

PEMODELAN SEMI-EMPIRIK PENGARUH KETEBALAN SiO_2 TERHADAP REFLEKTANSI, TRANSMITANSI, DAN ABSORPTANSI CERMIN ALUMINIUM

¹⁾I Wayan Windu Sara

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Jember, email: wyn.windu@unej.ac.id

Abstrak

Cermin Aluminium (Al) banyak digunakan pada berbagai aplikasi dan teknologi seperti dekorasi, rekayasa energi baru terbarukan, dan eksplorasi luar angkasa. Namun, penelitian secara numerik yang memodelkan pengaruh lapisan pelindung SiO_2 terhadap reflektansi, transmitansi, dan absorptansi cermin Al masih terbatas. Penelitian ini dilakukan secara komputasi menggunakan prinsip Hukum Snellius untuk dinamika antar lapisan dan matriks karakteristik untuk dinamika perambatan gelombang dalam lapisan, sebagai upaya mempelajari pengaruh ketebalan lapisan SiO_2 terhadap karakteristik optik cermin Al. Diperoleh bahwa nilai rerata reflektansi cermin Al berkisar ~85%, nilai rerata transmitansi bervariasi dengan nilai ~0,0013%, dan nilai rerata absorptansi sebesar ~15%. Perubahan ketebalan lapisan SiO_2 menyebabkan perubahan pola reflektansi, transmitansi, dan absorptansi yang periodik. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya peluang rekayasa ukuran ketebalan lapisan SiO_2 pada cermin Al untuk memperoleh nilai reflektansi, transmitansi, dan absorptansi yang relevan untuk kebutuhan teknologi maupun sensor optik.

Kata Kunci: Cermin Al, lapisan SiO_2 , reflektansi, transmitansi, absorptansi

Abstract

Aluminum (Al) mirrors are widely employed in various applications and technologies, including decorative coatings, renewable energy engineering, and space exploration. However, numerical studies that explicitly model the influence of protective SiO_2 layers on the reflectance, transmittance, and absorptance of Al mirrors remain limited. This study was conducted computationally by applying Snell's Law to describe interlayer dynamics and the characteristic matrix method to model wave propagation within each layer, with the aim of investigating the effect of SiO_2 layer thickness on the optical characteristics of Al mirrors. The results show that the average reflectance of the Al mirror is approximately 85%, the average transmittance varies with a value of about 0.0013%, and the average absorptance is around 15%. Variations in the SiO_2 layer thickness induce periodic changes in the reflectance, transmittance, and absorptance spectra. These findings indicate that engineering the SiO_2 layer thickness on Al mirrors offers potential for achieving reflectance, transmittance, and absorptance values tailored to the requirements of optical technologies and sensing applications.

Keywords: Al mirror, SiO_2 layer, reflectance, transmittance, absorptance

I. PENDAHULUAN

Cermin banyak digunakan oleh berbagai kalangan, baik untuk kebutuhan rumah tangga, dekorasi, penelitian ilmiah, rekayasa energi baru terbarukan (Grosjean et al., 2021) maupun eksplorasi luar angkasa (Aziz et al., 2025). Umumnya, cermin tersusun dari kombinasi berbagai lapisan bahan, salah satunya Aluminium (Al) sebagai lapisan reflektif (K. Zhang et al., 2021). Al digunakan karena memiliki reflektansi yang tinggi (Campos et al, 1998), ringan (J. Zhang et al, 2017), dan hemat biaya (J. Zhang et al., 2022). Lapisan aluminium ditempatkan di atas substrat kaca soda kapur dan di bawah lapisan Silikon Dioksida (SiO_2) (Almanza et al, 2009). Substrat kaca soda kapur berperan sebagai fondasi cermin karena sifatnya yang kuat (Renganathan et al., 2020). Sementara itu, lapisan SiO_2 berperan untuk melindungi lapisan Al karena nilai oksidanya yang tinggi (Guenther et al., 1992).

Selain meningkatkan ketahanan cermin, peningkatan ketebalan lapisan SiO_2 diharapkan dapat meningkatkan reflektansi cermin Al. Namun, semakin tebal lapisan pelindung tidak selalu meningkatkan reflektansi reflektor. Kumar et al. (2020) menemukan bahwa terdapat suatu nilai ketebalan dari lapisan pelindung yang menghasilkan pemantulan optimal pada film tipis berlapis. Hal yang serupa juga ditemukan oleh Liu, et al. (2022) pada cermin Al dengan substrat tembaga (Cu) yang menghasilkan reflektansi ~80% dalam rentang frekuensi ultraviolet. Sampai saat ini, belum ada penelitian yang spesifik dan lugas terkait pengaruh ketebalan lapisan pelindung SiO_2 terhadap karakteristik optik (reflektansi, transmitansi, dan absorptansi) cermin Al untuk rentang gelombang elektromagnetik yang lebar (ultraviolet-tampak-inframerah dekat).

Studi mengenai hubungan antara ketebalan lapisan pelindung SiO_2 dan karakteristik optik cermin dapat dilakukan secara komputasi. Umumnya, metode komputasi yang digunakan dalam memprediksi karakteristik optik tersebut adalah *Transfer Matrix Method* (TMM). TMM memodelkan film tipis berlapis berdasarkan formula Fresnel. Mandong & Uzum (2021) berhasil menerapkan TMM untuk mengkaji reflektansi lapisan anti-reflektif pada sel surya dengan substrat silikon. Sementara itu, Luce et al. (2022) mengembangkan paket program TMM-Fast, memodelkan, dan memprediksi reflektansi film tipis berlapis. Selanjutnya, Danis & Zayim (2025) berhasil mengembangkan paket program TMMMax yang lebih kompleks berbasis JAX untuk memprediksi reflektansi, transmitansi, dan absorptansi film tipis berlapis dengan indeks bias kompleks.

Namun, paradigma generalisasi pada TMMMax dan indeks bias yang konstan pada TMM-Fast membuat kedua paket program tersebut belum cukup baik digunakan dalam memodelkan karakteristik optik cermin Al. Oleh karena itu, pada penelitian ini kami mengembangkan skrip kode berbasis Python untuk mengakomodasi pemodelan cermin Al sebagai kombinasi lapisan tipis semi-tak hingga dengan indeks bias kompleks dari hasil eksperimen. Selanjutnya skrip kode tersebut digunakan untuk mempelajari pengaruh ketebalan lapisan pelindung SiO_2 terhadap reflektansi, transmitansi, dan absorptansi cermin Al. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai desain awal fabrikasi cermin Al yang potensial dan relevan untuk aplikasi berbasis optik seperti sensor cahaya maupun reflektor.

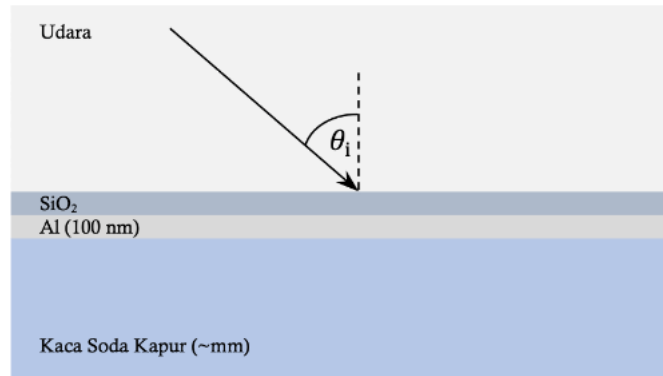
II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara komputasi menggunakan bahasa pemrograman Python versi 3.14.0. yang terpasang pada komputer personal berprosesor M1 (8 cores: 2.064 - 3.220 MHz) dan RAM 8 GB. Skrip kode pada penelitian ini terbagi menjadi 3 buah *file* yang berekstensi .py, yaitu: 1) data.py, 2) calculation.py, dan 3) calculation_all_pol.py. Skrip kode data.py dan calculation.py diintegrasikan pada skrip kode calculation_all_pol.py dan dijalankan menggunakan terminal pada editor Visual Studi Code.

Skrip kode.py berfungsi untuk impor data berekstensi .csv dan interpolasi data indeks bias dari lapisan-lapisan yang menyusun cermin Al. Pada penelitian ini, cermin Al dimodelkan sebagai kombinasi lapisan kaca soda kapur, lapisan Al, lapisan SiO_2 , dan lapisan udara. Lapisan kaca soda kapur berperan sebagai substrat, sedangkan lapisan udara berperan sebagai medium lingkungan sekitar cermin. Kedua lapisan tersebut diasumsikan sebagai lapisan semi-tak terhingga karena ketebalannya jauh lebih besar dari ketebalan lapisan Al dan lapisan SiO_2 yang berorde nm. Pemodelan cermin Al secara visual tersaji pada

Gambar 1. Ketebalan lapisan Al yang digunakan pada penelitian ini sebesar 100 nm (Liu et al., 2022). Sementara itu, ketebalan lapisan pelindung SiO₂ divariasikan dengan nilai 50 nm, 100 nm, 150 nm, dan 200 nm untuk mengetahui pengaruhnya pada reflektansi, transmittansi, dan absorptansi cermin Al dalam rentang sudut datang gelombang elektromagnetik θ_i dari 20° hingga 80°.



Gambar 1. Model lapisan cermin Al

Indeks bias kompleks dari bahan direpresentasikan dengan $\tilde{n} = n + ik$. Bagian real n merupakan indeks bias yang terkait dengan perubahan kecepatan cahaya saat melewati dua buah medium yang berbeda kerapatan, sedangkan bagian imajiner k merupakan koefisien ekstingsi terkait dengan penyerap ($k > 0$) dan penguatan ($k < 0$) cahaya (Bonnal et al., 2020). Nilai indeks bias kompleks bahan bergantung pada spektrum panjang gelombang elektromagnetik. **Tabel 1** menyajikan sumber data indeks bias kompleks yang digunakan pada penelitian ini. Secara komprehensif data pada Tabel 1 tersedia pada situs web basis data yang dikembangkan oleh Polyanskiy (2024).

Tabel 1. Referensi data indeks bias kompleks

Lapisan	Sumber
Udara	Börzsönyi et al. (2008)
SiO ₂	Rodríguez et al. (2016)
Al	Cheng et al. (2016)
Kaca Soda Kapur	Kamptner et al. (2024)

Skrip kode calculation.py memuat semua formula dan prosedur kalkulasi terkait proses optik dalam model cermin Al. Dinamika optik pada model cermin Al terbagi menjadi 2 jenis, yaitu dinamika optik antar lapisan dan dinamika optik pada lapisan. Dinamika optik antar lapisan udara-SiO₂, SiO₂-Al, dan Al-Kaca Soda Kapur dapat dikaji menggunakan Hukum Snellius tentang pembiasan cahaya pada persamaan (1) (Luce et al., 2022).

$$\tilde{n}_1 \sin \theta_1 = \tilde{n}_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

Notasi $\tilde{n}_1$ dan $\tilde{n}_2$ masing-masing mewakili indeks bias kompleks dari dua lapisan yang saling berdekatan. Sementara itu, θ_1 dan θ_2 masing-masing menunjukkan sudut datang atau sudut bias pada setiap lapisan. Hasil perkalian suku sebelah kiri maupun sebelah kanan harus merupakan bilangan real.

Dinamika optik pada lapisan j dengan ketebalan d_j dan indeks bias kompleks $\tilde{n}_j$ yang bergantung pada panjang gelombang elektromagnetik λ dapat dikaji menggunakan matriks karakteristik yang berukuran 2×2 (Keskar et al., 2021). Matriks karakteristik pada penelitian ini menggunakan solusi sudut bias dari persamaan (1) pada kuadran kedua. Ekspresi dari matriks karakteristik yang dimaksud terdapat pada persamaan (2) (Dadsetani & Omid, 2015).

$$M_j = \begin{pmatrix} A_j & B_j \\ C_j & D_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

Detail komponen matriks pada persamaan (2) sebagai berikut:

$$A_j = D_j = -\cos(2\pi\tilde{n}_j d_j \cos(\theta_j) / \lambda) \quad (3)$$

$$B_j = i \frac{\sin(2\pi\tilde{n}_j d_j \cos(\theta_j) / \lambda)}{\eta_j} \quad (4)$$

$$C_j = i\eta_j \sin(2\pi\tilde{n}_j d_j \cos(\theta_j) / \lambda) \quad (5)$$

Sudut θ_j merupakan sudut masuk atau keluar gelombang elektromagnetik pada lapisan diukur relatif terhadap garis normal. Sementara itu, suku η_j merupakan admitansi optik lapisan j . Admitansi optik merupakan rasio kuat medan listrik dari gelombang elektromagnetik yang mengenai dan berpropagansi dalam suatu lapisan. Formula admitansi optik untuk gelombang elektromagnetik terpolarisasi-s dinyatakan sebagai $\eta_j = n_j \times \cos(\theta_j)$, sedangkan untuk terpolarisasi-p $\eta_j = n_j / \cos(\theta_j)$ (Oktay et al., 2025).

Pada penelitian ini, matriks karakteristik hanya digunakan pada lapisan SiO₂ dan Al karena merupakan lapisan koheren yang bukan semi tak-hingga. Dengan demikian, matriks karakteristik total dalam penelitian ini dapat dituliskan pada persamaan (6). Urutan perkalian matriks dimulai dari lapisan yang lebih dahulu dilewati oleh gelombang elektromagnetik (Sharhan, 2020).

$$M_{tot} = \prod_{j=1}^2 M_j = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (6)$$

Koefisien refleksi r dan transmisi t masing-masing dapat dihitung menggunakan elemen-elemen pada matriks karakteristik total dengan persamaan (7) dan (8) (Tuomas, 2022).

$$r = \frac{\eta_u (A + B\eta_s) - (C + D\eta_s)}{\eta_u (A + B\eta_s) + (C + D\eta_s)} \quad (7)$$

$$t = \frac{2\eta_u}{\eta_u (A + B\eta_s) + (C + D\eta_s)} \quad (8)$$

Suku η_u dan η_s masing-masing mewakili admitansi optik udara dan substrat. Besaran yang menggambarkan karakteristik optik seperti reflektansi $\mathcal{R}$, transmitansi $\mathcal{T}$, dan absorptansi $\mathcal{A}$ dihitung menggunakan persamaan (9), (10), dan (11) (Tuomas, 2022).

$$\mathcal{R} = |r|^2 \quad (9)$$

$$\mathcal{T} = \frac{\text{Re}(\eta_s)}{\text{Re}(\eta_u)} |t|^2 \quad (10)$$

$$\mathcal{A} = 1 - \mathcal{R} - \mathcal{T} \quad (11)$$

Skrip kode calculation_all_pol.py berfungsi untuk iterasi kalkulasi dalam memperoleh nilai reflektansi, transmitansi, dan absorptansi cermin Al dengan sudut datang maupun panjang gelombang elektromagnetik pada rentang tertentu. Secara komprehensif proses iterasi kalkulasi untuk sebuah nilai ketebalan lapisan SiO₂ pada penelitian ini ditunjukkan oleh diagram alir pada **Gambar 2**. Nilai reflektansi, transmitansi, dan absorptansi dari gelombang elektromagnetik terpolarisasi-s dan terpolarisasi-p pada penelitian ini direratakan sebagai nilai efektif karena gelombang elektromagnetik yang tak terpolarisasi selalu memuat komponen terpolarisasi s maupun p sekaligus (Sheppard & Aguilar, 1999). Untuk kesederhanaan, istilah reflektansi, transmitansi, dan absorptansi dalam penelitian ini mewakili nilai efektifnya.



Gambar 2. Diagram alir kalkulasi

B. Variabel Operasional Penelitian

Dalam penelitian ini melibatkan 3 buah jenis variabel operasional, yaitu variabel kontrol, variabel manipulasi, dan variabel respon. Ketiga variabel tersebut dideskripsikan sebagai berikut:

1. Variabel kontrol meliputi jenis lapisan, ketebalan lapisan Al (100 nm), ketebalan lapisan semi-tak hingga (udara dan substrat kaca soda kapur), dan data indeks bias kompleks dari setiap lapisan yang bersumber pada penelitian eksperimen.
2. Variabel manipulasi meliputi variasi ketebalan lapisan pelindung SiO₂ sebesar 50 nm, 100 nm, 150 nm, dan 200 nm. Peningkatan ketebalan lapisan SiO₂ tidak melebihi panjang gelombang untuk menjaga koherensi.
3. Variabel respon meliputi reflektansi, transmitansi, dan absorptansi model cermin Al pada rentang panjang gelombang 300 – 1.000 nm dan sudut datang 20° – 80°.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data numerik hasil kalkulasi dalam penelitian ini diperoleh dengan memasukkan parameter-parameter yang dibutuhkan dalam menjalankan skrip kode. Keluaran seperti data reflektansi, transmittansi, dan absorptansi disimpan dalam *file* berformat csv. Untuk 1 variasi ketebalan lapisan SiO₂ akan diperoleh sebanyak 3 buah *file.csv* sehingga total *file.csv* yang dikumpulkan dalam penelitian ini sebanyak 12 buah.

D. Teknik Pengolahan Data

Data numerik hasil kalkulasi reflektansi, transmittansi, dan absorptansi diolah menggunakan perangkat lunak LibreOffice untuk menentukan nilai tertinggi dan terendahnya. Hal tersebut dilakukan untuk setiap variasi ketebalan lapisan SiO₂. Selain itu, perhitungan rerata reflektansi, transmittansi, dan absorptansi dilakukan dalam 3 jenis rentang panjang gelombang, yaitu ultraviolet dekat, cahaya tampak, dan inframerah dekat. Terakhir, data numerik kalkulasi reflektansi, transmittansi, dan absorptansi rerata divisualisasikan dengan grafik 2 dimensi untuk melihat perilaku optik cermin Al sebagai respon terhadap perubahan ketebalan lapisan SiO₂ dalam rentang panjang gelombang elektromagnetik yang lebar (300 – 1.000 nm) dan variasi sudut datang yang besar (20° – 80°).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

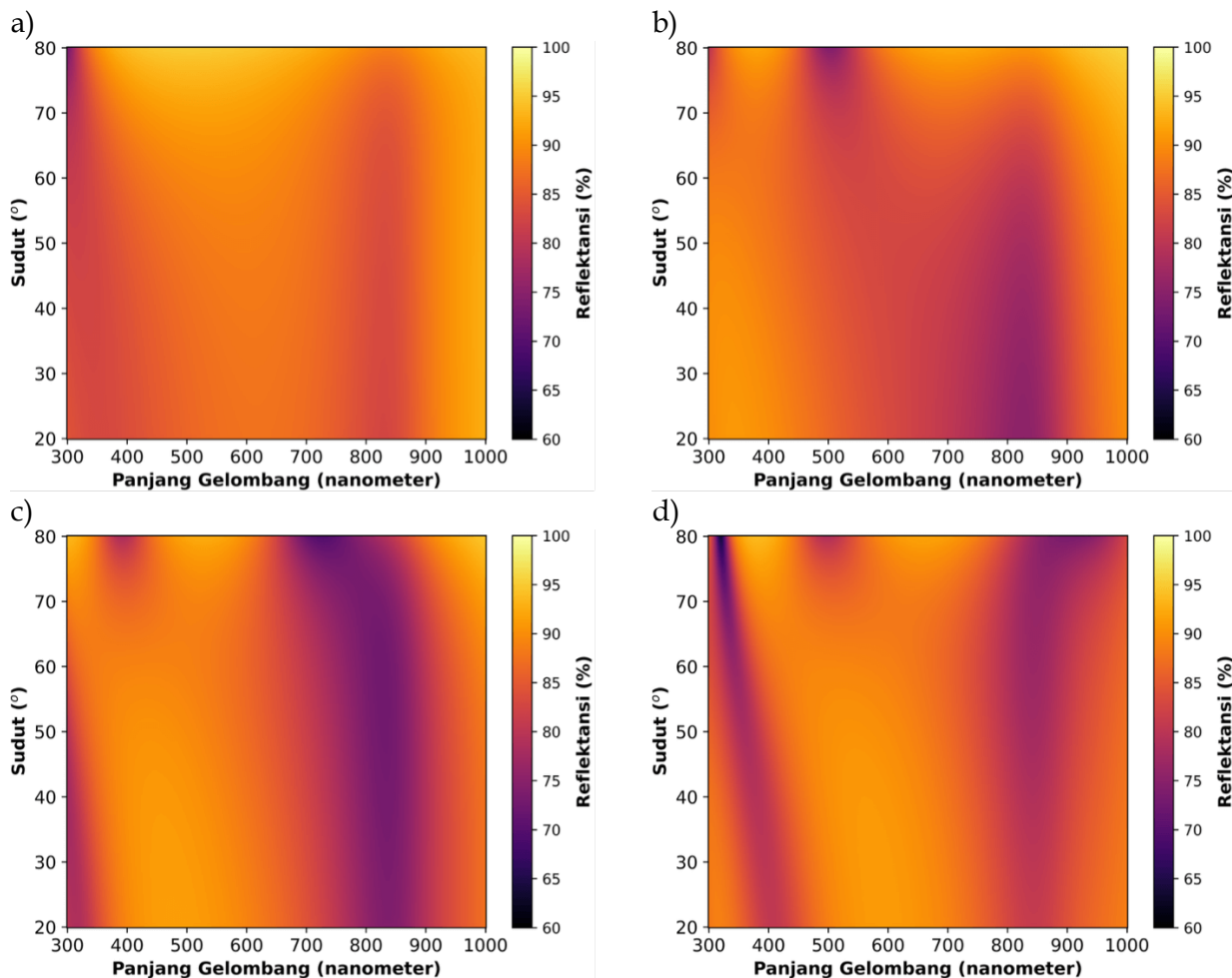
A. Pengaruh Ketebalan lapisan SiO₂ terhadap Reflektansi

Nilai reflektansi cermin Al yang diperoleh dalam penelitian ini relatif mendekati nilai yang terdapat pada beberapa referensi atau penelitian sebelumnya, yaitu berkisar pada nilai 80-90% (Flaschmann et al., 2023; Rincón-Llorente et al., 2018). Tren nilai reflektansi pada penelitian ini serupa dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Förster et al. (2013), yaitu reflektansi cermin cenderung stabil sekitar ~90% pada rentang panjang gelombang 400-600 nm. Selain itu, model yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat menunjukkan penurunan reflektansi cermin Al sekitar panjang gelombang ~800 nm seperti eksperimen yang dilakukan oleh Wette et al. (2023). Hal tersebut menandakan bahwa pemodelan cermin Al pada penelitian ini sudah baik dan dapat diterima. Selanjutnya dikaji reflektansi cermin Al dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂. Nilai reflektansi cermin Al yang diperoleh menunjukkan perbedaan bergantung pada ketebalan lapisan SiO₂. Secara visual temuan tersebut tersaji pada **Gambar 3**.

Gambar 3a) menunjukkan bahwa reflektansi cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ 50 nm berbeda untuk setiap panjang gelombang dan sudut datang. Reflektansi yang relatif besar terjadi pada rentang panjang gelombang cahaya tampak sekitar ~400-700 nm pada sudut datang yang relatif besar. Berbeda dengan reflektansi pada rentang panjang gelombang inframerah dekat sekitar ~900-1000 nm yang relatif homogen untuk variasi sudut datang yang besar. Peningkatan ketebalan lapisan SiO₂ menjadi 100 nm menyebabkan perubahan distribusi nilai reflektansi. Hal tersebut ditunjukkan pada **Gambar 3b)**, yang mana reflektansi pada rentang cahaya tampak mengalami penurunan dan pada rentang inframerah dekat cenderung menjadi inhomogen, tetapi reflektansinya pada rentang ultraviolet dekat mengalami peningkatan. Reflektansi pada rentang cahaya tampak kembali mengalami peningkatan dengan rentang gelombang yang lebih kecil ~400-600 nm saat ketebalan lapisan SiO₂ menjadi 150 nm seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3c)**. Sebaliknya pada rentang panjang gelombang inframerah dekat ~800-900 nm terjadi penurunan reflektansi dan cenderung lebih homogen. Pada **gambar 3d)** menunjukkan bahwa reflektansi yang relatif tinggi pada rentang cahaya tampak mengalami pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar ~500-700 nm untuk ketebalan lapisan SiO₂ sebesar 200 nm. Selain itu, terjadi peningkatan reflektansi pada rentang ultraviolet dekat dan pembalikan pola reflektansi secara vertikal pada rentang cahaya tampak merah dan inframerah dekat ~650-1.000 nm.

Secara kuantitatif pengaruh ketebalan lapisan SiO₂ terhadap reflektansi cermin Al ditunjukkan dengan nilai rerata reflektansinya pada rentang panjang gelombang 300-1.000 nm. Peningkatan ketebalan lapisan SiO₂ dari 50 nm hingga 150 nm cenderung menyebabkan rerata reflektansi cermin Al berkurang, tetapi tidak signifikan. Namun, rerata reflektansi cermin Al kembali meningkat ketika ketebalan lapisan SiO₂ menjadi 200 nm. Untuk rentang gelombang elektromagnetik yang lebih spesifik, seperti spektrum inframerah dekat (300-380 nm) ditemukan bahwa perubahan nilai ketebalan lapisan SiO₂ dari 50 nm menjadi 100 nm menyebabkan peningkatan nilai rerata reflektansi, sedangkan ukuran ketebalan lapisan SiO₂ yang lebih besar dari 100 nm cenderung menyebabkan rerata reflektansi cermin berkurang. Sementara itu, terjadi penurunan nilai rerata

reflektansi saat ketebalan lapisan SiO₂ ditingkat dari 50 nm menjadi 100 nm dalam spektrum cahaya tampak (380-750 nm). Sebaliknya, teramati peningkatan rerata reflektansi saat ketebalan lapisan SiO₂ ditingkatkan dari 100 nm menjadi 200 nm. Pada spektrum inframerah dekat (750-1.000 nm), diperoleh bahwa rerata reflektansinya memiliki kecenderungan perubahan nilai serupa seperti pada spektrum yang luas (300-1.000 nm). Nilai reflektansi cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ disajikan secara komprehensif pada **Tabel 2**.



Gambar 3. Reflektansi cermin Al pada rentang panjang gelombang 300-1.000 nm dan rentang sudut 20°-80° dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂ sebesar a) 50 nm, b) 100 nm, c) 150 nm, dan d) 200 nm

Tabel 2. Rerata reflektansi cermin Al dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂ pada rentang panjang gelombang yang berbeda (sudut 20° - 80°)

	50 nm (%)	100 nm (%)	150 nm (%)	200 nm (%)
$300 \leq \lambda \leq 1.000 \text{ nm}$	87,39	84,90	83,99	85,17
$300 \leq \lambda < 380 \text{ nm}$	83,15	89,05	85,69	82,73
$380 \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$	88,29	84,44	86,60	87,96
$750 < \lambda \leq 1.000 \text{ nm}$	87,41	84,26	79,54	81,82

Cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ 50 nm, 100 nm, 150 nm, dan 200 nm masing-masing menunjukkan profil reflektansi yang inhomogen. Fenomena ini terjadi karena perbedaan indeks bias kompleks setiap lapisan penyusun cermin Al yang nilainya bervariasi terhadap panjang gelombang (Tchenka et al., 2025). Nilai reflektansi dari cermin Al tidak mencapai 100% disebabkan oleh adanya penyerapan dari lapisan-lapisan dengan koefisien ekstingsi yang positif (Heisig et al., 2022). Selain itu, terdapat pergeseran fase (Sultan et al., 2024) dan resonansi optik (Walther et al., 2023) sehingga memungkinkan terjadi interferensi

konstruktif maupun destruktif. Resonansi optik merupakan mekanisme di mana gelombang elektromagnetik seolah-olah terperangkap untuk sementara waktu sehingga memungkinkan terjadinya superposisi gelombang yang memunculkan fenomena interferensi konstruktif yang mana gelombang-gelombang penyusunnya saling menguatkan maupun interferensi destruktif yang mana gelombang-gelombang penyusunnya saling melemahkan. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan variasi nilai reflektansi saat ketebalan lapisan SiO₂ berbeda. Peningkatan reflektansi berkaitan erat penguatan interferensi konstruktif dan pelemahan interferensi destruktif. Sementara itu, penurunan reflektansi berkaitan erat dengan pelemahan interferensi konstruktif dan penguatan interferensi destruktif.

B. Pengaruh Ketebalan lapisan SiO₂ terhadap Transmittansi

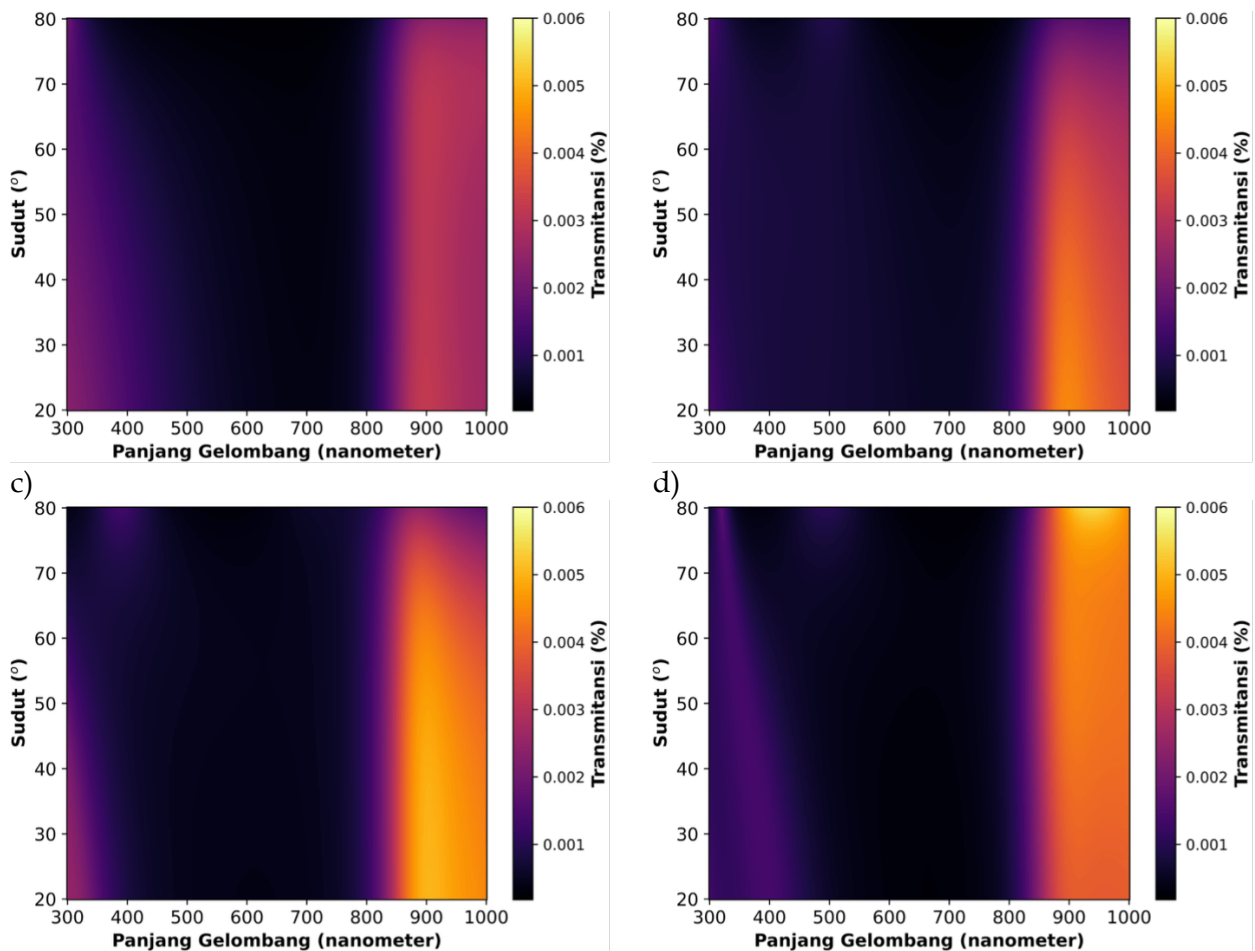
Nilai transmittansi yang diperoleh pada penelitian ini relatif sangat rendah. Hal tersebut dapat diamati pada **Gambar 4**. Ini menandakan bahwa sangat sedikit energi gelombang elektromagnetik yang diteruskan ke dalam substrat kaca soda kapur dibandingkan dengan energi gelombang elektromagnetik yang datang pada permukaan kaca Al. **Gambar 4a)** menunjukkan transmittansi pada cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ sebesar 50 nm. Transmittansi pada spektrum ultraviolet dekat tampak relatif inhomogen dibandingkan dengan transmittansi pada spektrum inframerah dekat. Selain itu, nilai transmittansi pada spektrum inframerah dekat ~ 850 - 1.000 nm relatif lebih besar dibandingkan dengan nilai transmittansi pada spektrum ultraviolet dekat. Nilai transmittansi yang lebih rendah teramati pada spektrum cahaya tampak sekitar ~ 300 - 750 nm. Perubahan nilai transmittansi terjadi saat ketebalan lapisan SiO₂ pada cermin ditingkatkan menjadi 100 nm. Hal tersebut dapat diamati pada **Gambar 4b)**. Terjadi penurunan nilai transmittansi pada spektrum ultraviolet dekat dan nilai transmittansi pada spektrum inframerah dekat cenderung menjadi lebih inhomogen. Sementara itu, profil transmittansi dari cermin Al dengan ketebalan 150 nm ditunjukkan pada **Gambar 4c)**. Terjadi peningkatan transmittansi pada spektrum ultraviolet dekat ~ 300 nm untuk sudut datang 20° - 50° . Hal yang serupa terjadi pada spektrum inframerah dekat ~ 900 nm untuk rentang sudut yang lebih besar. Peningkatan transmisi cenderung tidak teramati pada spektrum cahaya tampak. **Gambar 4d)** menunjukkan transisi transmittansi menjadi lebih homogen pada spektrum inframerah ~ 900 - 1.000 nm untuk cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ sebesar 200 nm. Selain itu, teramati bahwa terjadi pergeseran nilai transmittansi dari daerah ultraviolet dekat ke daerah cahaya tampak.

Dalam spektrum yang lebar (300- 1.000 nm) terjadi peningkatan nilai rerata transmittansi seiring bertambahnya ketebalan lapisan SiO₂ dari 50 nm hingga 150 nm pada cermin Al. Namun, penurunan terjadi saat ketebalan lapisan SiO₂ diset menjadi 200 nm. Hal yang serupa teramati pada spektrum yang lebih sempit, yaitu spektrum cahaya tampak maupun inframerah dekat. Perbedaan terjadi pada daerah spektrum ultraviolet dekat. Peningkatan ketebalan cermin lapisan SiO₂ dari 50 nm menjadi 100 nm membuat nilai transmittansi menurun secara signifikan. Namun, hal yang serupa tidak teramati pada peningkatan ketebalan lapisan SiO₂ yang lebih dari 100 nm. Pada ketebalan lapisan SiO₂ 150 nm dan 200 nm, nilai transmittansinya cenderung stabil. Secara lengkap perubahan nilai transmittansi akibat variasi ketebalan lapisan SiO₂ untuk berbagai spektrum gelombang elektromagnetik tersaji pada **Tabel 3**.

Fluktuasi profil transmittansi cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ yang berbeda berkaitan dengan perubahan fase pada lapisan SiO₂. Semakin besar ketebalan lapisan SiO₂ semakin besar pula perubahan fasenya, tetapi dampak perubahan fase tersebut cenderung terjadi secara sinusoidal sehingga pola perubahan transmittansi yang teramati tampak periodik. Selain ketebalan, panjang gelombang dalam lapisan SiO₂ berpengaruh pada perubahan fase. Hal tersebut diduga menjadi penyebab perbedaan periodisitas pola transmittansi pada cermin Al.

a)

b)



Gambar 4. Transmittansi cermin Al pada rentang panjang gelombang 300-1.000 nm dan rentang sudut 20°-80° dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂ a) 50 nm, b) 100 nm, c) 150 nm, dan d) 200 nm

Tabel 3. Rerata transmittansi cermin Al dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂ pada rentang panjang gelombang yang berbeda (sudut 20° - 80°)

	50 nm (%)	100 nm (%)	150 nm (%)	200 nm (%)
$300 \leq \lambda \leq 1.000 \text{ nm}$	0,0012	0,0013	0,0015	0,0014
$300 \leq \lambda < 380 \text{ nm}$	0,0016	0,00093	0,0012	0,0012
$380 \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$	0,00056	0,00063	0,00052	0,00051
$750 < \lambda \leq 1.000 \text{ nm}$	0,0021	0,0024	0,0030	0,0028

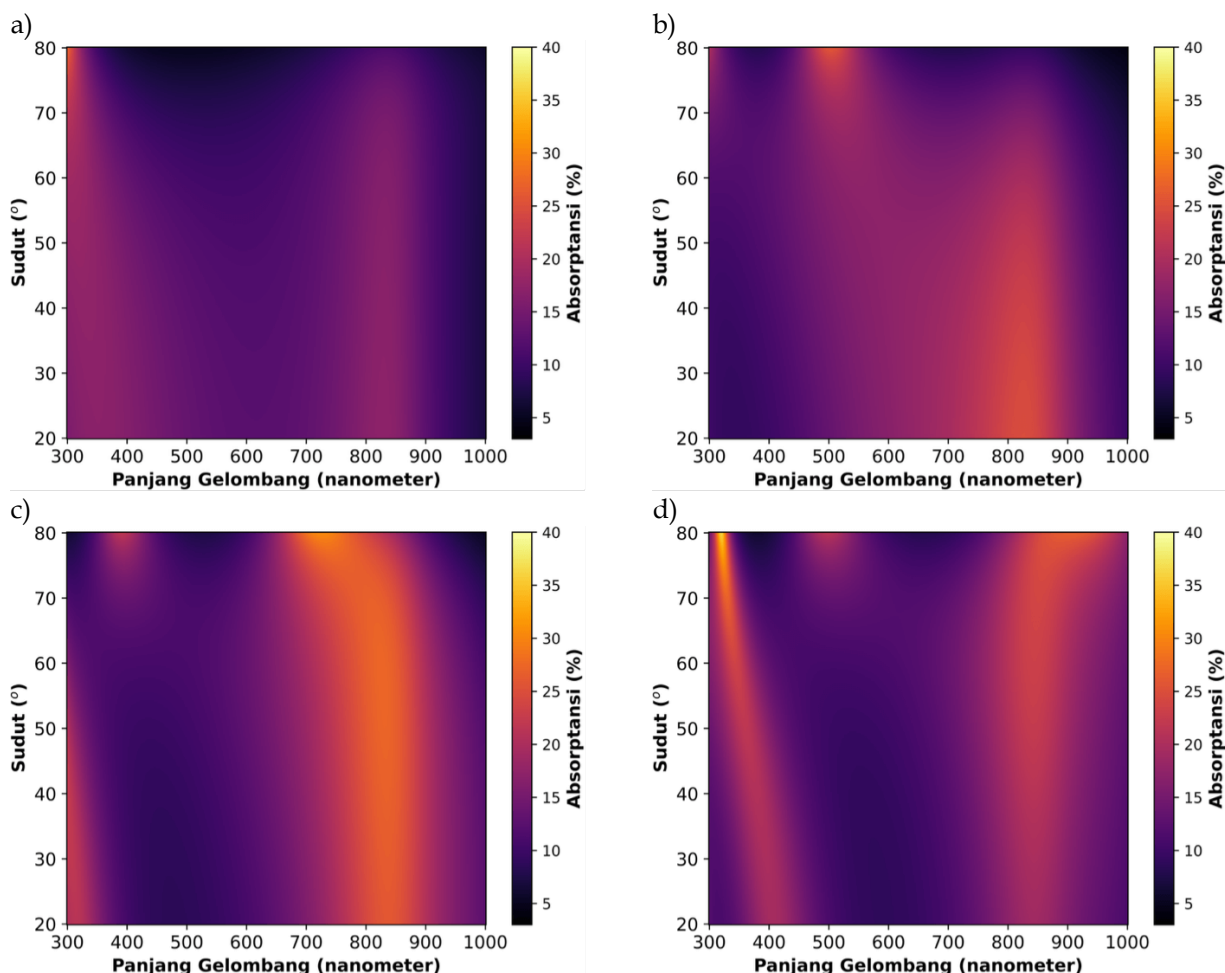
C. Pengaruh Ketebalan lapisan SiO₂ terhadap Absorptansi

Absorptansi merupakan ukuran energi gelombang elektromagnetik yang terjebak atau terserap pada cermin dibandingkan dengan energi gelombang elektromagnetik yang mengenai cermin. Profil absorptansi cermin Al yang diperoleh pada penelitian tersaji pada **Gambar 5**. Sekilas profil absorptansi cermin Al dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂ menunjukkan pola yang serupa dengan profil reflektansinya pada **Gambar 3**.

Kemiripan profil tersebut dikarenakan nilai transmittansi dari cermin Al yang sangat rendah. Berdasarkan **Gambar 5a**) absorptansi yang dominan pada cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ 50 nm terjadi pada daerah tepi spektrum ultraviolet dekat dan inframerah dekat. Sementara itu, peningkatan ketebalan lapisan SiO₂ menjadi 100 nm menyebabkan pergeseran absorptansi dari daerah tepi ultraviolet dekat ke daerah cahaya tampak dan peningkatan absorptansi pada daerah spektrum inframerah dekat ~800-900 nm seperti pada **Gambar 5b**). Peningkatan absorptansi pada daerah spektrum inframerah dekat ~800-900 nm semakin signifikan saat ketebalan lapisan SiO₂ sebesar 150 nm seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5c**). Selain itu, teramati bahwa peningkatan absorptansi juga terjadi pada spektrum ultraviolet dekat, sedangkan absorptansi pada daerah cahaya tampak menurun. Pada cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ sebesar 200

nm teramati pergeseran nilai absorptansi dari daerah ultraviolet dekat menuju daerah cahaya tampak seperti pada **Gambar 5d**). Di samping itu, nilai absorptansi di sekitar daerah inframerah dekat ~800-900 nm mengalami penurunan dan pembalikan profil secara vertikal.

Perubahan absorptansi pada daerah spektrum yang lebar dan sempit dari cermin Al akibat pengaruh ketebalan lapisan SiO₂ disajikan dengan nilai reratanya yang terdapat pada Tabel. 4. Pada spektrum yang lebar (300-1.000 nm), peningkatan ketebalan lapisan SiO₂ dari 50 nm menjadi 150 nm menyebabkan peningkatan rerata absorptansi. Namun, nilai rerata absorptansinya menurun saat ketebalan lapisan SiO₂ menjadi 200 nm. Perubahan yang serupa juga terjadi pada spektrum inframerah dekat, yang mana rerata absorptansinya tertinggi pada ketebalan lapisan SiO₂ 150 nm. Sementara itu, terjadi penurunan nilai rerata absorptansi pada daerah ultraviolet dekat saat ketebalan lapisan SiO₂ meningkat dari 50 nm menjadi 100 nm, sedangkan nilai rerata absorptansinya membesar saat ketebalan lapisan SiO₂ meningkat dari 100 nm menjadi 200 nm. Hal yang berbeda terjadi pada daerah spektrum tampak. Peningkatan ketebalan lapisan SiO₂ menyebabkan nilai rerata absorptansi meningkat kemudian menurun. Nilai rerata absorptansi yang paling signifikan terjadi saat ketebalan lapisan SiO₂ sebesar 100 nm.



Gambar 5. Absorptansi cermin Al pada rentang panjang gelombang 300-1.000 nm dan rentang sudut 20°-80° dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂ a) 50 nm, b) 100 nm, c) 150 nm, dan d) 200 nm

Tabel 4. Rerata absorptansi cermin Al dengan variasi ketebalan lapisan SiO₂ pada rentang panjang gelombang yang berbeda (sudut 20° - 80°)

	50 nm (%)	100 nm (%)	150 nm (%)	200 nm (%)
$300 \leq \lambda \leq 1.000 \text{ nm}$	12,60	15,09	16,00	14,83

$300 \leq \lambda < 380 \text{ nm}$	16,85	10,95	14,31	17,27
$380 \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$	11,70	15,56	13,39	12,03
$750 < \lambda \leq 1.000 \text{ nm}$	12,59	15,74	20,45	18,18

Perubahan pola absorptansi yang diperoleh dari cermin Al yang dengan ketebalan lapisan SiO₂ yang berbeda diduga disebabkan oleh mekanisme atenuasi optik dan resonansi optik. Atenuasi optik berkaitan dengan penyerapan energi gelombang elektromagnetik, semakin besar lintasan optik yang ditempuh maka semakin besar absorptansi yang terjadi. Sementara itu, resonansi optik menyebabkan spektrum gelombang elektromagnetik tertentu terperangkap sehingga hanya sebagian energi gelombang elektromagnetik yang dapat dipantulkan maupun diteruskan.

Secara ringkas, hasil simulasi numerik yang ditemukan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 5**. Perubahan nilai reflektansi, transmittansi, dan absorptansi terjadi secara periodik layaknya perubahan amplitudo dari sistem osilator terdorong dan teredam. Yang mana nilai reflektansi, transmittansi, dan absorptansi mengalami perubahan di sekitar nilai reratanya.

Tabel 5. Ringkasan perubahan nilai reflektansi, transmittansi, dan absorptansi cermin Al pada rentang panjang gelombang 300-1.000 nm akibat perubahan ketebalan lapisan SiO₂

Perilaku	
Reflektansi	Berubah secara periodik sekitar nilai ~85,36%, dengan reflektansi tertinggi saat ketebalan lapisan SiO ₂ sebesar 50 nm
Transmittansi	Berubah secara periodik sekitar nilai ~0,0013%, dengan transmittansi tertinggi saat ketebalan lapisan SiO ₂ sebesar 150 nm
Absorptansi	Berubah secara periodik sekitar nilai ~14,63% dengan absorptansi tertinggi saat ketebalan lapisan SiO ₂ sebesar 150 nm

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Pengaruh ketebalan lapisan SiO₂ terhadap reflektansi, transmittansi, dan absorptansi cermin Al dapat dimodelkan dan disimulasikan secara numerik menggunakan pendekatan dinamika optik, baik antar lapisan maupun dalam lapisan beserta asumsi gelombang elektromagnetik yang koheren. Secara umum diperoleh bahwa nilai rerata reflektansi cermin Al berkisar ~85%, nilai rerata transmittansi bervariasi dengan nilai ~0,0013%, dan nilai rerata absorptansi sebesar ~15%. Perubahan ketebalan lapisan SiO₂ menyebabkan perubahan pola reflektansi, transmittansi, dan absorptansi yang periodik dari cermin Al. Cermin Al dengan ketebalan lapisan pelindung SiO₂ sebesar 50 nm berpotensi untuk sensor dan cermin cahaya tampak dan inframerah. Sementara itu, cermin Al dengan ketebalan lapisan SiO₂ 100 nm berpotensi digunakan sebagai penyerap spektrum inframerah dekat, sedangkan ketebalan SiO₂ sebesar 200 nm menjadikan cermin Al cukup baik sebagai reflektor spektrum ultraviolet. Keterbatasan penelitian ini adalah masih menggunakan asumsi permukaan lapisan cermin yang halus tanpa cacat dan belum memasukkan faktor inkohorensi dalam dinamika optik sehingga belum dapat mempelajari karakteristik optik cermin Al sepenuhnya.

B. Saran

Penelitian sejenis ini dapat dilakukan lebih lanjut dengan memasukkan faktor tidak rataanya lapisan sehingga besaran-besaran fisis yang diperoleh mendekati nilai yang sesungguhnya. Selain itu, dapat dilakukan variasi ukuran ketebalan maupun jenis lapisan sehingga diperoleh desain cermin dengan performa optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi maupun teknologi tertentu. Desain yang diperoleh selanjutnya dapat dikaji pada skala laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Almanza, R., Hernández, P., Martínez, I., & Mazari, M. (2009). Development and mean life of aluminum first-surface mirrors for solar energy applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(9), 1647–1651. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.05.004>
- Aziz, I., Chahid, Y., Keogh, J., Carruthers, J., Morris, K., Harman, J., McPhee, S., Fraser, E., Millan, L., & Bourgenot, C. (2025). Additive manufacturing in aluminium of a primary mirror for a CubeSat application: manufacture, testing, and evaluation. *Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems V*, 13624, 458–491.
- Bonnal, T., Belarouci, A., Orobtcchouk, R., & Prud'homme, E. (2020). How to determine the complex refractive index from infrared reflectance spectroscopy? <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03869-7>
- Börzsönyi, A., Heiner, Z., Kalashnikov, M. P., Kovács, A. P., & Osvay, K. (2008). Dispersion measurement of inert gases and gas mixtures at 800 nm. *Applied Optics*, 47(27), 4856–4863. <https://doi.org/10.1364/AO.47.004856>
- Campos, J., Fontecha, J., Pons, A., Corredera, P., & Corróns, A. (1998). Measurement of standard aluminium mirrors, reflectance versus light polarization. *Measurement Science and Technology*, 9(2), 256. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/2/013>
- Cheng, F., Su, P.-H., Choi, J., Gwo, S., Li, X., & Shih, C.-K. (2016). Epitaxial Growth of Atomically Smooth Aluminum on Silicon and Its Intrinsic Optical Properties. *ACS Nano*, 10(11), 9852–9860. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05556>
- Dadsetani, M., & Omid, A. R. (2015). Optical properties of multilayer (III-V semiconductors) thin films within the framework of DFT + characteristic matrix. *Optik*, 126(21), 2999–3003. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.07.088>
- Danis, B. S., & Zayim, E. (2025). TMMax: High-performance modeling of multilayer thin-film structures using transfer matrix method with JAX. <https://doi.org/10.21105/joss.09088>
- Flaschmann, R., Schmid, C., Zugliani, L., Strothauer, S., Wietschorke, F., Grotowski, S., Jonas, B., Müller, M., Althammer, M., Gross, R., Finley, J. J., & Müller, K. (2023). Optimizing the growth conditions of Al mirrors for superconducting nanowire single-photon detectors. *Materials for Quantum Technology*, 3(3). <https://doi.org/10.1088/2633-4356/ace490>
- Förster, A., Armstrong, T., Chadwick, P., & Held, M. (2013). Dielectric Coatings for IACT Mirrors. <http://arxiv.org/abs/1307.4557>
- Grosjean, A., Soum-Glaude, A., & Thomas, L. (2021). Replacing silver by aluminum in solar mirrors by improving solar reflectance with dielectric top layers. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00307>
- Guenther, K. H., Lee, C., Han, X. F., Balasubramanian, K., & Jorgensen, G. J. (1992). Weather Resistant Aluminum Mirrors with Enhanced UV Reflectance. *Proceedings of the 35th Annual Technical Symposium of the Society of Vacuum Coaters, Baltimore, MD*.
- Heisig, L.-M., Markuske, K., Werzner, E., Wulf, R., & Fieback, T. M. (2022). Experimental and Simplified Predictive Determination of Extinction Coefficients of Ceramic Open-Cell Foams Used for Metal Melt Filtration. *Advanced Engineering Materials*, 24(2), 2100723. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adem.202100723>
- Kamptner, A., Scharber, M. C., & Schiek, M. (2024). Accurate Determination of the Uniaxial Complex Refractive Index and the Optical Band Gap of Polymer Thin Films to Correlate Their Absorption Strength and Onset of Absorption. *ChemPhysChem*, 25(23), e202400233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cphc.202400233>
- Keskar, D., Survase, S., & Thakurdesai, M. (2021). Reflectivity simulation by using transfer matrix method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1913(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1913/1/012051>
- Liu, C., Guo, Q., Cao, G., Ai, W., & Guan, Y. (2022). Vacuum ultraviolet high-reflectance aluminum mirrors on copper substrate for application in noble liquid time projection chamber. *Vacuum*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110806>
- Luce, A., Mahdavi, A., Marquardt, F., & Wankerl, H. (2022). TMM-Fast, a transfer matrix computation package for multilayer thin-film optimization: tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*, 39(6), 1007. <https://doi.org/10.1364/josaa.450928>
- Mandong, A. M., & Uzum, A. (2021). Fresnel calculations of double/multi-layer antireflection coatings on silicon substrates. *Research on Engineering Structures and Materials*, 7(4), 539–550. <https://doi.org/10.17515/resm2020.241en1217>
- Oktay, S., Duru, İ., Bakır, H., & Tabaru, T. E. (2025). Deep learning and machine learning based highly accurate reflection prediction model for multi layers anti-reflection coatings. *Optical and Quantum Electronics*, 57(1), 101. <https://doi.org/10.1007/s11082-024-08006-x>

- Polyanskiy, M. N. (2024). Refractiveindex.info database of optical constants. *Scientific Data*, 11(1), 94. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02898-2>
- Renganathan, P., Duffy, T. S., & Gupta, Y. M. (2020). Hugoniot states and optical response of soda lime glass shock compressed to 120 GPa. *Journal of Applied Physics*, 127(20), 205901. <https://doi.org/10.1063/5.0010396>
- Rincón-Llorente, G., Heras, I., Rodríguez, E. G., Schumann, E., Krause, M., & Escobar-Galindo, R. (2018). On the effect of thin film growth mechanisms on the specular reflectance of aluminium thin films deposited via filtered cathodic vacuum arc. *Coatings*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/coatings8090321>
- Rodríguez-de Marcos, L. V., Larruquert, J. I., Méndez, J. A., & Aznárez, J. A. (2016). Self-consistent optical constants of SiO₂ and Ta₂O₅ films. *Optical Materials Express*, 6(11), 3622–3637. <https://doi.org/10.1364/OME.6.003622>
- Sharhan, A. A. (2020). Transfer Matrix Mathematical Method for Evaluation the DBR Mirror for Light Emitting Diode and Laser. *Journal of Physics: Conference Series*, 1535(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1535/1/012018>
- Sheppard, C. J. R., & Aguilar, F. (1999). Fresnel coefficients for weak reflection, and the scattering potential for three-dimensional imaging. In *Optics Communications* (Vol. 162).
- Sultan, Z., Tota, R., Ali, E., Obayedulla, M., & Yadav, B. (2024). Analysis of Optical Thin-films: Towards Lower Reflectivity for High Performance Solar Cells and Modern Photonic Devices Applications. *International Journal of Materials Science and Applications*, 13(6), 101–112. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20241306.11>
- T R, M. K., Srihari, P. V., & Krupashankara, M. S. (2020). Simulation and Optimization of Coating thickness for Absorptance and Reflectance in Multilayered Thin Films. *International Journal of ChemTech Research*, 13(4), 364–373. <https://doi.org/10.20902/ijctr.2019.130405>
- Tchenka, A., Amiri, L., Bousseta, M., Lebrini, N., Ourbaa, M., & Ech-Chamikh, E. (2025). Influence of refractive index, thickness and extinction coefficient on thin film reflectance. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 206, 112849. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2025.112849>
- Tuomas, T. (2022). MULTILAYER THIN FILM-BASED HYPERSPECTRAL CAMOUFLAGE COATINGS.
- Walther, M., Siefke, T., Gerold, K., & Zeitner, U. D. (2023). Switchable optics based on guided mode resonance in lithographically patterned vanadium dioxide with integrated heating layer. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 19(1). <https://doi.org/10.1051/jeos/2023019>
- Wette, J., Sutter, F., Sánchez-Moreno, R., & Fernández-García, A. (2023). Comparison of Commercial Reflectometers for Solar Mirrors. *SolarPACES Conference Proceedings*, 1. <https://doi.org/10.52825/solarpaces.v1i.666>
- Zhang, J., Wang, C., Qu, H., Guan, H., Wang, H., Zhang, X., Xie, X., Wang, H., Zhang, K., & Li, L. (2022). Design and Fabrication of an Additively Manufactured Aluminum Mirror with Compound Surfaces. *Materials*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/ma15207050>
- Zhang, J., Zhang, X., Tan, S., & Xie, X. (2017). Design and Manufacture of an Off-axis Aluminum Mirror for Visible-light Imaging. *Current Optics and Photonics*, 1(4), 364–371. <https://opg.optica.org/copp/abstract.cfm?URI=copp-1-4-364>
- Zhang, K., Qu, H., Guan, H., Zhang, J., Zhang, X., Xie, X., Yan, L., & Wang, C. (2021). Design and fabrication technology of metal mirrors based on additive manufacturing: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app112210630>