

# Analisis Respons Optis Nanokomposit: Pengaruh Faktor Geometris

Bintoro S. Nugroho\*, Yulyanto

Program Studi Fisika FMIPA Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak

\*Email : b.s.nugroho@physics.untan.ac.id

(Diterima 12 November 2019; Disetujui 31 Mei 2020; Dipublikasikan 16 September 2020)

## Abstrak

Pada penelitian ini, dilakukan studi teoritik respons optis sistem nanokomposit yang terdiri dari *semiconductor quantum dot* (SQD) dan *metal nanoparticle* (MNP) elips. SQD dimodelkan secara kuantum sebagai *three-level system* bertipe V sedangkan MNP dimodelkan dalam kerangka teori elektromagnetika klasik. Fokus studi diarahkan pada investigasi pengaruh faktor geometris, yaitu aspek rasio MNP, terhadap modifikasi respons optis nanokomposit. Formalisme *density matrix* dengan aplikasi persamaan Liouville–von Neumann digunakan untuk menganalisis dinamika optis sistem. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi aspek rasio MNP dapat menyebabkan modifikasi pada dinamika populasi SQD. Nanokomposit dengan aspek rasio MNP bernilai  $q = 0,5$  memiliki frekuensi osilasi populasi yang lebih tinggi dibandingkan nanokomposit dengan  $q = 1,5$ . Ditemukan pula bahwa nanokomposit dengan  $q = 0,5$  mencapai keadaan tunaknya pada interval waktu yang lebih lama dibandingkan  $q = 1,5$ . *Optical instability* dapat muncul saat nanokomposit dengan  $q = 1,5$  dieksitasi dengan medan berintensitas tinggi,  $I = 10^{4.7} \text{ W/cm}^2$ . Saat fenomena ini terjadi, populasi SQD mengalami osilasi secara lestari dan sistem tidak pernah mencapai keadaan tunaknya.

Kata kunci: metal nanoparticle, nanokomposit, optical instability, respons optis, quantum dot

## 1. Latar Belakang

Diantara sejumlah struktur dasar material nano, *semiconductor quantum dot* (SQD) adalah salah satu yang paling intensif dipelajari [1]. Telah dilaporkan bahwa selain menunjukkan respons optik yang unik akibat *confinement effect* [2], SQD juga memiliki sifat nonlinearitas optik yang tinggi [3]. Struktur dasar material nano lain yang juga menarik perhatian besar adalah *metal nanoparticle* (MNP) [4,5]. Struktur ini memiliki keistimewaan terutama pada tingginya tampang lintang optik yang dimilikinya [6] yang memungkinkan rekayasa cahaya pada skala nanometer. Karakteristik penting lain dari MNP berhubungan dengan medan elektromagnetik induktif kuat (*plasmon field*) yang muncul di sekitarnya saat nanopartikel ini beresonansi dengan cahaya [7].

Kemajuan metode fabrikasi dan sintesis material telah membuka kemungkinan kombinasi berbagai struktur dasar nanomaterial, seperti SQD, molekul, dan MNP, menjadi sistem nanokomposit [8,9]. Saat SQD digabungkan dengan MNP, medan induktif kuat yang muncul di sekitar MNP akan mengamplifikasi medan elektromagnetik yang dirasakan oleh SQD [10]. Hal ini dapat meningkatkan respon nonlinearitas sistem [11] dan memodifikasi respons optik material secara

drastis [12]. Beberapa penelitian telah melaporkan bahwa SQD yang dihibridisasi dengan MNP menunjukkan berbagai sifat optis yang tidak ditemui pada sistem tunggalnya, seperti *optical instability* [13], *optical bistability* [14], osilasi Rabi termodifikasi [15,16], *gain without inversion* [17], hingga transparansi terinduksi elektromagnetik dengan mediasi plasmon [18].

Studi nanokomposit SQD-MNP pada umumnya memodelkan SQD sebagai *two-level system* [15,16,19]. Meskipun model tersebut telah cukup baik menggambarkan modifikasi respons optis yang muncul akibat hibridisasi, namun beberapa fenomena yang berkaitan dengan tingkat keadaan elektronik yang lebih kompleks tidak dapat diamati. Untuk melengkapi hal tersebut, penelitian ini menganalisis respons optis nanokomposit dengan SQD yang dimodelkan sebagai *three-level system* bertipe V. Berbeda dari studi lain dengan sistem serupa [20,21], penelitian ini meninjau MNP berbentuk elips dengan beberapa variasi faktor geometris (aspek rasio). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa aspek rasio MNP sangat berpengaruh pada respons optis nanokomposit. Saat nilai aspek rasio berubah, terjadi perubahan dinamika sistem dan perubahan karakteristik kebergantungan terhadap intensitas medan datang. Hasil ini menunjukkan bahwa sifat optis

nanokomposit dapat direkayasa melalui variasi faktor geometris sistem.

**2. Metode: Model dan Formalisme**

Nanokomposit yang ditinjau ditunjukkan pada Gambar 1(a). Sistem ini terdiri dari SQD dengan konstanta dielektrik  $\epsilon_s$  dan MNP elips yang memiliki sumbu semimayor  $a$  dan semiminor  $b$  dengan fungsi dielektrik  $\epsilon_m(\omega)$ . Kedua nanopartikel terpisah pada jarak  $d$  dan terletak dalam medium dengan konstanta dielektrik  $\epsilon_b$ . Sistem dieksitasi dengan laser yang dimodelkan sebagai medan klasik osilatif berbentuk  $\mathcal{E} = E_0 \cos \omega t (\hat{x} + \hat{y})$  dan intensitas  $\epsilon_0 c |E_0|^2 / 2$ , dengan  $E_0$  adalah amplitudo,  $\omega$  adalah frekuensi angular medan,  $c$  adalah kecepatan cahaya, dan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas vakum.

Eksitasi pada SQD adalah *exciton* yang keadaan elektroniknya dimodelkan sebagai *three-level system* bertipe V [Gambar 1.(b)]. Dengan model tersebut, keadaan elektronik *exciton* terdiri dari satu keadaan dasar  $|1\rangle$  dan dua keadaan tereksitasi,  $|2\rangle$  dan  $|3\rangle$ . Energi masing-masing keadaan adalah  $0, \hbar\omega_1, \hbar\omega_2$ , berturut-turut. Transisi yang diizinkan melalui eksitasi medan eksternal adalah  $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$  dan  $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$  dengan momen dipol transisi  $\mu_{21} = \mu_{12} = \mu_{21}\hat{x}$  dan  $\mu_{31} = \mu_{13} = \mu_{13}\hat{y}$ . Keadaan  $|3\rangle$  dan  $|2\rangle$  dapat berelaksasi secara radiatif ke keadaan  $|1\rangle$  dengan laju  $\gamma_{31}$  dan  $\gamma_{21}$ .

Eksitasi pada MNP elips adalah *localized surface plasmon (LSP)*, osilasi kolektif elektron bebas pada logam. Secara klasik, karakteristik optis LSP dideskripsikan oleh polarisabilitas MNP,  $\alpha(\omega)$ , berbentuk [22]

$$\alpha(\omega) = 4\pi ab^2 \frac{\epsilon_m - \epsilon_b}{3\epsilon_b + 3\kappa(\epsilon_m - \epsilon_b)}. \quad (1)$$

Pada persamaan ini,  $\kappa$  merupakan faktor depolarisasi yang menggambarkan pengaruh geometris MNP [23]

$$\kappa = \frac{1 - e^2}{e^2} \left[ \frac{1}{2e} \ln \left( \frac{1+e}{1-e} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

dengan  $e = \sqrt{1 - 1/q^2}$  dan  $q = a/b$ . Parameter terakhir mendefinisikan aspek rasio MNP elips.

Dinamika optis akibat interaksi medan dan nanokomposit digambarkan dengan persamaan Liouville-von Neumann yang dalam pendekatan *rotating wave approximation (RWA)* dapat dituliskan sebagai

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [\mathcal{H}^{RWA}, \rho] + \mathcal{L}(\rho). \quad (3)$$

Hamiltonian sistem dinyatakan oleh

$$\mathcal{H}^{RWA} = \hbar(\Delta_{21}|2\rangle\langle 2| + \Delta_{31}|3\rangle\langle 3| - \hbar(\Omega_{21}^{SQD} \sigma_{12} + \Omega_{31}^{SQD} \sigma_{13}) + H.c. \quad (4)$$

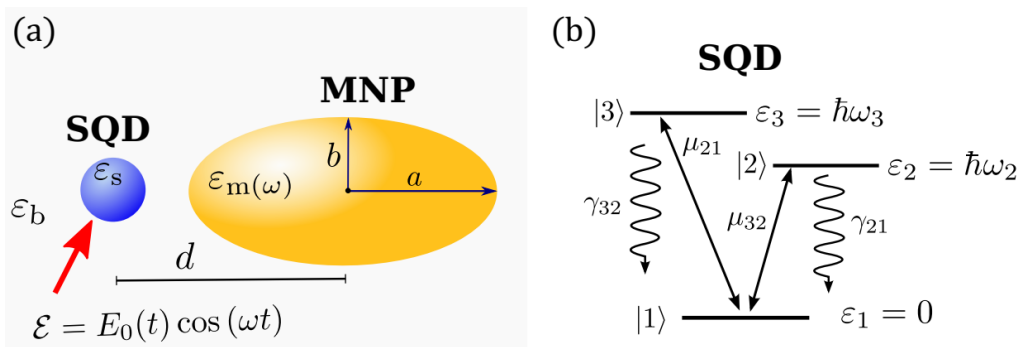
Proses relaksasi yang terjadi pada sistem dirumuskan oleh operator Lindblad berbentuk

$$\mathcal{L}(\rho) = -\frac{\gamma_{21}}{2} (\sigma_{21}\sigma_{12}\rho - 2\sigma_{12}\rho\sigma_{21} + \rho\sigma_{21}\sigma_{12}) - \frac{\gamma_{31}}{2} (\sigma_{31}\sigma_{13}\rho - 2\sigma_{13}\rho\sigma_{31} + \rho\sigma_{31}\sigma_{13}) \quad (5)$$

dengan  $\sigma_{ij} = |i\rangle\langle j|$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ),  $\Delta_{21} = \omega_2 - \omega_1 - \omega$  dan  $\Delta_{31} = \omega_3 - \omega_1 - \omega$  adalah *detuning* resonansi *exciton* terhadap medan eksitasi, dan  $\Omega_{n1}^{SQD} = \mu_{n1} E_{n1}^{SQD} / (2\hbar)$  ( $n = 2, 3$ ) adalah frekuensi osilasi Rabi untuk medan total  $E_{n1}^{SQD}$ . Menggunakan aproksimasi *point dipole*, medan total yang dirasakan SQD dapat dituliskan

$$E_{n1}^{SQD} = \frac{1}{\epsilon'_s} \left[ 1 + \frac{S_{n1}\alpha(\omega)}{4\pi d^3} \right] E_0 + \frac{(S_{n1})^2 \alpha(\omega)}{16\pi^2 \epsilon_0 \epsilon_b \epsilon_s d^6} P_{n1}^{SQD}, \quad (6)$$

dengan  $\epsilon'_s = (\epsilon_s + 2\epsilon_b) / (3\epsilon_b)$  adalah konstanta dielektrik efektif dari SQD,  $S_{n1} = -1(2)$  untuk medan sejajar (tegak lurus) momen dipol transisi,



**Gambar 1.** (a) Skematik sistem nanokomposit SQD-MNP (b) tingkat keadaan elektronik SQD

dan  $P_{n1}^{SQD} = \mu_{n1}(\rho_{n1} + \rho_{1n})$  adalah amplitudo momen dipole SQD yang dihitung dari komponen *off-diagonal* elemen *density matrix*,  $\rho_{ij}$  ( $i \neq j$ ).

### 3. Elemen *Density Matrix* dan Parameter Kopling

Menggunakan persamaan (3)-(5), elemen *density matrix* dihitung dengan  $\dot{\rho}_{nm} \langle n | \rho | m \rangle$ , hingga diperoleh

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{11} = & -i[\tilde{\Omega}_{21}^0 \rho_{12} + \tilde{\Omega}_{31}^0 \rho_{13} + G_{21}(\rho_{12}\rho_{12} \\ & + \rho_{21}\rho_{12}) + G_{31}(\rho_{13}\rho_{13} + \rho_{31}\rho_{13}) \\ & - \tilde{\Omega}_{21}^{0*} \rho_{21} - \tilde{\Omega}_{31}^{0*} \rho_{31} - G_{21}^*(\rho_{21}\rho_{21} \\ & + \rho_{12}\rho_{21}) - G_{31}^*(\rho_{31}\rho_{31} + \rho_{13}\rho_{31})] \\ & + \rho_{22}\gamma_{21} + \gamma_{31}\rho_{33}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{22} = & -i[\tilde{\Omega}_{21}^0 \rho_{21} + G_{21}^*(\rho_{21}\rho_{12} + \rho_{21}\rho_{21}) \\ & - \tilde{\Omega}_{21}^0 \rho_{12} - G_{21}(\rho_{12}\rho_{21} + \rho_{12}\rho_{12})] \\ & - \gamma_{21}\rho_{22}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{33} = & -i[\tilde{\Omega}_{31}^0 \rho_{31} + G_{31}^*(\rho_{31}\rho_{13} + \rho_{31}\rho_{31}) \\ & - \tilde{\Omega}_{31}^0 \rho_{13} - G_{31}(\rho_{13}\rho_{31} + \rho_{13}\rho_{13})], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{12} = & i[\tilde{\Omega}_{21}^{0*} Z_{21} + \rho_{12}(\Delta_{21} + G_{21}^R Z_{21}) \\ & + G_{21}^R Z_{21} \rho_{21} - iG_{21}^I Z_{21} \rho_{21} + \tilde{\Omega}_{31}^{0*} \rho_{32} \\ & + G_{31}^R \rho_{31}(\rho_{13} + \rho_{31}) - iG_{31}^I \rho_{31} \\ & (\rho_{13} + \rho_{31})] - \frac{\rho_{12}}{2}(\gamma_{21} - 2G_{21}^I Z_{21}), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{13} = & [\tilde{\Omega}_{31}^{0*} Z_{31} + \rho_{13}(\Delta_{31} + G_{31}^R Z_{31}) \\ & + G_{31}^R Z_{31} \rho_{31} - iG_{31}^I Z_{31} \rho_{31} \\ & + \tilde{\Omega}_{21}^{0*} \rho_{23} + G_{21}^R \rho_{23}(\rho_{12} + \rho_{21}) \\ & - iG_{21}^I \rho_{23}(\rho_{12} + \rho_{21})] \\ & - \frac{\rho_{13}}{2}(\gamma_{31} - 2G_{31}^I Z_{31}), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{23} = & -i[\rho_{23}(\Delta_{21} - \Delta_{31}) + G_{31}^*(\rho_{13}\rho_{21} \\ & + \rho_{31}\rho_{21}) - G_{21}(\rho_{21}\rho_{13} + \rho_{12}\rho_{13}) \\ & + \tilde{\Omega}_{31}^{0*} \rho_{21} - \tilde{\Omega}_{21}^0 \rho_{13}] \\ & - \frac{1}{2}(\gamma_{21}\rho_{23} + \gamma_{31}\rho_{23}), \end{aligned} \quad (12)$$

Pada persamaan ini,  $Z_{n1} = \rho_{nn} - \rho_{11}$  adalah selisih populasi antara keadaan  $|n\rangle$  dan keadaan dasar  $|1\rangle$ ,  $G_{n1}^I$  dan  $G_{n1}^R$  adalah bagian riil dan imajiner dari parameter bernilai kompleks  $G_{n1}$ , sedangkan  $\tilde{\Omega}_{n1}^0$  menotasikan frekuensi Rabi ternormalisasi. Ekspresi matematis kedua besaran tersebut dapat dituliskan

$$G_{n1} = \frac{\mu_{n1}^2 (S^{n1})^2 \alpha(\omega)}{32\hbar\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_b \varepsilon_s' d^6}, \quad (13)$$

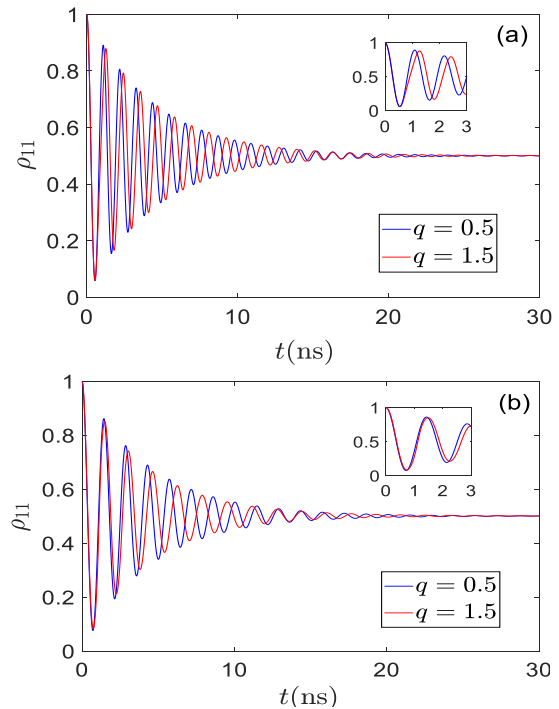
dan

$$\tilde{\Omega}_{n1}^0 = \frac{1}{\varepsilon_s'} \left[ 1 + \frac{S^{n1} \alpha(\omega)}{4\pi d^3} \right] \frac{\mu_{n1} E_0}{2\hbar}. \quad (14)$$

Parameter yang dituliskan pada persamaan (13) merupakan parameter kopling yang menggambarkan seberapa kuat SQD berinteraksi dengan MNP. Parameter ini merupakan besaran penting dan menentukan bagi respons optis nanokomposit. Sebagaimana yang dapat dilihat pada persamaan (7)-(12), besaran ini memperkenalkan suku-suku nonlinear tambahan pada SQD hibrid dibandingkan sistem tunggalnya ( $G_{n1} = 0$ ). Hal ini akan mempengaruhi respons optis nanokomposit SQD-MNP secara signifikan.

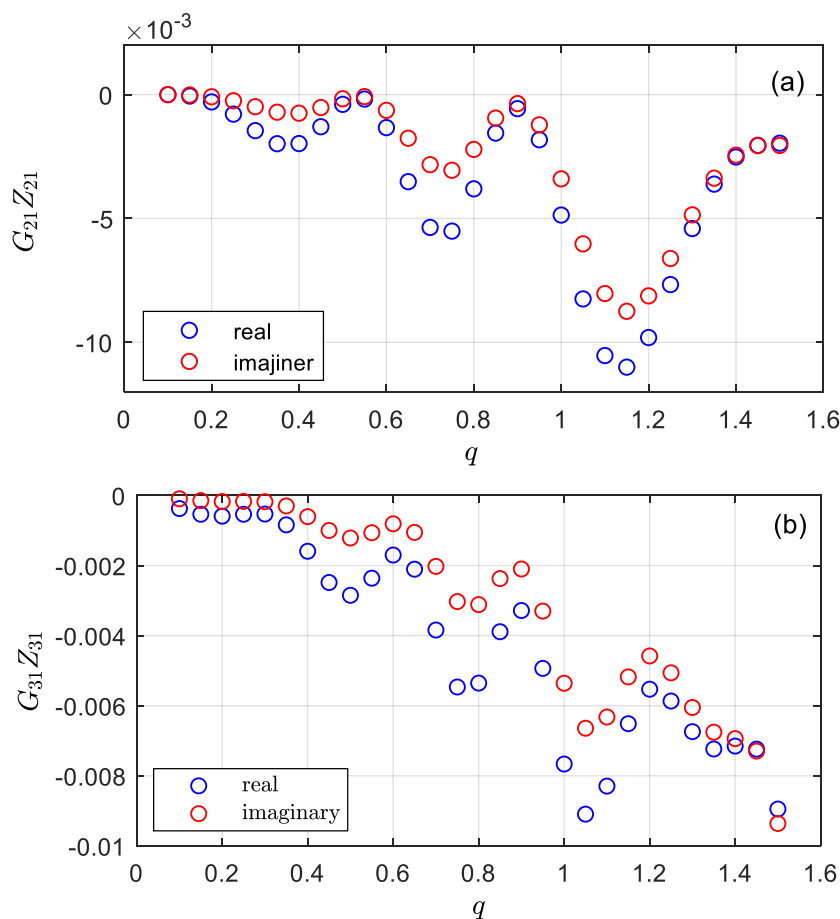
### 4. Hasil Numerik dan Pembahasan

Pada bagian ini, respons optis nanokomposit SQD-MNP dianalisis dengan menyelesaikan secara numerik persamaan (7)-(12) menggunakan metode Runge-Kutta (4,5) eksplisit. Parameter yang digunakan dalam perhitungan ditinjau untuk SQD berbahan GaAs ( $\varepsilon_s = 6$ ) [24] berukuran sekitar 3 nm dengan energi transisi *exciton* sebesar  $\hbar\omega_2 = 2,37\text{eV} - 35\mu\text{eV}$  dan  $\hbar\omega_3 = 2,37\text{eV} - 35\mu\text{eV}$ . Momen dipol transisi SQD saling tegak lurus



**Gambar 2.** Dinamika populasi keadaan dasar,  $\rho_{11}$ , untuk (a)  $\omega = \omega_2$  (b)  $\omega = \omega_3$ .

dengan nilai masing-masing  $\mu_{21} = 22$  D dan  $\mu_{31} = 17$  D. Laju peluruhan dari keadaan  $|2\rangle$  dan  $|3\rangle$  ke



**Gambar 3.** (a)  $G_{21}Z_{21}$  Vs  $q$  untuk  $\omega = \omega_2$  (b)  $G_{31}Z_{31}$  Vs  $q$  untuk  $\omega = \omega_3$ . Perhitungan dilakukan untuk intensitas medan  $I = 25 \text{ W/cm}^2$

keadaan  $|1\rangle$  diasumsikan memiliki besar yang sama,  $\gamma_{21} = \gamma_{31} = 0.3 \text{ ns}^{-1}$ . MNP berbahan emas (Au), dengan fungsi dielektrik yang dihitung dengan *fitting* Drude [22], diletakkan pada jarak  $d = 13 \text{ nm}$  dari SQD. Sistem nanokomposit berada pada medium berbahan silika,  $\epsilon_b = 2,16$ . Sistem dieksitasi dengan medan yang polarisasinya sejajar orientasi momen dipol transisi sehingga  $S^{n1} = -1$ .

Pengaruh faktor geometris pada sifat optis nanokomposit ditinjau dengan melihat respons sistem terhadap variasi nilai aspek rasio MNP. Mula-mula, dilakukan analisis pada dinamika populasi keadaan dasar  $\rho_{11}$  sebagai fungsi waktu saat sistem dieksitasi oleh medan eksternal untuk dua kondisi resonansi,  $\omega = \omega_2$  dan  $\omega = \omega_3$  (Gambar 2).

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa, terlepas dari faktor geometrisnya, osilasi  $\rho_{11}$  untuk kondisi resonansi  $\omega = \omega_2$  memiliki frekuensi yang lebih besar dari kondisi resonansi  $\omega = \omega_3$ . Hal ini dapat dipahami karena osilasi  $\rho_{11}$  berkaitan dengan siklus Rabi (Rabi *cycle/flopping*) yang besar frekuensinya

sebanding dengan dipole momen transisi  $\Omega \propto \mu_{n1}$  dan pada sistem ini  $\mu_{21} > \mu_{23}$ .

Pengaruh faktor geometris tampak jelas pada dinamika  $\rho_{11}$ . Pada dua kondisi resonansi ( $\omega = \omega_2$  dan  $\omega = \omega_3$ ), frekuensi osilasi  $\rho_{11}$  untuk aspek rasio  $q = 0,5$  terlihat lebih besar dibandingkan  $q = 1,5$  [untuk lebih jelasnya, perhatikan *inset* pada Gambar 2(a) dan (b)]. Selain itu, dapat dilihat pula bahwa osilasi  $\rho_{11}$  mencapai *steady state* dengan lebih cepat saat  $q = 1,5$  dibandingkan ketika  $q = 0,5$ .

Keunikan respons optis nanokomposit yang diamati pada Gambar 2 dapat dijelaskan dengan meninjau kembali persamaan (10) dan (11). Suku kedua pada dua persamaan tersebut mengindikasikan bahwa hibridisasi menyebabkan terjadinya dua hal: (i) renormalisasi frekuensi transisi *exciton*,  $\omega_n \rightarrow \omega_n + G_{n1}^R Z_{n1}$ , dan (ii) renormalisasi laju relaksasi,  $\gamma_{n1} \rightarrow \gamma_{n1} - 2G_{n1}^I Z_{n1}$ . Renormalisasi pada frekuensi transisi akan menyebabkan medan eksitasi tidak lagi tepat beresonansi dengan energi transisi *exciton*. Hal ini akan menyebabkan meningkatnya frekuensi osilasi

$\rho_{11}$  disertai dengan pengurangan amplitude osilasi [15]. Selain itu, renormalisasi pada laju relaksasi akan menyebabkan berubahnya nilai *damping* pada sistem yang mengakibatkan perubahan waktu osilasi  $\rho_{11}$  menuju keadaan tunaknya.

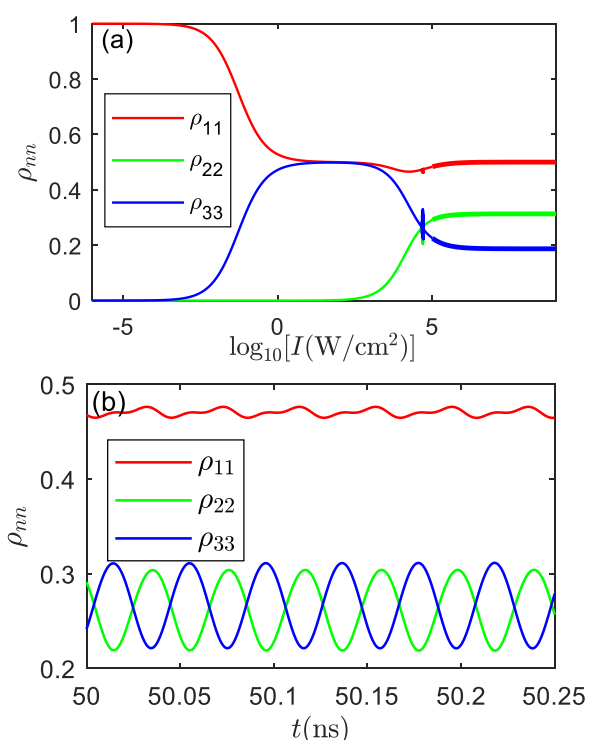
Untuk melihat bagaimana pengaruh aspek rasio terhadap renormalisasi frekuensi dan laju relaksasi, pada Gambar 3 ditampilkan nilai  $G_{21}Z_{21}$  sebagai fungsi  $q$  pada keadaan resonansi  $\omega = \omega_2$  dan nilai  $G_{31}Z_{31}$  sebagai fungsi  $q$  pada keadaan resonansi  $\omega = \omega_3$ . Pada Gambar 3(a) dan 3(b), terlihat bahwa untuk  $q = 0,5$ ,  $G_{n1}^R Z_{n1}$  ( $n = 2,3$ ) bernilai lebih besar dibandingkan untuk  $q = 1,5$ . Hal ini menyebabkan frekuensi ternormalisasi menjadi lebih besar pada nanokomposit dengan  $q = 0,5$  dibandingkan  $q = 1,5$ . Sebagai konsekuensinya, frekuensi osilasi  $\rho_{11}$  untuk  $q = 0,5$  menjadi lebih tinggi. Kecendrungan serupa juga terlihat untuk nilai  $G_{n1}^I Z_{n1}$ . Sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 3(a) dan 3(b), untuk  $q = 0,5$ ,  $G_{n1}^I Z_{n1}$  ( $n = 2,3$ ) juga bernilai lebih besar dibandingkan untuk  $q = 1,5$ . Hal ini menyebabkan laju relaksasi ternormalisasi menjadi lebih kecil (ingat kembali tanda minus pada renormalisasi relaksasi) pada nanokomposit dengan  $q = 0,5$  dibandingkan  $q = 1,5$ . Hal ini menjelaskan mengapa  $\rho_{11}$  lebih cepat mencapai keadaan

tunaknya untuk nanokomposit dengan  $q = 0,5$  dibandingkan nanokomposit dengan  $q = 1,5$ .

Selanjutnya, ditinjau pengaruh aspek rasio pada kebergantungan respons optik nanokomposit terhadap intensitas medan datang (*intensity-dependent response*). Pada Gambar 4(a) ditunjukkan kebergantungan populasi  $\rho_{nn}$  terhadap intensitas medan eksitasi untuk kondisi resonansi  $\omega = \omega_3$  dan aspek rasio  $q = 1,5$ . Pada rentang intensitas kecil, energi medan datang tidak cukup tinggi untuk mengeksitasi SQD secara signifikan sehingga sistem masih berada di keadaan dasarnya  $\rho_{11} \approx 1$  dan  $\rho_{22} \approx \rho_{33} \approx 0$ . Saat intensitas medan datang ditingkatkan ( $\log_{10} I \approx -3$ ), transisi dari keadaan  $|1\rangle$  ke keadaan  $|3\rangle$  mulai terjadi yang ditandai dengan penurunan nilai  $\rho_{11}$  seiring dengan peningkatan  $\rho_{33}$ . Pada rentang intensitas ini, populasi di keadaan  $|2\rangle$  masih minimal karena resonansi medan eksternal  $\omega = \omega_3$  hanya efektif mengeksitasi transisi  $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ . Ketika intensitas medan datang ditingkatkan lebih tinggi lagi ( $\log_{10} I \approx 3$ ), transisi ke keadaan  $|2\rangle$  mulai terjadi. Hal ini terlihat dari peningkatan nilai  $\rho_{22}$  diikuti dengan penurunan nilai  $\rho_{11}$  dan  $\rho_{33}$  yang menunjukkan bahwa terjadi transisi  $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ , sehingga transisi  $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$  tidak lagi mendominasi. Terjadi hal menarik saat intensitas medan datang ditingkatkan hingga  $I = 10^{4.7} \text{ W/cm}^2$ , sebelum sistem mengalami saturasi. Pada intensitas tersebut,  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{22}$  dan  $\rho_{33}$  berosilasi secara lestari, sistem tidak pernah mencapai keadaan tunaknya [Gambar 4(b)]. Kondisi ini menunjukkan instabilitas optis yang telah dilaporkan diamati pada SQD yang dimodelkan sebagai *ladder like three-level system* [13]. *Optical instability* ini muncul sebagai akibat dari kompetisi eksitasi ke keadaan  $|2\rangle$  dan  $|3\rangle$  dan nonlinearitas yang muncul dari eksitasi plasmon pada MNP [13]. Nanokomposit dengan aspek rasio  $q = 0,5$  menunjukkan karakter kebergantungan populasi  $\rho_{nn}$  terhadap intensitas medan yang serupa, namun tanpa kehadiran *optical instability* (gambar tidak ditampilkan).

## 5. Kesimpulan

Pada penelitian ini, dilakukan analisis terhadap pengaruh faktor geometris pada repon optis nanokomposit. Sistem ini terdiri dari SQD yang dimodelkan sebagai *three-level* bertipe V dan MNP elips. Efek geometris pada sistem ditinjau dari parameter aspek rasio MNP. Formalisme *density matrix* digunakan untuk menganalisis dinamika optis nanokomposit. Hasil yang diperoleh



**Gambar 4.** (a) Dependensi populasi terhadap intensitas untuk  $\omega = \omega_{31}$  dan  $q = 1,5$  (b) dinamika populasi saat terjadi *optical instability*.

menunjukkan bahwa aspek rasio MNP sangat berpengaruh pada dinamika sistem maupun karakteristik kebergantungan sistem terhadap intensitas medan datang. Hasil ini menunjukkan bahwa respons optis nanokomposit dapat direkayasa dengan modifikasi faktor geometris nanokomposit.

### Daftar Pustaka

- [1] Chow, W. W. and Jahnke, F., On the physics of semiconductor quantum dots for applications in lasers and quantum optics, *Progress in Quantum Electronics*, 37(3), pp.109–184, 2013.
- [2] Barbagioanni, E. G., Lockwood, D. J., Simpson, P. J., and Goncharova, L. V., Quantum confinement in Si and Ge nanostructures, *Journal of Applied Physics*, 111(3), 2012.
- [3] Kumbhakar, P., Chattopadhyay, M., and Mitra, A. K., Nonlinear optical properties of doped ZnS quantum dots, *International Journal of Nanoscience*, 10(1–2), pp.177–180, 2011.
- [4] Compaijen, P. J., Malyshev, V. a., and Knoester, J., Surface-mediated light transmission in metal nanoparticle chains, *Physical Review B*, 87(20), pp.205437, 2013.
- [5] Moon, H. R., Lim, D. W., and Suh, M. P., Fabrication of metal nanoparticles in metal-organic frameworks, *Chemical Society Reviews*, 42(4), pp.1807–1824, 2013.
- [6] Temple, T. L. and Bagnall, D. M., Broadband scattering of the solar spectrum by spherical metal nanoparticles, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(4), pp.600–611, 2013.
- [7] Yeshchenko, O. A., Bondarchuk, I. S., Gurin, V. S., Dmitruk, I. M., and Kotko, A. V., Temperature dependence of the surface plasmon resonance in gold nanoparticles, *Surface Science*, 608, pp.275–281, 2013.
- [8] Chen, H., Ming, T., Zhao, L., Wang, F., Sun, L.-D., Wang, J., and Yan, C.-H., Plasmon–molecule interactions, *Nano Today*, 5(5), pp.494–505, 2010.
- [9] Xu, J., Chen, L., Choi, H., Konish, H., and Li, X., Assembly of metals and nanoparticles into novel nanocomposite superstructures., *Scientific reports*, 3pp.1730, 2013.
- [10] Ding, S. J., Nan, F., Liu, X. N., Liu, X. L., Zhang, Y. F., Liang, S., Yao, D. Z., Zhang, X. H., and Wang, Q. Q., Largely enhanced optical nonlinear response of heavily doped Ag:CdTe nanocrystals around the excitonic band edge, *Journal of Physical Chemistry C*, 119(44), pp.24958–24964, 2015.
- [11] Fu, M., Wang, K., Long, H., Yang, G., Lu, P., Hetsch, F., Susha, A. S., and Rogach, A. L., Resonantly enhanced optical nonlinearity in hybrid semiconductor quantum dot – metal nanoparticle structures, *Appl. Phys. Lett.*, 100(6), pp.063117, 2012.
- [12] Zhang, W., Govorov, A. O., and Bryant, G. W., Semiconductor-Metal Nanoparticle Molecules: Hybrid Excitons and the Nonlinear Fano Effect, *Phys. Rev. Lett.*, 97(14), pp.146804, 2006.
- [13] Nugroho, B. S., Iskandar, A. A., Malyshev, V. A., and Knoester, J., Instabilities in the optical response of a semiconductor quantum dot - metal nanoparticle heterodimer: Self-oscillations and chaos, *Journal of Optics (United Kingdom)*, 19(1), pp. 015004, 2017.
- [14] Nugroho, B. S., Iskandar, A. A., Malyshev, V. A., and Knoester, J., Bistable optical response of a nanoparticle heterodimer: Mechanism, phase diagram, and switching time, *J. Chem. Phys.*, 139(1), pp.014303, 2013.
- [15] Nugroho, B. S. and Arman, Y., Modifikasi Osilasi Rabi Pada Nanoparticle Heterodimer: Pengaruh Jarak antar Partikel dan Intensitas Medan Iluminasi, *Positron*, 8(2), pp.7, 2018.
- [16] Sadeghi, S. M., The inhibition of optical excitations and enhancement of Rabi flopping in hybrid quantum dot-metallic nanoparticle systems., *Nanotechnology*, 20(22), pp.225401, 2009.
- [17] Sadeghi, S. M., Gain without inversion in hybrid quantum dot-metallic nanoparticle systems., *Nanotechnology*, 21(45), pp.455401, 2010.
- [18] Hatef, A., Sadeghi, S. M., and Singh, M. R., Plasmonic electromagnetically induced transparency in metallic nanoparticle--quantum dot hybrid systems, *Nanotechnology*, 23(6), pp.65701, 2012.
- [19] Nugroho, B. S., Iskandar, A. A., Malyshev, V. A., and Knoester, J., Bistable optical response of a nanoparticle heterodimer: Mechanism, phase diagram, and switching time, *Journal of Chemical Physics*, 139(1), pp. 014303, 2013.
- [20] Solookinejad, G., Jabbari, M., Nafar, M., Ahmadi, E., and Asadpour, S. H., Incoherent control of optical bistability and multistability in a hybrid system: Metallic nanoparticle-quantum dot nanostructure, *Journal of Applied Physics*, 124(6), pp.063102, 2018.
- [21] Ko, M.C., Kim, N.C., Choe, S. Il, So, G.H., Jang, P.R., Kim, Y.J., Kim, I.G., and Li, J.B. Plasmonic Effect on the Optical Properties in a Hybrid V-Type Three-Level Quantum Dot-Metallic Nanoparticle Nanosystem. *Plasmonics*, 13(1), pp.1–8,(2017).

- [22] Hatef, A., Sadeghi, S. M., and Singh, M. R., Coherent molecular resonances in quantum dot-metallic nanoparticle systems: coherent self-renormalization and structural effects., *Nanotechnology*, 23(20), pp.205203, 2012.
- [23] Link, S. and El-Sayed, M. A., Simulation of the Optical Absorption Spectra of Gold Nanorods as a Function of Their Aspect Ratio and the Effect of the Medium Dielectric Constant, *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(20), pp.10531–10532, 2005.
- [24] Muller, A., Wang, Q. Q., Bianucci, P., Shih, C. K., and Xue, Q. K. , Determination of anisotropic dipole moments in self-assembled quantum dots using Rabi oscillations, *Applied Physics Letters*, 84(6), pp.981–983, 2004.