

DOI: doi.org/10.21009/03.1401.FA13

ANALISIS CELAH ENERGI LAPISAN TIPIS $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ DI ATAS SUBSTRAT KACA INDIUM TIN OXIDE (ITO) DAN SUBSTRAT Si (100) TIPE-P

Kinanthi Freda Bhanuwati ^{a)}, Ajat Sudrajat ^{b)}, Novia Fransiska Simbolon ^{c)}, Dea Widiawati ^{d)}, Renny Apriani Dwika Saputri ^{e)}, Habibah Assa'addah ^{f)}, dan Irzaman ^{g)}

Program Studi Fisika, FMIPA IPB University, Jl. Raya Dramaga, Kampus IPB Dramaga Bogor, 16680 Jawa Barat, Indonesia

Email: ^{a)}kinanthifredabhanuwati@apps.ipb.ac.id, ^{b)}sudrajat_07ajat@apps.ipb.ac.id,
^{c)}noviafransiskasimbolon@apps.ipb.ac.id, ^{d)}deawidiawatidea@apps.ipb.ac.id, ^{e)}radsrenny@apps.ipb.ac.id,
^{f)}assa2003assaaddah@apps.ipb.ac.id, ^{g)}irzaman@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Lapisan tipis $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ pada substrat kaca Indium Tin Oxide (ITO) dan Substrat Si (100) Tipe-P telah berhasil dibuat dengan metode Chemical Solution Deposition (CSD) dengan kelarutan 0,5 M yang dibantu dengan spin coating 3000 rpm, dan annealing pada suhu 550 °C dengan kelajuan suhu 100 °C/jam yang ditahan selama 16 jam dan suhu pendinginan hingga suhu kamar. Substrat kaca Indium Tin Oxide (ITO) dengan ketebalan kaca 1,1 mm. Lapisan tipis ini diuji sifat optiknya menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dengan rentang 230 – 800 nm menghasilkan celah energi sebesar 2,84 eV di atas substrat Indium Tin Oxide (ITO) dan menghasilkan celah energi sebesar 2,24 eV di atas substrat Si (100) Tipe-P. Analisis celah energi pada lapisan tipis $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ pada substrat kaca Indium Tin Oxide (ITO) dan di atas substrat Si (100) Tipe-P sangat penting karena lapisan ini merupakan cikal bakal sensor tekanan.

Kata-kata Kunci: BST, ITO, Si (100) Tipe-P, CSD, celah energi.

Abstract

Thin films of $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ on Indium Tin Oxide (ITO) glass substrate and P-Type Si (100) substrate have been successfully prepared by Chemical Solution Deposition (CSD) method with 0.5 M solubility assisted by spin coating 3000 rpm, and annealing at 550 °C with temperature speed of 100 °C/hour held for 16 hours and cooling to room temperature. Indium Tin Oxide (ITO) glass substrate with glass thickness of 1.1 mm. These thin films were tested for optical properties using a UV-Vis Spectrophotometer with a range of 230 - 800 nm yielding an energy gap of 2.84 eV over Indium Tin Oxide (ITO) substrate and yielding an energy gap of 2.24 eV over P-type Si(100) substrate. Energy gap analysis of $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ thin film on Indium Tin Oxide (ITO) glass substrate and on Type-P Si (100) substrate is very important because this layer is the forerunner of pressure sensor.

Keywords: BST, ITO, Si (100) Type-P, CSD, energy gap.

PENDAHULUAN

Berkembangnya ilmu pengetahuan tentang material BST mendorong minat para peneliti untuk mengembangkan teknologi baru dengan BST sebagai pemeran utamanya. Konstanta dielektriknya yang tinggi, kapasitas penyimpanan muatan yang besar, dan stabilitas suhu yang baik dari karakteristik BST menjadikannya bahan ferroelektrik yang menjanjikan [1]. Hal ini juga membuat material BST menjadi kandidat unggulan dalam pengembangan perangkat elektronik dan optoelektronik, khususnya dalam aplikasi sensor. Material ferroelektrik BST yang memiliki lapisan dengan variasi sistematis dalam komposisinya, menunjukkan respons piezoelektrik [2, 3] yang membuat lapisan tipis BST dapat digunakan sebagai sensor tekanan.

Pada penelitian ini digunakan substrat Indium Tin Oxide (ITO) dan Si (100) tipe-P sebagai media pembuatan lapisan tipis BST. ITO merupakan konduktor transparan yang sering digunakan pada perangkat optoelektronik seperti transistor tipis, sel surya, sensor cahaya, dan sensor suhu [4, 5, 6, 7]. Indium Tin Oxide (ITO) dikenal karena resistivitas listriknya yang rendah dan transparansi optik yang akan tetap utuh saat digunakan pada kondisi ekstrem seperti tekanan tinggi [8, 9]. Substrat lain yang digunakan dalam penelitian ini adalah kaca Si (100) Tipe-P. Substrat Si (100) berbagai tipe telah banyak digunakan sebagai sensor tekanan tipe piezoelektrik karena memiliki sensitivitas yang tinggi [10].

Metode yang digunakan pada pembuatan lapisan tipis pada penelitian ini adalah metode *Chemical Solution Deposition* (CSD) yang sudah lama dikembangkan untuk penumbuhan *perovskite* lapisan tipis [11]. Metode CSD digunakan karena biayanya terjangkau, dapat melapisi area yang luas secara seragam, prosedur yang mudah, dan pemanfaatan bahannya efisien untuk membentuk lapisan tipis [12, 13, 14]. Setelah metode CSD dilakukan, lapisan tipis akan melewati proses *spin coating* dan *annealing* untuk memperoleh kualitas lapisan tipis yang optimal. Lapisan tipis yang sudah berhasil dibuat akan diuji sifat optiknya pada spektrofotometer UV-Vis. Dari pengujian tersebut dapat diperoleh nilai reflektansi dari masing-masing lapisan tipis untuk mengetahui besar celah energinya [15, 16]. Hasil pengujian ini akan digunakan untuk menganalisis pengaruh jenis substrat yang digunakan terhadap nilai celah energi optik dari lapisan tipis $\text{Ba}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{TiO}_3$ dan menentukan substrat mana yang lebih cocok digunakan dalam konteks pengembangan material dasar untuk sensor tekanan.

METODE

Penelitian ini melibatkan lima tahap utama, yaitu preparasi substrat, pembuatan larutan, penumbuhan film pada substrat, proses *annealing*, karakterisasi dan pengujian film. Pada tahap preparasi substrat film berbasis bahan ferroelektrik dibuat dengan menggunakan substrat Si (100) Tipe P dan substrat kaca Indium Tin Oxide (ITO). Substrat Si dipotong menggunakan pisau mata intan dengan ukuran 1,1 x 1,1 cm dan substrat ITO dipotong dengan ukuran 2 x 2 cm masing-masing sebanyak 1 buah. Substrat kemudian dicuci menggunakan aquabides dan air deionisasi didalam *ultrasonic cleaner*. Setelah dicuci substrat dikeringkan dan ditimbang menggunakan neraca digital.

Pada tahap pembuatan larutan, disiapkan bahan-bahan kimia yang sudah disesuaikan dengan hasil perhitungan stoikiometri $\text{Ba}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{TiO}_3$ dengan konsentrasi 0,5 M. Bahan-bahan tersebut terdiri dari Barium Asetat [$\text{Ba}(\text{CH}_3\text{OO})_2$] sebanyak 0,3831 g; Stronsium Asetat [$\text{Sr}(\text{CH}_3\text{OOH})_2$] sebanyak 0,1028 g; Titanium (IV) Isopropoksida [$\text{Ti}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$] sebanyak 0,5684 g; serta pelarut 2-metoksietanol [$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$] sebanyak 2 ml. Alat yang disiapkan dalam pembuatan larutan yaitu neraca digital, *magnetic stirrer*, mortar, delapan buah botol kaca, suntikan, filter PVDF, kertas kalibrasi neraca, pinset, spatula, sarung tangan, masker, dan mikropipet. Pembuatan larutan diawali dengan menggerus bubuk Barium Asetat [$\text{Ba}(\text{CH}_3\text{OO})_2$] dan Stronsium Asetat [$\text{Sr}(\text{CH}_3\text{OOH})_2$] sampai halus. Setelah itu bubuk dimasukkan seluruhnya ke dalam botol kaca, kemudian ditambahkan pelarut 2-metoksietanol sebanyak 2 ml. Langkah berikutnya yaitu melakukan *stirring* menggunakan *magnetic stirrer* selama 2 jam dengan kecepatan putar 500 rpm supaya didapatkan larutan yang homogen. Setelah dilakukan *stirring*, larutan diambil menggunakan suntik tanpa jarum yang telah dipasang filter PVDF (0,45 μm), kemudian dipindahkan ke botol yang bersih.

Pada tahap ketiga dilakukan penumbuhan film dengan menggunakan metode *Chemical Solution Deposition* (CSD) pada bagian aktif substrat Si (100) Tipe-P dan substrat kaca Indium Tin Oxide (ITO) melalui teknik *spin coating*. Substrat ditempelkan di bagian atas piringan reaktor *spin coating*

dengan menggunakan *double tape* agar tidak lepas saat berputar. Sebagian sisi substrat ditutup dengan solatip hingga benar-benar rapat. Sedangkan bagian substrat yang tidak ditutup ditetesi dengan larutan BST hingga merata. Setelah itu substrat diputar menggunakan *spin coating* selama 30 detik dengan kecepatan 3000 rpm. Proses ini dilakukan berulang sebanyak 2 kali pada masing-masing substrat dengan interval waktu 1 menit.

Setelah substrat diberi lapisan, langkah selanjutnya adalah tahap *annealing*. Pada tahap ini sampel akan melalui proses *annealing* pada *furnace* dengan suhu maksimal 550 °C selama 16 jam. Setelah proses *annealing* selesai, sampel akan masuk ke tahap akhir yaitu uji dan sifat optik lapisan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Data yang didapatkan melalui uji spektroskopi UV-Vis nantinya akan diolah menggunakan *software* Origin melalui metode Kubelka-Munk, yaitu metode penentuan celah energi dari masing-masing sampel dengan melihat grafik linear hubungan Energi (eV) pada sumbu y dan $(\alpha_{K-M}hv)^2$ untuk mencari nilai celah energi dari masing-masing sampel dengan persamaan (1), (2), (3) [16, 17, 18]:

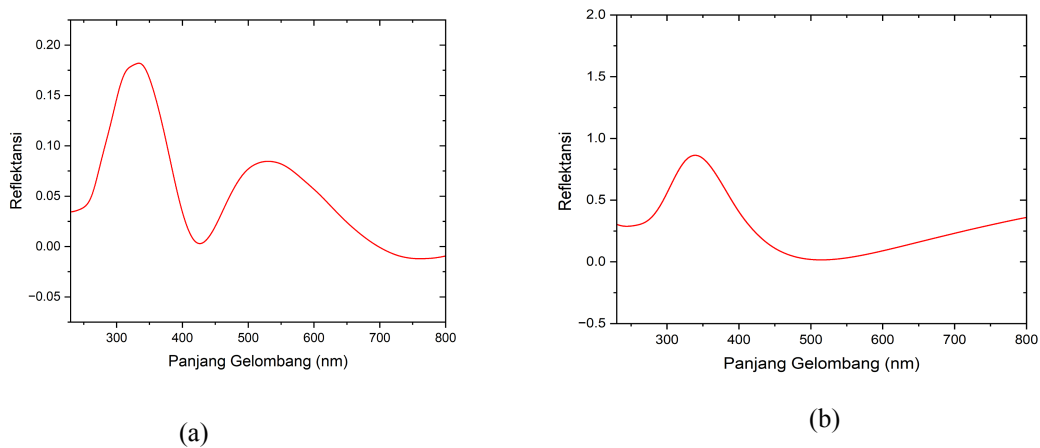
$$F(R) = \frac{K}{S} = (1 - R)^2 \propto \alpha_{K-M} \tag{1}$$

$$F(R) \propto \alpha_{K-M} \propto \frac{(hv - E_g)^{1/n}}{hv} \tag{2}$$

$$(\alpha_{K-M}hv)^n = A(hv - E_g) \tag{3}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

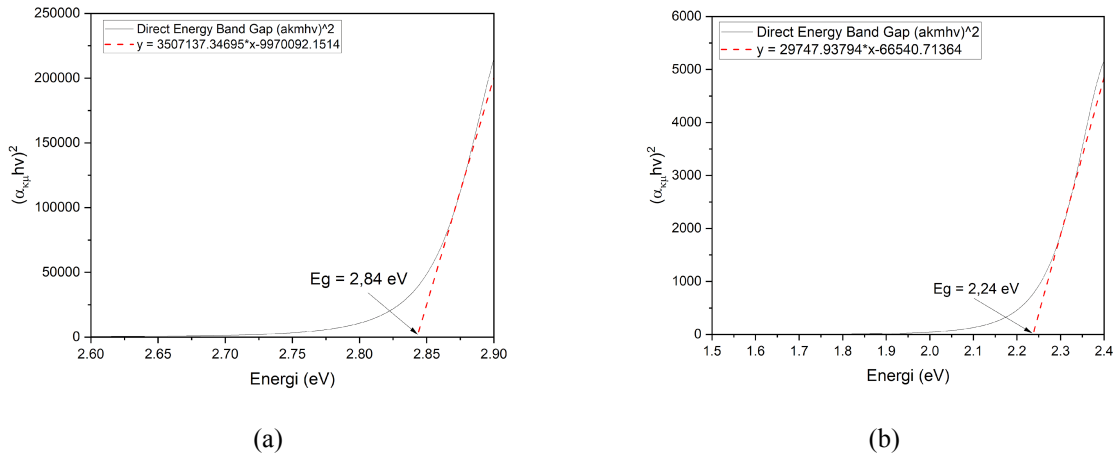
Lapisan tipis Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO₃ telah berhasil ditumbuhkan pada substrat Si (100) Tipe-P dan substrat kaca Indium Tin xide (ITO). Berdasarkan hasil uji spektroskopi UV-Vis lapisan tipis BST substrat ITO dan Si (100) Tipe-P pada rentang panjang gelombang 230 nm hingga 800 nm didapatkan kurva reflektansi seperti gambar 1(a) dan 1(b).



GAMBAR 1. Reflektansi lapisan tipis BST pada (a) substrat ITO dan (b) substrat Si (100) Tipe-P.

Kedua substrat mengabsorbsikan cahaya foton pada rentang panjang gelombang 230-800 nm. Berdasarkan gambar 1(a) dan 1(b) dapat dilihat bahwa pada substrat ITO, reflektansi maksimum terjadi pada panjang gelombang 335 nm dan minimum pada panjang gelombang 760 nm. Sedangkan pada substrat Si (100) Tipe-P reflektansi maksimum terjadi pada panjang gelombang 340 nm dan minimum pada panjang gelombang 515 nm. Hal ini menunjukkan bahwa kedua lapisan tipis berada pada rentang panjang gelombang ultraviolet (180-380 nm) dan cahaya tampak (380-780 nm) [19], tetapi substrat ITO dapat menyerap cahaya tampak lebih banyak karena nilai reflektansinya lebih rendah dari substrat Si (100) Tipe-P [20]. Berdasarkan persamaan (1), (2), (3), data reflektansi pada

gambar 1(a) dan 1(b) di atas menjadi bahan untuk menentukan celah energi langsung dari masing-masing sampel dengan pendekatan teori Kubelka-Munk [16, 17, 18, 21, 22].



GAMBAR 2. Celah energi lapisan tipis BST pada (a) substrat ITO dan (b) substrat Si (100) Tipe-P.

Berdasarkan metode Kubelka-Munk didapatkan nilai celah energi dari masing-masing substrat.

TABEL 1. Celah energi lapisan tipis BST pada substrat ITO dan Si (100) Tipe-P

Substrat	Celah Energi (eV)
Indium Tin Oxide (ITO)	2,84
Si (100) Tipe-P	2,24

Berdasarkan data celah energi pada tabel 1 serta gambar 2(a) dan 2(b), didapatkan nilai celah energi pada substrat ITO sebesar 2,84 eV dan pada substrat Si (100) Tipe-P sebesar 2,24 eV. Pada penelitian sebelumnya, Sarhaddi *et al.* [22] mendapatkan nilai celah energi *direct* untuk substrat ITO sebesar 3,39-4,02 eV. Adapun untuk nilai celah energi lapisan tipis BST pada substrat Si (100) Tipe-P berkisar antara 2,9-3,1 eV [23]. Kedua nilai celah energi yang didapatkan melalui eksperimen memiliki perbedaan dengan celah energi pada literatur. Perbedaan nilai celah energi pada penelitian ini mungkin disebabkan oleh keadaan suhu *furnace* yang tidak stabil dan waktu *annealing* yang terlalu panjang [24] saat proses pembuatan lapisan tipis.

Dapat dilihat bahwa celah energi dari lapisan tipis BST pada substrat ITO lebih besar dibanding substrat Si (100) Tipe-P. Material dengan celah energi yang lebih kecil akan mulai menyerap foton pada energi yang lebih rendah (panjang gelombang lebih panjang). Sebaliknya, material dengan celah energi yang lebih besar akan menyerap pada energi foton yang lebih tinggi (panjang gelombang lebih pendek). Data reflektansi pada gambar 1(a) substrat ITO menunjukkan penyerapan yang lebih kuat pada rentang UV-Vis (ditunjukkan oleh nilai reflektansi yang lebih rendah pada puncak absorbansi), yang konsisten dengan celah energi yang lebih besar (2,84 eV) dan penyerapan yang bergeser ke panjang gelombang lebih pendek. Sementara itu, untuk substrat Si (100) Tipe-P (Gambar 2(b)), nilai celah energi yang lebih kecil (2,24 eV) menunjukkan potensi untuk penyerapan pada panjang gelombang yang lebih panjang, sehingga elektron dapat tereksitasi dengan energi foton yang lebih rendah. Semakin kecil celah energi pada suatu lapisan tipis, maka semakin besar probabilitas elektron pada pita valensi untuk tereksitasi ke pita konduksi, ini disebabkan oleh rendahnya energi minimum yang diperlukan untuk proses eksitasi tersebut [25]. Substrat yang memiliki nilai celah energi lebih kecil memiliki potensi lebih besar untuk diaplikasikan pada berbagai perangkat terutama sensor. Oleh karena itu, lapisan tipis pada substrat Si (100) lebih cocok diaplikasikan sebagai sensor dibandingkan dengan substrat ITO. Sifat piezoelektrik yang dimiliki BST memungkinkan lapisan tipis dengan substrat Si (100) Tipe-P ini untuk dijadikan sebagai sensor tekanan. Untuk menentukan efisiensi

substrat Si (100) Tipe-P sebagai sensor tekanan, diperlukan pengujian lebih lanjut terkait dengan sensitivitas dan nilai resistivitasnya [3, 9].

PENUTUP

Lapisan tipis $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ pada substrat kaca Indium Tin Oxide (ITO) dan Substrat Si (100) Tipe-P telah berhasil dibuat. Nilai celah energi dari lapisan tipis substrat ITO sebesar 2,84 eV dan substrat Si (100) Tipe-P sebesar 2,24 eV didapatkan melalui pengujian sifat optik dengan uji spektroskopi UV-Vis dan metode Kubelka-Munk. Semakin kecil nilai celah energi, maka semakin besar probabilitas elektronnya untuk eksitasi dari pita valensi ke konduksi yang dapat meningkatkan efisiensi lapisan tipis tersebut saat diaplikasikan sebagai sensor. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lapisan tipis substrat Si (100) Tipe-P dengan nilai celah energi lebih rendah, memiliki kemungkinan lebih besar untuk digunakan sebagai sensor tekanan piezoelektrik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Terapan Kompetitif Nasional (PTKN), Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan Nasional, Kebudayaan, Riset dan Teknologi, Republik Indonesia di bawah kontrak: 001/E5/[PG.02.00.PL/2023](#).

REFERENSI

- [1] R. Dewi, "KARAKTERISASI DAN PEMBUATAN FILM TIPIS BARIUM STRONTIUM TITANAT Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO₃ (BST) MENGGUNAKAN METODE SOL-GEL," *J. Komun. Fis. Indones.*, vol. 3, pp. 865–869, 2016.
- [2] D. A. Kiselev, M. S. Afanasiev, S. A. Levashov, A. A. Sivov, and G. V. Chucheva, "Thickness dependence of electrical and piezoelectric properties of ferroelectric Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃ thin films," *Thin Solid Films*, vol. 619, pp. 214–219, 2016, doi: 10.1016/j.tsf.2016.10.064.
- [3] U. Anindy, M. Nur Indro, and I. Husein, "Piezoelectric properties: cerium oxide (CeO₂) doped barium titanate (BaTiO₃) film on ITO substrate," *Ferroelectrics*, vol. 570, no. 1, pp. 162–175, 2021, doi: 10.1080/00150193.2020.1839267.
- [4] J. Kim, S. Shrestha, M. Souri, J. G. Connell, S. Park, and A. Seo, "High-temperature optical properties of indium tin oxide thin-films," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-69463-4.
- [5] O. Yavas and M. Takai, "Effect of substrate absorption on the efficiency of laser patterning of indium tin oxide thin films," *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no. 8 I, pp. 4207–4212, 1999, doi: 10.1063/1.370332.
- [6] Irzaman *et al.*, "Application of lithium tantalate (LiTaO₃) films as light sensor to monitor the light status in the Arduino Uno based energy-saving automatic light prototype and passive infrared sensor," *Ferroelectrics*, vol. 524, no. 1, pp. 44–55, 2018, doi: 10.1080/00150193.2018.1432842.
- [7] Irzaman *et al.*, "Design and fabrication of photovoltaics based on MFS (Ag/BaTiO₃/silicon p-type) structure," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 7, no. June 2023, pp. 29–34, 2024, doi: 10.1016/j.mset.2023.06.002.
- [8] Y. Nakane, H. Masuta, Y. Honda, F. Fujimoto, T. Miyazaki, and S. Yano, "Formation of indium-tin mixing method oxide (ITO) films by the dynamic," vol. 60, pp. 264–267, 1991.
- [9] C. C. Chang and S. K. Fang, "A study of the design of ZnO thin film pressure sensors," *Int. J. Electron.*, vol. 87, no. 8, pp. 1013–1023, 2000, doi: 10.1080/002072100404659.
- [10] F. Huriawati and Irzaman, "Kajian Sifat Optik Film Tipis Bst Didadah Niobium Dan Tantalum," *J. Pendidik. Fis. dan Keilmuan*, vol. 1, no. 1, pp. 9–13, 2015.
- [11] K. L. Chopra, R. C. Kainthla, D. K. Pandya, and A. P. Thakoor, "Chemical Solution Deposition of Inorganic Films," *Phys. Thin Film. Adv. Res. Dev.*, vol. 12, pp. 167–235, 1982, doi: 10.1016/s0079-1970(13)70010-0.
- [12] S. M. Al-Shomar, "Investigation the effect of doping concentration in Ruthenium-doped TiO₂ thin films for solar cells and sensors applications," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 3, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab815b.
- [13] Irzaman *et al.*, "Ferroelectric sensor BaxSr_{1-x}TiO₃ integrated with android smartphone for controlling and monitoring smart street lighting," *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 34, no. 6, p. 102180, 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2022.102180.
- [14] A. Ripai *et al.*, "The effect of ionic radius carbon dot on Ti⁴⁺ in lattice parameters of Ba_{0.2}Sr_{0.8}TiO₃ thin films," *BIO Web Conf.*, vol. 171, pp. 4–9, 2025, doi: 10.1051/bioconf/202517102008.
- [15] L. Isa, . Irmansyah, and . Irzaman, "Optical Properties and Bandgap Energy of LiTaSiO₅ Ferroelectric Thin Films on Silicon," *J. Ilmu Pertan. Indones.*, vol. 21, no. 3, pp. 177–179, 2016, doi: 10.18343/jipi.21.3.177.
- [16] Djohan N, Harsono B, Liman J, Hardhienata H, Irzaman, "Structural, optical properties and raman spectroscopy of In₂O₃ doped LiTaO₃ thin films," *International Journal of Nanoelectronics & Materials*, vol. 15, no. 1, 2022.
- [17] Warono D, Syamsudin, "Unjuk kerja spektrofotometer untuk analisa zat aktif ketoprofen," *Konversi*, vol. 2, no. 2, pp. 57-65, 2013.
- [18] Zuhri M, Ramadhan HF, Irzaman, "Synthesis and Characterization of SrTiO₃ Doped with Bi (CH₃COO)₃," *International Journal of Nanoelectronics and Materials (IJNeaM)*, pp. 169-182, 2023.
- [19] Iskandar J, Syafutra H, Juansah J, Irzaman, "Characterizations of electrical and optical properties on ferroelectric photodiode of barium strontium titanate (Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃) films based on the annealing time differences and its development as light sensor on satellite technology," *Procedia Environment Science*, vol. 24, pp. 324–328, 2015, doi:10.1016/j.proenv.2015.03.042.
- [20] Patel M, Chavda A, Mukhopadhyay I, Kim J, Ray A, "Nanostructured SnS with inherent anisotropic optical properties for high photoactivity," *Nanoscale*, vol. 8, no. 4, pp. 2293–2303, 2016, doi:10.1039/c5nr06731f.
- [21] Jumardin, Maddu A, Santoso K, Isnaeni, "Karakteristik sifat optik nanopartikel karbon (carbon dots) dengan metode UV-Vis DRS (ultraviolet-visible diffuse reflectance spectroscopy)," *JFT: Jurnal Fisika*

- dan Terapannya*, vol. 9, no. 1, pp. 1–15, 2022, doi:10.24252/jft.v9i1.28815.
- [22] Sarhaddi R, Shahtahmasebi N, Rezaee Rokn-Abadi M, Bagheri-Mohagheghi MM, "Effect of post-annealing temperature on nano-structure and energy band gap of indium tin oxide (ITO) nano-particles synthesized by polymerizing complexing solgel method," *Physics E: Low-Dimensional Systems Nanostructures*, vol. 43, no. 1, pp. 452–457, 2010, doi:10.1016/j.physe.2010.08.028.
- [23] Susanto, Liman J, Tamudjaja H, "Perancangan sensor cahaya menggunakan film bst dengan substrat silikon (100) type-p dan indium tin oxide," *Jurnal Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 47-56, 2018.
- [24] Indriani D, Fahyuan HD, Ngatijo N, "Uji UV-Vis Lapisan TiO₂/N₂ untuk menentukan *band gap energy*," *J Online Phys*, vol. 3, no. 2, pp .6–10, 2018, doi:10.22437/jop.v3i2.5142.
- [25] Dwianto KB, "Pengaruh waktu anil pada sifat optik lapisan terkait ukuran film TiO₂ sebagai material pendukung sel surya berbasis perovskite," [skripsi], Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November, 2019.