

Concentration and Urbach Energy of ZnO Nanoparticles Synthesized Using Tween 80 Encapsulant

Konsentrasi dan Energi Urbach Nanopartikel ZnO yang Disintesis Menggunakan Enkapsulan Tween 80

Horasdia Saragih ^{a*}, William Yustian ^a, Ananda E.J. Lingga ^a, Anggraini O. Simanjuntak ^a, Brianna D. Marcia ^a, Dea R. Manalu ^a, Gefriella B. Oumaro ^a, Jeanet G.R. Leo ^a, Karin Kusminarti ^a, Ladyos D. Silalahi ^a, Michelle A. La'lang ^a, Rima S. Nurbayanti ^a, Ruly Y.R.R. Leo ^a, Santika Situmorang ^a, and Widya A. Siahaan ^a

^a Department of Pharmacy, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Adventist University of Indonesia, West Java, Indonesia.

*Corresponding Authors: horas@unai.edu

Abstract

Excessive exposure to ultraviolet (UV) radiation can cause skin damage, necessitating the development of effective and transparent sunscreen materials. ZnO nanoparticles are a promising candidate; however, they often suffer from agglomeration, which degrades their optical performance. This study aims to investigate the effect of varying concentrations of Tween 80 as an encapsulating agent on the optical and structural characteristics of ZnO nanoparticles. The nanoparticles were synthesized using a rotor–stator homogenization method with Tween 80 concentrations ranging from 2 to 5 mL (each dissolved in 50 mL of ethanol), followed by characterization using UV–Vis spectroscopy. The results indicate that increasing the concentration of Tween 80 enhances the concentration of ZnO nanoparticles without significantly altering the average particle size (~2.44 nm), resulting in a monodisperse system. Urbach energy analysis reveals that crystal order improves up to an optimum at 4 mL of Tween 80, followed by a slight decrease at higher concentrations. Optically, all samples exhibit strong absorption in the UV region and high transmittance in the visible range (95–100%). These findings demonstrate that the synthesized ZnO nanoparticles have strong potential as a sunscreen. It is concluded that Tween 80 plays a crucial role in controlling the growth, crystal structure, and optical properties of ZnO nanoparticles, with the optimum concentration yielding the best performance.

Keywords: ZnO Nanoparticles, Tween 80, Urbach Energy.

Abstrak

Paparan radiasi ultraviolet (UV) yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan kulit sehingga diperlukan material tabir surya yang efektif dan transparan. Nanopartikel ZnO merupakan kandidat unggul, namun sering mengalami aglomerasi yang menurunkan performa optiknya. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi konsentrasi Tween 80 sebagai enkapsulan terhadap karakteristik optik dan struktur nanopartikel ZnO. Sintesis dilakukan menggunakan metode homogenisasi rotor-stator dengan variasi Tween 80 (2–5 mL masing-masing di dalam 50 mL Etanol), kemudian dikarakterisasi menggunakan spektroskopi UV-Vis. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Tween 80 meningkatkan konsentrasi nanopartikel ZnO tanpa mengubah ukuran rata-rata partikel (~2,44 nm), menghasilkan sistem monodispers. Analisis energi Urbach menunjukkan bahwa keteraturan kristal meningkat hingga kondisi optimum pada 4 mL Tween 80, kemudian sedikit menurun pada konsentrasi lebih tinggi. Secara optik, seluruh sampel menunjukkan absorpsi kuat pada wilayah UV dan transmitansi tinggi pada cahaya tampak (95–100%). Hal ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO yang dihasilkan memiliki potensi yang besar sebagai tabir surya. Disimpulkan bahwa Tween 80 berperan penting dalam mengontrol pertumbuhan, struktur kristal, dan sifat optik nanopartikel ZnO, dengan konsentrasi optimum menghasilkan performa terbaik.

Kata Kunci: Nanopartikel ZnO, Tween 80, Energi Urbach.



Copyright © 2020 The author(s). You are free to : **Share** (copy and redistribute the material in any medium or format) and **Adapt** (remix, transform, and build upon the material) under the following terms: **Attribution** – You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use; **NonCommercial** – You may not use the material for commercial purposes; **ShareAlike** – If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original. Content from this work may be used under the terms of the a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\) License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Article History:

Received: 15/01/2026,
Revised: 24/04/2026,
Accepted: 24/04/2026,
Available Online: 10/05/2026.

QR access this Article



<https://doi.org/10.36490/journal-jps.com.v9i2.1527>

Pendahuluan

Paparan radiasi ultraviolet (UV) yang berlebihan pada kulit manusia telah menjadi perhatian kesehatan global karena dampaknya yang memicu eritema, penuaan dini, hingga risiko kanker kulit [1]. Dalam upaya perlindungan diri, penggunaan tabir surya berbahan dasar anorganik semakin diminati dibandingkan filter organik karena stabilitas termalnya yang tinggi dan sifatnya yang tidak mengiritasi kulit. Nanopartikel Seng Oksida (ZnO) merupakan salah satu material paling efektif dalam aplikasi ini berkat kemampuannya dalam menyerap radiasi UV yang sangat baik, sekaligus menjaga transparansi estetika ketika diaplikasikan pada permukaan kulit dalam skala nanometer [2,3].

Meskipun memiliki potensi besar, sintesis nanopartikel ZnO sering kali menghadapi kendala berupa aglomerasi yang tinggi, yang dapat menurunkan efektivitas optiknya [4]. Penggunaan surfaktan non-ionik seperti Tween 80 sebagai agen enkapsulan menjadi strategi kunci untuk mengontrol morfologi dan ukuran partikel [5]. Tween 80 bekerja dengan cara menyelimuti permukaan partikel selama proses nukleasi, mencegah pertumbuhan kristal yang berlebihan melalui rintangan sterik, sehingga menghasilkan nanopartikel yang lebih terdispersi dan stabil [6].

Kualitas optik dari nanopartikel ZnO yang disintesis sangat dipengaruhi oleh tingkat keteraturan struktur kristalnya, yang secara kuantitatif dapat dianalisis melalui energi Urbach. Energi Urbach memberikan gambaran mengenai *disorder* struktural dan adanya level energi tambahan di dalam *band gap* nanopartikel ZnO akibat adanya cacat kristal atau pengaruh dopan/enkapsulan [7,8]. Dalam konteks tabir surya, pemahaman mengenai energi Urbach menjadi krusial karena perubahan pada ekor pita (*band tail*) ini secara langsung mempengaruhi efisiensi absorpsi foton pada panjang gelombang tertentu di daerah UV [8,9].

Penelitian sintesis nanopartikel ZnO menggunakan enkapsulan telah banyak dilakukan, namun sampai saat ini korelasi spesifik antara variasi konsentrasi Tween 80 terhadap konsentrasi nanopartikel ZnO yang dihasilkan dan besarnya energi Urbach-nya masih belum ada dilaporkan. Perubahan konsentrasi surfaktan tidak hanya mengubah ukuran fisik nanopartikel, tetapi juga memodifikasi distribusi keadaan elektronik pada batas pita energinya. Fenomena ini memicu pertanyaan ilmiah mengenai sejauh mana optimalisasi Tween 80 dapat menekan ketidakteraturan kristal nanopartikel guna menghasilkan nanopartikel dengan performa optik yang unggul [10,11].

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh variasi konsentrasi Tween 80 terhadap karakteristik struktural dan optik nanopartikel ZnO. Fokus utama diarahkan pada analisis hubungan antara konsentrasi enkapsulan yang digunakan dengan konsentrasi nanopartikel ZnO yang dihasilkan serta nilai energi Urbach-nya melalui metode spektroskopi UV-Vis. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis dan praktis dalam pengembangan material tabir surya berbasis nanoteknologi yang lebih efisien dan terukur secara optis.

Metode Penelitian

Alat dan Bahan

Alat utama yang digunakan pada penelitian ini adalah: (1) Rotor-Stator Homogenizer merek High Speed Homogenizer FSH-2A, (2) wadah pemanas yang dilengkapi dengan medium air, dan (3) UV-Vis Spectrophotometer merek RIGOL Ultra – 3660.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah: (1) zinc chloride ($ZnCl_2$) dengan kemurnian 99,9%; (2) Tween 80 dengan kemurnian 99,9%; (3) etanol dengan kemurnian 99,9%; dan (4) air murni. $ZnCl_2$, Tween 80 dan Etanol, dibeli dari Merck KGaA.

Penyiapan Prekursor $ZnCl_2$ dan Tween 80

Prekursor $ZnCl_2$ disiapkan dengan melarutkan 1 g serbuk $ZnCl_2$ ke dalam 100 mL air murni. Prekursor Tween 80 disiapkan sebanyak 4 ragam konsentrasi, yaitu: 2 mL, 3 mL, 4 mL dan 5 mL, masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol.

Sintesis Nanopartikel ZnO

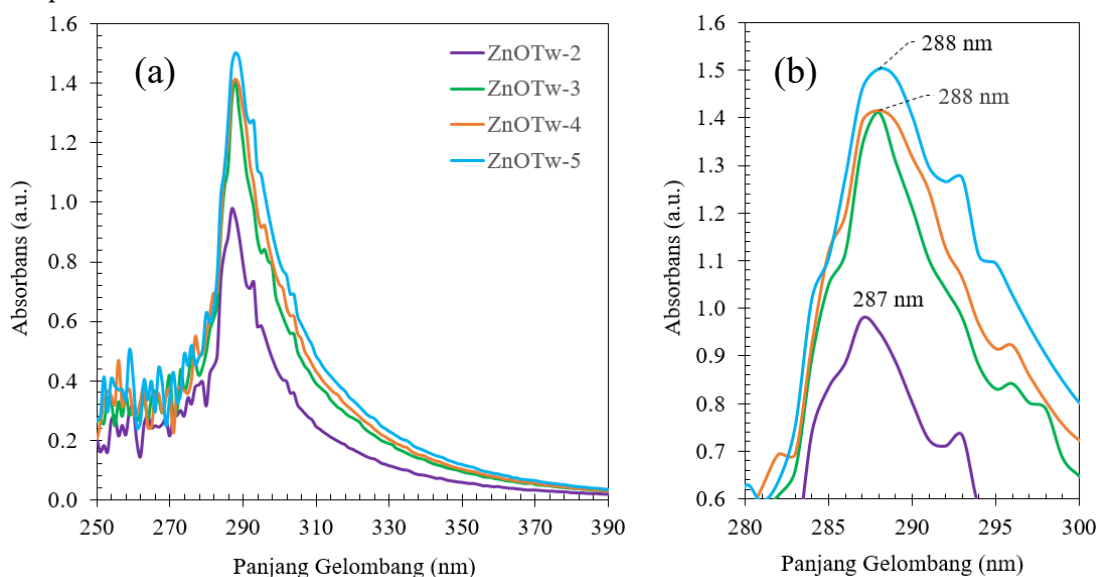
Prekursor $ZnCl_2$ dicampur dengan prekursor Tween 80 dan dihomogenisasi menggunakan sistim peralatan Rotor-Stator Homogenizer merek High Speed Homogenizer FSH-2A. Homogenisasi dilakukan dengan memutar rotor pada laju 10800 rpm pada temperatur ruang selama 15 menit. Hasil larutan yang telah dihomogenisasi, selanjutnya dipanaskan di dalam medium air pada temperatur $95^\circ C$ selama 30 menit. Setelah dipanaskan, selanjutnya dihomogenisasi kembali pada laju rotasi rotor 10800 rpm pada temperatur ruang selama 10 menit.

Karakterisasi

Nanopartikel ZnO hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan sistim peralatan UV-Vis Spectrophotometer merek RIGOL Ultra – 3660. Absorbans dan transmitans optik nanopartikel diukur pada temperatur ruang dan pada rentang panjang gelombang 200 nm sampai 800 nm.

Hasil dan Diskusi

Hasil pengukuran spektrum absorbans keempat sampel yang disintesis di atas, pada panjang gelombang 250 nm sampai 390 nm, ditunjukkan pada Gambar 1. Pembentukan nanopartikel ZnO di dalam koloid dapat dikonfirmasi dari hasil spektrum absorbans ini. Semua sampel (ZnOTw-2 hingga ZnOTw-5) menunjukkan puncak serapan eksiton yang sangat dominan dan terdefinisi dengan baik pada wilayah ultraviolet, tepatnya berpusat pada panjang gelombang 287 nm dan 288 nm. Dalam perspektif fisika semikonduktor, puncak tajam ini adalah "sidik jari optik" yang memvalidasi pembentukan kristal ZnO di dalam koloid. Ketajaman puncak ini menunjukkan pembentukan fasa kristalin ZnO yang terdefinisi dengan baik. Munculnya puncak tajam ini merupakan transisi elektronik dari pita valensi ($O2p$) ke pita konduksi ($Zn-4s$) material ZnO. Data spektrum ini menunjukkan bahwa material ZnO telah terbentuk di dalam semua sampel koloid.



Gambar 1. (a) Spektrum absorbans empat ragam nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan empat ragam konsentrasi enkapsulan Tween 80, yaitu: 2 mL (ZnOTw-2), 3 mL (ZnOTw-3), 4 mL (ZnOTw-4), dan 5 mL (ZnOTw-5), yang masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol. (b) Panjang gelombang dimana puncak absorbans terjadi.

Menurut hukum Beer-Lambert, besar absorbans (A) suatu materi di dalam suatu koloid berbanding lurus dengan konsentrasinya yang dinyatakan dalam persamaan: $A = \epsilon \cdot c \cdot l$, dimana ϵ adalah koefisien ekstingsi molar, c adalah konsentrasi, dan l adalah panjang lintasan optik. Berdasarkan data absorbans yang diperoleh di atas bahwa puncak absorbans paling tinggi dihasilkan oleh koloid ZnOTw5, kemudian diikuti secara berturut-turut oleh ZnOTw-4, ZnOTw-3 dan ZnOTw-2. Ini berarti koloid ZnOTw-5 memiliki konsentrasi ZnO yang paling tinggi dan disusul secara berturut-turut oleh ZnOTw4, ZnOTw-3 dan ZnOTw-2. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan konsentrasi Tween 80 yang berbeda saat sintesis, mempengaruhi konsentrasi ZnO yang terbentuk, dimana semakin besar konsentrasi Tween 80 yang digunakan, semakin tinggi konsentrasi ZnO yang terbentuk. Fakta ini menunjukkan bahwa Tween 80 tidak hanya berperan sebagai enkapsulasi semata, akan tetapi juga mempengaruhi proses pembentukan populasi material ZnO. Hal ini dapat difahami karena pada saat prekursor $ZnCl_2$ bereaksi dan mulai membentuk inti kristal (*nuclei*) ZnO di dalam larutan, molekul-molekul Tween 80 secara alami bertindak sebagai agen pembatas ruang di dalam larutan sebelum mengenkapsulasi nuklei-nuklei ZnO.

Molekul Tween 80 memiliki rantai hidrokarbon yang panjang dan gugus hidroksil yang dapat berinteraksi dengan permukaan partikel ZnO melalui gaya van der Waals atau ikatan hidrogen. Semakin tinggi konsentrasi molekul Tween 80 di dalam larutan, semakin cepat permukaan inti kristal yang baru lahir tertutup oleh molekul Tween 80 [12]. Hal ini secara efektif menghentikan pertumbuhan kristal ZnO lebih lanjut. Karena pertumbuhan setiap individu partikel ZnO dibatasi oleh agen pembatas, maka sisa ion Zn^{2+} di dalam larutan akan cenderung membentuk inti kristal baru dari pada menempel pada partikel yang sudah ada. Hasilnya, jumlah (populasi) partikel kristal ZnO yang terbentuk menjadi lebih banyak, yang berkontribusi pada kenaikan nilai absorbans [13].

Selain itu, Tween 80 adalah surfaktan yang dapat membentuk misel di dalam pelarut etanol/air. Pada konsentrasi tertentu (di atas *critical micelle concentration* atau CMC), molekul Tween 80 mengatur diri menjadi struktur sferis. Struktur ini berfungsi sebagai "reaktor nano" atau template. Konsentrasi molekul Tween 80 yang lebih tinggi meningkatkan densitas atau jumlah misel di dalam larutan. Ruang-ruang mikroskopik ini menangkap ion Zn^{2+} dan memfasilitasi reaksi pembentukan ZnO di dalam lingkungan yang terlindungi. Semakin banyak "reaktor nano" (misel) yang tersedia karena konsentrasi Tween 80 yang tinggi, semakin banyak pula lokasi dimana nanopartikel ZnO dapat tumbuh secara simultan. Hal ini berkontribusi meningkatkan konsentrasi nanopartikel di dalam larutan [14]. Secara termodinamika pembentukan nanopartikel membutuhkan energi untuk menciptakan permukaan baru (energi permukaan). Energi bebas Gibbs (ΔG) untuk pembentukan inti kristal baru sangat dipengaruhi oleh tegangan antarmuka (γ). Molekul Tween 80 menurunkan tegangan antarmuka γ antara fase padat ZnO dan pelarut cair. Dengan turunnya γ , penghalang energi untuk nukleasi menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, pada konsentrasi Tween 80 yang lebih tinggi memudahkan sistem secara termodinamika untuk memicu kelahiran lebih banyak nanopartikel ZnO dari larutan prekursor [15].

Diameter rata-rata nanopartikel ZnO yang terbentuk di dalam koloid dapat dihitung dengan menggunakan model massa efektif (sebagaimana dilakukan oleh Samuel *et al.* [16]):

$$E^* = E_g^{bulk} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2er^2} \left(\frac{1}{m_e^* m_0} + \frac{1}{m_h^* m_0} \right) - \frac{1,8e}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} - \frac{0,124e^3}{\hbar^2 (4\pi\epsilon\epsilon_0)^2} \left(\frac{1}{m_e^* m_0} + \frac{1}{m_h^* m_0} \right)^{-1}$$

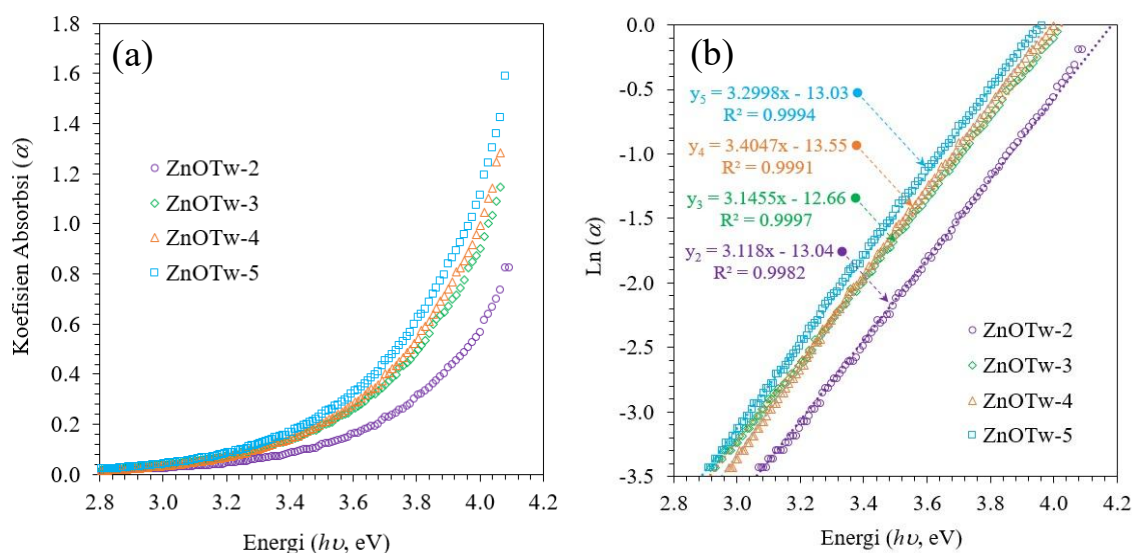
dimana: E_g^{bulk} adalah energi celah pita (*band gap*) bulk ZnO (partikel ZnO berukuran besar) (eV), \hbar adalah konstanta Plank, r adalah jari-jari partikel, m_e adalah massa efektif elektron, m_h adalah massa efektif hole, m_0 adalah massa elektron bebas, e adalah muatan elektron, ϵ adalah permitivitas relatif, dan ϵ_0 adalah permitivitas ruang hampa. Dengan sedikit penyederhanaan matematis, untuk material nanopartikel ZnO (dimana: massa efektif elektron $m_e^* = 0,26 m_0$; massa efektif hole $m_h^* = 0,59 m_0$; permitivitas relatif $\epsilon = 8,5$; dan $E_g^{bulk} = 3,3$ eV), persamaan di atas dapat diubah menjadi:

$$r(nm) = \frac{-0,3049 + \sqrt{-26,23012 + 10240,72/\lambda_p(nm)}}{-6,3829 + 2483,2/\lambda_p(nm)}$$

dimana: λ_p adalah panjang gelombang dimana puncak absorbans terjadi.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1b, panjang gelombang dimana puncak absorbans terjadi (λ_p) untuk masing-masing sampel adalah 287 nm (ZnOTw-2), 288 nm (ZnOTw-3), 288 nm (ZnOTw-4), dan 288 nm (ZnOTw-5). Dengan menggunakan masing-masing besaran panjang gelombang ini, diameter rata-rata

partikel ZnO yang tumbuh dapat dihitung menggunakan persamaan di atas. Hasilnya adalah sekitar 1,22 nm (untuk semua sampel). Dengan demikian diameter rata-ratanya adalah 2,44 nm. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi Tween 80 yang digunakan saat sintesis di atas tidak mengubah secara signifikan diameter rata-rata nanopartikel ZnO yang terbentuk. Selain itu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1a, puncak absorbansi setiap sampel relatif sangat sempit dan tunggal. Ini menunjukkan bahwa diameter nanopartikel ZnO yang terbentuk memiliki distribusi ukuran yang relatif sangat sempit dan tunggal (monodispers).



Gambar 2. (a) Spektrum koefisien absorpsi (α) empat ragam nanopartikel ZnO yang spektrum absorbansnya ditunjukkan pada Gambar 1. (b) Plot $\ln(\alpha)$ sebagai fungsi energi foton $h\nu$.

Kristalinitas nanopartikel ZnO yang terbentuk di dalam koloid, cacat strukturnya, atau derajat ketidakteraturan atom penyusunnya, dapat diinvestigasi dari ekor Urbach (*Urbach tail*) koefisien absorpsinya. Koefisien absorpsi dari spektrum absorbansi nanopartikel yang ditunjukkan pada Gambar 1a, ditunjukkan pada Gambar 2a. Kristalinitas, cacat struktur, atau derajat ketidakteraturan atom penyusun, menghasilkan keadaan lokalisasi di dalam celah pita energi optik ZnO (*band gap energy*). Ekor Urbach adalah daerah transisi pada spektrum absorbansi dimana nilai koefisien absorpsi (α) mulai meningkat secara eksponensial sebelum mencapai bagian yang sangat curam (pita energi utama) (Gambar 2a). Adanya ekor Urbach pada spektrum absorbansi menunjukkan adanya distribusi keadaan terlokalisasi di dalam celah pita energi nanopartikel tersebut. Ekor Urbach adalah manifestasi dari adanya cacat kristal, ketidakteraturan susunan atom (*disorder*) di dalam nanopartikel. Lebarnya menunjukkan tingkat ketidakteraturan struktural tersebut.

Lebar ekor Urbach dinyatakan oleh energi Urbach (E_u). Ekor Urbach yang lebar memiliki energi Urbach yang besar. Energi Urbach yang besar menunjukkan ketidakteraturan struktur yang tinggi. Energi Urbach dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\alpha = \alpha_0 \exp \frac{h\nu}{E_0}$$

$$\ln \alpha = \left(\frac{1}{E_0} \right) h\nu + \ln \alpha_0$$

dimana: α adalah koefisien absorpsi, $h\nu$ adalah energi foton (eV) = $12400/\lambda$ (nm), α_0 adalah suatu konstanta, dan E_0 adalah energi Urbach. Untuk mendapatkan nilai besar energi Urbach E_0 , kita memplot logaritma natural (\ln) dari koefisien absorpsi α , yaitu $\ln(\alpha)$, sebagai fungsi dari energi foton $h\nu$. Koefisien kemiringan garis lurus hasil plot ini adalah sama dengan $1/E_0$.

Plot $\ln(\alpha)$ sebagai fungsi dari energi foton $h\nu$, untuk keempat sampel nanopartikel hasil sintesis di atas, dilakukan pada rentang energi foton dari 2,9 eV sampai 4,0 eV. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 2b. Diperoleh empat persamaan garis lurus dari empat hasil plot dengan besar koefisien kemiringan masing-masing, yaitu: 3,118 (ZnOTw-2); 3,145 (ZnOTw-3); 3,404 (ZnOTw-4); dan 3,299 (ZnOTw-5); dan besar koefisien determinasinya (R^2) masing-masing, yaitu: 0,9982; 0,9997; 0,9991; dan 0,9994. Koefisien determinasi R^2

menunjukkan seberapa baik persamaan garis lurus yang dihasilkan tersebut cocok dengan sebaran data yang dipilih. Pemilihan rentang energi foton $h\nu$ dari 2,9 eV sampai 4,0 eV telah menghasilkan koefisien determinasi (R^2) yang sangat tinggi, yaitu di atas 99%, untuk keempat persamaan garis lurus. Artinya, keempat persamaan garis lurus di atas memiliki kecocokan yang sangat tinggi dengan masing-masing sebaran data $h\nu$ yang diplot. Dengan demikian, koefisien kemiringan dari masing-masing garis lurus yang diperoleh telah dapat digunakan untuk menghitung besar energi Urbach E_0 secara akurat.

Dengan menggunakan nilai masing-masing koefisien kemiringan garis lurus di atas, energi Urbach E_0 diperoleh sebagai berikut: $E_0(2) = 0,320$ eV (ZnOTw-2); $E_0(3) = 0,317$ eV (ZnOTw3); $E_0(4) = 0,294$ eV (ZnOTw-4); dan $E_0(5) = 0,303$ eV (ZnOTw-5). Hasil ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan Tween 80 sebesar 4 mL menghasilkan energi Urbach yang paling kecil, yang artinya nanopartikel ini memiliki struktur kristal yang lebih teratur dibanding dengan yang lain. Selanjutnya diikuti masing-masing oleh nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan Tween 80 sebesar 5 mL, 3 mL, dan 2 mL. Dengan demikian, nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan Tween 80 sebesar 2 mL memiliki ketidakteraturan struktur yang paling tinggi. Dari hasil ini dapat kita nyatakan bahwa semakin besar volume Tween 80 yang digunakan, semakin teratur struktur kristal nanopartikel ZnO yang dihasilkan. Namun anomali terjadi pada nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan Tween 80 sebesar 5 mL, energi Urbachnya kembali meningkat (0,303 eV). Mekanisme peningkatan E_u yang terjadi pada konsentrasi tinggi ini, memerlukan investigasi lebih lanjut.

Mekanisme pengaruh Tween 80 terhadap besar energi Urbach di atas merupakan hasil interaksi kompleks antara proses kimia permukaan, dinamika pertumbuhan kristal, dan pembentukan struktur elektronik pada skala nanometer. Pada tahap awal sintesis, molekul Tween 80 teradsorpsi pada permukaan inti ZnO yang sedang terbentuk melalui interaksi antara gugus hidrofilik (seperti -OH dan -O⁻) dengan ion Zn²⁺ atau situs oksigen di permukaan kristal. Adsorpsi ini tidak hanya bersifat fisik (*physisorption*), akan tetapi juga dapat melibatkan interaksi kimia lemah yang cukup untuk memodifikasi energi permukaan partikel. Akibatnya, energi bebas permukaan menurun dan pertumbuhan kristal menjadi lebih terkontrol, khususnya pada arah kristal tertentu. Dalam kondisi ini, Tween 80 bertindak sebagai agen pengarah pertumbuhan (*growth-directing agent*) sekaligus penstabil (*capping agent*).

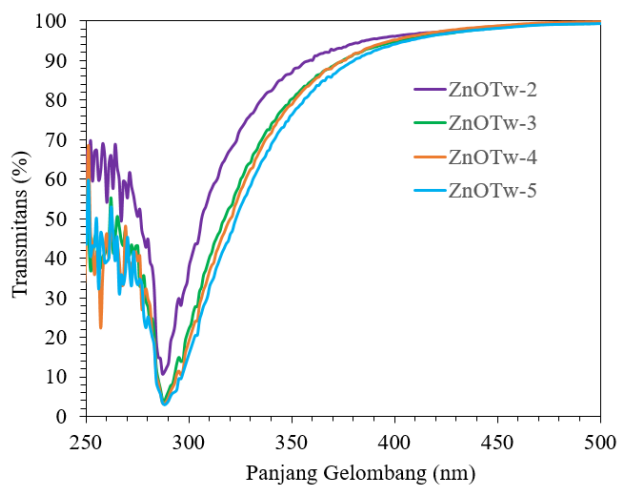
Seiring meningkatnya konsentrasi Tween 80, lapisan surfaktan yang terbentuk di permukaan nanopartikel menjadi semakin rapat dan homogen. Hal ini berdampak langsung pada penurunan jumlah cacat kristal, seperti kekosongan oksigen (*oxygen vacancies*) dan interstisial Zn, karena permukaan partikel terlindungi dari kondisi reaksi yang tidak stabil. Dengan berkurangnya cacat ini, fluktuasi potensial lokal dalam kisi kristal juga menurun, sehingga distribusi keadaan energi di dekat tepi pita menjadi lebih tajam. Secara elektronik, hal ini berarti jumlah keadaan lokal (*localized states*) dalam celah pita energi (*band gap*) berkurang, yang berimplikasi pada penurunan energi Urbach. Pada kondisi ini, sistem mendekati keadaan kristalin ideal dengan *disorder* minimal [17,18].

Dengan demikian, secara mikroskopis, Tween 80 memainkan peran ganda yang sangat bergantung pada konsentrasinya. Pada konsentrasi rendah hingga optimal, ia berfungsi sebagai penekan cacat dan penstabil struktur kristal, sehingga menurunkan energi Urbach. Sebaliknya, pada konsentrasi tinggi, ia justru menjadi sumber gangguan baru yang meningkatkan ketidakteraturan sistem. Energi Urbach yang dihasilkan merupakan refleksi langsung dari keseimbangan antara dua mekanisme ini, yaitu perbaikan keteraturan kristal dan induksi disorder oleh interaksi organik-anorganik di permukaan nanopartikel.

Hasil pengukuran spektrum transmitans keempat sampel, pada panjang gelombang 250 nm sampai 500 nm, ditunjukkan pada Gambar 3. Pada wilayah ultraviolet (UV), khususnya di bawah ~380 nm, seluruh sampel (ZnOTw-2 hingga ZnOTw-5) memperlihatkan penurunan transmitans yang sangat signifikan hingga mendekati nol, radiasi UV tidak diteruskan (ditransmisikan) melainkan diserap secara efektif. Ini menunjukkan bahwa semua sampel memiliki kemampuan proteksi UV yang baik, yang merupakan sifat utama yang diinginkan untuk aplikasi tabir surya.

Pada wilayah cahaya tampak (400–500 nm), seluruh sampel menunjukkan transmitans yang sangat tinggi, mendekati 95–100%. Ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO yang dihasilkan bersifat transparan terhadap cahaya tampak. Karena energi foton pada wilayah tampak lebih kecil dari pada energi celah pita ZnO, tidak terjadi eksitasi elektron antar pita, sehingga cahaya tampak tidak diserap dan dapat diteruskan. Perbedaan kecil antar kurva menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Tween 80 cenderung meningkatkan transmitans di wilayah tampak secara marginal. Dari perspektif aplikasi tabir surya, kombinasi sifat ini sangat ideal: absorpsi kuat pada UV (perlindungan kulit dari radiasi berbahaya) dan transparansi tinggi pada cahaya tampak (mengurangi efek *white cast*). Sampel dengan konsentrasi Tween 80 lebih tinggi

(ZnOTw-4 dan ZnOTw-5) tampak memberikan keseimbangan terbaik antara kedua sifat tersebut, karena menunjukkan absorpsi UV yang efektif sekaligus transmitans maksimum pada wilayah tampak. Dengan demikian, peningkatan konsentrasi Tween 80 secara fisika berkontribusi pada peningkatan kualitas optik nanopartikel ZnO melalui kontrol ukuran, dispersi, dan interaksi cahaya–materi.



Gambar 3. Spektrum transmitans empat ragam nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan empat ragam konsentrasi enkapsulan Tween 80, yaitu: 2 mL (ZnOTw-2), 3 mL (ZnOTw-3), 4 mL (ZnOTw-4), dan 5 mL (ZnOTw-5), yang masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa variasi konsentrasi Tween 80 berpengaruh signifikan terhadap karakteristik optik dan struktur nanopartikel ZnO yang dihasilkan. Peningkatan konsentrasi Tween 80 terbukti meningkatkan konsentrasi nanopartikel ZnO melalui mekanisme peningkatan nukleasi, tanpa mengubah ukuran rata-rata partikel secara signifikan (~2,44 nm), sehingga diperoleh sistem nanopartikel yang monodispers. Dari analisis struktur elektronik, nilai energi Urbach menunjukkan bahwa konsentrasi Tween 80 yang lebih tinggi cenderung meningkatkan keteraturan kristal dan menurunkan cacat struktur hingga mencapai kondisi optimum pada ZnOTw-4. Namun, pada konsentrasi yang terlalu tinggi, mulai muncul kembali peningkatan ketidakteraturan akibat interaksi organik yang berlebihan. Sementara itu, dari sisi sifat optik, seluruh sampel menunjukkan kemampuan absorpsi yang sangat kuat pada wilayah ultraviolet dan transmitans yang tinggi pada wilayah cahaya tampak. Hal ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO yang dihasilkan menunjukkan potensi sebagai bahan aktif tabir surya berdasarkan sifat optiknya, namun memerlukan uji SPF lebih lanjut. Sampel dengan konsentrasi Tween 80 lebih tinggi, khususnya ZnOTw-4 dan ZnOTw-5, memberikan performa optik terbaik karena mampu mengoptimalkan keseimbangan antara proteksi UV dan transparansi visual. Dengan demikian, Tween 80 tidak hanya berperan sebagai enkapsulan, tetapi juga sebagai pengontrol pertumbuhan, struktur kristal, dan sifat optik nanopartikel ZnO, yang secara keseluruhan menentukan kinerja material dalam aplikasi tabir surya. Namun pada penelitian ini, stabilitas ukuran nanopartikel ZnO di atas dalam jangka waktu yang lama, belum diinvestigasi. Ini adalah keterbatasan dalam studi ini yang perlu dilakukan sebagai penelitian lanjutan.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat benturan kepentingan, baik yang bersumber dari kepentingan finansial maupun relasi personal, yang dapat memengaruhi proses maupun hasil penelitian yang dilaporkan dalam artikel ini.

References

- [1] Brar G, Dhaliwal A, Brar AS, Sreedevi M, Ahmadi Y, Irfan M, et al. A Comprehensive Review of the Role of UV Radiation in Photoaging Processes Between Different Types of Skin. *Cureus* 2025;17. <https://doi.org/10.7759/cureus.81109>.

- [2] Chavda VP, Acharya D, Hala V, Daware S, Vora LK. Sunscreens: A comprehensive review with the application of nanotechnology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 2023;86:104720. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104720>.
- [3] Kapare HS, Bhosale M, Karwa P, Kulkarni D, Bhole R, Labhade S. Phyto-Assisted Synthesis and Investigation of Zinc Oxide Nanoparticles for Their Anti-Aging, Sun Protection and Antibacterial Activity. *Cosmetics* 2025;12:238. <https://doi.org/10.3390/cosmetics12060238>.
- [4] Kołodziejczak-Radzimska A, Jesionowski T. Zinc Oxide—From Synthesis to Application: A Review. *Materials* 2014;7:2833–81. <https://doi.org/10.3390/ma7042833>.
- [5] Sukmawati A, Utami W, Yuliani R, Da'i M, Nafarin A. Effect of tween 80 on nanoparticle preparation of modified chitosan for targeted delivery of combination doxorubicin and curcumin analogue. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 2018;311:012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/311/1/012024>.
- [6] Ntakirutimana S, Tan W, Wang Y. Enhanced surface activity of activated carbon by surfactants synergism. *RSC Adv* 2019;9:26519–31. <https://doi.org/10.1039/C9RA04521J>.
- [7] Bindu P, Thomas S. Estimation of lattice strain in ZnO nanoparticles: X-ray peak profile analysis. *J Theor Appl Phys* 2014;8:123–34. <https://doi.org/10.1007/s40094-014-0141-9>.
- [8] Kumari R, Sahai A, Goswami N. Effect of nitrogen doping on structural and optical properties of ZnO nanoparticles. *Progress in Natural Science: Materials International* 2015;25:300–9. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2015.08.003>.
- [9] Wang X, Yu D, Xu S. Determination of absorption coefficients and Urbach tail depth of ZnO below the bandgap with two-photon photoluminescence. *Opt Express* 2020;28:13817. <https://doi.org/10.1364/OE.391534>.
- [10] Bakkar MR, Ali AM, Elkhoully GE, Raya NR, Bilverstone TW, Chatterton NP, et al. Post-Synthesis Modulation of the Physicochemical Properties of Green-Synthesized Iron Oxide Nanoparticles with Tween 80 to Enhance Their Antibacterial Activity and Biocompatibility. *Pharmaceutics* 2025;17:1371. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17111371>.
- [11] Rozi AN, Saragih H. Sintesis Nanopartikel ZnO Menggunakan Prekursor ZnCl₂ dan Polimer Penstabil Tween 80 untuk Aplikasi Tabir Surya. *JFU* 2025;14:585–94. <https://doi.org/10.25077/jfu.14.6.585-594.2025>.
- [12] Sharif SNM, Hashim N, Isa IM, Jajuli MN, Arifin A, Abu Bakar N, et al. Tween–80 Coating in Enhancing Physicochemical Stability, Kinetics and Release Mechanism of Layered Double Hydroxide-Ferulate. *Indones J Chem* 2024;24:543. <https://doi.org/10.22146/ijc.91497>.
- [13] Angelina G, Yanti DD, Ashari A, Agung AAJ, Ayuwulanda A. The Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Extract Tomato (*Solanum lycopersicum*) As Capping Agent and Its Antioxidant Activity. *Stannum* 2024;6:10–20. <https://doi.org/10.33019/jstk.v6i1.4394>.
- [14] Wani MM, Bhat BA. Micelle-driven organic synthesis: an update on the synthesis of heterocycles and natural products in aqueous medium over the last decade. *RSC Adv* 2025;15:25586–607. <https://doi.org/10.1039/D5RA02664D>.
- [15] Polte J. Fundamental growth principles of colloidal metal nanoparticles – a new perspective. *CrystEngComm* 2015;17:6809–30. <https://doi.org/10.1039/C5CE01014D>.
- [16] Samuel MS, Bose L, George KC. Optical Properties of ZnO Nanoparticles. *Academic Review* 2009;XVI(1):57-65.
- [17] Arda L, Perez MMS, Ozugurlu E, Tascioglu I. B-Doped ZnO Nanoparticles: Defect Chemistry, Tensile Strain, and Tunable Optical Response. *Inorganics* 2026;14:60. <https://doi.org/10.3390/inorganics14020060>.
- [18] Muthusamy S, Bharatan S, Sivaprakasam S, Mohanam R. Effect of Deposition Temperature on Zn Interstitials and Oxygen Vacancies in RF-Sputtered ZnO Thin Films and Thin Film-Transistors. *Materials* 2024;17:5153. <https://doi.org/10.3390/ma17215153>.