

Peningkatan Absorpsi Cahaya pada Nanostruktur TiO₂ Terdoping Cu dan Ni untuk Aplikasi Pemisahan Air Fotokatalitik

Noni Novianti¹, Fransischa Ramona¹, Diana Vanda Wellia², Mulda Muldarisnur^{1*}

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas

²Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 10 September 2025

Direvisi: 5 Oktober 2025

Diterima: 20 November 2025

Kata kunci:

Doping Cu

Doping Ni

Penyerapan Optik

Plasmonik

TiO₂

Keywords:

Cu doping

Ni doping

Optical absorption

Plasmonics

TiO₂

Penulis Korespondensi:

Mulda Muldarisnur

Email: muldarisnur@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini melaporkan peningkatan absorpsi cahaya oleh nanopartikel TiO₂ ketika didoping dengan nanopartikel Ni dan Cu. Simulasi numerik dilakukan menggunakan metode elemen batas. Absorbansi pada wilayah cahaya tampak TiO₂ didoping Ni meningkat drastis dibandingkan TiO₂ murni. Peningkatan absorbansi cahaya diikuti pergeseran tepi pita serapan ke panjang gelombang yang lebih panjang (*red-shift*) akibat terbentuknya tingkat energi baru yang memperkecil celah pita energi. TiO₂ yang didoping Cu memperlihatkan peningkatan absorbansi yang lebih signifikan dan rentang serapan yang lebih lebar. Kedua dopan menurunkan celah pita energi relatif terhadap TiO₂ murni, dengan doping Cu menghasilkan penurunan lebih besar. Pendopongan Ni dan Cu meningkatkan respons optik TiO₂ di wilayah cahaya tampak. Doping Cu memberikan efek lebih dominan dalam memperluas serapan dan menurunkan energi celah pita. Temuan ini menunjukkan bahwa rekayasa dopan berbasis Ni dan Cu merupakan pendekatan potensial untuk meningkatkan performa material berbasis TiO₂ pada aplikasi fotokatalitik seperti produksi hidrogen dengan metode *water splitting*.

This study reports the enhancement of light absorption by TiO₂ nanoparticles when doped with Ni and Cu nanoparticles. Numerical simulations were performed using the boundary element method. The absorbance in the visible region of Ni-doped TiO₂ increases compared to pure TiO₂. The increase in absorbance is accompanied by a shift in the absorption band edge to a longer wavelength (redshift) due to the formation of new energy levels that narrow the band gap. Cu-doped TiO₂ exhibits a more significant increase in absorbance and a wider absorption range. Both dopants decrease the band gap relative to pure TiO₂, with Cu doping producing a greater decrease. Ni and Cu doping enhance the optical response of TiO₂ in the visible region. Cu doping has the most dominant effect in broadening the absorption and lowering the band gap energy. These findings indicate that Ni- and Cu-based dopant engineering is a potential approach to improve the performance of TiO₂-based materials in photocatalytic applications such as hydrogen production by water splitting.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Hidrogen merupakan salah satu kandidat utama energi masa depan karena memiliki densitas gravimetrik energi yang tinggi, tidak menghasilkan limbah saat digunakan, dan kompatibel dengan berbagai teknologi konversi energi (Turner, 2004). Dibanding bahan bakar fosil dan *biofuel*, jalur transisi energi hidrogen bebas jejak karbon dan berkelanjutan. Ada banyak metode produksi hidrogen, namun metode pemisahan air (*water splitting*) secara fotokatalitik sangat menjanjikan karena hanya membutuhkan dua sumber alam yang paling berlimpah, yaitu air dan sinar Matahari, sehingga menjadikan prosesnya sepenuhnya terbarukan (Hisatomi & Domen, 2019; Mohammed, et al., 2024). Dibandingkan produksi hidrogen dengan elektrolisis konvensional atau *steam methane reforming* yang membutuhkan energi eksternal dan menghasilkan emisi karbon, pemisahan air secara fotokatalitik jauh lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan (Chen, et al., 2010).

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan air untuk produksi hidrogen, seperti penggunaan fotokatalis berbasis oksida semikonduktor, pembentukan *heterojunction*, *Z-scheme*, hingga integrasi struktur plasmonik (Kudo & Miseki, 2009; Qanugo, et al., 2021). TiO₂ merupakan material yang paling banyak digunakan karena kestabilan kimia, ketahanan korosi, dan biaya produksi yang rendah (Aldosari & Hussain, 2024; Hashimoto, et al., 2005; Wellia, et al., 2023). Keterbatasan utama TiO₂ terletak pada *band gap* yang lebar (~3,2 eV) sehingga hanya menyerap komponen UV sinar Matahari yang jumlahnya sangat kecil (Diebold, 2003; Wulandari, et al., 2018). Salah satu strategi untuk meningkatkan absorpsi cahaya TiO₂ adalah dengan doping nanopartikel logam yang menghasilkan resonansi plasmon permukaan di rentang cahaya tampak (Atorf, et al., 2014; Muldarisnur, et al., 2019a). Disamping itu, doping logam juga meningkatkan pemisahan muatan mencegah terjadinya rekombinasi elektron dan lubang (Abed, et al., 2020; Kumar, et al., 2022).

Banyak penelitian menunjukkan kontribusi signifikan nanopartikel logam mulia seperti emas, perak, dan platina untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik TiO₂ (Diaz, et al., 2021; Gellé & Moores, 2017). Logam mulia sayangnya tidak dapat dikembangkan secara ekonomis untuk aplikasi skala massal akibat harga yang sangat tinggi dan ketersediaan yang terbatas. Hal ini mendorong penggunaan material alternatif seperti tembaga (Cu) dan nikel (Ni), yang tidak hanya jauh lebih murah tetapi juga memiliki sifat kimia fisika yang sesuai untuk proses fotokatalitik (Altomare, et al., 2023; Liu, et al., 2014; Xin, et al., 2021). Kombinasi performa menarik dan kelimpahan sumber menjadikan Cu dan Ni kandidat ideal untuk fotokatalis biaya rendah namun berperforma tinggi.

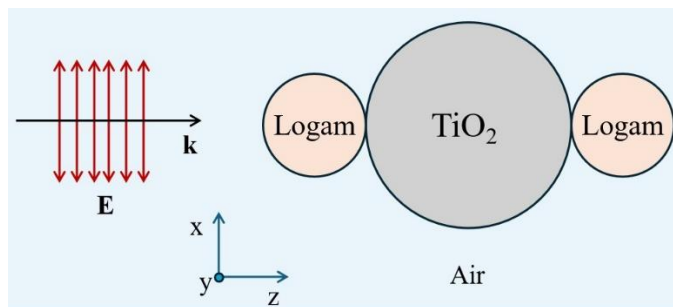
Meskipun berpotensi besar meningkatkan aktivitas fotokatalitik TiO₂, efisiensi fotokatalitik sangat bergantung pada optimasi ukuran nanopartikel Cu dan Ni dan interaksi antarmuka. Diameter nanopartikel logam secara langsung menentukan frekuensi resonansi plasmonik, intensitas absorpsi, serta kekuatan medan lokal di permukaan TiO₂ (Moskovits, 2015). Selain nanopartikel logam, ukuran TiO₂ juga menentukan panjang difusi muatan dan area aktif situs reaksi fotokatalis, sehingga pemilihan diameter yang tepat dapat menekan rekombinasi elektron–lubang dan meningkatkan transfer muatan (Chen & Mao, 2007). Semua penelitian di atas menunjukkan pentingnya optimasi ukuran TiO₂, Cu, dan Ni dalam merancang fotokatalis yang mampu memanfaatkan cahaya Matahari secara lebih efektif dalam proses produksi hidrogen. Dalam penelitian ini, kami menggunakan *Metal Nanoparticle Boundary Element Method* untuk mensimulasikan dan membandingkan spektrum penyerapan optik nanopartikel TiO₂ didoping Cu dan Ni.

II. METODE

MNPBEM digunakan untuk mendapatkan solusi persamaan Maxwell untuk nanostruktur. Metode ini tidak mendiskritisasi seluruh volume melainkan fokus pada permukaan partikel, sehingga sangat efisien dalam menangani antarmuka logam-semikonduktor. Iluminasi gelombang datar menginduksi muatan dan arus permukaan yang digunakan untuk menghitung medan hamburan dan penampang absorpsi. Pendekatan ini secara alami menangkap fenomena yang relevan dengan TiO₂ terdoping, termasuk peningkatan medan lokal dan respons hibrida plasmon. Formulasi ini menunjukkan akurasi dan fleksibilitas BEM untuk pemodelan nanopartikel plasmonik dengan berbagai geometri (Hohenester & Trügler, 2012).

TiO₂ dimodelkan sebagai bola dielektrik berdiameter 30 – 50 nm (Gambar 1). Ukuran nanopartikel logam (Ni dan Cu) divariasikan antara 5 nm sampai 30 nm. Nanopartikel logam menempel

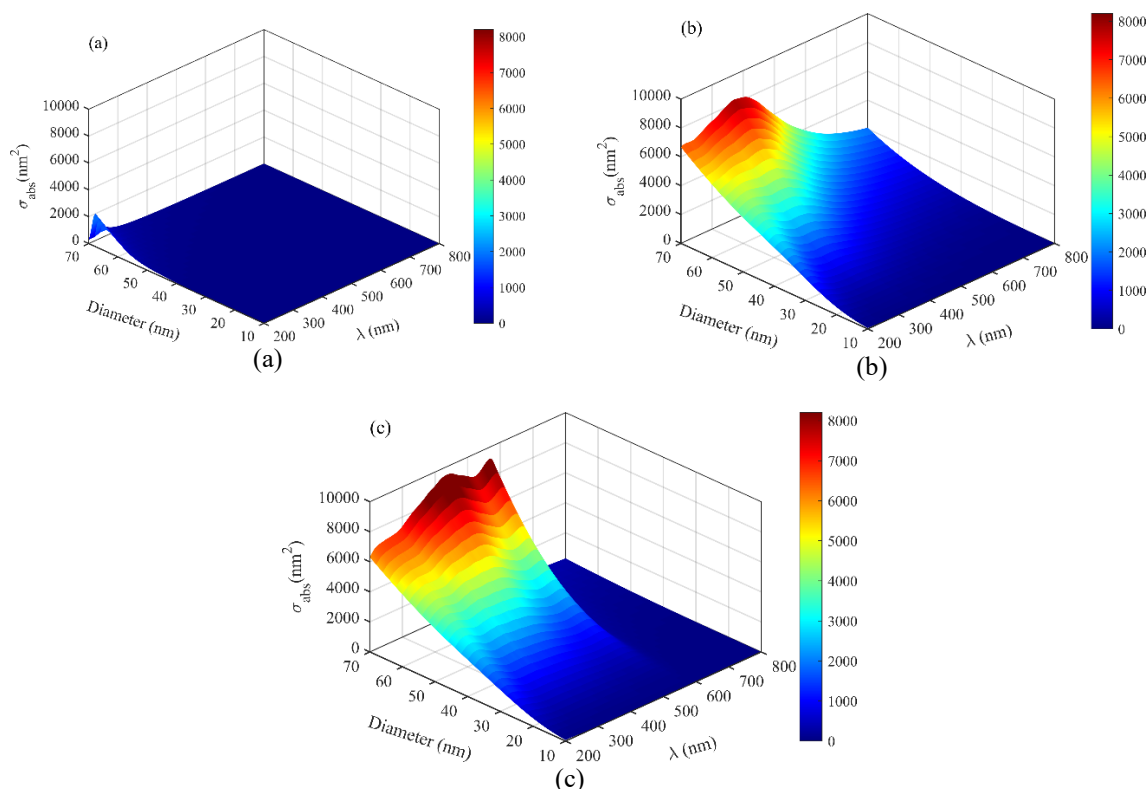
pada permukaan TiO₂, dimana medium sekitar berupa air yang merupakan medium pada proses pemisahan air secara fotokatalitik. Pada sebagian besar simulasi, dua nanopartikel logam diletakkan pada sisi berbeda dari TiO₂. Saat mempelajari efek penambahan jumlah, nanopartikel diletakkan secara merata dan simetris terhadap TiO₂. Indeks bias sebagai fungsi panjang gelombang dari nanopartikel diambil dari berbagai sumber, TiO₂ (DeVore, 1951), Ni (Johnson & Christy, 1974), dan Cu (Johnson & Christy, 1972). Nanopartikel dieksitasi oleh gelombang datar terpolarisasi linier dengan panjang gelombang 200–800 nm.



Gambar 1 Skema simulasi nanopartikel TiO₂ yang didoping nanopartikel logam (Ni atau Cu) diiluminasi dengan gelombang datar terpolarisasi linear.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Penyerapan Optik TiO₂, Nikel, dan Tembaga



Gambar 2 Tampang lintang absorpsi nanopartikel, (a) TiO₂, (b) Ni, dan (c) Cu sebagai fungsi diameter dan panjang gelombang cahaya.

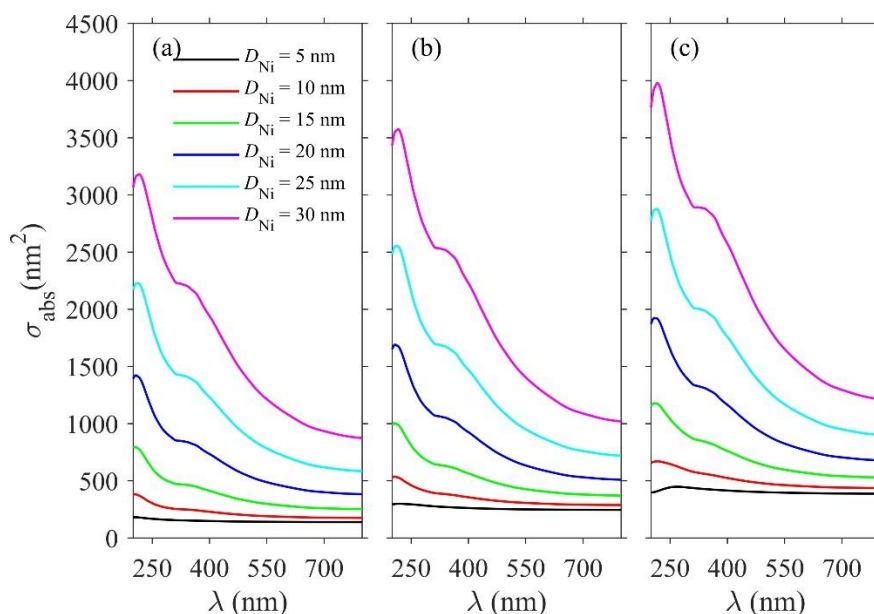
Spektrum penyerapan TiO₂ murni menunjukkan kenaikan yang tajam sekitar 380 nm, konsisten dengan energi celah pita (~3,2 eV). Penyerapan yang lemah di atas 400 nm menegaskan bahwa TiO₂ murni tidak dapat menyerap cahaya tampak secara efektif. Gambar 2(b) menunjukkan tampang lintang absorpsi nanopartikel Ni yang meningkat dengan diameter. Peningkatan absorpsi dikarenakan nanopartikel berdiameter besar memiliki jumlah dan volume elektron bebas lebih banyak saat

bersilasi secara kolektif. Puncak resonansi plasmonik Ni berada dalam rentang diameter yang disimulasikan pada rentang $\lambda \approx 250\text{--}320$ nm. Ni memiliki resonansi plasmonik yang relatif lemah di wilayah ultraviolet, konsisten dengan sifat intrinsik logam transisi yang memiliki energi plasma lebih tinggi dibanding logam mulia (Sharma, et al., 2017). Kenaikan signifikan absorpsi pada diameter besar disebabkan peningkatan luas permukaan, hamburan internal, dan kontribusi elektron pita-d.

Nanopartikel Cu memiliki tampang lintang absorpsi yang lebih tinggi dan pita resonansi yang lebih tajam dibanding Ni (Gambar 2c). Puncak plasmonik Cu berada pada rentang $\lambda \approx 300\text{--}350$ nm dengan pergeseran sedikit ke panjang gelombang lebih besar dibanding Ni. Sifat elektronik Cu mendukung pembentukan resonansi plasmonik terlokalisasi lebih kuat dengan pergeseran merah (*red-shift*) yang lebih lebar ke daerah cahaya tampak dibanding Ni. Disamping itu, tingkat redaman (*damping*) osilasi elektron dalam Cu lebih rendah dibanding Ni, akibatnya osilasi plasmon berlangsung dengan faktor kualitas lebih baik yang terlihat dari intensitas absorpsi yang lebih tinggi (Tyagi, et al., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa Cu lebih unggul untuk memperluas penyerapan cahaya di wilayah tampak dalam aplikasi fotokatalitik.

Spektrum absorpsi nanopartikel Ni dan Cu menunjukkan perbedaan karakteristik plasmonik yang sangat signifikan. Nanopartikel Ni memiliki puncak resonansi plasmonik yang berada pada wilayah ultraviolet, sebaliknya, nanopartikel Cu menunjukkan puncak resonansi yang bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar, di batas antara UV dan cahaya tampak. Pergeseran ini menunjukkan bahwa Cu memiliki respons plasmonik yang lebih sesuai dengan spektrum Matahari, sehingga secara teoritis lebih efektif dalam meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya untuk aplikasi fotokatalitik. Intensitas tampang lintang absorpsi maksimum nanopartikel Cu secara konsisten lebih tinggi dibanding Ni pada seluruh rentang diameter yang disimulasikan.

3.2 Absorpsi TiO₂ didoping Ni



Gambar 3 Tampang lintang absorpsi nanopartikel TiO₂ didoping dua nanopartikel Ni, diameter TiO₂ adalah (a) 30 nm, (b) 40 nm, dan (c) 50 nm. Diameter Ni diberikan pada Gambar (a).

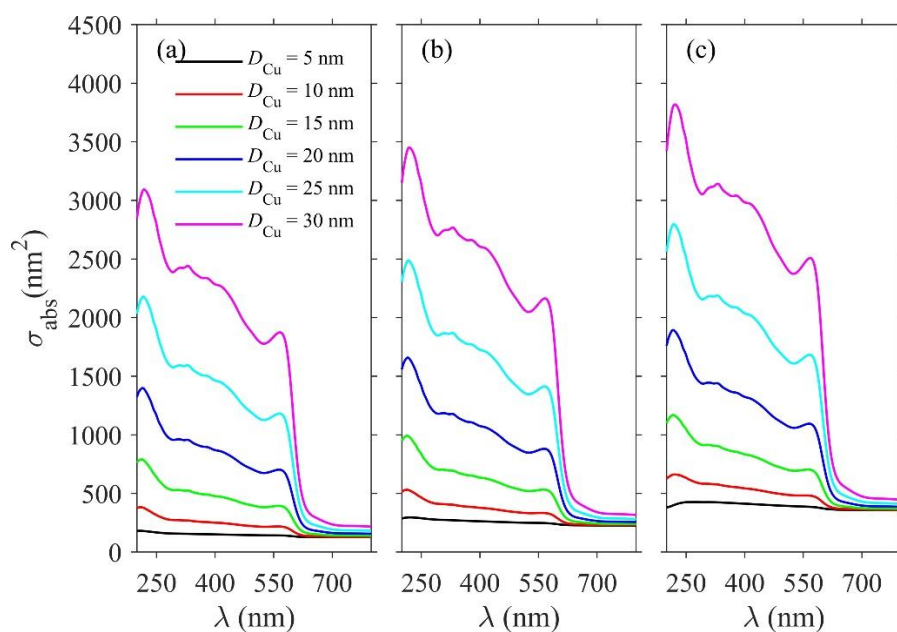
Gambar 3 menunjukkan pengaruh diameter nanopartikel Ni pada permukaan TiO₂ terhadap spektrum absorpsi komposit. Peningkatan diameter nanopartikel Ni menyebabkan kenaikan signifikan pada tampang lintang absorpsi plasmonik. Kurva absorpsi Ni relatif rendah dengan puncaknya sempit. Puncak menjadi jauh lebih intens dan lebih lebar ketika diameter Ni di atas 20 nm. Hal ini disebabkan ukuran partikel sebanding volume elektron bebas sehingga menghasilkan osilasi kolektif yang lebih kuat dan peningkatan kontribusi hamburan, yang dimanifestasikan sebagai kenaikan amplitudo dan pelebaran puncak absorpsi (Muldarisnur, et al., 2019b). *Baseline* absorpsi komposit nanopartikel meningkat dengan diameter TiO₂ yang menandakan bagaimana inti TiO₂ yang lebih besar meningkatkan interaksi optik keseluruhan akibat peningkatan area permukaan yang berinteraksi dengan

Ni dan perubahan lingkungan dielektrik lokal. Terdapat kecenderungan *red-shift* lemah dan pelebaran puncak plasmonik ketika ukuran TiO₂ meningkat. Pergeseran dan pelebaran ini disebabkan peningkatan *dielectric loading* dari inti TiO₂ yang lebih besar.

Hasil ini menunjukkan bahwa desain komposit Ni–TiO₂ perlu mempertimbangkan ukuran inti TiO₂ dan diameter Ni. Jika tujuan utama adalah menggeser dan memperkuat penyerapan cahaya Matahari yang lebih dominan di rentang cahaya tampak, skenario optimal kemungkinan melibatkan Ni dengan ukuran menengah pada inti TiO₂ yang relatif besar untuk memanfaatkan efek *dielectric loading* yang menggeser resonansi ke panjang gelombang lebih panjang. Namun, jika yang diinginkan adalah medan lokal maksimum pada frekuensi tertentu untuk memaksimalkan transfer muatan pada jalur reaksi tertentu, maka kombinasi TiO₂ lebih kecil dengan Ni menengah akan lebih efektif.

3.3 Absorbansi TiO₂ didoping Cu

Spektrum absorbansi komposit Cu–TiO₂ (Gambar 4) menunjukkan bahwa membesarnya diameter nanopartikel Cu meningkatkan penyerapan cahaya secara signifikan pada rentang panjang gelombang UV–visible. Puncak absorbansi Cu yang semula relatif sempit pada ukuran kecil menjadi sangat lebar dengan membesarnya diameter nanopartikel. Peningkatan dimensi nanopartikel Cu memperkuat osilasi plasmon permukaan sekaligus meningkatkan mekanisme damping radiatif sehingga menghasilkan spektrum penyerapan yang lebih luas. Tren serupa dijumpai pada TiO₂ berukuran 40 nm dan 50 nm, dengan intensitas absorbansi yang secara konsisten meningkat dengan diameter nanopartikel Cu.

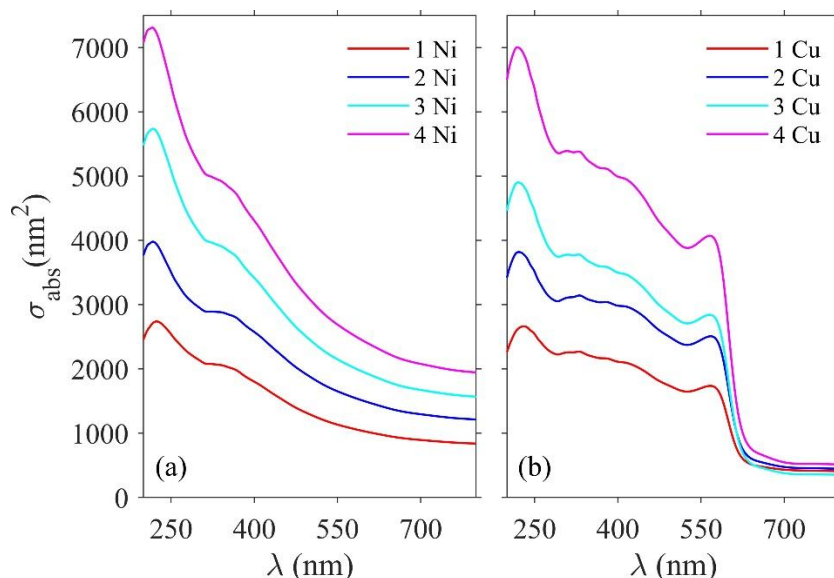


Gambar 4 Tampang lintang absorpsi nanopartikel TiO₂ didoping dua nanopartikel Cu, diameter TiO₂ adalah (a) 30 nm, (b) 40 nm, dan (c) 50 nm. Diameter Cu diberikan pada Gambar (a).

Ukuran inti TiO₂ turut mempengaruhi posisi dan karakteristik puncak plasmonik Cu. Puncak plasmon Cu mengalami sedikit pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar ketika diameter TiO₂ meningkat. Hal ini disebabkan meningkatnya konstanta dielektrik (*dielectric loading*) lokal pada lingkungan sekitar partikel Cu. Selain pergeseran puncak, peningkatan ukuran TiO₂ juga memperlebar spektrum absorbansi dan memperkuat intensitas *baseline*, menandakan bahwa struktur komposit dengan inti TiO₂ yang lebih besar menghasilkan medan elektromagnetik lokal yang lebih kuat dan meningkatkan interaksi optik antara nanopartikel Cu dan permukaan TiO₂. Pelebaran puncak resonansi yang terlihat pada nanopartikel Cu berdiameter besar merupakan indikasi adanya kontribusi mode *multipolar* dan peningkatan damping radiatif (Muldarisnur, et al., 2023; Sharma, et al., 2017). Walaupun hal ini memperluas rentang panjang gelombang yang dapat diserap, pelebaran yang terlalu besar juga dapat meningkatkan disipasi energi melalui pemanasan lokal yang berpotensi menurunkan efisiensi injeksi elektron energi tinggi pada proses fotokatalitik.

3.4 Pengaruh Jumlah Nanopartikel Ni dan Cu

Gambar 5 menunjukkan bahwa penambahan jumlah nanopartikel logam pada permukaan inti TiO₂ meningkatkanampang lintang absorbansi komposit. Untuk kasus Ni, peningkatan jumlah partikel dari meningkatkanampang lintang absorbansi di seluruh rentang UV–visible. Puncak plasmonik pada daerah UV menjadi lebih tinggi dan melebar dengan penambahan jumlah partikel. pola ini mengindikasikan dua kontribusi fisik utama, yaitu penambahan jumlah osilator plasmonik dan menguatnya interaksi resonansi plasmonik antarpartikel yang memperkuat medan lokal di celah antar partikel (Sheng, et al., 2020). Absorbansi Ni relatif tidak bergeser dari rentang panjang gelombang yang lebih pendek (UV) dibandingkan Cu, sehingga pertambahan intensitas tidak diikuti pergeseran puncak.



Gambar 5 Tampang lintang absorpsi nanopartikel TiO₂ didoping 1 - 4 nanopartikel (a) Ni dan (b) Cu. Diameter TiO₂ dan Ni atau Cu diasumsikan masing-masing 50 nm dan 30 nm.

Pola perubahan absorpsi cahaya pada Cu sebanding secara kuantitatif, namun secara kualitatif lebih dramatis. Bertambahnya jumlah nanopartikel Cu menyebabkan kenaikanampang lintang absorpsi yang lebih besar dibandingkan kasus Ni, disertai dengan pelebaran puncak yang lebih nyata dan munculnya fitur spektral tambahan pada rentang panjang gelombang yang lebih panjang. Hal ini disebabkan Cu memiliki resonansi intrinsik yang lebih kuat dan pada panjang gelombang lebih panjang dibanding Ni. Disamping itu, interaksi antarpartikel Cu lebih efektif membentuk *hot-spot* elektromagnetik dan mode *multipolar* yang memperluas serta meningkatkan penyerapan. Perbandingan kedua kasus menegaskan pentingnya optimasi desain komposit nanopartikel untuk aplikasi fotokatalitik. Menambahkan lebih banyak partikel logam Ni ataupun Cu pada permukaan TiO₂ meningkatkan kemampuan absorpsi cahaya, namun hal ini juga meningkatkan damping radiatif dan nonradiatif (pemanasan lokal, peningkatan hamburan) serta potensi rekombinasi muatan. Selain itu, bila jarak antarpartikel terlalu kecil, efek *coupling* dapat menggeser resonansi terlalu jauh atau membuat mode multipolar dominan sehingga medan lokal pada frekuensi tertentu justru menurun. Oleh karena itu, optimasi jumlah partikel harus mempertimbangkan tujuan akhir apakah untuk memaksimalkan penyerapan cahaya atau untuk medan lokal yang kuat pada frekuensi tertentu demi injeksi elektron berebgergi tinggi (*hot-electrons*).

IV. KESIMPULAN

Modifikasi plasmonik dengan nanopartikel Ni dan Cu secara signifikan meningkatkan penyerapan cahaya pada TiO₂, baik melalui peningkatan intensitas absorpsi maupun perubahan karakter resonansi optiknya. Nanopartikel Ni dan Cu sama-sama meningkatkanampang lintang absorpsi dengan bertambahnya diameter partikel dan jumlah partikel, namun dengan perilaku plasmonik yang berbeda. Peningkatan intensitas absorpsi dengan doping Cu jauh lebih besar, resonansi lebih tajam, serta spektrum yang melebar ke arah panjang gelombang tampak. Kelebihan ini

membuat Cu lebih efektif memperluas penyerapan ke wilayah energi yang relevan untuk fotokatalisis berbasis sinar Matahari. Sebaliknya, Ni memberikan respons plasmonik lebih moderat dan berpusat pada wilayah UV, tetapi tetap berkontribusi pada peningkatan absorbansi total serta berpotensi menjadi alternatif material berbiaya rendah. Peningkatan jumlah nanopartikel logam terbukti menghasilkan kenaikan absorbansi yang hampir linear, serta memperkuat efek coupling plasmonik antarpartikel, terutama pada Cu. Namun, pelebaran dan pergeseran puncak resonansi menandakan bahwa optimasi jumlah partikel harus dilakukan hati-hati agar tidak menghasilkan damping berlebih yang dapat menurunkan efisiensi injeksi elektron panas. Hasil ini juga menunjukkan bahwa ukuran TiO₂ inti, diameter partikel logam, dan jumlah partikel berperan sangat penting dalam menentukan respons optik akhir dan karenanya efisiensi fotokatalisis dalam water *splitting*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Universitas Andalas sesuai dengan Kontrak Penelitian Skema Penelitian Tesis Magister Batch I Nomor: 166/UN16.19/PT.01.03/PTM/2025 Tahun Anggaran 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Abed, J., Rajput, N. S., Moutaouakil, A. E., & Jouiad, M. (2020). Recent Advances in the Design of Plasmonic Au/TiO₂ Nanostructures for Enhanced Photocatalytic Water Splitting. *Nanomaterials*, 10(11), 2260. <https://doi.org/10.3390/nano10112260>
- Aldosari, O. F., & Hussain, I. (2024). Unlocking the potential of TiO₂-based photocatalysts for green hydrogen energy through water-splitting: Recent advances, future perspectives and techno feasibility assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 59, 958-981. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.306>
- Altomare, M., Qin, S., Saveleva, V. A., Badura, Z., Tomanec, O., Mazare, A., Zoppellaro, G., Vertova, A., Taglietti, A., Minguzzi, A., Ghigna, P., & Schmuki, P. (2023). Metastable Ni(I)-TiO₂-x Photocatalysts: Self-Amplifying H₂ Evolution from Plain Water without Noble Metal Co-Catalyst and Sacrificial Agent. *J. Am. Chem. Soc.*, 145(48), 26122 – 26132. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c08199>
- Atorf, B., Mühlenbernd, H., Muldarisnur, M., Zentgraf, T., & Kitzerow, H. (2014). Effect of Alignment on a Liquid Crystal/Split-Ring Resonator Metasurface. *ChemPhysChem*, 15(7), 1470-1476. <https://doi.org/10.1002/cphc.201301069>
- Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891–2959. <https://doi.org/10.1021/cr0500535>
- Chen, X., Shen, S., Guo, L., & Mao, S. S. (2010). Semiconductor-based photocatalytic hydrogen generation. *Chemical Reviews*, 110(11), 6503–6570. <https://doi.org/10.1021/cr1001645>
- DeVore, J. R. (1951). Refractive Indices of Rutile and Sphalerite. *J. Opt. Soc. Am.*, 41, 416-419. <https://doi.org/10.1364/JOSA.41.000416>
- Díaz, L., Rodríguez, V. D., González-Rodríguez, M., Rodríguez-Castellón, E., M. Algarra, d. P. N., & Morett, E. (2021). M/TiO₂ (M = Fe, Co, Ni, Cu, Zn) catalysts for photocatalytic hydrogen production under UV and visible light irradiation. *Inorg. Chem. Front.*, 8, 3491-3500. <https://doi.org/10.1039/D0QI01311K>
- Diebold, U. (2003). The surface science of titanium dioxide. *Surface Science Reports*, 48(5-8), 53-229. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(02\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(02)00100-0)
- Gellé, A., & Moores, A. (2017). Water splitting catalyzed by titanium dioxide decorated with plasmonic nanoparticles. *Pure Appl. Chem.*, 89(12), 1817–1827. <https://doi.org/10.1515/pac-2017-0711>
- Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(12R), 8269. <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.8269>

- Hisatomi, T., & Domen, K. (2019). Reaction systems for solar hydrogen production via water splitting with particulate semiconductor photocatalysts. *Nature Catalyst*, 2, 387 – 399. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0242-6>
- Hohenester, U., & Trügler, A. (2012). MNPBEM – A Matlab toolbox for the simulation of plasmonic nanoparticles. *Computer Physics Communications*, 183, 370 – 381. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2011.09.009>
- Johnson, P. B., & Christy, R. W. (1972). Optical constants of the noble metals. *Phys. Rev. B*, 6, 4370-4379.
- Johnson, P. B., & Christy, R. W. (1974). Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd. *Phys. Rev. B*, 9, 5056. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.9.5056>
- Kudo, A., & Miseki, Y. (2009). Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 253–278. <https://doi.org/10.1039/B800489G>
- Kumar, A., Choudhary, P., Kumar, A., Camargo, P. H. C., & Krishnan, V. (2022). Recent Advances in Plasmonic Photocatalysis Based on TiO₂ and Noble Metal Nanoparticles for Energy Conversion Environmental Remediation, and Organic Synthesis. *Small*, 18(1), 2101638. <https://doi.org/10.1002/sml.202101638>
- Liu, Y., Wang, Z., Fan, W., Geng, Z., & Fen, L. (2014). Enhancement of the photocatalytic performance of Ni-loaded TiO₂ photocatalyst under sunlight. *Ceramics International*, 40(3), 3887-3893. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.08.030>
- Mohammed, Y., Hafeez, H. Y., Mohammed, J., Suleiman, A. B., Ndikilar, C. E., & Idris, M. G. (2024). Hydrogen production via photocatalytic water splitting using spinel ferrite-based photocatalysts: Recent and future perspectives. *Next Energy*, 4, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100145>
- Moskovits, M. (2015). The case for plasmon-derived hot carrier devices. *Nature Nanotech*, 10, 6–8. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.280>
- Muldarisnur, M., Fridayanti, N., Oktorina, E., Zeni, E., Elvaswer, E., & Syukri, S. (2019a). Effect of nanoparticle geometry on sensitivity of metal nanoparticle based sensor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 578(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/578/1/012036>
- Muldarisnur, M., Oktorina, E., Fridayanti, N., Zeni, E., Elvaswer, E., & Syukri, S. (2019b). Size and aspect ratio dependency of sensitivity of ellipsoidal metal nanoparticle based liquid sensor. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 578, 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/578/1/012035>
- Muldarisnur, M., Perdana, I., Elvaswer, E., & Puryanti, D. (2023). Mapping of Sensing Performance of Concentric and Non-Concentric Silver Nanoring. *Emerging Science Journal*, 7(4), 1083-1099. <http://dx.doi.org/10.28991/ESJ-2023-07-04-04>
- Qanugo, K., Bose, D., & Thakur, K. K. (2021). A Review on Photocatalytic Water Splitting. *E3S Web of Conferences*, 309, 01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130>
- Sharma, V., Chotia, C., Tarachand, T., Ganesan, V., & Okram, G. S. (2017). Influence of particle size and dielectric environment on the dispersion behaviour and surface plasmon in nickel nanoparticles. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 19, 14096-14106. <https://doi.org/10.1039/C7CP01769C>
- Sheng, S., Ren, Y., Yang, S., Wang, Q., Sheng, P., Zhang, X., & Liu, Y. (2020). Remarkable SERS Detection by Hybrid Cu₂O/Ag Nanospheres. *ACS Omega*, 5(28)<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02301>
- Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972 – 974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
- Tyagi, S., Kashyap, R. K., Dhankhar, A., & Pillai, P. P. (2024). Plasmon-powered chemistry with visible-light active copper nanoparticles. *Chem. Sci.*, 15, 16997-17006. <https://doi.org/10.1039/D4SC04806G>

- Wellia, D. V., Syafawi, A., Putri, Y. E., & Muldarisnur, M. (2023). The effect of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) addition on green synthesis of porous N-doped TiO₂ for photoreduction of heavy metal ion Cr (vi). *RSC advances*, 13(42), 29645-29656. <https://doi.org/10.1039/D3RA03247G>
- Wulandari, M., Astuti, A., & Muldarisnur, M. (2018). Sintesis Nanopartikel TiO₂-SiO₂ Berpori Sebagai Fotokatalis untuk Penjernihan Air Limbah Rumah Tangga. *Jurnal Fisika Unand*, 7(1), 33-38. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.1.33-38.2018>
- Xin, Y., Yu, K., Zhang, L., Yang, Y., Yuan, H., Li, H., Wang, L., & Zeng, J. (2021). Copper-Based Plasmonic Catalysis: Recent Advances and Future Perspectives. *Advanced Materials*, 33(32), 2008145. <https://doi.org/10.1002/adma.202008145>