

## SINTESIS, KARAKTERISASI, DAN UJI STABILITAS KOLOID EMAS MENGUNAKAN BIO-REDUKTOR ALAMI EKSTRAK DAUN KELAPA SAWIT (*ELAEIS GUINEENSIS* J)

Nurul Asni<sup>1</sup>, Mutiara Dewi Rukmana<sup>2</sup>, Siti Suhartati<sup>3</sup>, Tazkia Maulida Putri<sup>4</sup>, Anjar Hermadi Saputro<sup>2</sup>, Iwan Syahjoko Saputra<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Program Studi Kimia Analisis, Akademi Kimia Analisis Caraka Nusantara

<sup>2</sup>Program Studi Farmasi, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sumatera

<sup>3</sup>Program Studi Rekayasa Kosmetik, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera  
iwan.saputra@km.itera.ac.id<sup>3</sup>

*Submitted September 13, 2025; Revised November 27, 2025; Accepted December 1, 2025*

### Abstrak

Banyak dilakukan pembuatan koloid emas yang melibatkan reduktor kimia seperti senyawa  $\text{NaBH}_4$  dan asam sitrat. Senyawa tersebut berbahaya dan tidak ramah lingkungan. Untuk mengatasi hal ini, penggunaan reduktor alami dari ekstrak bagian tanaman dapat menggantikan reduktor kimia berbahaya. Tujuan penelitian ini yaitu pembuatan koloid emas melalui proses yang ramah lingkungan dengan memanfaatkan metabolit sekunder seperti Alkaloid, Flavonoid, dan Tanin dalam ekstrak daun kelapa sawit (*Elaeis guineensis* J) sebagai reduktor alami ion  $\text{Au}^{3+}$  menjadi  $\text{Au}^0$ . Selain itu, ekstrak daun kelapa sawit juga berfungsi sebagai agen pengkhelet dan penstabil koloid emas. Penelitian ini menggunakan metode sintesis hijau (*green synthesis*) dalam pembentukan koloid emas. Hasil pengukuran *x-ray diffraction* (XRD) menunjukkan rata-rata ukuran kristalit koloid emas sebesar 22,8 nm dengan bentuk *face centered cubic* (FCC). Distribusi rata-rata ukuran partikel koloid emas yaitu 27,5 nm dengan muatan zeta charge -20 mV. Hal ini mengindikasikan kestabilan koloid emas selama 30 hari. Dari data yang ada dapat disimpulkan bahwa koloid emas berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit dan menghasilkan ukuran partikel dalam skala nanometer.

**Kata Kunci :** Nanoteknologi, Koloid Emas, *Elaeis guineensis* J

### Abstract

Gold colloids were successfully synthesized by utilizing oil palm leaf extract as a Bio-synthesis medium, natural reducing agent, and stabilizer. The use of natural reducing agents from plant extracts can replace dangerous and expensive chemical reducing agents. The purpose of this study is to form gold colloids through an environmentally friendly process, namely utilizing secondary metabolites such as Alkaloids, Flavonoids, and Tannins in oil palm leaf extract (*Elaeis guineensis* J) as natural reducing agents of  $\text{Au}^{3+}$  ions to  $\text{Au}^0$ . In addition, oil palm leaf extract also functions as a chelating agent and stabilizer of gold colloids. XRD results show an average crystallite size of gold colloids of 22.8 nm with a face-centered cubic (FCC) shape. The average distribution of gold colloidal particle size is 27.5 nm with a zeta charge of -20 mV. This indicates the stability of gold colloids for 30 days.

**Keywords :** Nanotechnology, Gold Colloid, *Elaeis guineensis* J

### 1. PENDAHULUAN

Nanoteknologi telah menarik perhatian besar dalam berbagai bidang penelitian dan aplikasi [1]. Bidang nanoteknologi telah dikembangkan untuk kemandirian material fungsional (nanomaterial) dengan ukuran dan bentuk yang spesifik yaitu pada skala 1–100 nm [2]. Salah satu contoh

nanomaterial dari bahan anorganik adalah koloid emas (AuNPs). Koloid emas memiliki struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC) yang dapat direkayasa menjadi ukuran nanokristal [3]. Koloid emas yang memiliki ukuran kristal dalam skala nano dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti nanokatalis

pemurnian air limbah, elektronik, sistem penghantaran obat, antibakteri, antikanker, dan sediaan kosmetik [4]. Selain itu, nanokristal emas memiliki sifat optik yang unik yaitu terlihat secara tampak (visibel) perubahan warna koloid yang dihasilkan setelah proses reduksi ion  $\text{Au}^{3+}$  menjadi  $\text{Au}^0$  (koloid). Koloid Au dengan berbagai variasi ukuran partikel menghasilkan warna koloid yang berbeda-beda dari ungu, merah, dan pink [5]. Disisi lain, koloid Au memiliki fenomena *Surface Plasmonic Resonance* (SPR) yang terlihat pada panjang gelombang sekitar 500–600 nm.

Sintesis nanopartikel emas melibatkan zat pereduksi sebagai agen pembentukan koloid emas. Zat kimia yang dapat digunakan sebagai agen reduksi ion  $\text{Au}^{3+}$  menjadi  $\text{Au}^0$  seperti Asam Sitrat, Natrium Sitrat, dan  $\text{NaBH}_4$ . Bahan-bahan ini tidak ramah lingkungan, beracun, dan mahal harganya [6]. Penelitian sebelumnya melaporkan pendekatan sintesis hijau dalam produksi koloid emas. Pemanfaatan ekstrak bagian dari tanaman seperti bagian daun, ranting, batang, buah, bunga, biji, dan akar dapat digunakan sebagai media pembentukan koloid emas [7]. Ekstrak seperti *Tribulus terrestris*, *Punica granatum* [8] *Fritillaria cirrhosa*, *Jatropha integerrima* Jacq [9] *Spinacia oleracea* L, *Kaempferia parviflora*, *Fusarium solani* [10] *Terminalia mantaly*, *Achillea wilhelmsii*, dan *Curcuma kwangsiensis* [11] dapat digunakan sebagai agen bio-sintesis alami dalam mereduksi ion  $\text{Au}^{3+}$  menjadi  $\text{Au}^0$ . Penggunaan bahan-bahan alami dari ekstrak bagian tanaman menjadi salah satu alternatif penggantian sumber reduktor yang berbahaya. Pada penelitian ini, kami melaporkan penggunaan ekstrak daun kelapa sawit (*Elaeis guineensis* J) sebagai media bio-sintesis koloid emas.

Sumatera merupakan Pulau terbesar penghasil kelapa sawit di Indonesia, dengan perkebunan yang membentang luas dari Provinsi Aceh hingga Lampung.

Kondisi iklim tropis, lembab, dan curah hujan yang cukup sepanjang tahun menjadikan Pulau Sumatera sebagai lokasi ideal untuk perkebunan kelapa sawit. Beberapa bagian dari tanaman kelapa sawit yang dapat dimanfaatkan seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai mulsa atau kompos, cangkang sawit sebagai bahan bakar boiler, serabut sebagai bahan bakar atau media tanam, bungkil inti sawit sebagai pakan ternak, palm kernel oil (PKO)/minyak inti sawit dan crude palm oil (CPO) dapat digunakan sebagai bahan baku minyak goreng [12]. Bagian lain yang masih jarang dimanfaatkan yaitu limbah daun kelapa sawit. Oleh karena itu, kami mencoba memanfaatkan limbah daun kelapa sawit sebagai media bio-sintesis koloid emas. Beberapa penelitian sebelumnya melaporkan hasil uji fitokimia ekstrak daun kelapa sawit mengandung senyawa metabolit sekunder seperti flavonoid, alkaloid, tanin, saponin, dan steroid [13]. Senyawa ini dapat dijadikan sebagai bio-reduktor dan agen pengkkelat koloid emas agar tidak terjadi aglomerasi selama proses reduksi berlangsung. Pemanfaatan ekstrak alami dari bagian tanaman dapat berpotensi mengurangi penggunaan bahan-bahan kimia yang berbahaya. Dengan pendekatan metode sintesis hijau diharapkan menjadi temuan baru bagi para peneliti untuk mengembangkan nanomaterial fungsional. Tujuan penelitian ini yaitu pembuatan koloid emas yang stabil dalam waktu yang lama dengan adanya pelapis permukaan koloid emas menggunakan metabolit sekunder dalam ekstrak daun kelapa sawit.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Rekayasa Kosmetik, Institut Teknologi Sumatera yang berkolaborasi dengan Laboratorium Akademi Kimia Analis Caraka Nusantara.

### Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan berupa peralatan gelas kimia, timbangan analitik, dan botol vial. Sampel yang digunakan pada penelitian ini yaitu daun segar kelapa sawit yang didapatkan dari perkebunan sawit di Daerah Seputih Banyak, Lampung Tengah. Prekursor  $\text{HAuCl}_4$  (99,99%) dan akuades didapatkan dari Akademi Kimia Analis Caraka Nusantara.

### Preparasi Sampel Daun Kelapa Sawit

Sebanyak 100 g sampel daun kelapa sawit yang masih fresh dicuci menggunakan air lalu ditiriskan. Setelah itu, daun kelapa sawit dipotong kecil-kecil dan dikeringkan selama 7 hari. Potongan daun yang sudah kering dilakukan proses penghalusan menggunakan blender. Sebanyak 10 g serbuk daun kelapa sawit ditambahkan dengan 25 mL akuades. Campuran distirer selama 4 Jam pada suhu  $65^\circ\text{C}$  seperti yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya [14]. Campuran lalu didinginkan dan disaring menggunakan kertas saring Whatman No.1. Filtrat yang didapatkan dilakukan uji fitokimia dan perhitungan nilai rendemen.

### Bio-sintesis Koloid Emas

Sebanyak 10 mL larutan  $\text{HAuCl}_4$  ( $9 \times 10^{-5}$  M) direaksikan dengan 0,1 mL ekstrak daun kelapa sawit (variasi konsentrasi ekstrak: 1,3; 1,6; 1,9%). Larutan direaksikan pada suhu ruang sampai terjadi perubahan warna larutan dari kuning menjadi merah seperti yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya [15]. Perubahan warna yang terjadi mengindikasikan terbentuknya koloid emas berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit. Koloid emas yang terbentuk dilakukan analisis menggunakan instrumentasi.

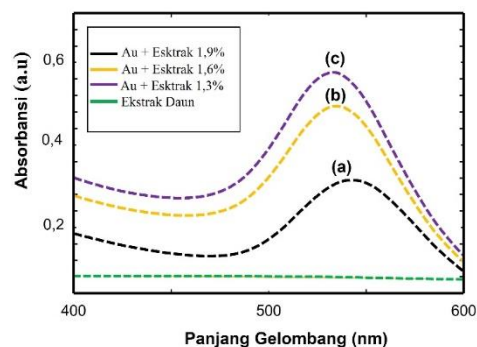
### Karakterisasi Koloid Emas

Panjang gelombang maksimum ( $\lambda$  maks) koloid emas dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-visibel (UV-vis Shimadzu 2600). Gugus fungsi yang terdapat dalam ekstrak daun kelapa sawit

dan mode vibrasi koloid emas dianalisis menggunakan spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR Perkin-Elmer) dengan pembagi berkas KBr pada bilangan gelombang  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ . Kristalinitas dan ukuran kristalit koloid emas dianalisis menggunakan spektroskopi difraksi sinar-X (XRD Shimadzu 7000) pada sudut difraksi ( $2\theta$ ):  $20\text{--}80^\circ$ . Nilai distribusi ukuran partikel koloid emas diukur menggunakan Particle Size Analyzer (PSA) (Malvern ZEN 1600, Inggris) dengan sudut hamburan cahaya dinamis  $90^\circ$  pada suhu  $25^\circ\text{C}$ . Muatan total antar partikel pada koloid emas dikarakterisasi menggunakan Particle Zeta Charge (PZC) (Malvern ZEN 1600).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Koloid emas berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit. Setelah dilakukan perhitungan, ekstrak daun kelapa sawit menghasilkan nilai rendemen sebesar 7%. Proses reduksi ion  $\text{Au}^{3+}$  menjadi  $\text{Au}^0$  dilakukan pada suhu ruang selama 1 jam. Terjadi perubahan warna larutan dari kuning menjadi merah yang mengindikasikan terbentuknya koloid emas.



**Gambar 1. Spektrum UV-Vis koloid emas dengan variasi konsentrasi ekstrak daun kelapa sawit (a) 1,3%; (b) 1,6%; dan (d) 1,9%**

Analisis menggunakan Spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk menentukan nilai absorbansi dan panjang gelombang koloid

emas yang terbentuk seperti ditunjukkan pada gambar 1.

Penentuan nilai panjang gelombang dilakukan pada rentang 400–600 nm. Untuk sampel ekstrak daun kelapa sawit tidak memiliki spektrum pada daerah panjang gelombang 500–600 nm. Untuk Koloid emas dengan penambahan ekstrak daun kelapa sawit 1,3; 1,6; dan 1,9% menghasilkan masing-masing nilai absorbansi sebesar 0,22; 0,45; dan 0,59 dengan nilai panjang gelombang 548; 532; dan 532 nm seperti ditunjukkan pada gambar 1a–c. Dari data yang didapat, semakin kecil nilai panjang gelombang maka semakin kecil ukuran koloid emas yang dihasilkan. Koloid emas memiliki fenomena *surface plasmonic resonance* (SPR) yang terlihat pada panjang gelombang 500–600 nm [16].

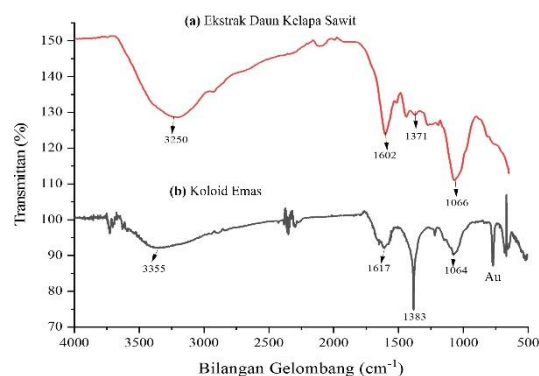
Analisis menggunakan FTIR digunakan untuk menentukan gugus fungsi yang terdapat dalam ekstrak daun kelapa sawit. Hasil analisis fitokimia menjelaskan, ekstrak daun kelapa sawit mengandung metabolit sekunder seperti Flavonoid, Alkaloid, dan tanin. Untuk senyawa saponin tidak terdapat dalam ekstrak daun kelapa sawit seperti terlihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. Skrining Fitokimia Ekstrak Daun Kelapa Sawit**

| No | Nama Senyawa | Hasil |
|----|--------------|-------|
| 1. | Alkaloid     | +     |
| 2. | Flavonoid    | +     |
| 3. | Tanin        | +     |
| 4  | Saponin      | -     |

Gambar 2 merupakan spektrum FTIR koloid emas yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit. Hasil karakterisasi gugus fungsi yang terdapat dalam ekstrak daun kelapa sawit yaitu –OH pada bilangan gelombang  $3250\text{ cm}^{-1}$ , regangan C=C pada  $1602\text{ cm}^{-1}$ , C–H pada  $1371\text{ cm}^{-1}$ , dan ikatan C–O pada  $1066\text{ cm}^{-1}$ . Namun, hasil analisis FTIR dari koloid emas yang terbentuk yaitu regangan –OH dari alkohol/fenol yang berikatan dengan H

pada bilangan gelombang  $3355\text{ cm}^{-1}$ , regangan C=C dari alkena pada  $1617\text{ cm}^{-1}$ , regangan C–H dari alkana pada  $1383\text{ cm}^{-1}$ , regangan ikatan C–O dari alkohol pada  $1064\text{ cm}^{-1}$ . Bilangan gelombang tersebut sesuai dengan tabel 1 senyawa flavonoid, alkaloid, dan tanin yang terkandung dalam ekstrak daun kelapa sawit.

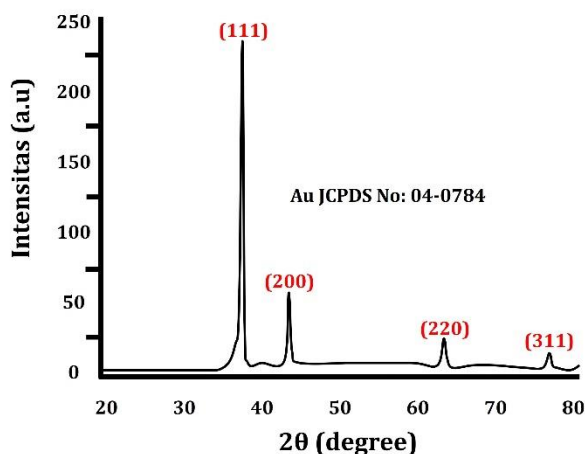


**Gambar 2. Spektrum FTIR (a) Ekstrak daun kelapa sawit dan (b) koloid emas dengan konsentrasi ekstrak daun kelapa sawit 1,9%**

Pembentukan koloid emas dari bio-menggunakan ekstrak daun kelapa sawit menunjukkan pergeseran puncak FTIR yang terlihat dari Gambar 2b pergeseran puncak dan lebar yang intens dari  $1066\text{ cm}^{-1}$  ke  $1064\text{ cm}^{-1}$  dimungkinkan terjadi ikatan yang kuat dari ion  $\text{Au}^{3+}$  dengan gugus alkohol primer dari vibrasi C–O sehingga terjadi reduksi ion  $\text{Au}^{3+}$  menjadi  $\text{Au}^0$ . Berdasarkan teori, pembentuk koloid emas dengan bioreduktor ekstrak daun kelapa sawit terjadi karena adanya reaksi reduksi ion  $\text{Au}^{3+}$ . Gugus fungsi yang terkandung dalam ekstrak daun kelapa sawit mengalami reaksi oksidasi sehingga mengalami perubahan, hal ini akan menyebabkan terbentuknya koloid emas dari reaksi gugus fungsi yang terkandung dalam ekstrak daun kelapa sawit yang mereduksi ion  $\text{Au}^{3+}$  [17]. Gugus fungsi dapat diindikasikan dengan turunnya intensitas puncak gugus fungsi pada spektrum FTIR dari ekstrak daun kelapa

sawit sebelum direaksikan dengan ion  $\text{Au}^{3+}$  dan setelah koloid emas terbentuk. Dimungkinkan kembali ada gugus karbonil yang menunjukkan stabilitas koloid emas dengan membentuk lapisan pengkelat. Hal ini dapat mencegah terbentuknya aglomerasi pada saat proses stabilitas.

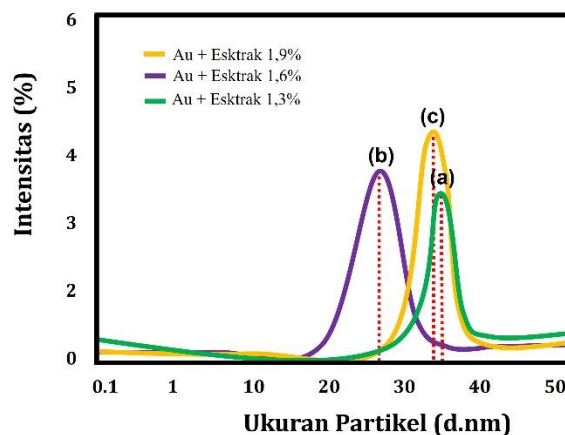
Analisis Spektroskopi XRD digunakan untuk menentukan kristalinitas, ukuran kristalit, indeks miller, dan struktur kristal dari koloid emas. Gambar 3 merupakan kristalinitas dari koloid emas yang disintesis dengan ekstrak daun kelapa sawit. Dari data XRD, koloid emas memiliki nilai hkl (111); (200), (220), dan (311) yang terlihat pada sudut  $2\theta$ : 38,6; 43,2; 62,7; dan 78,4 yang sesuai dengan JCPDS No. 04-0784. Koloid emas memiliki struktur kristal *face centered cubic* (FCC) [18]. Setelah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan *Debye-Scherrer*, koloid emas yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit memiliki ukuran kristal sebesar 22,8 nm.



**Gambar 3. Kristalinitas koloid emas dengan konsentrasi ekstrak daun kelapa sawit 1,6%**

Analisis menggunakan *particle size analyzer* (PSA) digunakan untuk menentukan rata-rata ukuran partikel koloid emas. Gambar 4 merupakan spektrum PSA dari koloid emas yang

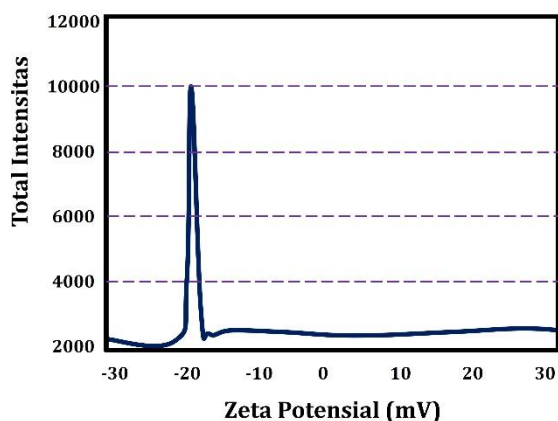
disintesis menggunakan berbagai variasi konsentrasi ekstrak daun kelapa sawit.



**Gambar 4. Spektrum PSA koloid emas dengan berbagai variasi konsentrasi ekstrak daun kelapa sawit**

Koloid emas yang disintesis dengan konsentrasi ekstrak daun kelapa sawit 1,3; 1,6; dan 1,9% menghasilkan rata-rata ukuran partikel masing-masing 35,4; 27,5; dan 34,7 nm. penambahan ekstrak daun kelapa sawit dengan konsentrasi 1,6% menghasilkan distribusi rata-rata ukuran partikel yang terkecil dibandingkan pada penambahan ekstrak dengan konsentrasi 1,3 dan 1,9%. Hal ini menunjukkan penambahan ekstrak 1,6% merupakan hasil yang optimum dan sesuai dengan data panjang gelombang karakterisasi spektrofotometer UV-Vis.

Analisis menggunakan *Particle Zeta Charge* (PZC) digunakan untuk mengetahui muatan dan tolakan antar partikel koloid emas. Gambar 5 merupakan spektrum PZC dari koloid emas yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit.



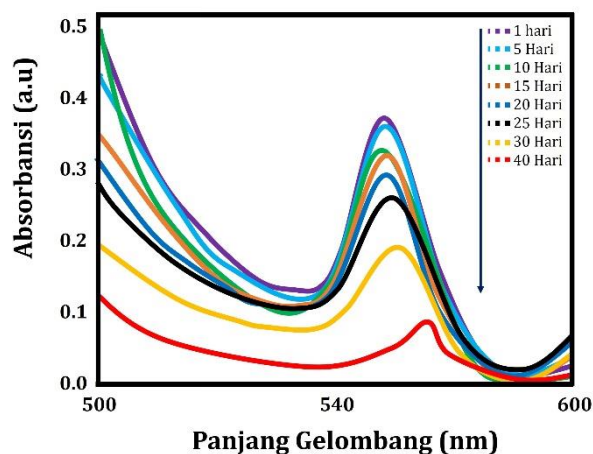
**Gambar 5. Spektrum PZC koloid emas dengan konsentrasi ekstrak daun kelapa sawit 1,6%**

Analisis potensial zeta (zeta potential) merupakan parameter kritis dalam karakterisasi koloid emas yang menggambarkan stabilitas elektrostatik partikel dalam suspensi. Pengukuran zeta potential koloid emas dilakukan menggunakan teknik *dynamic light scattering* (DLS) atau laser *Doppler velocimetry* untuk menentukan mobilitas elektroforetik partikel bermuatan [19].

Nilai zeta potential yang tinggi (umumnya  $> \pm 30$  mV) mengindikasikan stabilitas koloid emas yang baik karena adanya gaya tolak-menolak elektrostatik yang kuat antar partikel, sementara nilai yang rendah menunjukkan kecenderungan agregasi partikel. Point of zero charge (PZC) koloid emas biasanya berada pada pH sekitar 2-3, dimana pada kondisi ini partikel memiliki muatan netto nol dan stabilitas koloid mencapai titik minimum [20]. Koloid emas yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit memiliki muatan antar partikel ( $-20$  mV) yang mengindikasikan tolakan antar partikel koloid emas semakin kuat, sehingga koloid emas tidak terjadi aglomerasi [21].

Untuk kestabilan koloid emas ditentukan menggunakan Spektrofotometer UV-Vs. gambar 6 merupakan hasil kestabilan

koloid emas yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit.



**Gambar 6. Spektrum UV-Vis Kestabilan koloid emas yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit dengan konsentrasi sebesar 1,6%**

Koloid emas yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelapa sawit memiliki kestabilan partikel selama 30 hari seperti ditunjukkan pada gambar 6. Hal ini diprediksi seluruh metabolit sekunder yang terkandung dalam ekstrak daun kelapa sawit berperan dalam pembentukan koloid emas.

#### 4. SIMPULAN

Koloid emas berhasil disintesis menggunakan reduktor alami ekstrak daun kelapa sawit. Selain itu, metabolit sekunder dalam ekstrak daun kelapa sawit dapat digunakan sebagai agent pengkhelat dan penstabil ukuran partikel koloid emas. Spektrum UV-Vis memperlihatkan koloid emas memiliki nilai SPR pada Panjang gelombang sekitar 500–600 nm. Dari data XRD, koloid emas memiliki rata-rata ukuran kristalit sebesar 22,8 nm. Rata-rata distribusi ukuran partikel koloid emas sebesar 27,5 nm pada penambahan ekstrak daun kelapa sawit sebesar 1,6%. Muatan permukaan koloid emas memiliki nilai  $-20$  mV yang mengindikasikan kestabilan koloid yang lama mencapai 30 hari.



Terbentuknya koloid emas menggunakan ekstrak duan kelapa sawit diharapkan memberikan kontribusi nanoteknologi dimasa mendatang.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi. Direktorat Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat Melalui Skema Pendanaan Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun 2025 dengan No Kontrak Utama: 124/C3/DT.05.00/PL/2025 dan No Kontrak Turunan: 0904/LL3/AL.04/2025.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Huang, L. Tang, and L. Tan, "A green chemistry approach to the facile and scalable synthesis of antibacterial Fe-doped ZnO nanoparticles for industrial and commercial applications," *Mater Des*, vol. 260, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.115128.
- [2] G. Arroyo *et al.*, "Green synthesis of antioxidant and low-toxicity gold and silver nanoparticles using floral extracts," *OpenNano*, p. 100258, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.onano.2025.100258.
- [3] Md. R. Akanda, Md. F. Hasan, and Md. Al-amin, "Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using Brunfelsia americana Leaf Extract: Isotherm, Kinetics, Thermodynamic Insights and Reusability into Malachite Green Dye Removal from Aqueous Solutions," *S Afr J Chem Eng*, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.sajce.2025.10.001.
- [4] M. Zahra, H. Abrahamse, and B. P. George, "Green synthesis of gold nanoparticles from Dicoma anomala extract coated with liposome-encapsulated pheophorbide-a for enhanced photodynamic therapy against MDA-MB-231 triple negative breast cancer cells," *Biomedicine and Pharmacotherapy*, vol. 188, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.biopha.2025.118227.
- [5] A. Jakhmola, F. Moradi Kashkooli, K. Rod, M. Lodyga, J. (Jahan) Tavakkoli, and M. C. Kolios, "Green synthesis of cannabinoids loaded gold nanoparticles displaying enhanced anti-cancer properties," *Materials Today Sustainability*, vol. 31, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.mtsust.2025.101153.
- [6] M. Z. Lafta, R. R. Hameed Al-Samarrai, and M. Bouaziz, "Green synthesis of silver and gold nanoparticles using quercetin extracted from Arctium lappa by HPLC, Characterization and Estimation of antioxidant activity," *Results Chem*, vol. 13, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.rechem.2025.102028.
- [7] L. Venkateswaran *et al.*, "A facile synthesis of green gold nanoparticles from fruit waste peels and their bioactivity evaluation against HT-29 colon cancer cell lines," *Results Chem*, vol. 16, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.rechem.2025.102334.
- [8] M. Moradi, M. Rouhani, M. Hekmati, H. Veisi, and D. Esmaeli, "Green synthesis of gold nanoparticles supported over the Myrtus communis L extract modified magnetic iron oxide as a novel antibacterial agent," *Results Chem*, vol. 15, May 2025, doi: 10.1016/j.rechem.2025.102323.
- [9] M. A. Acquavia *et al.*, "Green synthesis of gold nanoparticles from pomegranate juice ascertained by a combined approach based on MALDI FT-ICR MS and LC-ESI-MS/MS," *Food Chem*, vol. 476, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.foodchem.2025.143427.

- [10] M. Ramli *et al.*, "Influence of various concentrations of chloroauric acid on the fabrication of gold nanoparticles: Green synthesis using *Elaeis guineensis* Jacq leaf extract and characterizations," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 17, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.rsufi.2024.100317.
- [11] A. Jakhmola *et al.*, "Polyvinyl alcohol assisted citrate based reduction of gold(III) ions: Theoretical design and experimental study on green synthesis of spherical and biocompatible gold nanoparticles," *Materials Today Sustainability*, vol. 28, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.mtsust.2024.101012.
- [12] B. Yaou Balarabe, "Green synthesis of gold-titania nanoparticles for sustainable ciprofloxacin removal and phytotoxicity evaluation on aquatic plant growth," *Hybrid Advances*, vol. 4, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.hybadv.2023.100107.
- [13] X. Yang, Y. Bao, X. Zhou, H. Zhu, and J. Gao, "Green chemistry-based synthesis of gold nanoparticles using *Nicotiana glauca* and their anticancer properties against cervical cancer," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 17, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.arabjc.2024.106029.
- [14] S. Akhtar, F. Zuhair, M. Nawaz, and F. A. Khan, "Green synthesis, characterization, morphological diversity, and colorectal cancer cytotoxicity of gold nanoparticles," *RSC Adv*, vol. 14, no. 49, pp. 36576–36592, Nov. 2024, doi: 10.1039/d4ra06340f.
- [15] A. G. Deshmukh, V. Mistry, A. Sharma, and P. N. Patel, "Green and sustainable bio-synthesis of gold nanoparticles using *Aspergillus* *Trinidadensis* VM ST01: Heterogeneous catalyst for nitro reduction in water," *Tetrahedron Green Chem*, vol. 2, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.tgchem.2023.100021.
- [16] Y. A. Alli *et al.*, "Hydrogen-assisted green synthesis of trimethyl chitosan gold nanoparticles," *Kuwait Journal of Science*, vol. 51, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.kjs.2023.12.002.
- [17] E. D. Mohamed Isa *et al.*, "Green synthesis of gold nanoparticles via *Artocarpus odoratissimus* peel extract for potential applications of optical filter and catalytic degradation," *J King Saud Univ Sci*, vol. 36, no. 6, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jksus.2024.103209.
- [18] S. J. Nadaf *et al.*, "Green synthesis of gold and silver nanoparticles: Updates on research, patents, and future prospects," Nov. 01, 2022, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.onano.2022.100076.
- [19] S. Rokkarukala *et al.*, "One-pot green synthesis of gold nanoparticles using *Sarcophyton crassocaule*, a marine soft coral: Assessing biological potentialities of antibacterial, antioxidant, anti-diabetic and catalytic degradation of toxic organic pollutants," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14668.
- [20] M. Sivakavinesan *et al.*, "Citrus limetta Risso peel mediated green synthesis of gold nanoparticles and its antioxidant and catalytic activity," *J King Saud Univ Sci*, vol. 34, no. 7, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2022.102235.
- [21] P. Shanmugam, "Green route synthesis of alpinia calcarata functionalized gold nanoparticles for nonlinear optical applications," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10409.