MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i1.8913

PENGARUH DOPING NIKEL DAN MONOETHANOLAMINE (MEA) SEBAGAI ZAT ADITIF TERHADAP ENERGI CELAH PITA SnO2

The Effect of Nickel Doping and Monoethanolamine (MEA) as Additives on the Band Gap Energy of SnO2

Nadya Alexandra, Hary Sanjaya, Alizar Ulianas, Umar Kalmar Nizar
Universitas Negeri Padang
hary.s@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Dec 15, 2025	Jan 7, 2026	Jan 19, 2026	Jan 24, 2026

Abstract

The relatively large band gap energy of SnO_2 semiconductors limits their ability to absorb visible light, resulting in suboptimal photocatalytic activity. Although modification of SnO_2 band gap energy through transition metal doping has been widely studied, research that specifically combines nickel doping with the addition of monoethanolamine (MEA) using the sol–gel method remains limited. This study aimed to analyze the effect of nickel doping and MEA addition on the band gap energy of SnO_2 synthesized via the sol–gel method. A quantitative approach with a laboratory experimental design was employed, in which pure SnO_2 and nickel-doped SnO_2 with MEA addition were synthesized as research samples and subsequently characterized using a UV–Diffuse Reflectance Spectrophotometer (UV–DRS). Reflectance data were analyzed using the Kubelka–Munk approach and Tauc plot method to determine band gap energy. The results showed that pure SnO_2 had a band gap energy of 3.59 eV, whereas nickel-doped SnO_2 with MEA addition exhibited a reduced band gap energy of 2.33 eV. These findings indicate that the combination of nickel doping and MEA

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

additive is effective in modifying the optical properties of SnO_2 and extending its light absorption into the visible region, thereby enhancing its potential as a visible-light-driven photocatalytic material. This study contributes to the development of modification strategies for SnO_2-based oxide semiconductors and opens avenues for further research on optimizing dopant and additive compositions as well as directly evaluating the photocatalytic performance of the material.

Keywords: Semiconductor; SnO_2; Nickel Doping; Monoethanolamine; Band Gap Energy

Abstrak: Energi celah pita yang relatif besar pada semikonduktor SnO_2 membatasi kemampuannya dalam menyerap cahaya tampak sehingga aktivitas fotokatalitiknya belum optimal. Meskipun modifikasi energi celah pita SnO_2 melalui doping logam transisi telah banyak dikaji, penelitian yang secara khusus mengombinasikan doping nikel dengan penambahan zat aditif *monoethanolamine* (*MEA*) menggunakan metode *sol–gel* masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh doping nikel dan penambahan *MEA* terhadap energi celah pita SnO_2 yang disintesis melalui metode *sol–gel*. Pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif dengan desain eksperimen laboratoris, di mana SnO_2 murni dan SnO_2 terdoping nikel dengan penambahan *MEA* disintesis sebagai objek penelitian, kemudian dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer *UV–Diffuse Reflectance (UV–DRS)*. Data reflektansi dianalisis menggunakan pendekatan *Kubelka–Munk* dan metode *Tauc plot* untuk menentukan energi celah pita. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SnO_2 murni memiliki energi celah pita sebesar 3,59 eV, sedangkan SnO_2 terdoping nikel dengan penambahan *MEA* mengalami penurunan energi celah pita hingga 2,33 eV. Temuan ini mengindikasikan bahwa kombinasi doping nikel dan aditif *MEA* efektif dalam memodifikasi sifat optik SnO_2 dan memperluas serapan cahaya ke wilayah tampak, sehingga memperkuat potensinya sebagai material fotokatalis berbasis cahaya tampak. Penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan strategi modifikasi semikonduktor oksida berbasis SnO_2 dan membuka peluang kajian lanjutan terkait optimasi komposisi dopan dan aditif serta evaluasi langsung kinerja fotokatalitik material.

Kata Kunci: Semikonduktor; SnO_2; Doping Nikel; *Monoethanolamine*; Energi Celah Pita

PENDAHULUAN

Semikonduktor timah dioksida (SnO_2) merupakan material oksida bertipe-n yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi optoelektronik dan fotokatalitik. SnO_2 diketahui memiliki energi celah pita yang relatif besar, yaitu sekitar 3,6 eV, yang menunjukkan bahwa material ini terutama menyerap radiasi pada wilayah ultraviolet (Köse et al., 2015). Energi celah pita (*band gap*) didefinisikan sebagai perbedaan energi antara pita valensi dan pita konduksi pada suatu semikonduktor (Dwicahyani et al., 2025). Selain itu, SnO_2 memiliki stabilitas kimia dan termal yang baik serta tingkat transparansi tinggi pada daerah cahaya tampak, sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai material fotokatalis untuk proses degradasi senyawa organik (P. K. Mishra et al., 2022).

Besarnya energi celah pita SnO_2 murni menyebabkan keterbatasan dalam pemanfaatan cahaya tampak, sehingga aktivitas fotokatalitiknya masih kurang optimal (Fardhani et al., 2022; Nihad et al., 2025). Salah satu pendekatan yang umum dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan melakukan doping logam, yang bertujuan untuk menurunkan energi celah pita dan memperluas daerah serapan cahaya ke wilayah tampak, sehingga meningkatkan kinerja fotokatalitik material (Kumar et al., 2022). Selain doping, penambahan zat aditif juga berperan penting dalam mengontrol ukuran partikel dan meningkatkan luas permukaan spesifik, yang pada akhirnya dapat meningkatkan reaktivitas semikonduktor (Yulfitrianti, 2023).

Sintesis nanopartikel SnO_2 dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti hidrotermal, pembakaran larutan (solution combustion), dan metode sol-gel. Metode sol-gel banyak dipilih karena mampu menghasilkan material dengan tingkat kemurnian tinggi, ukuran partikel yang terkontrol, serta proses sintesis yang relatif sederhana dan hemat energi. Beberapa penelitian melaporkan bahwa SnO_2 yang disintesis menggunakan metode solgel menunjukkan komposisi unsur yang sesuai dan minim pengotor berdasarkan analisis elemental (Aydın Ünal, 2025).

Berbagai logam transisi telah digunakan sebagai dopan dalam sintesis SnO_2 untuk meningkatkan sifat optiknya, di antaranya kobalt (Co) (Nihad et al., 2025) dan tembaga (Cu) (Arif et al., 2022). Salah satu dopan yang efektif adalah nikel (Ni), yang dilaporkan mampu menurunkan energi celah pita SnO_2 dari 3,61 eV menjadi 2,58 eV sehingga memperluas serapan ke wilayah cahaya tampak (Khan et al., 2021). Selain itu, penambahan zat aditif monoethanolamine (MEA) berperan sebagai agen pengompleks dan penstabil yang menghasilkan partikel lebih kecil dan homogen, sehingga berpotensi meningkatkan aktivitas fotokatalitik material (Yulfitrianti, 2023).

Secara teoritis, modifikasi energi celah pita pada semikonduktor oksida logam sangat dipengaruhi oleh keberadaan dopan dan kondisi sintesis yang mengontrol struktur mikro material. *Sze dan Ng* menjelaskan bahwa doping logam transisi dapat membentuk tingkat energi baru di dalam celah pita semikonduktor, sehingga menurunkan energi eksitasi elektron dan memperluas serapan cahaya ke wilayah tampak (Agustia, 2025; Setyawan & Suryani, 2024). Pada SnO_2, inkorporasi ion Ni^{2+} ke dalam kisi kristal dilaporkan mampu menyebabkan distorsi kisi dan pembentukan vacancy oksigen yang berkontribusi terhadap penyempitan energi celah pita (Setyawan & Suryani, 2024). Selain itu, penggunaan zat aditif dalam metode sol–gel, seperti monoethanolamine (MEA), berperan sebagai agen

pengompleks yang mengontrol laju hidrolisis dan kondensasi prekursor, sehingga menghasilkan partikel yang lebih homogen dan memodifikasi keadaan permukaan material (Aziz & Rustyawan, n.d.). Kombinasi antara doping logam transisi dan penambahan zat aditif ini dilaporkan memberikan efek sinergis dalam meningkatkan sifat optik dan potensi fotokatalitik semikonduktor oksida (A. Mishra et al., 2022; M. Mishra et al., 2024)namun kajian yang secara spesifik mengevaluasi pengaruh simultan doping nikel dan aditif MEA terhadap energi celah pita SnO_2 masih terbatas.

Berdasarkan uraian diatas, maka penelitian ini bertujuan untuk mensintesis SnO_2 tanpa dopan dan SnO_2 terdoping nikel dengan penambahan monoethanolamine (MEA) melalui metode sol–gel, serta mengevaluasi pengaruh perlakuan tersebut terhadap energi celah pita material. Karakterisasi energi celah pita dilakukan menggunakan Spektrofotometer UV–Diffuse Reflectance (UV-DRS).

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratoris dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh doping nikel dan penambahan zat aditif monoethanolamine (MEA) terhadap energi celah pita material semikonduktor SnO_2. Desain penelitian yang digunakan adalah eksperimen komparatif, yaitu membandingkan sifat optik SnO_2 murni dengan SnO_2 terdoping nikel yang disintesis menggunakan metode sol–gel. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah perlakuan doping nikel dan penambahan MEA, sedangkan variabel terikatnya adalah energi celah pita SnO_2. Objek penelitian berupa material anorganik SnO_2 hasil sintesis laboratorium, sehingga penelitian ini tidak melibatkan partisipan manusia maupun hewan.

Sintesis SnO_2 murni dilakukan dengan melarutkan 1 mmol $SnCl_2{\cdot}2H_2O$ ke dalam 50 mL metanol pro analysis (p.a), kemudian larutan dihomogenkan menggunakan magnetic stirrer selama 60 menit. Selanjutnya, larutan disonikasi selama 30 menit hingga terbentuk sol yang homogen dan didiamkan selama 24 jam untuk proses pematangan sol. Gel yang terbentuk dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110 °C selama ±1 jam, kemudian dikalsinasi menggunakan furnace pada suhu 600 °C selama ±3 jam untuk menghasilkan serbuk SnO_2. Sampel yang diperoleh dihaluskan menggunakan lumpang dan alu sebelum dilakukan karakterisasi.

Sintesis SnO_2 terdoping nikel dengan penambahan zat aditif dilakukan dengan melarutkan 1 mmol $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ dan 0,2 mmol $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ ke dalam 50 mL metanol p.a, kemudian larutan dihomogenkan menggunakan magnetic stirrer selama 60 menit. Selanjutnya, monoethanolamine (MEA) sebanyak 2 mL (33,1 mmol) ditambahkan ke dalam larutan dan pengadukan dilanjutkan selama ±1 jam. Larutan kemudian disonikasi selama 30 menit hingga homogen dan didiamkan selama 24 jam untuk menstabilkan sol. Gel yang terbentuk dikeringkan pada suhu 110 °C selama ±1 jam dan dikalsinasi pada suhu 600 °C selama ±3 jam. Serbuk hasil kalsinasi dihaluskan dan digunakan untuk analisis sifat optik.

Karakterisasi energi celah pita material dilakukan menggunakan spektrofotometer UV–Diffuse Reflectance (UV–DRS). Data reflektansi yang diperoleh dikonversi menjadi fungsi Kubelka–Munk, F(R), untuk merepresentasikan serapan optik material. Penentuan energi celah pita dilakukan menggunakan metode Tauc plot dengan memplot hubungan antara $(F(R)h\nu)^{1/2}$ dan energi foton (hν). Nilai energi celah pita diperoleh dari hasil ekstrapolasi linier kurva terhadap sumbu energi. Metode ini digunakan karena sesuai untuk analisis sifat optik material semikonduktor berbentuk serbuk.

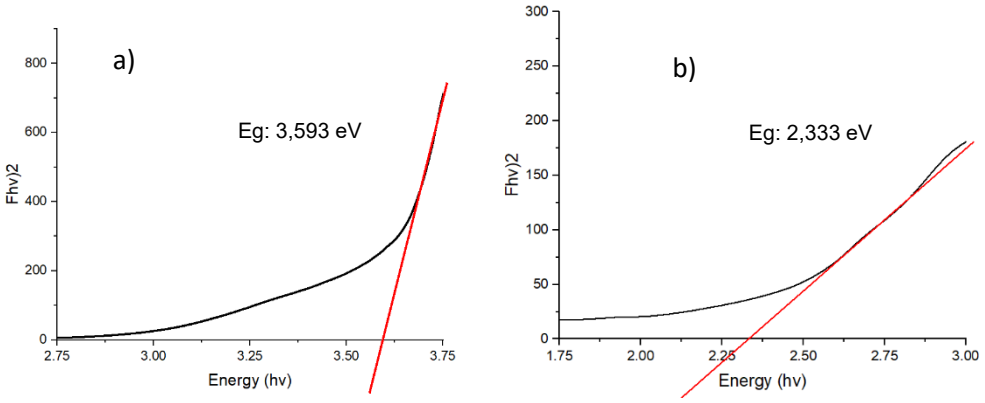
HASIL

Penentuan energi celah pita (*band gap*) dari material semikonduktor SnO_2 hasil sintesis dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Diffuse Reflectance (UV-DRS). Data reflektansi yang diperoleh selanjutnya dikonversi dari nilai persentase reflektansi (%R) menjadi fungsi Kubelka-Munk, F(R). Pendekatan Kubelka–Munk digunakan untuk menghitung energi celah pita semikonduktor berdasarkan hubungan antara serapan optik dan energi foton, yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Eg = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Energi celah pita ditentukan melalui analisis grafik Tauc yang menunjukkan hubungan antara energi foton ($h\nu$) dan fungsi Kubelka–Munk $(F(R')h\nu)^{1/2}$. Nilai energi celah pita (Eg) diperoleh dari titik potong hasil ekstrapolasi linier terhadap sumbu energi. Pada persamaan tersebut, h menyatakan konstanta Planck bernilai $6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s, c merupakan kecepatan cahaya, sedangkan λ menunjukkan panjang gelombang cahaya dalam satuan nanometer (Sanjaya, 2018).

Berikut adalah hasil grafik SnO2 dari pengolahan data menggunakan *software OriginPro.*



Gambar 1. Grafik energi celah pita dari a) SnO2 Murni, b) SnO2-Ni+MEA

Berdasarkan hasil grafik yang diperoleh, dapat diketahui bahwa SnO_2 murni memiliki energi celah pita sebesar 3,59 eV, sedangkan SnO_2 yang terdoping nikel sebesar 1 mmol dengan penambahan zat aditif monoethanolamine (MEA) sebanyak 2 ml (33,1 mmol) menunjukkan penurunan energi celah pita hingga 2,33 eV. Penurunan nilai energi celah pita ini menunjukkan bahwa keberadaan dopan nikel dan aditif MEA memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat optik SnO_2. Hasil penelitian ini sejalan dengan laporan sebelumnya oleh Khan (2021) yang menyatakan bahwa doping nikel berpengaruh terhadap penurunan energi celah pita SnO_2. SnO_2 murni memiliki energi celah pita sekitar 3,78 eV, sedangkan SnO_2 yang terdoping nikel mengalami penurunan energi celah pita 2,47 eV, bergantung pada kadar dopan yang digunakan (Khan et al., 2021).

Turunnya energi celah pita pada SnO_2 terdoping nikel disebabkan oleh keberadaan ion Ni^{2+} yang terinkorporasi ke dalam kisi kristal SnO_2 dan menghasilkan tingkat energi baru di dalam celah pita. Tingkat energi ini berasal dari interaksi orbital d ion nikel dengan pita elektronik SnO_2, sehingga memperkecil jarak antara pita valensi dan pita konduksi serta memperluas daerah serapan ke wilayah cahaya tampak. Perubahan struktur pita energi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan aktivitas fotokatalitik material (Ahmed et al., 2011).

Pada penelitian ini digunakan monoethanolamine (MEA) sebagai zat aditif yang berfungsi sebagai agen penstabil dan pengompleks. Penambahan MEA juga dilaporkan mampu menurunkan energi celah pita semikonduktor. Hasil penelitian ini sejalan dengan laporan sebelumnya oleh Irsyad & Sanjaya (2025) bahwa energi celah pita ZnO menurun dari

3,21 eV menjadi 2,68 eV setelah penambahan MEA sebanyak 2 ml (33,1 mmol), yang menunjukkan peran MEA dalam memodifikasi sifat optik material (Irsyad & Sanjaya, 2025).

Tabel hasil pengukuran celah pita antara SnO2 murni dengan SnO2- Ni+MEA dalam bentuk tabel dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. hasil pengukuran celah pita antara SnO2 murni dengan SnO2- Ni+MEA

Semikonduktor	Energi celah pita
SnO2 Murni	3,59 eV
SnO2-Ni+MEA	2,33 eV

Penurunan energi celah pita pada SnO_2 terdoping nikel disebabkan oleh terbentuknya tingkat energi baru akibat interaksi ion Ni^{2+} dengan struktur pita SnO_2, sehingga memperkecil jarak antara pita valensi dan pita konduksi dan menggeser serapan ke wilayah cahaya tampak. Pergeseran ini meningkatkan potensi aktivitas fotokatalitik SnO_2. Selain itu, penambahan zat aditif berperan dalam mengontrol pertumbuhan partikel sehingga menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil dan luas permukaan yang lebih besar, yang selanjutnya mendukung peningkatan efisiensi proses fotokatalisis

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa doping nikel dan penambahan zat aditif monoethanolamine (MEA) memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan energi celah pita SnO_2. Penurunan nilai band gap dari 3,59 eV pada SnO_2 murni menjadi 2,33 eV pada SnO_2 terdoping nikel dengan penambahan MEA menunjukkan bahwa modifikasi struktur material berhasil memperluas serapan cahaya dari wilayah ultraviolet ke wilayah cahaya tampak. Temuan ini secara langsung menjawab tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi efektivitas kombinasi dopan nikel dan aditif MEA dalam memodifikasi sifat optik SnO_2 melalui metode sol–gel.

Secara teoritis, penurunan energi celah pita pada SnO_2 terdoping nikel dapat dijelaskan melalui mekanisme inkorporasi ion Ni^{2+} ke dalam kisi kristal SnO_2. Substitusi sebagian ion Sn^{4+} oleh ion Ni^{2+} menyebabkan ketidakseimbangan muatan dan distorsi kisi, yang mendorong terbentuknya tingkat energi baru (defect levels) di dalam celah pita. Tingkat

energi ini berasal dari interaksi orbital d ion nikel dengan pita elektronik SnO_2, sehingga memperkecil jarak antara pita valensi dan pita konduksi. Mekanisme serupa telah dilaporkan oleh Ahmed et al. (2011), yang menyatakan bahwa doping logam transisi pada SnO_2 menghasilkan penyempitan celah pita akibat munculnya tingkat energi tambahan di dalam struktur pita.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Negara et al. (2025)yang melaporkan bahwa doping nikel pada SnO_2 yang disintesis menggunakan metode sol–gel mampu menurunkan energi celah pita dari sekitar 3,78 eV menjadi 2,47 eV, bergantung pada konsentrasi dopan. Kesamaan tren penurunan energi celah pita menunjukkan bahwa nikel merupakan dopan yang efektif dalam memodifikasi sifat optik SnO_2. Namun demikian, nilai energi celah pita yang diperoleh pada penelitian ini (2,33 eV) lebih rendah dibandingkan beberapa laporan sebelumnya, yang mengindikasikan adanya kontribusi tambahan dari faktor lain selain doping nikel.

Perbedaan tersebut diduga kuat berkaitan dengan penggunaan monoethanolamine (MEA) sebagai zat aditif dalam proses sintesis. MEA berfungsi sebagai agen pengompleks dan penstabil yang mampu mengontrol laju hidrolisis dan kondensasi selama proses sol–gel, sehingga menghasilkan partikel dengan ukuran lebih kecil dan distribusi yang lebih homogen. Ukuran partikel yang lebih kecil berpotensi meningkatkan densitas keadaan permukaan (surface states), yang berkontribusi terhadap modifikasi struktur pita energi.

Peran aditif MEA dalam menurunkan energi celah pita semikonduktor juga telah dilaporkan oleh Ningsih et al. (2021) , yang menunjukkan bahwa penambahan MEA pada sintesis ZnO mampu menurunkan energi celah pita dari 3,21 eV menjadi 2,68 eV. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian ini dan menunjukkan bahwa MEA memiliki peran penting dalam memodifikasi sifat optik material oksida semikonduktor.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang hanya menggunakan doping logam tanpa aditif, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi doping nikel dan penambahan MEA memberikan efek sinergis dalam menurunkan energi celah pita SnO_2. Hal ini mengindikasikan bahwa strategi modifikasi ganda melalui dopan dan aditif lebih efektif dibandingkan penggunaan dopan tunggal. Pendekatan serupa juga dilaporkan oleh Ningsih et al., (2021); Sujatmiko (2020) yang menyatakan bahwa pengendalian struktur mikro material berperan penting dalam meningkatkan respons optik dan fotokatalitik SnO_2 terdoping logam.

Secara implikatif, hasil penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode modifikasi semikonduktor berbasis SnO_2 untuk aplikasi fotokatalitik berbasis cahaya tampak. Penurunan energi celah pita hingga mendekati 2,3 eV membuka peluang pemanfaatan SnO_2 terdoping nikel dengan penambahan MEA dalam proses degradasi senyawa organik menggunakan sumber cahaya yang lebih efisien dan ramah energi. Selain itu, penelitian ini memperkuat pemahaman bahwa peran zat aditif dalam sintesis sol–gel tidak hanya terbatas pada pengendalian morfologi, tetapi juga berdampak langsung terhadap sifat elektronik material.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, khususnya pada aspek karakterisasi yang masih difokuskan pada sifat optik material. Analisis struktur kristal, ukuran partikel, dan morfologi belum dilakukan secara langsung, sehingga mekanisme yang diusulkan masih bersifat inferensial berdasarkan literatur. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan karakterisasi tambahan seperti X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), atau Transmission Electron Microscopy (TEM), serta pengujian aktivitas fotokatalitik untuk mengonfirmasi hubungan antara penurunan energi celah pita dan peningkatan kinerja fotokatalitik material.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi material SnO_2 melalui kombinasi doping nikel dan penambahan zat aditif monoethanolamine (MEA) secara efektif memengaruhi sifat optik material, khususnya energi celah pita. Hasil analisis mengonfirmasi bahwa perlakuan tersebut mampu menurunkan energi celah pita SnO_2 secara signifikan dibandingkan material tanpa modifikasi, sehingga meningkatkan kemampuan material dalam menyerap cahaya pada wilayah tampak. Temuan ini secara langsung menjawab tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi pengaruh doping nikel dan aditif MEA terhadap energi celah pita SnO_2 yang disintesis menggunakan metode sol–gel. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi modifikasi semikonduktor oksida berbasis SnO_2 melalui pendekatan kombinasi dopan logam transisi dan zat aditif dalam proses sintesis. Hasil penelitian memperkuat pemahaman bahwa keberadaan dopan nikel berperan dalam membentuk tingkat energi baru di dalam celah pita, sementara penambahan MEA berkontribusi dalam mengendalikan kondisi sintesis yang berdampak pada modifikasi sifat elektronik material. Pendekatan ini menunjukkan potensi untuk diterapkan secara lebih

luas pada pengembangan material semikonduktor lain yang dioptimalkan untuk aplikasi berbasis cahaya tampak.

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian, studi lanjutan disarankan untuk melakukan karakterisasi struktur dan morfologi material secara lebih komprehensif, seperti melalui analisis XRD, SEM, atau TEM, guna mengonfirmasi mekanisme yang diusulkan. Selain itu, pengujian langsung terhadap aktivitas fotokatalitik material perlu dilakukan untuk mengkaji hubungan antara penurunan energi celah pita dan peningkatan kinerja fotokatalitik, sehingga potensi aplikasi praktis material SnO_2 terdoping nikel dengan penambahan MEA dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

Agustia, M. M. (2025). *Pengaruh Komposisi N-CDs dari Ampas Kopi pada Nanokomposit ZnO/N-CDs sebagai Material Fotokatalis*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim. https://etheses.uin-malang.ac.id/79282/

Ahmed, A. S., Shafeeq, M. M., Singla, M. L., Tabassum, S., Naqvi, A. H., & Azam, A. (2011). Band gap narrowing and fluorescence properties of nickel-doped SnO2 nanoparticles. *Journal of Luminescence, 131*(1), 1–6. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.07.017

Arif, M., Shah, M. Z. U., Ahmad, S. A., Shah, M. S., Ali, Z., Ullah, A., Idrees, M., Zeb, J., Song, P., Huang, T., & Yi, J. (2022). High photocatalytic performance of copper-doped SnO2 nanoparticles in degradation of Rhodamine B dye. *Optical Materials, 134*, 113135. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113135

Aydın Ünal, F. (2025). Synthesis and characterization of the doped/co-doped SnO2 nanoparticles by the sol–gel method. *International Journal of Applied Ceramic Technology, 22*(1), 1–15. https://doi.org/10.1111/ijac.14916

Aziz, I., & Rustyawan, W. (n.d.). *Sintesis dan Karakterisasi γ-Al2O3 dari Boehmit dengan Penambahan Asam Anorganik sebagai Penyangga Katalis Hydrotreating*. Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta. https://repository.uinjkt.ac.id/dspace/handle/123456789/Al2O3_Boehmit

Dwicahyani, A., Sanjaya, H., & Patriela, M. (2025). Pengaruh Penggunaan Doping Vanadium dan Zat Aditif Diethanolamine (DEA) terhadap Energi Celah Pita SnO2. *Journal of Research and Education Chemistry, 7*(1), 59. https://journal.unp.ac.id/jrec/article/view/59

Fardhani, D. A., Haris, A., Suyati, L., & Widodo, D. S. (2022). Sintesis Elektroda Lapis Tipis Sn–ZnO/FTO secara Elektrodeposisi dan Aplikasi pada Degradasi Remazol Black B (RBB). *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry, 2*(1), 18–24. https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/gjec/article/view/12877

Irsyad, A., & Sanjaya, H. (2025). Pengaruh Variasi Konsentrasi Doping CuO dan Aditif Monoethanolamine (MEA) pada Sintesis Nanopartikel ZnO dan Uji Aktivitas Fotokatalitiknya. *Journal of Research and Education Chemistry, 7*(1), 66. https://doi.org/10.25299/jrec.2025.vol7(1).21195

Khan, D., Rehman, A., Rafiq, M. Z., Khan, A. M., & Ali, M. (2021). Improving the optical properties of SnO2 nanoparticles through Ni doping by sol-gel technique. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 4*. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100079

Köse, H., Karaal, Ş., Aydin, A. O., & Akbulut, H. (2015). Structural properties of size-controlled SnO2 nanopowders produced by sol-gel method. *Materials Science in Semiconductor Processing, 38*, 404–412. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.03.028

Kumar, A., Kumar, N., Chitkara, M., & Dhillon, G. (2022). Physicochemical investigations of structurally enriched Sm3+ substituted SnO2 nanocrystals. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 33*(8), 5283–5296. https://doi.org/10.1007/s10854-022-07716-w

Mishra, A., Malik, R., Hachiya, T., Jürgenson, T., Namba, S., Posner, D. C., Kamanu, F. K., Koido, M., Le Grand, Q., & Shi, M. (2022). Stroke genetics informs drug discovery and risk prediction across ancestries. *Nature, 611*(7934), 115–123. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05317-4

Mishra, M., Desul, S., Santos, C. A. G., Mishra, S. K., Kamal, A. H. M., Goswami, S., Kalumba, A. M., Biswal, R., da Silva, R. M., & Dos Santos, C. A. C. (2024). A bibliometric analysis of sustainable development goals (SDGs): A review of progress, challenges, and opportunities. *Environment, Development and Sustainability, 26*(5), 11101–11143. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03215-0

Mishra, P. K., Biswal, S. K., & Sahu, D. (2022). Synthesis and photocatalytic activity of Ni doped SnO2 nanoparticles for removal of toxic industrial dyes. *Materials Today: Proceedings, 68*, 80–84. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.104

Negara, S. P. J., Kartika, A. E., Ansyarif, A. R., Mardiyanti, R., Yusaerah, N., Hayatun, A., & Irmawan, M. (2025). *Pengenalan Nanoteknologi dalam Ilmu Kimia*. Penerbit NEM.

Nihad, N., Farh, H., Djebbari, N., & Laib Dit Leksir, Y. (2025). Effect of cobalt on the structural, morphological, optical, and electrical properties of SnO2 thin films prepared by dip coating technique. *Main Group Chemistry, 24*(4), 195–207. https://doi.org/10.1177/10241221251326182

Ningsih, S. K. W., Nizar, U. K., Bahrizal, B., & Nasra, E. (2021). Sintesis Mg2+ Doped ZnO dengan Penambahan Albumen Ayam Ras Menggunakan Gabungan Metode Sol-Gel dan Sonokimia. *Jurnal Riset Kimia, 12*(1), 27–35. https://doi.org/10.25077/jrk.12.1.27-35.2021

Sanjaya, H. (2018). Degradasi Metil Violet Menggunakan Katalis ZnO-TiO2 secara Fotosonolisis. *Eksakta: Berkala Ilmiah Bidang MIPA, 19*(1), 91–99. https://doi.org/10.24036/eksakta/vol19-iss1/131

Setyawan, H. P., & Suryani, O. (2024). Modified Titanium Oxide with Metal Doping as Photocatalyst in Photochemical Water Splitting. *Sains Natural: Journal of Biology and Chemistry, 14*(1), 1–12. https://ejournal.uin-malang.ac.id/index.php/sainsnatural/article/view/1412 [Access restricted]

Sujatmiko, F. (2020). *Biosintesis Komposit Grafena Oksida Tereduksi/SnO_2 Menggunakan Ekstrak Daun Matoa (Pometia pinnata) untuk Degradasi Fotokatalitik Biru Metilena*. Universitas Islam Indonesia. https://dspace.uii.ac.id/123456789/23798

Yulfitrianti, M., Sanjaya, H., & Budiman, S. (2023). Pengaruh Aditif Monoethanolamine (MEA) terhadap Struktur Kristal Copper Tin Oxide. *Asian Journal of Science, Technology, Engineering, and Art, 1*(2), 295–304. https://doi.org/10.58578/ajstea.v1i2.2046