3.2.7	Pyranine	16
3.2.8	Na-naphthionate.....	17
3.2.9	Tinopal CBS-X	17
3.2	Metodologi	17
3.3.1	SWTT	18
3.3.2	IWTT	19
3.3.3	Partitioning tracer	20
3.3.4	Non-Partitioning Tracer	20
3.3.5	Push an Pull	20
3.3.6	Flow Line Tracer	21
3.3	Perovskite yang diusulkan untuk line tracer.....	25
3.4.1	Bahan	25
3.4.2	Proses Sintesis	26
3.4	Karakterisasi Material.....	34
3.5.1	XRD.....	34
3.5.2	UV-VIS	34
3.5.3	FTIR	34
3.5.4	Stability Test	35
3.5.5	SEM.....	35
3.5.6	TGA dan DSC.....	35
3.5.7	Pressure Resistance Test	36
3.5	Pengujian Perovskite sebagai Line Tracer.....	36
3.6.1	Stabilitas kimia dan Fisik	36
3.6.2	Respon Optik	37
3.6.3	Konsentrasi dan Limit Deteksi (LOD).....	37
3.6.4	Waktu Muncul (Time Breakthrough)	37
3.6.5	Karakterisasi Struktural	37
3.6.6	Pengujian Biodegradability	37

3.6.7 Pengujian Toksisitas	38
BAB 4 ANALISIS PASAR	40
4.1 Potensi Pasar.....	40
4.1.1 Ringkasan	40
4.1.2 Analisis Segmentasi Pasar	42
4.1.3 Lonjakan dan Perlambatan Pertumbuhan	43
4.1.4 Distribusi Statistik Pasar (2018-2033).....	45
4.2 Permintaan Pasar	46
4.2.1 Permintaan Pasar - Pemantauan Lingkungan	48
4.2.2 Permintaan Pasar – Industri Kimia.....	50
4.3 Potensi Pasar <i>Premium Green Chemicals</i>	51
4.4 Karakteristik Market Pengguna	52
4.4.1 Upstream.....	52
4.4.2 Midstream.....	53
4.4.3 Downstream	54
4.5 Lanskap Persaingan	56
4.6 Analisis Strategi.....	57
4.7 Perbandingan Spesifikasi Kompetitor	58
4.8 Strategi Positioning untuk Halide Perovskite	60
BAB 5 ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN.....	62
5.1 Toksisitas Material.....	62
5.2 Dampak Lingkungan	63
BAB 6 ANALISIS KEUANGAN	67
6.1 Ruang Lingkup analisis Keuangan	67
6.2 Asumsi Umum.....	68
6.3 Analisis Biaya.....	68
6.3.1 Biaya Peralatan	68
6.3.2 Biaya Bahan.....	71

6.3.3 Biaya Pengujian.....	73
6.3.4 Biaya Energi	74
REFERENSI	77
BIOGRAFI PENULIS.....	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Regulasi dan Standar Internasional Terkait Line Tracer	4
Tabel 2.2 Regulasi Nasional Terkait Penggunaan Line Tracer	7
Tabel 2.3 Regulasi Nasional Terkait EIA dan Pengelolaan Lingkungan untuk Penggunaan Tracer.....	12
Tabel 3.1 Material yang Digunakan sebagai Chemical Line Tracer.....	23
Tabel 3.2 Bahan yang digunakan untuk produksi perovskite berbasis Line Tracer	25
Tabel 4.1 Nilai Pasar Global Fluorescent Tracer, Berdasarkan Sektor Pengguna Akhir (2018–2033).....	40
Tabel 4.2 Lonjakan dan Perlambatan Pertumbuhan Pasar Fluorescent Tracer per Sektor (2022–2033)	43
Tabel 4.3 Segmentasi dan Karakteristik Pelanggan – Upstream	52
Tabel 4.4 Segmentasi dan Karakteristik Pelanggan – <i>Midstream</i>	53
Tabel 4.5 Segmentasi dan Karakteristik Pelanggan – Downstream	55
Tabel 4.6 Analisis SWOT Perovskite Halide Fluorescent Taggant.....	57
Tabel 4.7 Perbandingan Karakteristik Kompetitor dan Perovskite Halide pada Aplikasi Fluorescent Taggant di Industri Migas	58
Tabel 4.8 Peluang Penggunaan Perovskite sebagai Line Tracer.....	60
Tabel 5.1 Kandungan Toxicity Material pada Lingkungan.....	63
Tabel 5.2 kriteria dalam pelarut hijau (green solvent)	64
Tabel 5.3 Material Perovskite Dengan 12 Kriteria Green Solvent	66
Tabel 6.1 Ringkasan Analisis Keuangan.....	68
Tabel 6.2 Estimasi biaya peralatan skala laboratorium.....	69
Tabel 6.3 Estimasi Biaya peralatan skala produksi percontohan	70
Tabel 6.4 Ringkasan Biaya Bahan Perovskite	72
Tabel 6.5 Biaya bahan yang dibutuhkan dalam formulasi lab	72
Tabel 6.6 Biaya bahan untuk skala produksi percontohan.....	73
Tabel 6.7 Biaya pengujian laboratorium	74
Tabel 6.8 Biaya energi skala laboratorium.....	75
Tabel 6.9 Biaya energi skala produksi percontohan	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Klasifikasi umum line tracers.	14
Gambar 3.2 Klasifikasi metode pada line tracers di Reservoir.	18
Gambar 3.3 Schematic diagram SWTT	19
Gambar 3.4 Schematic Diagram IWTT	20
Gambar 3.5 Schematic Diagram Push and Pull	21
Gambar 3.6 Schematic Diagram Flow Line Tracer	22
Gambar 3.7 Schematic diagram Liquid-assisted precipitation	27
Gambar 3.8 Schematic Slot-die coating.....	28
Gambar 3.9 Schematic Diagram Hybrid Deposition	29
Gambar 3.10 Schematic diagram Solvothermal process	30
Gambar 3.11 Schematic diagram Electrospinning.....	31
Gambar 3.12 Schematic diagram Microwave-Assisted Synthesis	32
Gambar 3.13 Inkjet Printing	33
Gambar 3.14 Mind map perovskite measurement	38
Gambar 4.1 Pertumbuhan Fluorescent Tracer 2018-2023	42
Gambar 4.2 Distribusi Market Setiap Bidang.....	45
Gambar 4.3 Pertumbuhan Fluorescent Tracer Market.....	46
Gambar 4.4 Peluang pasar Fluorescent Tracer	48
Gambar 4.5 Peluang pasar Fluorescent Tracer untuk Sektor Monitoring Lingkungan	49
Gambar 4.6 Peluang pasar Fluorescent Tracer untuk sektor Industri Kimia	50
Gambar 4.7 Prediksi Pasar Green Chemicals	51
Gambar 4.8 Segmentasi Pasar Green Chemicals Setiap Wilayah.....	51
Gambar 4.9 Segmentasi Pasar untuk Line Tracer	56

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam industri minyak dan gas, pengelolaan sumur tua menghadirkan tantangan kompleks seiring dengan penurunan tekanan reservoir, menurunnya laju produksi, dan ketidakpastian distribusi jalur aliran fluida bawah permukaan (Yunasa, 2022). Untuk mempertahankan produksi, berbagai strategi Enhanced Oil Recovery (EOR) telah diadopsi, disertai dengan integrasi teknologi pemantauan reservoir yang lebih presisi. Salah satu pendekatan pemantauan yang krusial adalah penggunaan pelacak kimia, yang berfungsi untuk melacak dinamika aliran fluida injeksi dan produksi di dalam sistem pori reservoir (Dugstad et al., 2013).

Di antara berbagai teknologi Pelacak, pelacak berbasis fluoresen telah menjadi metode unggulan karena kemampuan deteksi ultra-sensitif pada konsentrasi sangat rendah, serta kompatibilitasnya dengan perangkat deteksi yang relatif sederhana. Metode ini dikenal sebagai *line tracer*, melibatkan injeksi zat penjejak berfluoresen langsung ke dalam aliran fluida di pipa produksi atau injeksi, dengan tujuan untuk memetakan pergerakan fluida secara spasial dan temporal di dalam reservoir (Khmelnitskiy et al., 2022a). Teknologi ini memberikan wawasan kritis terhadap jalur dominan aliran, efisiensi injeksi, serta deteksi potensi bypass atau kebocoran. Namun demikian, tracer fluoresen konvensional seperti naphthionate, uranin, dan rhodamine menunjukkan keterbatasan serius saat diterapkan pada kondisi ekstrem sumur tua seperti temperatur tinggi, tekanan tinggi, serta komposisi kimia yang agresif (Benischke, 2021). Ketahanan optik dan kestabilan kimia yang terbatas mengurangi akurasi dan efektivitas pelacak dalam jangka panjang.

Sebagai respons atas keterbatasan tersebut, material halide perovskite, khususnya cesium lead bromide (CsPbBr_3), telah muncul sebagai kandidat pelacak berbasis fluoresen generasi baru dengan kinerja yang sangat menjanjikan. Material ini menawarkan efisiensi kuantum tinggi, emisi cahaya yang kuat dan stabil, serta kemampuan tuning spektral yang memungkinkan penyesuaian terhadap parameter lapangan (Hafina et al., 2024). Di samping

itu, sintesis perovskite bersifat ekonomis, scalable, dan dapat disesuaikan dengan metode manufaktur eksisting.

Meski demikian, implementasi teknologi ini di lapangan masih memerlukan validasi teknis yang ketat. Oleh karena itu, diperlukan studi kelayakan yang komprehensif untuk mengevaluasi stabilitas optik, ketahanan termal dan kimia, aspek keberlanjutan lingkungan, serta keekonomian sistem tracer berbasis perovskite. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi batas teknis dan potensi optimalisasi penggunaan perovskite sebagai tracer dalam strategi line tracing, khususnya untuk mendukung pengambilan keputusan rekayasa di sumur migas yang telah berada pada fase penurunan.

1.2 Tujuan

Tujuan umum studi kelayakan ini adalah mengevaluasi potensi penggunaan perovskite sebagai pelacak berbasis fluoresen untuk aplikasi *line tracer* di sumur tua migas Indonesia. Studi ini akan menilai apakah perovskite dapat memenuhi kebutuhan operasional reservoir (misalnya suhu, tekanan, salinitas) sekaligus meningkatkan efektivitas pelacakan aliran fluida.

1.2.1 Tujuan Umum

Tujuan Umum Studi kelayakan ini adalah untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi dari pengembangan halide perovskite-based fluorescent taggant sebagai material baru yang inovatif untuk aplikasi Line tracer pada sumur tua.

1.2.2 Tujuan Khusus

Selain Tujuan Umum diatas, Tujuan Penulisan studi kelayakan ini secara khusus adalah sebagai berikut;

- 1 Mengevaluasi performa optik dan fluoresensi perovskite, termasuk *Stokes-shift*, *lifetime*, dan *emission spectra*, guna menilai kelayakan material ini sebagai tracer non-radioaktif yang sensitif dan akurat dalam pelacakan fluida bawah permukaan.
- 2 Mengkaji efektivitas halide perovskite sebagai tracer dalam media berpori, melalui pengujian kinerja tracer dalam sistem aliran fluida yang mensimulasikan kondisi reservoir sumur tua.

6.3.3 Biaya Pengujian

Biaya uji laboratorium pada skala laboratorium difokuskan untuk mengevaluasi formulasi perovskite melalui berbagai instrumen karakterisasi dan peralatan pendukung. Komponen biaya ini mencerminkan kebutuhan penting dalam memastikan kualitas sampel, kestabilan material, serta kelayakan proses sintesis pada skala pilot sebelum berlanjut ke produksi penuh. Rincian pengujian dalam skala laboratorium dapat dilihat pada Tabel 6.7 berikut.

Tabel 6.7 Biaya pengujian laboratorium

Pengujian	Rate IDR	UOM	Sampel Qty	Total Cost IDR
TEM	Rp2.500.000	per sampel	15	Rp37.500.000
X-Ray	Rp300.000	per sampel	15	Rp4.500.000
Laser 405 nm + Detektor PL	Rp250.000	per sampel	10	Rp2.500.000
UV-Vis Spectrometer	Rp50.000	per sampel	10	Rp500.000
UV Lamp 405 nm	Rp80.000	per sampel	10	Rp800.000
Magnetic stirrer	Rp100.000	per sampel	10	Rp1.000.000
pH meter	Rp15.000	per sampel	12	Rp180.000
Sonicator	Rp20.000	per sampel	10	Rp200.000
Anti-leak vial	Rp400.000	per sampel	10	Rp4.000.000
Total Cost Method			Rp51.180.000	

6.3.4 Biaya Energi

Biaya energi dihitung berdasarkan konsumsi listrik yang digunakan selama proses sintesis material perovskite, baik pada skala laboratorium maupun skala produksi percontohan. Rincian penggunaan listrik untuk masing-masing skala pada setiap run ditunjukkan pada Tabel 6.8 dan Tabel 6.9.

Tabel 6.8 Biaya energi skala laboratorium

Peralatan	Daya (kW)	Jam/run	Energi (kWh/run)	Biaya/run (IDR)
Analytical balance	0.05	1	0,05	Rp55,74
Magnetic hotplate + stirrer	0.2	4	0,8	Rp891,79
Probe sonicator	0.5	1	0,5	Rp557,37
Centrifuge benchtop	0.5	1	0,5	Rp557,37
Laser 405 nm + PL detector	0.05	1	0,05	Rp55,74
UV-Vis spectrophotometer	0.2	1	0,2	Rp222,95
Small glovebox / drybox	0.5	8	4	Rp4.458,96
UV lamp 405 nm	0.05	2	0,1	Rp111,47
pH meter	5	1	5	Rp5.573,70
Total Komsumsi Energi Skala Laboratorium			11,2	Rp12.485,09

Tabel 6.9 Biaya energi skala produksi percontohan

Peralatan	Daya (kW)	Jam/run	Energi (kWh/run)	Biaya/run (IDR)
Jacketed mixing / reactor	5	8	40	Rp44.589,60
High-speed disperser	7.5	8	60	Rp66.884,40
Pilot-scale bead mill	15	8	120	Rp133.768,80
Premix tank	3	8	24	Rp26.753,76
Premix mixing machine	7.5	8	60	Rp66.884,40
Holding / buffer tank	1.5	8	12	Rp13.376,88
Solvent recovery / distillation skid	20	8	160	Rp178.358,40
Vacuum dryer / tray oven	10	8	80	Rp89.179,20
Total Produksi Percontohan			556	Rp619.795,44

REFERENSI

- Addy, K., Kellogg, D. Q., Gold, A. J., Groffman, P. M., Ferendo, G., & Sawyer, C. (2002). In Situ Push–Pull Method to Determine Ground Water Denitrification in Riparian Zones. *Journal of Environmental Quality*, 31(3), 1017–1024. <https://doi.org/10.2134/JEQ2002.1017;CTYPE:STRING:JOURNAL>
- Benischke, R. (2021). Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal* 2021 29:1, 29(1), 67–88. <https://doi.org/10.1007/S10040-020-02278-9>
- Chandra, A., Prasad, S., Iuele, H., Colella, F., Rizzo, R., D’Amone, E., Gigli, G., & del Mercato, L. L. (2021). Highly Sensitive Fluorescent pH Microsensors Based on the Ratiometric Dye Pyranine Immobilized on Silica Microparticles. *Chemistry - A European Journal*, 27(53), 13318–13324.
- Drahansky, M. (2011). Liveness Detection in Biometrics. *Advanced Biometric Technologies*. <https://doi.org/10.5772/17205>
- Dugstad, O., Viig, S., Krognes, B., Kleven, R., & Huseby, O. (2013). Tracer monitoring of enhanced oil recovery projects. *EPJ Web of Conferences*, 50, 02002. <https://doi.org/10.1051/EPJCONF/20135002002>
- Hafina, C. F., Kurniasih, S., Widharyanti, I. D., Isnaeni, Zaine, S. N. A., & Adhyaksa, G. W. P. (2024). Cesium lead bromide perovskite nanocrystals as fluorescent taggants for detecting fluid leaks. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, 3, 100025. <https://doi.org/10.1016/J.JACOMC.2024.100025>
- Ho, D. T., Wanninkhof, R., Schlosser, P., Ullman, D. S., Hebert, D., & Sullivan, K. F. (2011). Toward a universal relationship between wind speed and gas exchange: Gas transfer velocities measured with 3He/SF6 during the Southern Ocean Gas Exchange Experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(7). <https://doi.org/10.1029/2010JC006854;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Huang, S., Jiao, M., Wang, X., & He, X. (2022). A First-Principles Study on the Structural and Carrier Transport Properties of Inorganic Perovskite

- CsPbI₃ under Pressure. *Crystals* 2022, Vol. 12, 12(5).
<https://doi.org/10.3390/CRYST12050648>
- Khmelnitskiy, V., AlJabri, N., & Solovyeva, V. (2022a). Fluorescent Based Tracers for Oil and Gas Downhole Applications: Between Conventional and Innovative Approaches. *Engineering Proceedings* 2022, Vol. 19, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ECP2022-12670>
- Khmelnitskiy, V., AlJabri, N., & Solovyeva, V. (2022b). Fluorescent Based Tracers for Oil and Gas Downhole Applications: Between Conventional and Innovative Approaches. *Engineering Proceedings* 2022, Vol. 19, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ECP2022-12670>
- Król, A., Gajec, M., & Kukulska-Zajac, E. (2021). Uranine as a Tracer in the Oil and Gas Industry: Determination in Formation Waters with High-Performance Liquid Chromatography. *Water* 2021, Vol. 13, 13(21).
<https://doi.org/10.3390/W13213082>
- Lei, L., Peng, Z., Liang, T., Yu, H. R., & Cheng, C. J. (2021). Solvothermal synthesis of poly(acrylic acid) decorated magnetic molybdenum disulfide nanosheets for highly-efficient adsorption of cationic dyes from aqueous solutions. *RSC Advances*, 11(27), 16490–16499.
<https://doi.org/10.1039/D1RA01548F>
- Lin, Y., Dai, H., Yang, C., Lin, S., & Chen, G. (2011). Electrochemiluminescent behavior of eosin Y and its application for detection of some bioactive molecules. *Electroanalysis*, 23(5), 1260–1266.
<https://doi.org/10.1002/ELAN.201000530>;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Ono, L. K., Wang, S., Kato, Y., Raga, S. R., & Qi, Y. (2014). Fabrication of semi-transparent perovskite films with centimeter-scale superior uniformity by the hybrid deposition method. *Energy & Environmental Science*, 7(12), 3989–3993. <https://doi.org/10.1039/C4EE02539C>
- Parker, J. T., DeBerardinis, J., & Mäkiharju, S. A. (2022). Enhanced laboratory x-ray particle tracking velocimetry with newly developed tungsten-coated O(50 µm) tracers. *Experiments in Fluids* 2022 63:12, 63(12), 184-.
<https://doi.org/10.1007/S00348-022-03530-6>

- Patidar, A. K., Joshi, D., Dristant, U., & Choudhury, T. (2022). A review of tracer testing techniques in porous media specially attributed to the oil and gas industry. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 2022 12:12, 12(12), 3339–3356. <https://doi.org/10.1007/S13202-022-01526-W>
- Perelaer, J., Kröber, P., Delaney, J. T., Schubert, U. S., Kröber, P., Delaney, J. T., & Schubert, U. S. (2009). Fabrication of Two and Three-Dimensional Structures by Using Inkjet Printing. *NIP & Digital Fabrication Conference*, 25, 791–794. https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-4451.2009.25.1.ART00104_2
- Polavarapu, L., & Vivo, P. (2023). Perovskite photovoltaics : stability and scalability. *Scientific Reports*, 1–3. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31512-z>
- Protesescu, L., Yakunin, S., Bodnarchuk, M. I., Krieg, F., Caputo, R., Hendon, C. H., Yang, R. X., Walsh, A., & Kovalenko, M. V. (2015a). Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX_3 , $X = \text{Cl, Br, and I}$): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut. *Nano Letters*, 15(6), 3692–3696. <https://doi.org/10.1021/nl5048779>
- Protesescu, L., Yakunin, S., Bodnarchuk, M. I., Krieg, F., Caputo, R., Hendon, C. H., Yang, R. X., Walsh, A., & Kovalenko, M. V. (2015b). Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX_3 , $X = \text{Cl, Br, and I}$): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut. *Nano Letters*, 15(6), 3692–3696. https://doi.org/10.1021/NL5048779/SUPPL_FILE/NL5048779_LIVESLIDES.MP4
- Saleh, H. M., & Hassan, A. I. (2021). Introduction to Green Chemistry. *Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*, 1–14. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6897-2_1
- Sanga, L., Lalengmawia, C., Renthlei, Z., Chanu, S. T., Hima, L., Singh, N. S., Yvaz, A., Bhattarai, S., & Rai, D. P. (2025). A review on perovskite materials for photovoltaic applications. *Next Materials*, 7, 100494. <https://doi.org/10.1016/J.NXMATE.2025.100494>

- Serres-Piole, C., Preud'homme, H., Moradi-Tehrani, N., Allanic, C., Jullia, H., & Lobinski, R. (2012). Water tracers in oilfield applications: Guidelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 98–99, 22–39. <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2012.08.009>
- Shekarnoush, M., Fernandez-Izquierdo, L., Aguirre-Tostado, F. S., Shamsi, Z. H., & Quevedo-Lopez, M. A. (2023). Decoding the Mechanisms of Room-Temperature Solid-State Synthesis of Halide Perovskites. *Chemistry of Materials*, 35(21), 8909–8921. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c01440>
- Singha, K., & Gorelick, S. M. (2005). Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis. *Water Resources Research*, 41(5), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004WR003460>;WEBSITE:WEBSITE:AGUPUBS;JOURNAL:JOURNAL:19447973;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:19447973;ISSUE:ISSUE:DOI
- Sun, J., Yang, J., Lee, J. I., Cho, J. H., & Kang, M. S. (2018). Lead-Free Perovskite Nanocrystals for Light-Emitting Devices. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 9(7), 1573–1583. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.8b00301>
- Survey, U. S. G. (2024). Mineral commodity summaries 2024. *Mineral Commodity Summaries*. <https://doi.org/10.3133/MCS2024>
- Wu, Y., Ngyuen, T. L., & Perlman, C. E. (2021). Intravenous sulforhodamine B reduces alveolar surface tension, improves oxygenation, and reduces ventilation injury in a respiratory distress model. <https://doi.org/10.1152/Jappphysiol.00421.2020>, 130(5), 1305–1316. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00421.2020>
- Yoon, M. B., Lee, W. J., & Lim, A. R. (2020). Thermal property and structural molecular dynamics of organic–inorganic hybrid perovskite 1,4-butanediammonium tetrachlorocuprate. *RSC Advances*, 10(57), 34800–34805. <https://doi.org/10.1039/D0RA06551J>
- Yunasa, W. (2022). *Investigasi Konektivitas Antara Injector Dan Producer Dengan Metode Well Interference Test Menggunakan Simulator CMG IMEX 2015*.

- Zheng, L., Zhang, D., Ma, Y., Lu, Z., Chen, Z., Wang, S., Xiao, L., & Gong, Q. (2015). Morphology control of the perovskite films for efficient solar cells. *Dalton Transactions*, 44(23), 10582–10593. <https://doi.org/10.1039/C4DT03869J>
- Zhuang, J., Wang, J., & Yan, F. (2023). Review on Chemical Stability of Lead Halide Perovskite Solar Cells. *Nano-Micro Letters*, 15(1), 84. <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01046-0>

BIOGRAFI PENULIS



Ir. Gede Widia Pratama Adhyaksa, Ph.D.

merupakan Dosen Program Studi Teknik Kimia Universitas Pertamina dengan latar belakang pendidikan di bidang energi terbarukan, khususnya material untuk Photovoltaics. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana di Institut Teknologi Bandung, magister di Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), dan doktor di Universitas Amsterdam, serta memiliki pengalaman sebagai Postdoctoral Research Fellow di Nanyang Technological University. Minat riset penulis berfokus pada pengembangan perovskite solar cells, perovskite photovoltaics, dan nanomaterial, dengan kontribusi signifikan melalui publikasi internasional di bidang energi berkelanjutan. Sejak bergabung dengan Universitas Pertamina, penulis aktif mengintegrasikan riset akademik dengan proyek keinsinyuran strategis di lingkungan PT Pertamina (Persero) dan sub-holding, khususnya pada pengembangan energi surya, sustainability, dan Carbon Capture and Storage (CCS).



Dr. Fayza Yulia merupakan Dosen Program Studi Teknik Mesin Universitas Pertamina, Penulis telah menyelesaikan pendidikan sarjana hingga doktor di bidang Teknik Mesin Universitas Indonesia. Penulis memiliki latar belakang akademis di bidang *Thermal Engineering* dan *Energy System*. Penulis aktif dalam mengintegrasikan penelitian akademis dengan perspektif praktis pada aplikasi bangunan dan energi. Selain itu, penulis memiliki

Minat penelitian pada *Carbon Capture and Storage* (CCS) berbasis adsorpsi serta sistem energi bangunan berkelanjutan, khususnya dalam pengurangan konsumsi energi dan emisi karbon di lingkungan. Saat ini, Penulis berfokus pada penyimpanan energi berbasis Bio-MOF, pemodelan dan optimasi sistem energi, serta penyimpanan termal terintegrasi HVAC–BIM untuk bangunan berenergi rendah, dengan tujuan mengembangkan solusi rendah karbon yang realistis dan dapat diskalakan.



Muhammad Suryadika merupakan mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Universitas Pertamina, Penulis memiliki pengalaman akademis sebagai asisten laboratorium di Universitas Pertamina, meliputi Laboratorium Mekanika Kekuatan Material, dan Mekanika Fluida dan Proses Manufaktur. Penulis juga telah menyelesaikan kerja praktik di PT Kilang Pertamina Internasional RU II Dumai dengan fokus analisis efisiensi motor listrik penggerak Pompa Sentrifugal di Hydrocracker Unibon (HCU). Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan riset ilmiah dan kegiatan pengabdian masyarakat. Penulis memiliki spesialisasi dan minat riset pada bidang sistem energi, khususnya dalam simulasi menggunakan Aspen Plus serta perancangan dan analisis sistem HVAC.



M. Zaki Ramdhan merupakan mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Universitas Pertamina, Penulis memiliki pengalaman akademis sebagai asisten laboratorium di Universitas Pertamina, meliputi Laboratorium Fisika Dasar, Mekanika Kekuatan Material, dan Mekanika Fluida. Penulis juga telah menyelesaikan kerja praktik di PT Pertamina Drilling Service dengan fokus analisis pada Double Ram Blowout Preventer (BOP) menggunakan metode FMEA. Selain itu, Penulis aktif dalam riset ilmiah dan telah melakukan penulisan paper mengenai analisis Human Reliability Assessment (HRA) menggunakan metode HEART dan SLIM. Penulis memiliki spesialisasi dan minat riset pada integrasi teknik mesin dengan ilmu data, khususnya dalam bidang Computational Fluid Dynamics (CFD), Artificial Neural Networks (ANN), sistem HVAC, dan Predictive Maintenance.



Buku ini mengulas kelayakan halide perovskite sebagai chemical tracer di industri hulu migas, dimulai dari karakteristik material, potensi kinerja untuk pemantauan reservoir, serta posisi teknologi ini dalam pasar tracer yang sudah ada. Di dalamnya dibahas pula kerangka Markets & Regulation, landscape industri, serta analisis yang dirangkum ke dalam roadmap teknologi dari tahap riset, uji pilot, hingga implementasi lapangan.

Selanjutnya, buku menelaah rantai pasok material dan proses produksi, lalu menghubungkannya dengan rancangan business plan, analisis finansial, dan rencana pertumbuhan layanan tracer perovskite. Aspek lingkungan, risiko, dan keselamatan dibahas melalui kajian jejak lingkungan, potensi bahaya material, serta matriks risiko dan strategi mitigasi, sehingga buku ini berfungsi sebagai panduan ringkas untuk menilai kelayakan teknis, ekonomis, dan keberlanjutan teknologi tracer berbasis halide perovskite.