

Size Stability and Optical Properties of ZnO Nanoparticles Coated with Tween 80 Polymer

Stabilitas Ukuran dan Sifat Optik Nanopartikel ZnO yang Dilapisi Polimer Tween 80

Mirthelia Endah Oywari ^a, Donn Richard Ricky ^a, Horasdia Saragih ^{a*}

^a Department of Pharmacy, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Advent Indonesia, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

*Corresponding Authors: horas@unai.edu

Abstract

Background: ZnO nanoparticles are widely used as UV filters in sunscreens due to their broad-spectrum protection and aesthetic transparency. However, agglomeration caused by high surface energy often compromises their efficacy. Coating with non-ionic polymers such as Tween 80 represents a potential stabilization strategy. **Objective:** This study aims to investigate the effect of varying Tween 80 concentrations on the size stability and optical properties of ZnO nanoparticles. **Methods:** Tween 80-coated ZnO nanoparticles were synthesized via a solvolysis method assisted by a rotor-stator homogenizer at Tween 80 volume variations of 1, 2, 3, and 4 mL in 50 mL of ethanol. Characterization was performed using a Particle Size Analyzer (PSA) and a UV-Vis spectrophotometer at day 0 and day 60. **Results:** Increasing Tween 80 concentration significantly reduced the mean diameter of nanoparticles from 17.9 nm to 11.4 nm and narrowed the size distribution (standard deviation decreased from 13.2 nm to 2.8 nm). The zeta potential remained near zero (-0.1 to -0.2 mV) due to the non-ionic nature of Tween 80, yet colloidal stability was maintained through a steric hindrance mechanism. After 60 days of storage, the 4 mL Tween 80 concentration was the most effective in limiting size growth (only 2.6%), compared to 83.7% for the 1 mL concentration. All samples exhibited high transmittance (>87%) in the visible light spectrum while maintaining strong UV absorption. **Conclusion:** An optimal Tween 80 concentration (4 mL in 50 mL ethanol) is crucial for producing ZnO nanoparticles with long-term size stability and superior optical properties, making them promising for next-generation sunscreen cosmetic formulations.

Keywords: ZnO nanoparticles, Encapsulation, Steric Stability, Optical Properties, Tween 80.

Abstrak

Latar Belakang: Nanopartikel ZnO banyak digunakan sebagai filter UV dalam tabir surya karena perlindungan spektrum luas dan transparansi estetika, namun aglomerasi akibat energi permukaan tinggi sering menurunkan efektivitasnya. Pelapisan dengan polimer non-ionik seperti Tween 80 menjadi strategi stabilisasi yang potensial. **Tujuan:** Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh variasi konsentrasi Tween 80 terhadap stabilitas ukuran dan sifat optik nanopartikel ZnO. **Metode:** Nanopartikel ZnO dilapisi Tween 80 disintesis melalui metode solvolisis dengan bantuan rotor-stator homogenizer pada variasi volume Tween 80 (1, 2, 3, dan 4 mL dalam 50 mL etanol). Karakterisasi dilakukan menggunakan Particle Size Analyzer (PSA) dan spektrofotometer UV-Vis pada hari ke-0 dan ke-60. **Hasil:** Peningkatan konsentrasi Tween 80 secara signifikan menurunkan diameter rata-rata nanopartikel dari 17,9 nm menjadi 11,4 nm serta mempersempit distribusi ukuran (standar deviasi dari 13,2 nm menjadi 2,8 nm). Potensial zeta mendekati nol (-0,1 hingga -0,2 mV) karena sifat non-ionik Tween 80, namun stabilitas koloid dipertahankan melalui mekanisme hambatan sterik. Setelah penyimpanan 60 hari, konsentrasi Tween 80 4 mL paling efektif membatasi pertumbuhan ukuran (hanya 2,6%), dibandingkan konsentrasi 1 mL (83,7%). Seluruh sampel menunjukkan transmitansi tinggi (>87%) pada spektrum cahaya tampak serta serapan UV yang kuat. **Kesimpulan:** Konsentrasi Tween 80 yang optimal (4 mL dalam 50 mL etanol) sangat krusial untuk menghasilkan nanopartikel ZnO dengan stabilitas ukuran jangka panjang dan sifat optik yang unggul, sehingga berpotensi diaplikasikan dalam formulasi kosmetik tabir surya generasi baru.

Kata Kunci: Nanopartikel ZnO, Enkapsulas, Stabilitas Sterik, Sifat Optik, Tween 80.



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: 08/02/2026,
Revised: 02/05/2026,
Accepted: 02/05/2026,
Available Online: 01/06/2026.

QR access this Article



<https://doi.org/10.36490/journal-jps.com.v9i2.1542>

Pendahuluan

Penggunaan nanopartikel seng oksida (ZnO) sebagai bahan aktif dalam tabir surya telah menjadi fokus utama dalam industri kosmetik modern dibandingkan dengan filter ultraviolet (UV) organik tradisional seperti oxybenzone atau avobenzone. Nanopartikel ZnO menawarkan perlindungan spektrum yang lebih luas (*broad-spectrum*) yang mencakup wilayah UV-A dan UV-B secara simultan melalui mekanisme penyerapan dan biokompatibel serta tidak toksik [1]. Selain itu, nanopartikel ZnO memberikan keuntungan estetika yang baik, yaitu transparan saat diaplikasikan pada kulit karena ukurannya sangat kecil sehingga tidak menimbulkan *white cast* sebagaimana biasanya muncul pada tabir surya yang lain [2].

Meskipun memiliki banyak keunggulan, nanopartikel ZnO tanpa modifikasi permukaan memiliki kecenderungan alami untuk beraglomerasi akibat energi permukaannya yang besar dan gaya tarik-menarik van der Waals. Aglomerasi ini secara drastis akan menurunkan stabilitasnya dan performa fotokatalitiknya. Untuk mengatasi ini, pelapisan permukaan menggunakan polimer adalah strategi yang tepat untuk dilakukan. Polimer pelapis akan menciptakan penghalang yang dapat mencegah terjadinya koalisi antar nanopartikel [3]. Dalam konteks pelapisan polimer untuk aplikasi topikal, Tween 80 menawarkan keunggulan yang unik dibandingkan dengan polimer pelapis yang lain seperti PEG atau PVP. Sebagai surfaktan non-ionik, Tween 80 dapat membentuk lapisan pelindung di permukaan nanopartikel ZnO [4]. Dengan mengontrol konsentrasi Tween 80, transparansi nanopartikel ZnO dalam spektrum cahaya tampak dapat dipertahankan sementara absorpsinya pada wilayah UV tetap optimal. Stabilitas optik ini sangat vital untuk memastikan efikasi perlindungan UV tidak menurun ketika diaplikasikan dan selama masa penyimpanan.

Urgensi pengembangan nanopartikel ZnO yang stabil secara ukuran dan sifat optik didasari pada kebutuhan akan tabir surya yang memiliki performa konsisten dan keamanan jangka panjang. Ketidakstabilan ukuran dapat menyebabkan sedimentasi dalam produk dan penurunan nilai *Sun Protection Factor* (SPF), sedangkan ketidakstabilan optik dapat mengakibatkan hilangnya transparansi dan efektivitas filtrasi radiasi UV [5]. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi stabilitas ukuran dan sifat optik nanopartikel ZnO yang dilapisi polimer Tween 80. Pengaruh variasi konsentrasi polimer Tween 80 yang digunakan terhadap stabilitas tersebut, dianalisis. Studi ini diharapkan dapat menentukan rasio optimal yang mampu menghasilkan nanostruktur ZnO yang stabil, transparan, sehingga efektif sebagai agen fotoprotektif, guna menjawab tantangan formulasi tabir surya generasi terbaru yang aman dan efisien di masa yang akan datang.

Metode Penelitian

Bahan

Untuk mensintesis nanopartikel ZnO terlapis Tween 80, bahan yang digunakan adalah: (1) zinc chloride (ZnCl₂, kemurnian 99,9%); (2) Tween 80 (kemurnian 99,9%); (3) etanol (kemurnian 99,9%); dan (4) *de-ionized water* (air murni). Zinc chloride, Tween 80 dan Etanol, dibeli dari Merck KGaA Germany. Semua bahan-bahan ini digunakan langsung tanpa perlakuan tambahan.

Pembuatan Prekursor

Prekursor ZnCl₂ disiapkan dengan melarutkan 1 g serbuk ZnCl₂ ke dalam 10 mL air. Empat ragam prekursor Tween 80 disiapkan dengan melarutkan 1 mL, 2 mL, 3 mL, dan 4 mL Tween 80 yang masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol.

Sintesis Nanopartikel ZnO

Nanopartikel ZnO disintesis menggunakan sistem peralatan *Rotor-Stator Homogenizer* merek *High Speed Homogenizer FSH-2A*. Lebar celah *rotor-stator*-nya adalah 1 mm. Pertama-tama prekursor ZnCl₂ dimasukkan ke dalam gelas beker 100 mL dan dihomogenisasi dengan memutar *rotor* pada laju 8000 rpm pada temperatur ruang. Satu menit kemudian, cairan prekursor Tween 80 diteteskan secara perlahan ke dalamnya dengan menggunakan *syringe*. Setelah penetesan prekursor Tween 80 selesai dilakukan, homogenisasi terus dilakukan dengan meningkatkan laju putar *rotor* pada 10800 rpm selama 10 menit.

Hasil larutan homogen campuran prekursor ZnCl₂ dan prekursor Tween 80 yang diperoleh selanjutnya dipanaskan pada temperatur 80°C selama 60 menit secara radiatif menggunakan lampu berdaya 500 watt. Temperatur larutan homogen hasil pemanasan diukur secara langsung dengan menggunakan termometer. Setelah dipanaskan larutan ini kembali dihomogenisasi pada laju rotasi *rotor* 10800 rpm pada temperatur ruang selama 5 menit. Proses sintesis seperti ini dilakukan untuk masing-masing ragam konsentrasi prekursor Tween 80 yang digunakan.

Karakterisasi

Nanopartikel ZnO yang disintesis, yang telah dilapisi oleh Tween 80, selanjutnya dikarakterisasi. Karakterisasi dilakukan mencakup: (1) pengukuran distribusi diameter (untuk mendapatkan diameter rata-rata dan indeks polidispersitasnya), (2) pengukuran mobilitas elektroforetik (untuk mendapatkan besar potensial zetanya), dan (3) pengukuran transmitansi optiknya pada panjang gelombang 200 nm sampai 800 nm, untuk mengetahui sifat optiknya. Distribusi diameter dan mobilitas elektroforetik diukur dengan menggunakan sistem peralatan *Particle Size Analyzer (PSA)* merek HORIBA SZ-100 (Japan). Transmitansi optik diukur dengan menggunakan sistem peralatan *UV-Vis Spectrophotometer* merek RIGOL Ultra - 3660 (RIGOL Technologies, China).

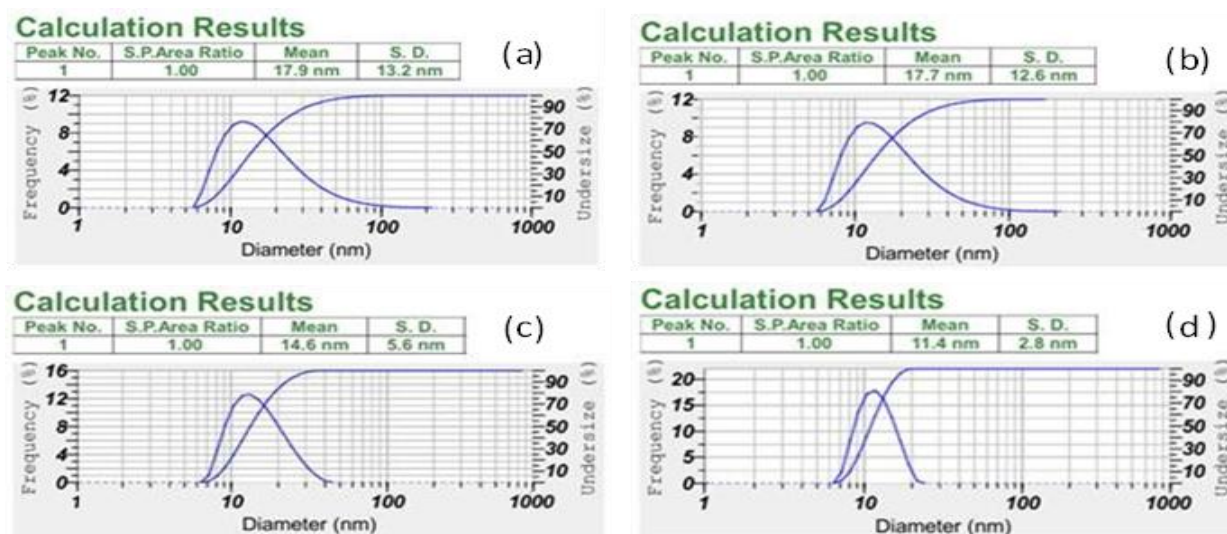
Hasil Dan Pembahasan

Hasil pengukuran distribusi diameter, diameter rata-rata (*mean*) dan standar deviasi (SD) nanopartikel ZnO yang disintesis tepat setelah selesai disintesis (0 hari), ditunjukkan pada Gambar 1. Diperoleh, diameter rata-rata nanopartikel ZnO tersebar dari 11,4 nm sampai 17,9 nm dan standar deviasinya tersebar dari 2,8 nm sampai 13,2 nm. Terlihat ada korelasi yang signifikan antara peningkatan volume Tween 80 yang digunakan dengan pengecilan ukuran nanopartikel ZnO dan penyempitan distribusi ukurannya. Ketika volume Tween 80 yang digunakan bertambah, diameter rata-rata nanopartikel hasil sintesis berkurang. Hal yang sama terjadi pada standar deviasinya. Standar deviasi nanopartikel berkurang ketika volume Tween 80 yang digunakan ditambah.

Secara teoritik, molekul Tween 80 yang bersifat amfifilik akan bermigrasi ke antarmuka nanopartikel-pelarut. Bagian hidrofobik dari molekul Tween 80 berinteraksi dengan permukaan nanopartikel ZnO yang memiliki energi bebas permukaan yang tinggi, sementara rantai polioksietilen yang hidrofilik dari molekul Tween 80 menjulur ke arah medium air (media dispersi). Bol'shagin & Roldughin [6] melaporkan bahwa hadirnya molekul surfaktan pada permukaan nuklei ZnO menciptakan penghalang fisik sehingga dapat menghalangi penambahan atom lebih lanjut ke kisi kristal nuklei ZnO tersebut. Dengan meningkatnya konsentrasi Tween 80, kerapatan molekul yang teradsorpsi pada permukaan nuklei ZnO semakin tinggi, sehingga laju pelapisan lebih dominan dari pada laju pertumbuhan kinetik nuklei.

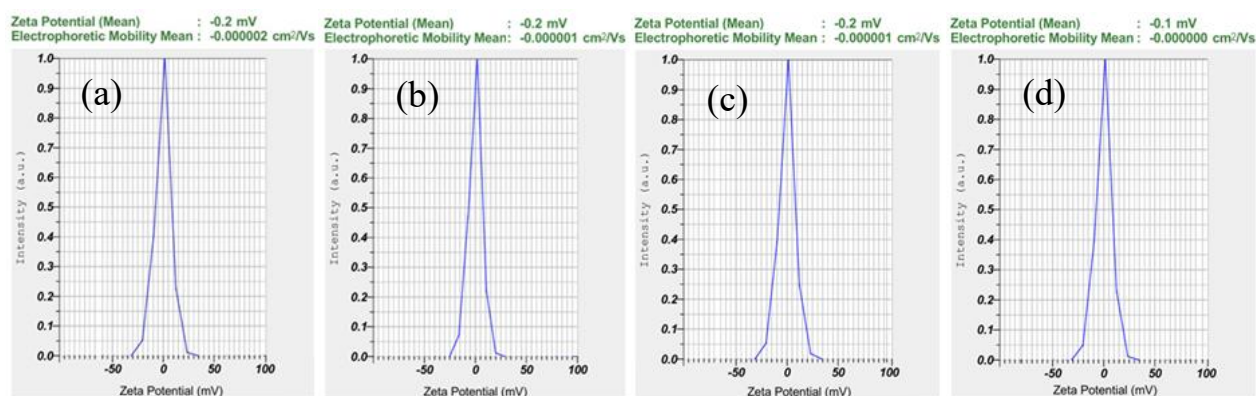
Peningkatan konsentrasi Tween 80 juga menyebabkan penurunan nilai standar deviasi (SD) yang drastis, dari 13,2 nm (Gambar 1a) menjadi 2,8 nm (Gambar 1d). Penurunan SD ini berkaitan dengan efektivitas stabilisasi sterik oleh molekul Tween 80. Pada konsentrasi rendah (1 mL), jumlah molekul Tween 80 tidak mencukupi untuk menutupi seluruh permukaan nuklei ZnO yang terbentuk secara simultan. Akibatnya, sebagian nuklei mengalami koalisi dan pertumbuhan yang tidak terkendali sehingga menghasilkan variasi ukuran yang lebih lebar. Sebaliknya, pada konsentrasi yang lebih tinggi (4 mL), molekul Tween 80 tersedia cukup untuk melapisi setiap nuklei ZnO segera setelah proses nukleasi terjadi. Secara molekuler, interaksi antara molekul Tween 80 dan nanopartikel ZnO dipicu oleh adanya kekosongan oksigen (*oxygen vacancies*) pada permukaan nanopartikel ZnO, yang memberikan titik aktif bagi gugus fungsi dari molekul Tween 80 untuk berikatan koordinasi dengan ion Zn²⁺ di permukaan nanopartikel ZnO. Ketika konsentrasi Tween 80 meningkat, viskositas mikro di sekitar nanopartikel akan berubah (bertambah) dan hambatan sterik menjadi lebih kuat. Bagian hidrofilik dari molekul Tween 80 yang berikatan dengan molekul air menciptakan lapisan

hidrasi yang kuat. Lapisan ini mencegah terjadinya proses *Ostwald ripening* dimana nanopartikel kecil larut ke dalam medium dan bermigrasi ke permukaan nanopartikel yang lebih besar.



Gambar 1. Distribusi diameter, diameter rata-rata (*mean*) dan standar deviasi (SD) nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan: (a) 1 mL, (b) 2 mL, (c) 3 mL, dan (d) 4 mL Tween 80, yang masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol. Pengukuran dilakukan tepat setelah nanopartikel selesai disintesis (0 hari).

Dengan terhambatnya koalisi dan *ripening* pada nanopartikel, ukuran nanopartikel ZnO dapat terjaga. Ini menjelaskan mengapa diameter rata-rata nanopartikel ZnO yang menggunakan Tween 80 dengan volume 4 mL jauh lebih kecil dan lebih seragam. Hasil ini menunjukkan bahwa Tween 80 berfungsi sebagai pengontrol morfologi dan ukuran yang sangat efektif dalam sintesis nanopartikel berbasis solvolisis. Dari hasil ini terlihat bahwa peningkatan konsentrasi Tween 80 memberikan dua keuntungan: (1) menurunkan diameter rata-rata nanopartikel dengan membatasi akses prekursor ke permukaan kristal nanopartikel (pelapisan cepat); dan (2) mempersempit distribusi diameter (menurunkan SD) melalui mekanisme stabilisasi sterik yang mencegah aglomerasi dan koalisi antar nanopartikel.



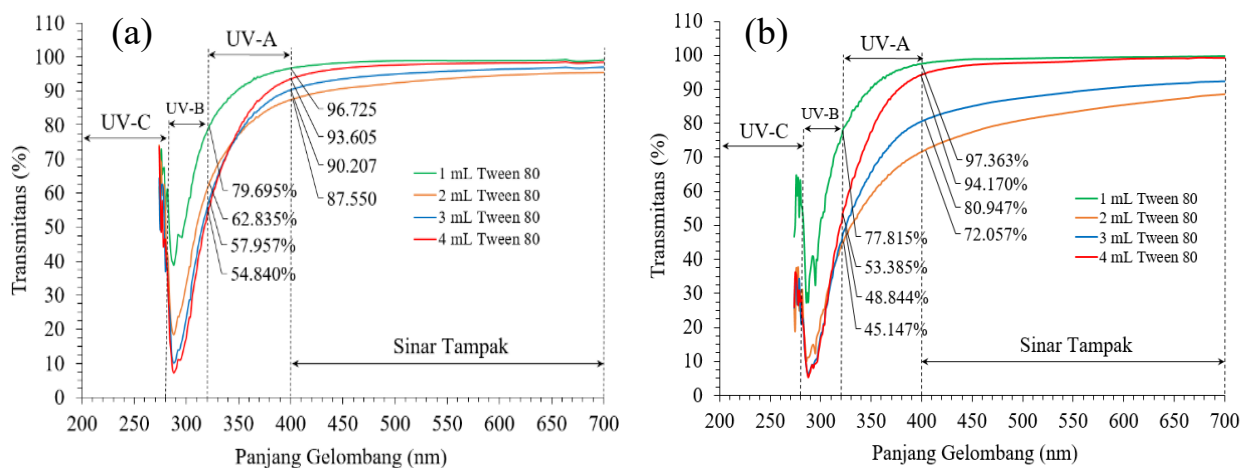
Gambar 2. Distribusi potensial zeta dan mobilitas elektroporetik rata-rata nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan: (a) 1 mL, (b) 2 mL, (c) 3 mL, dan (d) 4 mL Tween 80, yang masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol. Pengukuran dilakukan tepat setelah nanopartikel selesai disintesis (0 hari).

Hasil pengukuran mobilitas elektroforetik dan distribusi potensial zeta pada saat tepat setelah nanopartikel ZnO selesai disintesis (0 hari), ditunjukkan pada Gambar 2. Potensial zeta rata-rata nanopartikel sangat rendah (mendekati nol), tersebar dari -0,1 mV sampai -0,2 mV. Sementara mobilitas elektroforetik rata-ratanya tersebar dari 0 cm²/Vs sampai -2x10⁻⁶ cm²/Vs. Terlihat, potensial zeta nanopartikel ZnO tidak berubah untuk penggunaan tiga ragam volume Tween 80 (1 mL, 2 mL, 3 mL). Penurunan terjadi ketika volume Tween 80 yang digunakan 4 mL. Potensial zeta adalah parameter yang menunjukkan muatan listrik bersih pada lapisan geser (*slipping plane*) suatu partikel di dalam medium dispersi. Kasim *et al.* [7] melaporkan bahwa titik isoelektrik (*Isoelectric Point*/IEP) nanopartikel ZnO berada pada kisaran pH 9 sampai 10. Ketika nanopartikel

ZnO (tanpa dilapisi oleh surfaktan) didispersi di dalam medium air yang memiliki pH netral (pH 7), potensial zetanya adalah positif yang besarnya sekitar antara +15 mV hingga +30 mV karena protonasi gugus hidroksil permukaan ($-\text{ZnOH}_2^+$). Pada penelitian ini potensial zeta nanopartikel ZnO diperoleh mendekati netral (hampir nol). Ini disebabkan oleh sifat kimia Tween 80 sebagai surfaktan yang non-ionik.

Secara teoritis, ketika molekul Tween 80 teradsorpsi di permukaan nanopartikel ZnO melalui interaksi antara gugus hidrofilik polioksietilen dengan ion Zn^{2+} di permukaan kristal nanopartikel ZnO, molekul tersebut membentuk lapisan pelindung yang tebal. Taheri *et al.* [8] melaporkan bahwa surfaktan non-ionik tidak memberikan muatan listrik tambahan ke permukaan nanopartikel, melainkan justru menutupi muatan asli permukaan nanopartikel tersebut. Hal ini mengakibatkan pergeseran *slipping plane* menjauh dari permukaan padat nanopartikel ke arah luar masuk ke dalam fase cair (medium dispersi) dimana potensial listrik telah meluruh secara signifikan. Fenomena ini menjelaskan mengapa nilai potensial zeta yang terukur pada penelitian ini sangat rendah. Perbedaan mencolok antara literatur (+20 mV) dan hasil eksperimen ini (-0,1 hingga -0,2 mV) membuktikan bahwa pelapisan Tween 80 telah berhasil meniadakan pengaruh muatan elektrostatik permukaan asli nanopartikel ZnO. Adsorpsi polimer Tween 80 yang berat molekulnya besar akan menyaring (*shielding*) medan listrik permukaan nanopartikel ZnO sehingga instrumen PSA hanya mendeteksi nilai potensial yang hampir netral pada batas lapisan hidrasi surfaktan. Ditinjau secara elektrostatik, nanopartikel dengan potensial zeta di bawah ± 30 mV dianggap tidak stabil dan sangat rentan terhadap aglomerasi. Menurut teori DLVO (*Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek*), stabilitas koloid bergantung pada kesetimbangan antara gaya tarik van der Waals dan gaya tolak elektrostatik [9].

Jika potensial zeta rendah (-0,1 sampai -0,2 mV), gaya tolak menolak elektrostatik antar nanopartikel hampir tidak ada. Implikasinya nanopartikel mudah berkoalisi melalui proses tumbukan akibat gerak Brown dan melekat satu sama lain karena gaya tarik van der Waals yang dominan sehingga menyebabkan aglomerasi dalam waktu singkat. Namun, untuk sistem yang menggunakan penyalubung surfaktan, stabilitas tidak hanya ditentukan oleh parameter elektrostatik yang diwakili oleh potensial zeta, melainkan juga oleh hambatan sterik yang dihasilkan oleh molekul surfaktan. Meskipun potensial zetanya menunjukkan ketidakstabilan secara teoritis, nanopartikel yang diselubungi oleh surfaktan dapat tetap terdispersi dengan baik di dalam medium dalam jangka panjang jika lapisan sterik yang dihasilkan oleh surfaktannya cukup tebal untuk mencegah inti nanopartikel saling bersentuhan.



Gambar 3. Transmittans optik nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan: 1 mL, 2 mL, 3 mL, dan 4 mL Tween 80, yang masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol. Pengukuran dilakukan: (a) tepat setelah nanopartikel selesai disintesis (0 hari) dan (b) setelah 60 hari.

Hasil pengukuran transmittans optik nanopartikel ZnO hasil sintesis di atas, dari panjang gelombang 200 nm sampai 700 nm yang diukur tepat setelah nanopartikel selesai disintesis (0 hari), ditunjukkan pada Gambar 3a. Nanopartikel ZnO terlihat mentransmisikan secara baik gelombang sinar tampak (400 nm sampai 700 nm) dan menyerap secara baik gelombang ultraviolet (< 400 nm). Spektrum transmittans optik yang ditunjukkan pada Gambar 3a memberikan informasi yang sangat penting mengenai interaksi radiasi elektromagnetik dengan sistem koloid nanopartikel ZnO-Tween 80 hasil sintesis. Profil transmittans ini menunjukkan variasi yang signifikan seiring dengan perubahan volume Tween 80 yang digunakan, terutama

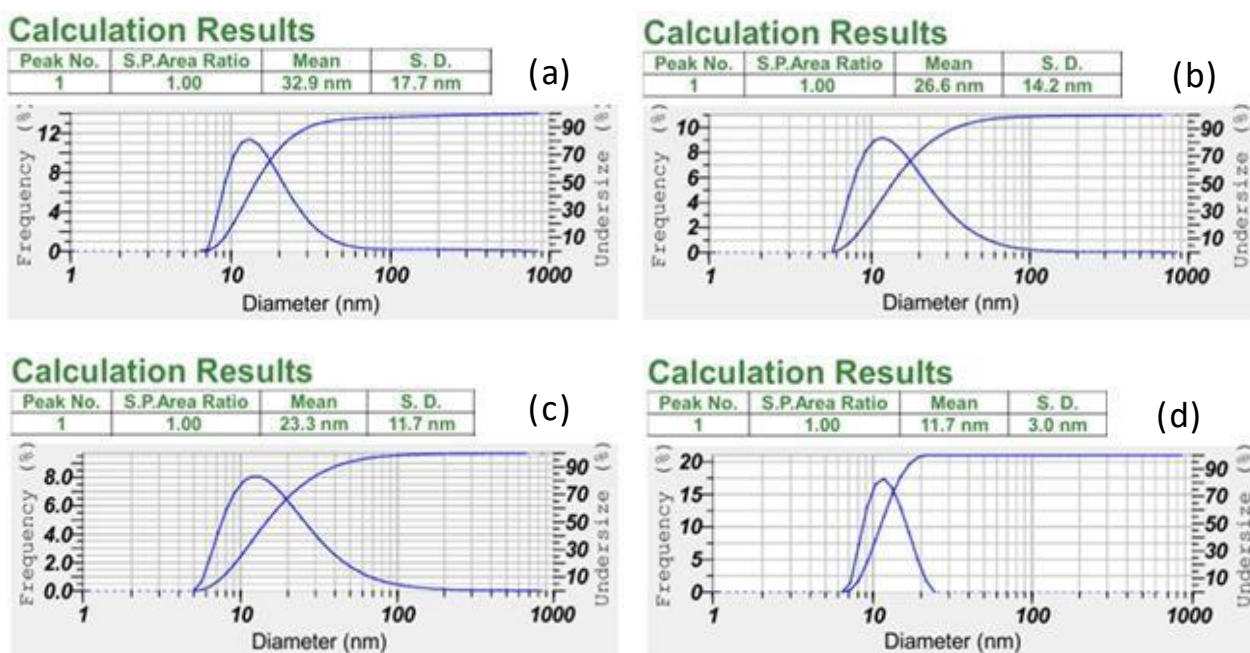
pada rentang ultraviolet (UV). Pada daerah UV-C (200-280 nm) dan UV-B (280-320 nm) spektrum transmitans ini menunjukkan bahwa semua sampel memiliki nilai transmitans yang rendah, dengan lembah absorpsi (titik transmitans terendah) berada di sekitar panjang gelombang 280-300 nm. Pada daerah UV-A (320-400 nm), terjadi kenaikan transmitans yang sangat tajam yang merepresentasikan ambang absorpsi intrinsik (*fundamental absorption edge*) nanopartikel ZnO.

Absorpsi kuat di daerah UV ini terjadi akibat eksitasi elektron pada nanopartikel ZnO dari pita valensi ke pita konduksi. Terlihat tren dimana semakin besar volume Tween 80 yang digunakan, semakin rendah nilai transmitansnya (semakin tinggi absorpsinya) pada daerah UV. Sebagai contoh, pada panjang gelombang ~300 nm, sampel dengan 4 mL Tween 80 menunjukkan transmitans terendah (~8-10%), sedangkan sampel dengan 1 mL Tween 80 menunjukkan transmitans yang lebih tinggi (~40%). Hal ini berkaitan dengan efisiensi pembentukan nanopartikel. Konsentrasi surfaktan yang lebih tinggi memfasilitasi pembentukan nuklei ZnO yang lebih banyak dan lebih kecil (terdispersi baik), sehingga luas permukaan efektif untuk menyerap radiasi UV meningkat secara signifikan. Pada daerah sinar tampak, seluruh sampel menunjukkan nilai transmitans yang sangat tinggi, berkisar antara 87,55% hingga 96,72%. Hal ini menunjukkan bahwa dispersi nanopartikel ZnO-Tween 80 sangat transparan. Ukuran nanopartikel ZnO yang jauh lebih kecil dari panjang gelombang cahaya tampak meminimalkan hamburan Rayleigh sehingga meningkatkan transparansinya [10]. Terlihat juga bahwa konsentrasi Tween 80 mempengaruhi transparansi koloid. Berbeda pada daerah UV, pada daerah sinar tampak (khususnya >450 nm), sampel dengan 1 mL Tween 80 justru memiliki transmitans paling tinggi (~96,7%), sedangkan sampel dengan 4 mL memiliki transmitans yang relatif lebih rendah (~87,5%) meskipun masih tergolong sangat transparan.

Perbedaan nilai transmitans di atas dapat dijelaskan melalui ketebalan dan kepadatan lapisan enkapsulator Tween 80 di permukaan nanopartikel ZnO. Peningkatan volume Tween 80 dari 1 mL ke 4 mL meningkatkan kepadatan molekul Tween 80 yang terikat pada permukaan nanopartikel ZnO (mengisi kekosongan oksigen di permukaan nanopartikel). Lapisan surfaktan yang semakin tebal dan padat ini cenderung meningkatkan hamburan internal atau refleksi pada antarmuka, yang menyebabkan menurunkan intensitas cahaya tampak yang diteruskan melalui medium. Selain itu, lapisan Tween 80 memiliki indeks bias yang berbeda dengan pelarut air. Bertambahnya konsentrasi surfaktan di dalam sistem adalah meningkatkan fraksi volume zat terlarut organik di dalam sistem tersebut, yang menurut hukum Lorentz-Lorenz dapat mengubah indeks bias efektif medium dispersi, sehingga mempengaruhi nilai transmitans totalnya [11].

Stabilitas ukuran dan sifat optik nanopartikel yang telah disintesis dan telah dilapisi di atas, selanjutnya diinvestigasi. Keempat koloid nanopartikel tersebut disimpan selama 60 hari pada temperatur ruang. Pengukuran distribusi diameter, diameter rata-rata dan standar deviasi kembali dilakukan setelah masa penyimpanan. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4. Jika kita bandingkan hasil pada Gambar 4 (setelah masa penyimpanan 60 hari) dan hasil pada Gambar 1 (pada saat 0 hari), distribusi diameter, diameter rata-rata dan standar deviasi nanopartikel, berubah. Terjadi penambahan diameter rata-rata dan pelebaran distribusi ukuran (peningkatan *standard deviation*) yang signifikan pada semua sampel setelah 60 hari masa penyimpanan. Pada hari ke-0, diameter rata-rata berkisar antara 11,4 nm hingga 17,9 nm, namun setelah 60 hari, ukuran nanopartikel mengalami pergeseran ke arah skala yang lebih besar. Penambahan diameter rata-rata ini mengindikasikan bahwa meskipun Tween 80 bertindak sebagai *capping agent*, sistem koloid masih mengalami ketidakstabilan termodinamika selama penyimpanan. Hal ini sejalan dengan yang dilaporkan oleh Michalak *et al.* [12], yang menyatakan bahwa nanopartikel logam oksida dalam media cair cenderung mengalami pertumbuhan sekunder untuk meminimalkan energi bebas permukaannya yang tinggi melalui proses reduksi luas permukaan total.

Fenomena peningkatan diameter rata-rata dan nilai SD setelah 60 hari ini dapat dijelaskan melalui mekanisme Ostwald *ripening*. Nanopartikel-nanopartikel yang lebih kecil, yang memiliki kelarutan permukaan yang lebih tinggi karena kelengkungan permukaannya yang ekstrem, secara perlahan larut ke dalam medium dan bergerak menuju permukaan nanopartikel yang lebih besar dan terserap [12]. Proses ini didorong oleh gradien konsentrasi kimia di sekitar nanopartikel dengan ukuran yang berbeda. Meskipun Tween 80 membentuk lapisan hidrasi di sekitar permukaan nanopartikel dan menghasilkan gaya tolak sterik, rendahnya potensial zeta memfasilitasi kedekatan antar nanopartikel (*close proximity*), yang mempercepat transfer massa yang memicu Ostwald *ripening*. Akibatnya, populasi nanopartikel kecil berkurang sementara nanopartikel besar terus bertumbuh, yang secara visual terlihat dari pergeseran kurva distribusi diameter pada Gambar 4 dibandingkan dengan Gambar 1.



Gambar 4. Distribusi diameter, diameter rata-rata (mean) dan standar deviasi (SD) nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan: (a) 1 mL, (b) 2 mL, (c) 3 mL, dan (d) 4 mL Tween 80, yang masing-masing dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol. Pengukuran dilakukan setelah 60 hari sejak nanopartikel selesai disintesis.

Selama 60 hari masa penyimpanan, efektivitas stabilisasi sterik dari rantai polioksietilen Tween 80 diuji. Pada konsentrasi Tween 80 yang rendah (1 mL), jumlah molekul surfaktan ini terlihat tidak mencukupi untuk menutupi seluruh permukaan baru nukleus ZnO yang muncul akibat pertumbuhan, sehingga menyebabkan lonjakan standar deviasi yang drastis (Gambar 4a). Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi (4 mL), peningkatan ukuran diameter nanopartikel tampak lebih teredam dibandingkan konsentrasi rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan molekul Tween 80 yang tinggi pada antarmuka ZnO-air mampu memberikan hambatan fisik yang lebih kuat terhadap koalisi. Sebagaimana dilaporkan oleh Ettelaie *et al.* [13] stabilitas sterik sangat bergantung pada ketebalan lapisan adsorpsi dan derajat hidrasi dari rantai polimer. Selama masa penyimpanan, kemungkinan terjadi relaksasi rantai polimer atau desorpsi parsial yang mengurangi efisiensi pembungkusan. Namun pada konsentrasi 4 mL, sisa molekul di larutan mungkin membantu mempertahankan integritas lapisan lebih baik dari pada konsentrasi rendah. Stabilitas nanopartikel ZnO dalam sistem ini bersifat stabilitas kinetik yang didominasi oleh hambatan sterik, namun ketiadaan stabilitas elektrostatis (potensial zeta ~ 0) menyebabkan sistem tetap mengalami evolusi ukuran. Proses Ostwald *ripening* dan aglomerasi adalah mekanisme utama yang bertanggung jawab atas peningkatan diameter rata-rata dan standar deviasi setelah 60 hari ini. Hasil ini menegaskan bahwa untuk penyimpanan jangka panjang, konsentrasi *capping agent* non-ionik harus dioptimalkan secara ketat untuk mengimbangi ketiadaan gaya tolak elektrostatis.

Perbandingan diameter rata-rata nanopartikel dan persentase pertumbuhannya pada 0 hari vs 60 hari ditunjukkan pada Tabel 1. Terjadi hubungan terbalik yang tajam antara konsentrasi Tween 80 dan laju pertumbuhan nanopartikel selama 60 hari. Sampel dengan 1 mL Tween 80 menunjukkan ketidakstabilan ekstrem dengan persentase pertumbuhan mencapai 83,7%. Sebaliknya, pada sampel 4 mL, pertumbuhan ukuran dapat diredam secara signifikan hingga hanya sebesar 2,6%. Fenomena ini menunjukkan bahwa laju Ostwald *ripening* dan koalisi sangat bergantung pada kerapatan adsorpsi molekul surfaktan pada permukaan nanopartikel ZnO. Pada konsentrasi rendah (1 mL), cakupan permukaan (*surface coverage*) oleh Tween 80 tidak sempurna (*sub-monolayer*), meninggalkan banyak titik aktif (*oxygen vacancies*) yang terbuka pada permukaan nanopartikel. Hal ini memudahkan ion-ion dari nanopartikel kecil berdifusi dan mengendap pada nanopartikel yang lebih besar.

Sementara pada penambahan 4 mL Tween 80, laju pertumbuhan rendah (2,6%). Ini menunjukkan bahwa lapisan polioksietilen sangat padat di permukaan nanopartikel sehingga menciptakan penghalang fisik yang efektif. Meskipun potensial zeta mendekati nol (meniadakan tolak-menolak elektrostatis) pada sampel ini, gaya tolak sterik yang dihasilkan oleh tumpang tindih rantai polimer surfaktan Tween 80 cukup

kuat untuk mencegah inti nanopartikel ZnO bersentuhan secara langsung saat terjadi tumbukan Brown. Hasil ini konsisten dengan penelitian Ettelaie *et al.* [13], dimana pada sistem koloid non-ionik, stabilitas jangka panjang lebih ditentukan oleh ketebalan lapisan hidrasi dari pada muatan permukaan. Pengurangan laju pertumbuhan dari 83,7% menjadi 2,6% mengkonfirmasi bahwa Tween 80 berfungsi sebagai pengontrol morfologi nanopartikel yang sangat efektif dalam menghambat aglomerasi sekunder selama masa penyimpanan.

Tabel 1. Perbandingan diameter rata-rata dan persentase pertumbuhan nanopartikel ZnO (0 hari vs 60 hari).

Volume Tween 80 (mL)	Diameter Hari-0 (nm)	Diameter Hari-60 (nm)	Selisih (Δd)	% Pertumbuhan
1 mL (a)	17,9	32,9	15,0	83,7%
2 mL (b)	17,7	26,6	8,9	50,2%
3 mL (c)	14,6	23,3	8,7	59,5%
4 mL (d)	11,4	11,7	0,3	2,6%

Meskipun telah disebut di atas bahwa penambahan volume Tween 80 menurunkan persentase pertumbuhan nanopartikel selama masa penyimpanan, tetapi teramati ada anomali ketika Tween 80 yang digunakan sebesar 3 mL. Persentase pertumbuhan nanopartikel meningkat menjadi 59,5% dari sebelumnya 50,2%. Ini diduga berkaitan dengan kesetimbangan dinamis antara molekul-molekul Tween 80 yang terikat pada permukaan nanopartikel ZnO dengan yang bebas di dalam larutan. Pada volume Tween 80 sebesar 3 mL, kuat dugaan menjadi titik labil termodinamika sistem koloid ini. Selama 60 hari masa penyimpanan, terjadi desorpsi (pelepasan) molekul Tween 80 dari permukaan nanopartikel ZnO kembali ke fase cair di dalam larutan untuk mencapai kesetimbangan kimia koloid yang baru. Lepasnya agen pelindung ini mengekspos kembali permukaan aktif nanopartikel ZnO yang tidak stabil (memiliki energi permukaan tinggi), sehingga memicu terjadinya aglomerasi selama penyimpanan. Namun, ketika volume Tween 80 dinaikkan ke 4 mL, hal di atas tidak lagi terjadi karena seluruh permukaan nanopartikel ZnO telah terlapisinya seluruhnya dengan kerapatan yang tinggi, ditambah lagi adanya efek rintangan struktural (*caging effect*) dari molekul-molekul Tween 80 yang bebas di dalam larutan yang sangat padat sehingga memblokir pergerakan nanopartikel. Ini menjelaskan mengapa penggunaan Tween 80 sebesar 4 mL kembali menunjukkan stabilitas ukuran nanopartikel yang sangat tinggi, yang pertumbuhannya hanya 2,6%.

Tabel 2. Peningkatan standar deviasi (SD) nanopartikel ZnO yang diukur pada 0 hari dan setelah 60 hari dan rasionya.

Volume Tween 80 (mL)	SD Hari-0 (nm)	SD Hari-60 (nm)	Peningkatan SD (ΔSD) (nm)	Rasio SD (SD-60/SD-0)
1 mL (a)	13,2	17,7	4,5	1,34
2 mL (b)	12,6	14,2	1,6	1,12
3 mL (c)	5,6	11,7	6,1	2,08
4 mL (d)	2,8	3,0	0,2	1,07

Peningkatan standar deviasi (SD) nanopartikel ZnO yang diukur pada 0 hari dan setelah 60 hari dan rasionya, ditunjukkan pada Tabel 2. Terlihat bahwa terjadi pelebaran distribusi ukuran yang sistematis selama masa penyimpanan 60 hari. Pada sampel dengan konsentrasi Tween 80 terendah (1 mL), nilai SD melonjak dari 13,2 nm menjadi 17,7 nm. Secara statistik, rasio SD yang lebih tinggi pada volume Tween 80 yang rendah menunjukkan bahwa proses aglomerasi dan koalisi terjadi secara acak dan tidak seragam. Hal ini disebabkan oleh ketidakmampuan molekul surfaktan dalam jumlah terbatas melapisi seluruh nuklei ZnO secara simultan. Ketika surfaktan tidak mencukupi untuk membalut secara sempurna permukaan nanopartikel, gaya tarik van der Waals akan menyebabkan penggabungan nanopartikel pada laju yang berbeda-beda, sehingga menghasilkan populasi ukuran yang sangat beragam. Sebaliknya pada penggunaan 4 mL Tween 80, peningkatan SD adalah yang paling rendah ($\Delta SD = 0,2$ nm) dengan rasio SD-60/SD-0 hanya 1,07. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi Tween 80 yang tinggi mampu mempertahankan tingkat monodispersitas koloid jauh lebih baik. Hal ini secara teoritis berkaitan dengan stabilitas sterik yang seragam di seluruh permukaan nanopartikel. Rantai polioksietilen yang padat menciptakan penghalang fisik yang konstan, sehingga meskipun terjadi pertumbuhan ukuran yang kecil (akibat *Ostwald ripening*), pertumbuhan tersebut terjadi secara lebih merata di seluruh populasi nanopartikel. Meskipun potensial zeta nanopartikel mendekati

nol untuk semua sampel, perbedaan signifikan pada nilai SD ini menegaskan bahwa pada sistem koloid yang diselubungi surfaktan non-ionik, homogenitas ukuran jangka panjang lebih ditentukan oleh kekuatan penghalang sterik dari pada tolak-menolak elektrostatis.

Selanjutnya pengukuran transmitansi optik nanopartikel ZnO di atas dilakukan setelah masa penyimpanan untuk melihat stabilitas sifat optiknya. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3b. Terlihat terjadi perubahan transmitansinya dari 0 hari dan pada saat setelah disimpan selama 60 hari (Gambar 3a ke Gambar 3b). Perubahan ini mengindikasikan bahwa meskipun nanopartikel ZnO telah distabilkan oleh Tween 80, sistem koloid tersebut tetap mengalami proses penuaan (*aging*) yang mempengaruhi karakteristik optiknya. Dengan kata lain, terjadi dinamika struktural dan morfologis yang signifikan pada nanopartikel ZnO selama masa penyimpanan. Pergeseran tepi serapan (*absorption edge*) atau perubahan nilai transmitansi pada daerah UV (di bawah 400 nm) mengindikasikan adanya perubahan ukuran inti nanopartikel (tanpa memperhitungkan tebal selubung yang dibentuk oleh Tween 80). Selama masa penyimpanan 60 hari, inti nanopartikel ZnO cenderung mengalami Ostwald *ripening*. Peningkatan ukuran ini menyebabkan penyempitan celah pita energinya (*optical band gap*). Pertumbuhan kristal nanopartikel ZnO selama masa penyimpanan dalam medium cair dapat disertai dengan peningkatan keteraturan kisi kristalnya, namun jika pertumbuhannya tidak terkendali, hal ini akan menurunkan transmitansi pada daerah UV karena penyerapan foton yang lebih efektif oleh volume partikel yang lebih besar.

Pada Gambar 3a, pelapisan Tween 80 sangat seragam. Namun, setelah 60 hari (Gambar 3b), terjadi perubahan pada konfigurasi lapisannya. Molekul air dapat berpenetrasi melalui lapisan Tween 80 sehingga memicu terjadinya hidrasi di permukaan nanopartikel ZnO yang membentuk kluster Zn(OH)₂ yang bersifat metastabil [14]. Ketidakstabilan ini dapat menyebabkan desorpsi parsial Tween 80 atau penataan ulang molekul-molekul Tween 80 pada permukaan nanopartikel, yang mengurangi gaya tolak sterik antar nanopartikel. Akibatnya, terjadi peningkatan standar deviasi ukuran. Nanopartikel tidak lagi memiliki ukuran yang seragam, yang pada gilirannya menyebabkan hamburan cahaya (*Mie scattering*) menjadi lebih bervariasi dan menurunkan kejernihan optik dispersi tersebut. Sifat optik nanopartikel ZnO sangat dipengaruhi oleh cacat intrinsiknya seperti kekosongan oksigen (*oxygen vacancies*) dan interstisial Zn. Selama penyimpanan 60 hari dalam medium air, interaksi kimia pada antarmuka nanopartikel ZnO-Tween 80-Air menyebabkan "penyembuhan" atau saturasi pada titik-titik cacat permukaan tersebut oleh gugus hidroksil (-OH). Pengurangan atau perubahan distribusi cacat permukaan ini mengubah densitas keadaan (*density of states*) di dekat tepi pita energi nanopartikel. Kuchibhatla *et al.* [15] melaporkan bahwa migrasi ion oksigen dan perubahan keadaan oksidasi di permukaan nanopartikel ZnO selama masa penuaan dapat menggeser posisi energi Fermi-nya dan mengubah profil transmitansi, terutama pada daerah transisi UV-Vis. Perubahan ini menjelaskan mengapa kemiringan kurva transmitansi pada Gambar 3b tampak lebih landai dibandingkan pada Gambar 3a.

Perubahan transmitansi pada rentang cahaya tampak (400-700 nm) sangat dipengaruhi oleh derajat aglomerasi. Gambar 3b menunjukkan penurunan transmitansi yang signifikan dibandingkan Gambar 3a, hal ini membuktikan bahwa nanopartikel telah membentuk aglomerat yang lebih besar dari batas hamburan Rayleigh. Pembentukan aglomerasi ini berkonsekuensi meningkatkan penampang lintang hamburan (*scattering cross-section*). Vollath [16] melaporkan bahwa aglomerasi nanopartikel ZnO dalam medium cair seiring berjalannya waktu sulit dihindari secara total karena gaya tarik-menarik Van der Waals yang mulai mendominasi ketika stabilitas sterik dari enkapsulator melemah. Hal ini mengakibatkan cahaya lebih banyak dihamburkan dari pada diteruskan, sehingga nilai transmitansi menurun. Perubahan sifat optik yang ditunjukkan pada Gambar 3a dan Gambar 3b disebabkan oleh sinergi antara pertumbuhan kristal (*Ostwald ripening*) dan penurunan efektivitas perlindungan sterik Tween 80 yang memicu aglomerasi. Proses ini mengubah distribusi ukuran (meningkatkan standar deviasi) dan memodifikasi profil cacat permukaan, yang secara kolektif menggeser karakteristik absorpsi dan meningkatkan hamburan cahaya.

Kesimpulan

Stabilitas ukuran dan sifat optik nanopartikel ZnO yang dilapisi polimer Tween 80, telah diinvestigasi. Hasilnya menunjukkan bahwa konsentrasi Tween 80 sangat mempengaruhi stabilitas ukuran dan sifat optik nanopartikel ZnO. Peningkatan volume Tween 80 dari 1 mL ke 4 mL secara signifikan menurunkan diameter rata-rata nanopartikel dari 17,9 nm menjadi 11,4 nm dan mempersempit distribusi ukuran (standar deviasi turun dari 13,2 nm menjadi 2,8 nm) pada saat sintesis (0 hari). Karakterisasi elektrostatisnya menunjukkan

bahwa pelapis Tween 80 menghasilkan potensial zeta yang mendekati netral (-0,1 hingga -0,2 mV). Ini menunjukkan bahwa Tween 80 dapat menyaring (*shielding*) muatan permukaan asli ZnO melalui pembentukan lapisan pelindung. Penggunaan Tween 80 sebesar 4 mL yang dilarutkan ke dalam 50 mL Etanol diperoleh menjadi konsentrasi yang paling optimal untuk meredam laju pertumbuhan nanopartikel. Profil optiknya menunjukkan bahwa semua nanopartikel terlapis mempertahankan transparansi yang tinggi di atas 87% pada spektrum cahaya tampak dan memiliki kemampuan penyerapan UV yang optimal. Hasil ini menegaskan bahwa penggunaan Tween 80 dalam konsentrasi yang tepat, secara efektif dapat menghambat proses *Ostwald ripening* dan aglomerasi sekunder.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan yang dapat memengaruhi pelaksanaan, analisis, maupun pelaporan hasil penelitian ini. Seluruh proses penelitian dilakukan secara independen dan sesuai dengan kaidah ilmiah yang berlaku.

Referensi

- [1] Khabir, Z., Holmes, A. M., Lai, Y. J., Liang, L., Deva, A., Polikarpov, M. A., Roberts, M. S., & Zvyagin, A. V. Human Epidermal Zinc Concentrations after Topical Application of ZnO Nanoparticles in Sunscreens. *International journal of molecular sciences*. 2021; 22 (22), 12372. <https://doi.org/10.3390/ijms222212372>
- [2] Ghamsari, M.S., Alamdari, S., Han, W. & Park, H.H. Impact of Nanostructured Thin ZnO Film in Ultraviolet Protection. *International Journal of Nanomedicine*. 2017; 12, 207–216. <https://doi.org/10.2147/IJN.S118637>
- [3] Mesa, C.L. & Risuleo, G., 2023. Polymer Wrapping onto Nanoparticles Induces the Formation of Hybrid Colloids. *Coatings*. 2023; 13 (5), 823. <https://doi.org/10.3390/coatings13050823>
- [4] Prieto, Cristina, Calvo, Lourdes. Performance of the Biocompatible Surfactant Tween 80, for the Formation of Microemulsions Suitable for New Pharmaceutical Processing, *Journal of Applied Chemistry*. 2013; 10, 930356. <https://doi.org/10.1155/2013/930356>
- [5] Krasochko, P., Korochkin, R., Krasochko, P., Gvozdev, S., & Ponaskov, M. Optical Properties of Colloidal Solutions of Metal Nanoparticles. *Scientific Horizons*. 2020; 23 (10), 47-53. [https://doi.org/10.48077/scihor.23\(10\).2020.47-53](https://doi.org/10.48077/scihor.23(10).2020.47-53)
- [6] Bol'shagin, E.Y., Roldughin, V.I. Kinetics of nucleation and growth of metal nanoparticles in the presence of surfactants. *Colloid J*. 2012; 74, 649–654. <https://doi.org/10.1134/S1061933X12060038>
- [7] Kasim, M.F., Kamarulzaman, N., Rusdi, R. & Rahman, A.A. Effect of pH on the Crystal Growth of ZnO Nanomaterials and Their Band Gap Energies. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018; 1083, 012043. DOI 10.1088/1742-6596/1083/1/012043
- [8] Taheri, M., Maaref, S., Kantzas, A., Bryant, S. & Trudel, S. Improving the Colloidal Stability of PEGylated BaTiO₃ Nanoparticles with Surfactants. *Chemical Physics*. 2023; 564, 111701. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2022.111701>
- [9] Hernandez, V.A. An Overview of Surface Forces and the DLVO Theory. *ChemTexts*. 2023; 9, 10. <https://doi.org/10.1007/s40828-023-00182-9>
- [10] Moharram, A. H., Mansour, S. A., Hussein, M. A., Rashad, M., Direct Precipitation and Characterization of ZnO Nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*. 2014; 5, 716210. <https://doi.org/10.1155/2014/716210>
- [11] Mayerhofer, T.G. & Popp, J. Beyond Beer's Law: Revisiting the Lorentz-Lorenz Equation. *ChemPhysChem*. 2020; 21, 1218-1223. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000301>
- [12] N.Michalak, T.Ossowski, Z.Miłosz, M.J.Prieto, Y.Wang, M.Werwiński, V.Babacic, F.Genuzio, L.Vattuone, A.Kiejn a, T.Schmidt, M.Lewandowski, Ostwald Ripening in an Oxide-on-Metal System. *Adv. Mater. Interfaces*. 2022; 9, 2200222. <https://doi.org/10.1002/admi.202200222>
- [13] Ettelaie, R., Holmes, M., Chen, J., & Farshchi. Steric Stabilising Properties of Hydrophobically Modified Starch: Amylose vs. Amylopectin. *Food Hydrocolloids*. 2016; 58, 364-377. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.004>
- [14] Rawal, T.B., Ozcan, A., Liu, S.H., Pingali, S.V., Akbilgic, O., Tetard, L., O'Neill, H.M., Santra, S. & Petridis, L. Interaction of Zinc Oxide Nanoparticles with Water: Implications for Catalytic Activity. *ACS Applied Nano Materials*. 2019; 2 (7). DOI: 10.1021/acsanm.9b00714
- [15] Kuchibhatla, S.V.N.T., Karakoti, A.S., Baer, D.R., Samudrala, S., Engelhard, M.H., Amonette, J.E., Thevuthasan, S. & Seal, S. Influence of Aging and Environment on Nanoparticle Chemistry: Implication to Confinement Effects in Nanocerium. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012; 116 (26), 14108-14114. <https://doi.org/10.1021/jp300725s>
- [16] Vollath, D. Agglomeration and Aggregation of Nanoparticles. *Nanoarchitectonics*. 2023; 4 (2): 45-57. <https://doi.org/10.37256/nat.4220233222>