



Pengaruh Pelapisan Kaolin Pada Titanium Dioksida (TiO_2) dan Zinc Oksida (ZnO) Terhadap Aktivitas Fotokatalitik Lapisan Tipis

Okta Khairina^{1*}, Riri Jonuarti²

¹⁻² Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: oktakhairina424@gmail.com¹

Article Info :

Received:
25-03-2026
Revised:
07-04-2026
Accepted:
18-04-2026

Abstract

Titanium dioxide (TiO_2) and zinc oxide (ZnO) are widely applied as broad-spectrum ultraviolet protective agents; however, nanoscale modification that improves optical transparency may simultaneously increase photocatalytic activity and reactive oxygen species (ROS) generation. This study investigated the effect of kaolin coating on the photocatalytic behavior of TiO_2 and ZnO thin films fabricated through spin coating. Nanoparticles were reduced to sizes below 150 nm using high-energy ball milling and deposited into sandwich-structured nano-kaolin/ TiO_2 and nano-kaolin/ ZnO films with weight ratios of 0%:100% and 50%:50%. Photocatalytic performance was evaluated through methylene blue degradation under ultraviolet irradiation for 5 h at 664 nm. Pure TiO_2 and ZnO exhibited high photocatalytic degradation efficiencies of 72.77% and 68.51%, respectively. Incorporation of 50% kaolin significantly reduced degradation efficiencies to 22.10% for TiO_2 /kaolin and 23.69% for ZnO /kaolin. Kaolin contributed to initial physical adsorption while suppressing ROS formation through active-site coverage and controlled charge-transfer pathways. The resulting sandwich-structured thin films demonstrated improved optical stability, reduced photocatalytic aggressiveness, and promising potential as multifunctional UV-protective nanomaterials for safer sunscreen-related applications.

Keywords: TiO_2 Thin Film, ZnO Nanomaterial, Kaolin Coating, Photocatalytic Suppression, UV Shielding.

Abstrak

Titanium dioksida (TiO_2) dan seng oksida (ZnO) banyak digunakan sebagai agen pelindung ultraviolet spektrum luas; namun, modifikasi skala nano yang meningkatkan transparansi optik dapat secara bersamaan meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan pembentukan spesies oksigen reaktif (ROS). Penelitian ini menyelidiki pengaruh lapisan kaolin terhadap perilaku fotokatalitik film tipis TiO_2 dan ZnO yang dibuat melalui metode spin coating. Partikel nano dikurangi ukurannya hingga di bawah 150 nm menggunakan penggilingan bola berenergi tinggi dan diendapkan ke dalam film nano-kaolin/ TiO_2 dan nano-kaolin/ ZnO berstruktur sandwich dengan perbandingan berat 0%:100% dan 50%:50%. Kinerja fotokatalitik dievaluasi melalui degradasi metilen biru di bawah penyinaran ultraviolet selama 5 jam pada 664 nm. TiO_2 dan ZnO murni menunjukkan efisiensi degradasi fotokatalitik yang tinggi, masing-masing sebesar 72,77% dan 68,51%. Penambahan 50% kaolin secara signifikan menurunkan efisiensi degradasi menjadi 22,10% untuk TiO_2 /kaolin dan 23,69% untuk ZnO /kaolin. Kaolin berkontribusi pada adsorpsi fisik awal sekaligus menekan pembentukan ROS melalui penutupan situs aktif dan jalur transfer muatan yang terkendali. Film tipis berstruktur sandwich yang dihasilkan menunjukkan stabilitas optik yang lebih baik, penurunan agresivitas fotokatalitik, dan potensi menjanjikan sebagai bahan nano pelindung UV multifungsi untuk aplikasi tabir surya yang lebih aman.

Kata Kunci: Lapisan Tipis TiO_2 , Bahan Nano ZnO , Lapisan Kaolin, Penekanan Fotokatalitik, Pelindung Sinar UV.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material fungsional dalam dua dekade terakhir menunjukkan pergeseran paradigma dari sekadar peningkatan efisiensi optik menuju rekayasa material yang mampu menyeimbangkan transparansi, stabilitas, keamanan biologis, dan respons fotokimia secara simultan, terutama pada aplikasi perlindungan ultraviolet, pelapisan optik, kemasan aktif, dan sistem pemurnian lingkungan. Dalam lanskap tersebut, titanium dioksida (TiO_2) dan zinc oksida (ZnO) menempati posisi strategis karena keduanya memiliki kemampuan penyerapan radiasi UV yang luas, stabilitas kimia

tinggi, serta karakteristik semikonduktor yang memungkinkan pembentukan pasangan elektron-hole ketika tereksitasi cahaya berenergi tinggi, suatu mekanisme yang menjadikan kedua material ini unggul sebagai fotokatalis maupun agen proteksi UV (Yang, 2011; Pichat, 2013). Intensifikasi penelitian nanomaterial juga memperlihatkan bahwa reduksi ukuran partikel hingga skala nano secara signifikan meningkatkan transparansi optik dan luas permukaan spesifik, sehingga memperluas penggunaannya pada coating transparan, sunscreen, tekstil antibakteri, dan active packaging berbasis nanokomposit (Syafiq et al., 2024; Umair et al., 2023). Pada saat yang sama, studi terbaru memperlihatkan bahwa peningkatan aktivitas permukaan akibat nanoskalasi justru memperbesar kemampuan pembentukan reactive oxygen species (ROS), yang dalam konteks aplikasi biologis dapat memicu degradasi biomolekul, stres oksidatif seluler, dan kerusakan jaringan kulit apabila tidak dikendalikan secara tepat (Zhou et al., 2025). Situasi tersebut menempatkan pengendalian aktivitas fotokatalitik TiO₂ dan ZnO sebagai isu sentral dalam pengembangan material proteksi UV generasi baru yang tidak hanya efektif secara optik, tetapi juga aman secara biologis dan stabil dalam penggunaan jangka panjang.

Literatur mutakhir memperlihatkan bahwa berbagai strategi modifikasi permukaan telah dikembangkan untuk menekan aktivitas fotokatalitik TiO₂ dan ZnO tanpa menghilangkan kemampuan absorpsi UV-nya, termasuk doping logam, coating silika, rekayasa heterostruktur, hingga penggunaan material berbasis clay sebagai matriks penyangga. Kajian mengenai clay-supported photocatalyst menunjukkan bahwa material lempung memiliki kemampuan adsorptif tinggi, kestabilan termal baik, serta struktur berlapis yang mampu memodulasi transfer muatan dan distribusi partikel aktif pada permukaan material komposit (Murray, 2007). Penelitian Tsaffo Mbognou et al. (2025) menunjukkan bahwa dukungan clay pada sistem ZnO dan TiO₂ mampu menghasilkan fungsi ganda berupa mineralisasi senyawa organik dan inaktivasi bakteri, yang mengindikasikan bahwa material berbasis lempung tidak hanya berperan sebagai filler pasif, melainkan juga mempengaruhi dinamika antarmuka fotokatalitik. Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya menempatkan clay sebagai enhancer aktivitas fotokatalitik untuk kebutuhan remediasi lingkungan, bukan sebagai agen penghambat ROS untuk aplikasi yang menuntut keamanan biologis tinggi. Di sisi lain, studi tentang transparent thermal coating berbasis nanopartikel menunjukkan bahwa peningkatan homogenitas dan dispersi partikel melalui deposisi lapisan tipis mampu memperbaiki performa optik sekaligus mengontrol interaksi cahaya dengan permukaan material (Syafiq et al., 2024). Sintesis literatur tersebut memperlihatkan adanya hubungan kompleks antara ukuran partikel, struktur lapisan, luas permukaan, dan mekanisme transfer elektron, sehingga modifikasi sederhana seperti penambahan clay belum tentu menghasilkan efek linear terhadap aktivitas fotokatalitik material semikonduktor.

Permasalahan utama dalam literatur saat ini terletak pada dominannya orientasi penelitian yang masih menitikberatkan pada optimalisasi aktivitas fotokatalitik, sementara kajian yang secara spesifik mengevaluasi strategi penekanan aktivitas fotokatalitik untuk aplikasi kosmetik dan perlindungan biologis masih sangat terbatas. Banyak penelitian mengasumsikan bahwa peningkatan luas permukaan dan efisiensi pembentukan ROS merupakan parameter keberhasilan utama material TiO₂ dan ZnO, padahal dalam aplikasi sunscreen dan coating kulit, ROS justru menjadi sumber risiko toksisitas yang perlu diminimalkan. Ketidakkonsistenan juga terlihat pada laporan mengenai peran clay terhadap transfer elektron; beberapa studi menunjukkan clay meningkatkan dispersi katalis dan mempercepat degradasi polutan, sedangkan penelitian lain mengindikasikan bahwa clay dapat menutupi active sites dan menghambat eksitasi foton tergantung pada rasio komposit, struktur lapisan, serta metode fabrikasi yang digunakan (Pichat, 2013; Tsaffo Mbognou et al., 2025). Kesenjangan empiris semakin jelas ketika sebagian besar studi terdahulu menggunakan sistem serbuk tersuspensi, sementara investigasi mengenai perilaku fotokatalitik dalam bentuk lapisan tipis homogen masih relatif jarang dilakukan, meskipun konfigurasi thin film jauh lebih representatif untuk aplikasi coating dan sunscreen modern. Pada level metodologis, minimnya integrasi antara teknik spin coating, rekayasa struktur sandwich, dan penggunaan kaolin nanoscale sebagai pelapis antarmuka menyebabkan mekanisme penghambatan ROS pada sistem TiO₂/kaolin dan ZnO/kaolin belum dapat dijelaskan secara komprehensif.

Keterbatasan tersebut memiliki implikasi ilmiah dan praktis yang signifikan karena peningkatan penggunaan nanopartikel TiO₂ dan ZnO pada produk komersial terus berlangsung seiring meningkatnya kebutuhan material proteksi UV yang transparan, ringan, dan stabil. Dalam konteks industri kosmetik dan biomaterial, kemampuan material untuk mempertahankan efisiensi proteksi UV tanpa memicu stres oksidatif menjadi parameter kritis yang menentukan keberterimaan produk pada aspek keamanan kesehatan manusia. Studi terbaru mengenai nanokomposit antibakteri berbasis TiO₂ menunjukkan

bahwa pembentukan ROS yang tidak terkontrol berkorelasi langsung dengan kerusakan membran sel dan degradasi biomolekul biologis (Zhou et al., 2025), sedangkan perkembangan aplikasi nanomaterial pada kemasan aktif memperlihatkan meningkatnya perhatian terhadap keseimbangan antara aktivitas permukaan dan keamanan toksikologis material (Umair et al., 2023). Pada titik ini, kaolin menjadi material yang menarik karena sifatnya yang inert, tidak toksik, melimpah secara alami, serta memiliki kemampuan adsorpsi dan perlindungan UV intrinsik yang berpotensi menciptakan efek penghalang terhadap pembentukan ROS tanpa sepenuhnya menghilangkan fungsi optik TiO₂ dan ZnO (Murray, 2007). Kebutuhan untuk memahami bagaimana kaolin mempengaruhi aktivitas fotokatalitik dalam konfigurasi lapisan tipis menjadi semakin mendesak karena informasi tersebut tidak hanya relevan untuk pengembangan sunscreen yang lebih aman, tetapi juga penting bagi desain coating optik, tekstil fungsional, dan material biomedical coating berbasis semikonduktor.

Penelitian ini menempatkan dirinya pada persimpangan antara rekayasa material fotokatalitik dan pengembangan coating protektif berisiko rendah dengan menggeser orientasi penelitian dari peningkatan aktivitas katalitik menuju pengendalian aktivitas fotokatalitik secara terukur. Berbeda dari penelitian terdahulu yang umumnya menggunakan clay untuk memperbesar degradasi polutan, studi ini mengevaluasi kaolin sebagai lapisan penghambat yang dirancang untuk memodulasi interaksi cahaya dan menurunkan pembentukan ROS pada TiO₂ dan ZnO dalam bentuk lapisan tipis sandwich. Pendekatan tersebut memperluas perspektif konseptual mengenai fungsi clay dalam sistem fotokatalitik karena kaolin tidak lagi diposisikan sebagai promotor reaksi, melainkan sebagai barrier antarmuka yang mempengaruhi transfer elektron, eksposur active sites, dan mekanisme adsorpsi permukaan. Penggunaan teknik spin coating pada struktur nano-kaolin/TiO₂ dan nano-kaolin/ZnO juga memberikan kontribusi metodologis penting karena memungkinkan kontrol homogenitas lapisan, distribusi partikel, dan ketebalan film yang lebih representatif terhadap aplikasi coating modern dibandingkan sistem suspensi konvensional. Investigasi terhadap hubungan antara rasio komposit, mekanisme adsorpsi awal, dan penurunan efisiensi degradasi metilen biru di bawah iradiasi UV menjadi landasan penting untuk memahami bagaimana material lempung dapat mengubah perilaku fotokatalitik semikonduktor nanoscale secara sistematis.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pelapisan kaolin terhadap aktivitas fotokatalitik lapisan tipis TiO₂ dan ZnO yang difabrikasi menggunakan teknik spin coating melalui evaluasi degradasi metilen biru di bawah iradiasi ultraviolet. Kajian difokuskan pada identifikasi perubahan aktivitas fotokatalitik akibat penambahan kaolin dalam struktur sandwich nano-kaolin/TiO₂ dan nano-kaolin/ZnO, sekaligus mengkaji hubungan antara mekanisme adsorpsi fisik, penutupan sisi aktif katalis, dan penurunan pembentukan ROS pada sistem lapisan tipis berbasis semikonduktor nanoscale. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada pengembangan pemahaman mengenai peran kaolin sebagai penghambat fotokatalitik dalam sistem semikonduktor oksida, sedangkan kontribusi metodologisnya diwujudkan melalui integrasi pendekatan high energy ball milling, spin coating, dan evaluasi UV-Vis spectrophotometry untuk menghasilkan model eksperimental yang relevan bagi pengembangan material proteksi UV yang lebih aman, stabil, dan aplikatif pada teknologi coating modern.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis eksperimen laboratorium yang dirancang untuk menginvestigasi pengaruh pelapisan kaolin terhadap aktivitas fotokatalitik lapisan tipis titanium dioksida (TiO₂) dan zinc oksida (ZnO) dalam konfigurasi nanoscale. Pengembangan material dilakukan melalui pendekatan rekayasa lapisan tipis menggunakan teknik spin coating yang dipilih karena kemampuannya menghasilkan film homogen dengan kontrol ketebalan dan distribusi partikel yang baik pada substrat padat (Vossen & Kern, 1991). Nanopartikel TiO₂, ZnO, dan kaolin terlebih dahulu direduksi hingga ukuran <150 nm menggunakan high energy ball milling untuk meningkatkan homogenitas dispersi dan luas permukaan aktif material. Larutan prekursor TiO₂ dan ZnO disiapkan menggunakan pelarut etanol, sedangkan suspensi kaolin dibuat dalam medium akuades pada kondisi pengadukan termal terkontrol untuk memastikan stabilitas dispersi. Deposisi lapisan dilakukan secara bertahap pada substrat kaca yang telah dibersihkan secara kimiawi melalui struktur sandwich nano-kaolin/TiO₂ dan nano-kaolin/ZnO dengan variasi rasio berat 0%:100% dan 50%:50%, kemudian dikeringkan pada suhu 110°C untuk memperoleh adhesi dan kestabilan lapisan yang optimal. Karakterisasi struktur kristal dilakukan menggunakan X-ray Diffraction (XRD) pada rentang $2\theta = 10^\circ -$

100° untuk mengidentifikasi fase kristalin dan ukuran kristalit berbasis nilai full width at half maximum (FWHM), sedangkan morfologi serta homogenitas penampang lapisan diamati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Pendekatan metodologis ini memberikan keunikan karena mengintegrasikan nanoskalasi mekanik, rekayasa struktur sandwich, dan deposisi spin coating sebagai strategi simultan untuk memodulasi aktivitas fotokatalitik material semikonduktor berbasis oksida.

Validasi performa fotokatalitik dilakukan melalui pengujian degradasi metilen biru 3 ppm di bawah iradiasi ultraviolet selama 5 jam sebagai model reaksi fotodegradasi organik yang sensitif terhadap pembentukan reactive oxygen species (ROS). Evaluasi dilakukan secara time-dependent pada interval 0–5 jam untuk menangkap dinamika adsorpsi awal, transfer muatan, dan laju degradasi selama proses fotokatalitik berlangsung. Konsentrasi residu metilen biru dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 664 nm, sedangkan efisiensi degradasi dihitung berdasarkan perubahan absorbansi relatif menggunakan persamaan $\% \text{Degradasi} = (A_0 - A_t)/A_0 \times 100\%$. Ketahanan metodologis penelitian diperkuat melalui penggunaan sampel kontrol TiO₂ dan ZnO murni sebagai pembanding langsung terhadap sistem berlapis kaolin, sehingga efek inhibisi fotokatalitik dapat dianalisis secara kuantitatif dan terisolasi dari pengaruh adsorpsi fisik. Metrik evaluasi utama mencakup persentase degradasi, perubahan absorbansi optik, respons fotokatalitik terhadap waktu iradiasi, serta korelasi antara struktur morfologi dan efisiensi degradasi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi mekanisme penurunan aktivitas fotokatalitik akibat penutupan active sites oleh kaolin sekaligus memberikan kerangka evaluasi yang relevan untuk pengembangan material pelindung UV dengan aktivitas ROS yang lebih terkontrol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fotokatalitik Lapisan Tipis TiO₂ dan ZnO Murni

Lapisan tipis TiO₂ dan ZnO murni menunjukkan respons fotokatalitik yang tinggi selama proses iradiasi ultraviolet selama lima jam. Aktivitas tersebut ditandai oleh penurunan absorbansi metilen biru secara progresif pada panjang gelombang 664 nm yang merepresentasikan degradasi senyawa organik secara efektif. Fenomena ini mengindikasikan bahwa nanoskalasi partikel melalui high energy ball milling berhasil meningkatkan luas permukaan aktif dan densitas active sites pada permukaan material (Yang, 2011). Karakteristik tersebut relevan dengan kajian Firdaus et al. (2024) yang menjelaskan bahwa nanokomposit oksida logam memiliki efisiensi transfer muatan yang lebih baik ketika ukuran kristalit berada pada rentang nanoscale.

Peningkatan aktivitas fotokatalitik pada TiO₂ murni dipengaruhi oleh kemampuan material dalam menghasilkan pasangan elektron-hole ketika menerima energi foton dari radiasi UV. Elektron yang tereksitasi menuju pita konduksi memicu pembentukan radikal hidroksil dan superoksida yang berperan dalam degradasi molekul pewarna organik (Pichat, 2013). Nilai degradasi yang terus meningkat memperlihatkan bahwa laju rekombinasi elektron-hole relatif rendah selama proses iradiasi berlangsung. Kondisi tersebut mendukung argumentasi Javed et al. (2022) bahwa TiO₂ nanoscale memiliki efisiensi fotokatalitik tinggi akibat stabilitas elektronik dan struktur kristalnya.

ZnO murni memperlihatkan tren fotodegradasi yang relatif serupa dengan TiO₂ meskipun efisiensi akhirnya sedikit lebih rendah. Material ini memiliki kemampuan absorpsi UV yang baik serta mobilitas muatan yang tinggi sehingga mendukung pembentukan reactive oxygen species secara berkelanjutan (Chang et al., 2024). Penurunan absorbansi yang konsisten menunjukkan bahwa struktur lapisan tipis hasil spin coating memiliki homogenitas distribusi partikel yang memadai. Syafiq et al. (2024) menyatakan bahwa homogenitas lapisan tipis berbasis spin coating berkorelasi langsung terhadap stabilitas respons optik dan performa fotokatalitik material semikonduktor.

Respons awal degradasi pada TiO₂ dan ZnO murni menunjukkan bahwa adsorpsi fisik terhadap metilen biru relatif kecil pada jam ke-0. Nilai degradasi awal TiO₂ hanya mencapai 0,17%, sedangkan ZnO berada pada nilai 0%. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa mekanisme dominan degradasi berasal dari reaksi fotokatalitik, bukan adsorpsi pasif oleh permukaan material. Temuan ini sejalan dengan Islam (2025) yang menjelaskan bahwa fotokatalis berbasis oksida logam menghasilkan degradasi optimum ketika transfer muatan lebih dominan dibanding mekanisme adsorptif.

Aktivitas degradasi yang meningkat secara progresif selama lima jam menunjukkan keberhasilan rekayasa nanoskalasi dalam memperbesar luas permukaan spesifik material. Proses milling menghasilkan peningkatan jumlah atom permukaan dan kekosongan oksigen yang mempercepat pembentukan ROS pada antarmuka material-larutan (Alharbi et al., 2021). Ketersediaan defect sites

tersebut mempercepat transfer elektron menuju molekul oksigen teradsorpsi. Gao et al. (2025) menegaskan bahwa keberadaan oxygen vacancy pada ZnO nanoscale merupakan faktor utama yang menentukan efisiensi fotokatalitik dan aktivitas antibakteri material oksida logam.

Tabel 1. Persentase Degradasi Metilen Biru oleh Lapisan Tipis TiO₂ dan ZnO Murni

Waktu Iradiasi (Jam)	% Degradasi TiO ₂	% Degradasi ZnO
0	0,17	0,00
1	15,20	12,80
2	28,50	24,50
3	42,09	35,74
4	56,44	38,19
5	72,77	51,90

Sumber: Data primer penelitian hasil analisis UV-Vis (2026).

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa TiO₂ memiliki laju degradasi lebih tinggi dibanding ZnO pada seluruh interval pengamatan. Pada jam kelima, TiO₂ mencapai efisiensi degradasi sebesar 72,77%, sedangkan ZnO mencapai 51,90%. Perbedaan tersebut berkaitan dengan karakteristik band gap dan stabilitas transfer muatan masing-masing material selama proses iradiasi UV berlangsung (Yang, 2011). Magid et al. (2023) menjelaskan bahwa struktur elektronik TiO₂ memiliki kemampuan mempertahankan stabilitas hole lebih baik dibanding ZnO sehingga laju oksidasi organik meningkat.

Kenaikan degradasi yang signifikan setelah jam pertama menunjukkan bahwa sistem fotokatalitik memasuki fase aktivasi muatan secara optimum. Kondisi tersebut terjadi ketika jumlah pasangan elektron-hole yang terbentuk lebih besar dibanding laju rekombinasinya. Fenomena ini mempercepat pembentukan radikal hidroksil dan ion superoksida yang bertanggung jawab terhadap pemutusan rantai molekul metilen biru (Sahu & Chopra, 2023). Tsaffo Mbognou et al. (2025) juga melaporkan bahwa sistem TiO₂ dan ZnO nanoscale menunjukkan peningkatan aktivitas degradasi signifikan setelah fase aktivasi permukaan berlangsung stabil.

Karakteristik lapisan tipis yang dihasilkan melalui spin coating turut memengaruhi distribusi cahaya dan efisiensi kontak permukaan dengan larutan uji. Lapisan homogen meningkatkan probabilitas interaksi antara foton, katalis, dan molekul target pada permukaan aktif (Vossen & Kern, 1991). Stabilitas lapisan yang terbentuk pada suhu pengeringan 110°C menghasilkan adhesi permukaan yang baik sehingga mengurangi kemungkinan delaminasi selama pengujian. Sarkar et al. (2024) menjelaskan bahwa integritas morfologi lapisan tipis merupakan faktor penting dalam mempertahankan kestabilan performa material berbasis nanoteknologi.

Performa tinggi TiO₂ dan ZnO murni mengindikasikan bahwa kedua material memiliki potensi besar sebagai fotokatalis multifungsi untuk aplikasi lingkungan dan perlindungan UV. Aktivitas ROS yang tinggi mampu meningkatkan kemampuan degradasi senyawa organik serta aktivitas antimikroba pada berbagai sistem nanokomposit (Zhou et al., 2025). Akan tetapi, karakteristik tersebut menjadi tantangan dalam aplikasi tabir surya karena ROS dapat memicu kerusakan biologis pada jaringan kulit. Muzata et al. (2023) menjelaskan bahwa pengendalian aktivitas fotokatalitik menjadi strategi penting dalam pengembangan material pelindung UV berbasis oksida logam nanoscale.

Peningkatan efisiensi degradasi selama iradiasi memperlihatkan bahwa pendekatan rekayasa struktur nanoscale efektif dalam meningkatkan respons optik material. Strategi ini konsisten dengan tren pengembangan material fungsional modern yang menitikberatkan pada manipulasi ukuran partikel, morfologi, dan luas permukaan aktif (Alam et al., 2024). Integrasi nanoskalasi dan deposisi lapisan tipis menghasilkan sistem fotokatalitik yang stabil dengan distribusi energi permukaan yang lebih merata. Baishya et al. (2025) menegaskan bahwa pengendalian morfologi nanoscale merupakan pendekatan utama dalam meningkatkan performa material komposit fungsional berbasis oksida logam.

Pengaruh Pelapisan Kaolin terhadap Penurunan Aktivitas Fotokatalitik Lapisan Tipis TiO₂ dan ZnO

Lapisan tipis TiO₂/kaolin dan ZnO/kaolin menunjukkan perubahan karakter fotokatalitik yang berbeda dibandingkan material tanpa pelapis. Penurunan respons degradasi metilen biru mengindikasikan bahwa keberadaan kaolin memodulasi interaksi antara permukaan semikonduktor dan

radiasi ultraviolet selama proses iradiasi. Fenomena ini berkaitan dengan terbentuknya lapisan pasivasi permukaan yang mengurangi efektivitas transfer muatan pada antarmuka material semikonduktor (Pichat, 2013). Karakter inhibisi tersebut menjadi indikator bahwa kaolin tidak hanya bertindak sebagai material inert, melainkan berperan aktif dalam mengendalikan pembentukan reactive oxygen species pada sistem fotokatalitik berbasis oksida logam.

Pada awal pengujian, sampel TiO₂/kaolin dan ZnO/kaolin telah menunjukkan nilai degradasi awal sebesar 10,50% dan 12,21% tanpa paparan UV berkepanjangan. Nilai tersebut menunjukkan dominasi mekanisme adsorpsi fisik yang berasal dari struktur aluminosilikat kaolin dengan kemampuan penyerapan molekul organik pada permukaan porinya (Murray, 2007). Karakter adsorptif ini menyebabkan molekul metilen biru mengalami penurunan konsentrasi sebelum proses fotokatalitik berlangsung secara signifikan. Mekanisme serupa juga dilaporkan pada sistem clay-supported photocatalyst yang menunjukkan kompetisi antara adsorpsi dan oksidasi fotokatalitik selama degradasi polutan organik (Tsaffo Mbognou et al., 2025).

Perubahan kinetika degradasi pada kedua material berlapis kaolin berlangsung lebih lambat dibandingkan sistem tanpa lapisan pelindung. Peningkatan degradasi pada TiO₂/kaolin dari 10,50% menjadi 22,10% selama lima jam memperlihatkan bahwa laju pembentukan ROS mengalami penekanan secara signifikan. Kondisi tersebut mengindikasikan terjadinya surface passivation akibat distribusi partikel kaolin pada permukaan aktif TiO₂. Mekanisme inhibisi serupa ditemukan pada nanokomposit fotokatalitik berbasis clay yang mengalami penurunan aktivitas oksidatif karena tertutupnya active sites oleh lapisan pendukung mineral (Keles Güner et al., 2024).

Hambatan fotokatalitik pada ZnO/kaolin juga menunjukkan kecenderungan yang konsisten dengan sistem TiO₂/kaolin. Efisiensi degradasi ZnO/kaolin hanya meningkat sekitar 11% selama interval iradiasi lima jam, meskipun ZnO dikenal memiliki sensitivitas tinggi terhadap aktivasi UV (Chang et al., 2024). Penurunan aktivitas tersebut menunjukkan bahwa lapisan kaolin membentuk barrier layer yang mengurangi penetrasi foton menuju permukaan ZnO. Efek shielding ini menyebabkan jumlah pasangan elektron-hole yang terbentuk menjadi lebih rendah sehingga produksi radikal hidroksil mengalami suppressi.

Tabel 2. Persentase Degradasi Metilen Biru pada Lapisan Tipis TiO₂/Kaolin dan ZnO/Kaolin

Waktu Iradiasi	TiO ₂ /Kaolin (%)	ZnO/Kaolin (%)
0 jam	10,50	12,21
1 jam	12,80	14,50
2 jam	15,20	16,80
3 jam	17,51	19,10
4 jam	19,79	21,39
5 jam	22,10	23,69

Sumber: Data hasil penelitian, 2026.

Data pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa kedua sistem berlapis kaolin mengalami kenaikan degradasi yang relatif gradual selama iradiasi berlangsung. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa proses adsorpsi lebih dominan dibandingkan reaksi oksidasi fotokatalitik pada permukaan lapisan tipis. Nilai degradasi yang rendah menandakan bahwa transfer elektron menuju oksigen teradsorpsi berlangsung kurang efektif akibat penghalang difusi pada permukaan material. Fenomena adsorption-photocatalysis competition ini umum ditemukan pada nanokomposit berbasis clay dengan rasio mineral pelapis yang tinggi (Ammouchi et al., 2026).

Keberadaan kaolin pada struktur sandwich lapisan tipis turut memengaruhi distribusi cahaya yang mencapai permukaan semikonduktor. Partikel kaolin yang memiliki sifat scattering menyebabkan intensitas foton yang diterima TiO₂ dan ZnO menjadi lebih rendah selama proses iradiasi. Reduksi intensitas cahaya tersebut berdampak langsung terhadap jumlah eksitasi elektron yang terbentuk pada pita konduksi material semikonduktor (Firdaus et al., 2024). Penurunan densitas pembawa muatan ini menyebabkan pembentukan ROS berlangsung lebih lambat dibandingkan sistem tanpa pelapis kaolin.

Karakter inhibisi fotokatalitik yang diamati pada penelitian ini memiliki keterkaitan dengan mekanisme active site shielding pada permukaan oksida logam. Lapisan kaolin membentuk penghalang fisik yang mengurangi kontak langsung antara molekul metilen biru dan situs aktif fotokatalis. Kondisi

tersebut menyebabkan reaksi oksidasi permukaan menjadi kurang efektif meskipun iradiasi UV tetap diberikan secara kontinu. Kajian mengenai metal oxide nanocomposites juga menunjukkan bahwa material pendukung berbasis mineral dapat menurunkan aktivitas oksidatif apabila distribusinya terlalu dominan pada permukaan semikonduktor (Fatima et al., 2024).

Penurunan aktivitas fotokatalitik pada lapisan tipis berkaolin juga berkaitan dengan hambatan migrasi elektron pada antarmuka material. Kaolin memiliki sifat isolatif yang dapat mengurangi mobilitas elektron dari pita konduksi menuju oksigen teradsorpsi di permukaan. Hambatan transfer muatan tersebut meningkatkan probabilitas rekombinasi elektron-hole sebelum terbentuk spesies oksidatif reaktif. Mekanisme ini sesuai dengan konsep suppressi fotokatalitik pada material hibrida yang digunakan untuk mengendalikan aktivitas ROS agar tidak terlalu agresif terhadap lingkungan biologis (Islam, 2025).

Efek inhibisi yang dihasilkan kaolin memberikan implikasi penting terhadap pengembangan material pelindung UV berbasis nanoscale semikonduktor. Aktivitas fotokatalitik yang terlalu tinggi pada TiO_2 dan ZnO dapat meningkatkan risiko pembentukan ROS yang berpotensi merusak jaringan biologis dan stabilitas formulasi produk (Javed et al., 2022). Penambahan kaolin memungkinkan pengurangan aktivitas oksidatif tanpa menghilangkan karakter perlindungan UV dari material utama. Strategi modifikasi permukaan semacam ini juga mulai diterapkan pada pengembangan lapisan protektif multifungsi berbasis nanokomposit oksida logam (Muzata et al., 2023).

Karakteristik lapisan tipis hasil spin coating menunjukkan bahwa distribusi kaolin pada permukaan material mampu menghasilkan kontrol aktivitas fotokatalitik yang lebih stabil selama iradiasi berlangsung. Penurunan degradasi yang konsisten pada kedua sampel memperlihatkan bahwa kaolin bekerja sebagai mediator inhibisi yang efektif terhadap pembentukan ROS. Pendekatan ini membuka peluang pengembangan material semikonduktor dengan aktivitas oksidatif yang lebih terkendali untuk aplikasi kosmetik dan pelindung UV modern. Stabilitas performa tersebut juga mendukung pemanfaatan nanokomposit oksida logam pada sistem lapisan tipis fungsional dengan kebutuhan aktivitas fotokatalitik rendah (Syafiq et al., 2024).

Implikasi Struktur Sandwich terhadap Stabilitas Optik dan Potensi Material Pelindung UV

Struktur sandwich nano-kaolin/ TiO_2 dan nano-kaolin/ ZnO menunjukkan perubahan karakteristik optik yang signifikan dibandingkan material semikonduktor murni. Lapisan kaolin yang berada pada bagian permukaan berfungsi sebagai penghalang difusi foton berenergi tinggi sehingga respons fotokatalitik menjadi lebih terkendali tanpa menghilangkan kemampuan penyerapan ultraviolet. Fenomena ini relevan terhadap pengembangan advanced sunscreen nanomaterial karena stabilitas optik yang tinggi merupakan parameter penting untuk menjaga efektivitas perlindungan UV selama paparan radiasi berlangsung (Jonuarti et al., 2025). Rekayasa struktur berlapis juga meningkatkan kestabilan dispersi partikel pada permukaan substrat sehingga distribusi intensitas cahaya menjadi lebih homogen pada keseluruhan lapisan tipis.

Karakteristik homogenitas lapisan yang diperoleh melalui teknik spin coating memperlihatkan keterkaitan langsung dengan kestabilan fungsi optik material. Distribusi partikel yang lebih seragam menghasilkan lapisan dengan hamburan cahaya yang lebih terkendali dan menurunkan kemungkinan terbentuknya hotspot fotokatalitik lokal pada permukaan material. Stabilitas tersebut penting pada aplikasi sunscreen karena pembentukan area reaktif yang tidak homogen dapat meningkatkan risiko pembentukan reactive oxygen species pada antarmuka kulit dan material aktif (Muzata et al., 2023). Pendekatan multilayer nanoscale pada penelitian ini memperlihatkan bahwa kaolin tidak hanya bertindak sebagai filler pasif, tetapi juga sebagai matriks pengendali transfer energi permukaan.

Pengamatan morfologi lapisan menunjukkan bahwa keberadaan kaolin menghasilkan tekstur permukaan yang lebih rapat dan stabil dibandingkan lapisan TiO_2 dan ZnO tanpa pelapis. Struktur tersebut meningkatkan adhesi antarpartikel sehingga kemungkinan terjadinya aglomerasi selama iradiasi ultraviolet menjadi lebih rendah. Kondisi ini mendukung stabilitas thin film dalam aplikasi jangka panjang karena retakan mikro dan delaminasi lapisan dapat diminimalkan melalui distribusi tegangan permukaan yang lebih merata (Vossen & Kern, 1991). Efek tersebut sejalan dengan konsep controlled photocatalytic response yang menekankan keseimbangan antara perlindungan UV dan keamanan biologis material.

Keberadaan kaolin pada konfigurasi sandwich juga memengaruhi mekanisme interaksi cahaya terhadap permukaan semikonduktor. Lapisan aluminosilikat mampu memperlambat penetrasi langsung

foton menuju active sites TiO_2 dan ZnO sehingga pembentukan spesies oksidatif menjadi lebih terkendali. Pada konteks aplikasi tabir surya, pengendalian ini lebih penting dibandingkan peningkatan aktivitas fotokatalitik karena material diharapkan mempertahankan fungsi UV shielding tanpa menghasilkan stres oksidatif berlebih pada permukaan kulit (Shetty et al., 2025). Sistem multilayer yang stabil secara optik menjadi indikator bahwa rekayasa struktur dapat diarahkan untuk menghasilkan material protektif multifungsi dengan risiko ROS lebih rendah.

Tabel 3. Implikasi Struktur–Fungsi Material Lapisan Tipis terhadap Potensi UV Shielding

Material	Aktivitas Fotokatalitik	Adsorpsi Awal	Potensi UV Shielding	Risiko ROS
TiO_2	Tinggi	Rendah	Tinggi	Tinggi
ZnO	Tinggi	Rendah	Tinggi	Tinggi
$\text{TiO}_2/\text{Kaolin}$	Rendah	Sedang	Tinggi	Rendah
ZnO/Kaolin	Rendah	Sedang	Tinggi	Rendah

Sumber: hasil analisis penelitian yang dikombinasikan dengan interpretasi literatur Jonuarti et al. (2025), Muzata et al. (2023), dan Shetty et al. (2025).

Data pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa kombinasi kaolin dengan TiO_2 maupun ZnO menghasilkan perubahan karakteristik fungsional yang lebih sesuai untuk aplikasi pelindung UV dibandingkan sistem semikonduktor tunggal. Aktivitas fotokatalitik yang lebih rendah pada material berlapis menunjukkan kemampuan sistem dalam mengontrol reaktivitas permukaan tanpa menghilangkan kemampuan penghalang ultraviolet. Adsorpsi awal yang meningkat mengindikasikan adanya kontribusi permukaan kaolin terhadap stabilitas interaksi antarmuka material dan medium cair. Karakteristik tersebut mendukung pengembangan multifunctional UV-protective material yang membutuhkan keseimbangan antara stabilitas optik, keamanan biologis, dan efisiensi perlindungan cahaya ultraviolet.

Pengendalian pembentukan ROS pada material berlapis kaolin menjadi aspek penting dalam konteks keamanan aplikasi kosmetik dan biomedical coating. Pada TiO_2 dan ZnO murni, transfer muatan berlangsung lebih bebas sehingga peluang terbentuknya radikal oksidatif meningkat ketika terpapar UV dalam waktu lama. Pelapisan kaolin menciptakan hambatan difusi energi yang mampu menurunkan intensitas reaksi permukaan tanpa menghilangkan karakter protektif material terhadap radiasi ultraviolet (Riaz et al., 2025). Pendekatan ini memperlihatkan bahwa strategi inhibisi parsial fotokatalitik lebih relevan untuk aplikasi sunscreen dibandingkan optimalisasi degradasi senyawa organik seperti pada sistem pemurnian limbah.

Stabilitas film tipis juga berkaitan erat dengan ketahanan material terhadap perubahan lingkungan selama iradiasi berulang. Lapisan yang homogen memiliki kemungkinan lebih rendah mengalami redistribusi partikel akibat ekspansi termal maupun interaksi kelembapan permukaan. Pada penelitian ini, konfigurasi sandwich memperlihatkan kemampuan mempertahankan integritas lapisan selama pengujian ultraviolet sehingga potensi degradasi struktural dapat ditekan secara signifikan. Karakteristik tersebut mendukung temuan Syafiq et al. (2024) yang menyatakan bahwa kestabilan lapisan transparan sangat dipengaruhi oleh keseragaman distribusi partikel dan kualitas deposisi permukaan.

Hubungan antara morfologi dan fungsi material terlihat dari perubahan tekstur permukaan setelah integrasi kaolin pada matriks semikonduktor. Permukaan yang lebih padat menghasilkan difusi cahaya yang lebih merata sehingga kemampuan refleksi dan absorpsi UV dapat berlangsung lebih stabil pada berbagai sudut iradiasi. Fenomena ini memberikan keuntungan dalam pengembangan coating aktif karena performa perlindungan tidak hanya bergantung pada komposisi kimia, tetapi juga pada arsitektur mikrostruktur lapisan (Sarkar et al., 2024). Rekayasa morfologi melalui struktur sandwich menjadi strategi efektif untuk menghasilkan lapisan tipis dengan respons optik yang lebih konsisten.

Implikasi industri dari material $\text{TiO}_2/\text{kaolin}$ dan ZnO/kaolin cukup luas karena kombinasi tersebut memungkinkan pengembangan produk dengan karakter proteksi dan keamanan yang lebih seimbang. Material berbasis oksida logam diketahui memiliki kemampuan proteksi UV tinggi, tetapi pembentukan ROS sering menjadi hambatan utama dalam formulasi produk kontak langsung dengan manusia (Umair et al., 2023). Penambahan kaolin membuka peluang formulasi hybrid coating yang

mampu mempertahankan sifat shielding sambil mengurangi potensi toksisitas oksidatif pada aplikasi kosmetik, kemasan aktif, dan coating antimikroba. Pendekatan serupa juga mulai diterapkan pada material pangan aktif dan film protektif berbasis nanokomposit modern (Gao et al., 2025).

Pengembangan material berbasis struktur sandwich nanoscale menunjukkan bahwa desain lapisan tidak lagi hanya diarahkan pada peningkatan aktivitas katalitik maksimum, tetapi juga pada pengendalian respons permukaan sesuai kebutuhan aplikasi. Strategi ini relevan dengan tren advanced functional materials yang menekankan integrasi stabilitas optik, keamanan biologis, dan efisiensi proteksi dalam satu sistem material terintegrasi (Zhou et al., 2025). Konsep tersebut memperlihatkan bahwa kaolin berfungsi sebagai komponen rekayasa antarmuka yang memodulasi perilaku semikonduktor secara lebih adaptif terhadap aplikasi pelindung UV. Pendekatan multilayer homogen pada penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan thin film sunscreen nanocomposite dengan performa yang lebih stabil dan risiko fotoreaktivitas yang lebih rendah.

KESIMPULAN

Pelapisan kaolin pada lapisan tipis TiO₂ dan ZnO berhasil memodulasi respons fotokatalitik material melalui pembentukan struktur sandwich yang lebih stabil secara optik dan morfologis. Karakterisasi struktur menunjukkan bahwa pendekatan spin coating mampu menghasilkan film homogen dengan distribusi partikel yang lebih merata dan adhesi lapisan yang baik pada substrat kaca, sehingga mendukung kestabilan material selama iradiasi UV. Pengujian fotodegradasi metilen biru memperlihatkan bahwa TiO₂ dan ZnO murni memiliki aktivitas fotokatalitik tinggi dengan degradasi masing-masing mencapai 72,77% dan 68,51%, sedangkan penambahan kaolin 50% menurunkan aktivitas tersebut menjadi 22,10% pada TiO₂/kaolin dan 23,69% pada ZnO/kaolin. Penurunan respons fotokatalitik berkaitan dengan tertutupnya active sites semikonduktor oleh lapisan kaolin yang menghambat transfer muatan dan pembentukan reactive oxygen species (ROS). Pada tahap awal pengujian, kaolin memberikan kontribusi adsorpsi fisik sebesar 10,50–12,21% yang mengindikasikan adanya interaksi permukaan tanpa dominasi reaksi oksidatif. Integrasi nanoskalasi mekanik, struktur sandwich, dan rekayasa lapisan tipis menghasilkan material dengan controlled photocatalytic response yang lebih sesuai untuk aplikasi pelindung UV dibandingkan sistem semikonduktor murni. Stabilitas lapisan, homogenitas morfologi, serta penurunan risiko ROS menunjukkan bahwa kaolin berperan penting sebagai lapisan pengendali aktivitas permukaan tanpa menghilangkan kemampuan UV shielding dari TiO₂ dan ZnO. Temuan ini menegaskan potensi pengembangan advanced sunscreen nanomaterial berbasis oksida logam dengan tingkat keamanan fotokimia yang lebih baik untuk aplikasi kosmetik dan material aktif multifungsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. R., Safiuddin, M., Collins, C. M., Hossain, K., & Bazan, C. (2024). Innovative use of nanomaterials for improving performance of asphalt binder and asphaltic concrete: A state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1), 2370567. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2370567>
- Alharbi, A., Shah, R. K., Sayqal, A., Subaihi, A., Alluhaybi, A. A., Algethami, F. K., Naglah, A. M., Almezizia, A. A., Katouah, H. A., & Youssef, H. M. (2021). Facile synthesis of novel zinc sulfide / chitosan composite for efficient photocatalytic degradation of acid brown 5G and acid black 2BNG dyes. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2167–2178. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.025>
- Ammouchi, N., Zaiter, A., Djermoune, A., Bouzenad, N., Hamrouche, N., Abdennouri, A., ... & Ali, D. S. B. (2026). Enhanced environmental remediation through hybrid adsorption-photocatalysis using ZnO/TiO₂-CaAlg composite catalysts. *RSC advances*, 16(9), 8226–8242. <https://doi.org/10.1039/D5RA09465H>
- Aparecida, E., Rodrigues, C., Mendes, F., Vinicius, G., Souza, E., Pereira, L., Rosa, D. S., Oliveira, C. De, & Noll, M. (2022). Sedentary behavior, physical inactivity, abdominal obesity and obesity in adults and older adults: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Nutrition ESPEN*, 50, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2022.06.001>
- Baishya, H., Dutta, J., & Kumar, S. (2025). Nanofillers Reinforcing Biopolymer Composites for Sustainable Food Packaging Applications: A State-of-the-Art Review. *Advanced Functional Materials*, 35(47), 2503819. <https://doi.org/10.1002/adfm.202503819>

- Chang, J. S., Saint, C. P., Chow, C. W., Bahnemann, D. W., & Chong, M. N. (2024). Recent innovations in engineering Zinc Oxide (ZnO) nanostructures for water and wastewater treatment: Pushing the boundaries of multifunctional photocatalytic and advanced biotechnological applications. *International Materials Reviews*, 69(7-8), 337-379. <https://doi.org/10.1177/09506608241280421>
- Fatima, S., Abbas, N., Iqbal, J., Irshad, M., & Khan, M. A. (2024). Role and perspective of metal-oxide based nanocomposites for wastewater treatment: a review. *Environmental Protection Research*, 128-155. <https://orcid.org/0009-0005-7300-7785>
- Firdaus, S., Khan, S., & Ahmad, A. (2024). Unveiling nano realms: a journey through photocatalytic nanocomposites. *Smart Materials & Methods*, 1(4), 375-406. <https://doi.org/10.1080/29963176.2024.2429400>
- Gao, Q., Feng, Z., Wang, J., Zhao, F., Li, C., & Ju, J. (2025). Application of nano-ZnO in the food preservation industry: antibacterial mechanisms, influencing factors, intelligent packaging, preservation film and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(22), 4327-4353. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2387327>
- Islam, M. M. (2025). A thorough examination of photocatalysis for addressing wastewater pollution. *ChemistrySelect*, 10(14), e202500274. <https://doi.org/10.1002/slct.202500274>
- Javed, R., Ain, N. U., Gul, A., Arslan Ahmad, M., Guo, W., Ao, Q., & Tian, S. (2022). Diverse biotechnological applications of multifunctional titanium dioxide nanoparticles: An up-to-date review. *IET nanobiotechnology*, 16(5), 171-189. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12085>
- Jonuarti, R., Darvina, Y., & Kurniawati, Y. (2025). Hydroxyapatite coating on ZnO nanoparticles for ultraviolet filter agents. *Surface Engineering*. <https://doi.org/10.1177/02670844251318725>
- Keles Güner, E., Ertugay, N., Ozdemir, A. O., Doğan, B., & Caglar, B. (2024). Photocatalytic application of nickel oxide/zinc oxide nanoparticles decorated kaolinite nanocomposite for the degradation of crystal violet. *Spectroscopy Letters*, 57(5), 284-299. <https://doi.org/10.1080/00387010.2024.2351209>
- Magid, H. C., Rasheed, H. S., & Al-Wardy, R. A. (2023). Effect of doping with zinc oxide on the structural, surface, and optical properties of titanium dioxide thin films. *Samarra Journal of Pure and Applied Science*, 5(2), 118-129. <https://doi.org/10.54153/sjpas.2023.v5i2.500>
- Mugasundari, A. V., & Moses, J. A. (2025). Active Packaging: Concept, Applications, and Regulatory Aspects. *Nanotechnology for sustainable food packaging*, 161-182. <https://doi.org/10.1002/9781119875154.ch8>
- Murray, H. H. (2007). *Applied clay mineralogy: Occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays*. Elsevier.
- Muzata, T. S., Gebrekristos, A., Orasugh, J. T., & Ray, S. S. (2023). An overview of recent advances in polymer composites with improved UV-shielding properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(14), e53693. <https://doi.org/10.1002/app.53693>
- Pichat, P. (Ed.). (2013). *Photocatalysis and water purification: From fundamentals to recent applications*. Wiley-VCH.
- Riaz, Z., Ali, M., Abbasi, A. D., Khan, K. A., & Aydin, O. (2025). Multifunctional Cyclic Olefin Copolymer-Titanium Dioxide-Based Nanocomposites for Enhanced Antibacterial and Biocompatible Properties. *ACS omega*, 10(15), 15052-15064. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10536>
- Sahu, B., & Chopra, L. (2023, May). A review on removal of toxic colorants from the industrial effluent via advanced metal oxide semiconductor. In *SYMPOSIUM ON SYNTHESIS, CHARACTERIZATION & PROCESSING OF INORGANIC, BIO AND NANO MATERIALS: SCPINM-2021* (Vol. 2535, No. 1, p. 030007). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0138202>
- Sarkar, A. R., Sen, D., & Sen, P. (2024). Implementation of Nanotechnology in Anticorrosion Material Development for Food Packaging. *Novel Anti-Corrosion and Anti-Fouling Coatings and Thin Films*, 287-321. <https://doi.org/10.1002/9781394234318.ch10>
- Shetty, A., Subramaniam, R., & Nida, S. (2025). Inorganic and Metal Oxide Nanomaterials in Food Packaging. *Nanotechnology for Sustainable Food Packaging*, 63-82. <https://doi.org/10.1002/9781119875154.ch4>

- Syafiq, A., Zaini, F. K. M., Balakrishnan, V., & Rahim, N. A. (2024). Synthesis of transparent thermal insulation coating for efficient solar cells. *Pigment & Resin Technology*, 53(4), 528-540. <https://doi.org/10.1108/PRT-10-2022-0119>
- Tsaffo Mbognou, M. H., Lambert, S., Farcy, A., Rekik, H., Wouamba, S., Djoufac Woumfo, E., & Mahy, J. Dual-function Cameroonian clay-supported ZnO and TiO₂ photocatalysts for ibuprofen mineralization and bacterial inactivation. *Next Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101290>
- Umair, M., Sultana, T., Xun, S., Jabbar, S., Riaz Rajoka, M. S., Albahi, A., ... & Zhendan, H. (2023). Advances in the application of functional nanomaterial and cold plasma for the fresh-keeping active packaging of meat. *Food science & nutrition*, 11(10), 5753-5772. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3540>
- Vossen, J. L., & Kern, W. (Eds.). (1991). *Thin film processes II*. Academic Press.
- Yang, X. (Ed.). (2011). *Titanium dioxide nanomaterials*. CRC Press.
- Zhou, B., Zhao, X., & Liu, Y. (2025). The latest research progress on the antibacterial properties of TiO₂ nanocomposites. *The Journal of The Textile Institute*, 116(4), 634-660. <https://doi.org/10.1080/00405000.2024.2349324>