

Pengaruh Massa Nanopartikel Magnetik Fe₃O₄/Ag yang Disintesis Menggunakan Metode Hijau terhadap *Specific Absorption Rate* dalam Aplikasi Hipertermia

The Role of Green-Synthesized Fe₃O₄/Ag Magnetic Nanoparticle Masses on the Specific Absorption Rate toward Magnetic Hyperthermia Applications

Dhel Prisca Daro Kowe¹, Mahardika Yoga Darmawan², Nurul Imani Istiqomah²,
Edi Suharyadi², Nur Aji Wibowo^{1,3*}

¹Departemen Fisika, Universitas Kristen Satya Wacana,
Jl. Diponegoro No.52-60, Salatiga, Jawa Tengah 50711, Indonesia

²Departemen Fisika, Universitas Gadjah Mada
Bulaksumur, Kab. Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281, Indonesia

³Departemen Fisika, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu, Jati Agung, Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia

*Corresponding author: nur.wibowo@uksw.edu

ABSTRAK

DOI:
[10.30595/jrst.v9i2.22884](https://doi.org/10.30595/jrst.v9i2.22884)

Histori Artikel:

Diajukan:
01/07/2024

Diterima:
18/05/2025

Diterbitkan:
08/09/2025

Dengan kemoterapi dan terapi radiasi sebagai pengobatan kanker yang paling umum saat ini, ada pertanyaan tentang efektivitas dan risikonya. Oleh karena itu, diperlukan metode pengganti yang tidak memiliki efek samping yang signifikan, seperti terapi hyperthermia magnetik (HM). Massa nanopartikel magnetik (NPM) dan pelapis NPM sebagai agen anti kanker memiliki peran yang sangat penting dalam optimalisasi metode HM yang dicirikan dengan nilai *Specific Absorption Rate* (SAR). Penelitian ini mengkaji pengaruh massa NPM besi oksida dengan pelapis perak (Fe₃O₄/Ag) terhadap nilai SAR. NPM Fe₃O₄/Ag disintesis menggunakan metode *green synthesis* (GS) dengan ekstrak tanaman *Moringa oleifera* (MO). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa GS-NPM Fe₃O₄/Ag memiliki ukuran kristal antara 42,69 - 43,58 nm dengan celah pita energi sebesar 2,50 eV, dan mengandung gugus fungsi O-H, C-H, N-Ag, Fe-O, dan Fe-O-Si. Terjadi perubahan suhu NPM Fe₃O₄/Ag pada semua variasi massa, berkisar dari 0°C hingga 14,2°C dalam rentang waktu 600 detik, dengan menggunakan frekuensi 15 kHz dan amplitudo medan magnet bolak-balik 150 Oe. Perubahan suhu ini menunjukkan bahwa semakin besar massa sampel NPM mengakibatkan peningkatan suhu NPM. Nilai SAR terendah dan tertinggi yang diperoleh, secara berturut-turut, adalah 0,43 W/g pada massa Fe₃O₄/Ag 0,125 gram dan 1,11 W/g pada massa 0,025 gram.

Kata Kunci: Fe₃O₄/Ag; Sintesis Hijau; Hipertermia; Nanopartikel; SAR

ABSTRACT

With chemotherapy and radiation therapy being the most common cancer treatments today, there are questions about their effectiveness and risks. Therefore, an alternative method that does not have significant side effects is needed, such as magnetic hyperthermia therapy (HM). The mass of magnetic nanoparticles (MNP) and the coating of MNP as anti-cancer agents play a very important role in optimizing the HM method, characterized by the Specific Absorption Rate (SAR) value. This study examines the effect of the mass of iron oxide magnetic nanoparticles with a silver coating (Fe₃O₄/Ag) on the Specific Absorption Rate (SAR) value. MNP Fe₃O₄/Ag was synthesized using the green synthesis (GS) method with Moringa oleifera (MO) plant extract. The results of this study show that GS-NPM Fe₃O₄/Ag has a crystal size between 42.69 - 43.58 nm with a bandgap energy of 2.50 eV, and contains functional groups O-H, C-H, N-Ag, Fe-O, and Fe-O-Si. There was a temperature change in the NPM Fe₃O₄/Ag for all mass variations, ranging from 0°C to 14.2°C over a period

of 600 seconds, using a frequency of 15 kHz and an alternating magnetic field amplitude of 150 Oe. This temperature change indicates that the greater the mass of the NPM sample, the higher the NPM temperature. The lowest and highest SAR values obtained, consecutively, were 0.43 W/g at a mass of Fe₃O₄/Ag 0.125 grams and 1.11 W/g at a mass of 0.025 grams.

Keywords: Fe₃O₄/Ag; Green Synthesis; Hyperthermia; Nanoparticle; SAR

1. PENDAHULUAN

Kanker adalah penyakit dimana sel-sel tumbuh secara tidak normal dan tidak terkendali dalam tubuh (Zafriah & Amalia, 2018). Saat ini, pengobatan kanker umumnya menggunakan kemoterapi dan radioterapi yang dapat menimbulkan keraguan terkait efektivitasnya. Hal ini mendorong pasien mempertimbangkan metode pengobatan tradisional (Shabrina & Iskandarsyah, 2019). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan metode alternatif dengan efek samping minimal, seperti terapi Hipertermia Magnetik (HM). Terapi HM adalah metode untuk menghancurkan sel kanker dengan menggunakan panas yang dihasilkan oleh nanopartikel magnetik (NPM) saat diinduksi oleh medan magnet bolak-balik. Proses selektif penghancuran sel kanker terjadi pada suhu 42-48°C selama 30-60 menit (Peiravi *et al.*, 2022; Giustini *et al.*, 2010). Pemanasan induksi magnetik adalah metode non-kontak dengan menggunakan medan magnet eksternal pada seluruh sampel yang ditempatkan di dalam kumparan solenoid untuk pemanasan. Medan magnet ini dihasilkan pada frekuensi di bawah 30 MHz agar kerugian dielektrik dapat diabaikan dibandingkan dengan kerugian resistif. Parameter penting dalam terapi HM ialah *Specific Absorption Rate* (SAR), yang mengkuantifikasi kemampuan partikel magnetik untuk menyerap energi panas. Besarnya nilai SAR dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, massa, dan sifat magnetik nanopartikel (Eseholi, 2011). Ketika nilai SAR tinggi, dosis injeksi yang dibutuhkan lebih rendah. Salah satu NPM yang umum digunakan dalam terapi HM adalah Fe₃O₄.

NPM Fe₃O₄ memiliki keunggulan, yaitu kemampuan pemblokiran suhu, stabilitas kimia (Cotar *et al.*, 2013), dan biokompatibilitas yang baik. NPM Fe₃O₄ memiliki luas permukaan besar yang diperlukan untuk imobilisasi molekul dan ukuran serta bentuknya dapat dengan mudah dikontrol menggunakan berbagai metode sintesis (Moodley *et al.*, 2018). Efek pemanasan nanopartikel dapat ditingkatkan dengan melapisi permukaannya menggunakan logam, seperti perak (Ag) (Dizaji *et al.*, 2016). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa nanopartikel

Ag memiliki peran sebagai agen anti kanker (Maranciuc *et al.*, 2022). Penelitian oleh Liu *et al.*, menemukan bahwa penggabungan NPM Fe₃O₄ dan Ag dapat meningkatkan kematian sel tumor melalui pemanasan magnetik dalam uji coba in vitro dan in vivo (Liu *et al.*, 2010). Dalam pembuatan NPM ini, metode yang digunakan harus ramah lingkungan dan biokompatibel, seperti metode green synthesis (GS) atau metode sintesis hijau (Routrey *et al.*, 2019).

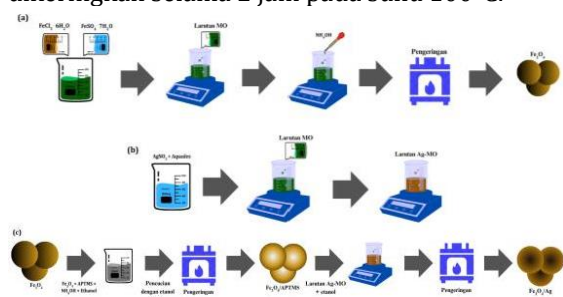
Metode GS dimanfaatkan untuk menghasilkan NPM menggunakan ekstrak tumbuhan dan mikroorganisme sebagai agen reduktor dan stabilisator. *Moringa oleifera* (MO) adalah salah satu tumbuhan yang dapat digunakan dalam sintesis NPM (Moodley *et al.*, 2018). MO mengandung senyawa metabolit seperti flavonoid, fenolik, amina, terpenoid, dan protein yang berperan sebagai stabilisator dan reduktor dalam pembuatan NPM Fe₃O₄ dan Ag (Chang *et al.*, 2019; Mateus *et al.*, 2018; Moodley *et al.*, 2018; Katata-Seru *et al.*, 2018). MO juga berpotensi sebagai agen pereduksi dalam produksi NPM untuk aplikasi klinis.

Saat ini penelitian dengan menggunakan NPM Fe₃O₄/Ag sangat menarik perhatian. Pada penelitian sebelumnya melaporkan tentang uji SAR dengan menggunakan material NPM Bismuth Ferrite/PEG yang massanya divariasikan sebesar 0 gram, 1 gram, 2 gram, 3 gram, 4 gram dan 5 gram. Diperoleh nilai SAR 32 mW/g dengan magnetisasi saturasi 150 Oe; 45,2 mW/g dengan magnetisasi saturasi 200 Oe; dan 83,3 mW/g dengan magnetisasi saturasi 250 Oe (Juwita, 2022). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa massa memiliki peran yang sangat signifikan dalam menciptakan nilai SAR yang optimal. Meskipun demikian, dalam penelitian yang dilakukan oleh Juwita, tidak ada penggunaan agen anti kanker sebagai pelapis NPM. Sementara itu, agen anti kanker memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung kinerja HM. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan digunakan Ag sebagai pelapis NPM. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh massa NPM Fe₃O₄/Ag yang disintesis menggunakan metode GS terhadap SAR dalam aplikasi hipertermia.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Sintesis Hijau Nanopartikel Magnetik Fe₃O₄/Ag

Gambar 1 menunjukkan proses GS-NPM Fe₃O₄/Ag. Larutan prekursor yang mengandung 4,054 gram FeCl₃·6H₂O dan 2,081 gram FeSO₄·7H₂O dilarutkan dalam 7,5 mL akuades dan diaduk pada 600 rpm selama 15 menit. Kemudian, 10 mL larutan MO ditambahkan ke dalam larutan Fe dan diaduk selama 30 menit pada suhu 60°C. Larutan NH₄OH (10%) ditambahkan setetes demi setetes sambil mempertahankan suhu campuran pada 60°C. Endapan dicuci dan dituang untuk memperoleh padatan, yang kemudian dikeringkan selama 2 jam pada suhu 100°C.



Gambar 1. Skema proses GS-NPM menggunakan ekstrak MO (a) Fe₃O₄, (b) Ag-MO, dan (c) Fe₃O₄/Ag

Serbuk kering Fe₃O₄ dicampur dengan 12 mL APTMS dalam 12 mL larutan NH₄OH menggunakan sonikasi untuk modifikasi permukaan. Endapan dicuci dan dituang untuk memperoleh padatan yang kemudian dikeringkan selama 2 jam pada suhu 70°C. Serbuk kering AgNO₃ sebanyak 0,272 gram dilarutkan dalam 70 mL akuades dan diaduk pada 450 rpm selama 60 menit. Kemudian 10 mL larutan MO ditambahkan ke dalam larutan AgNO₃ dan diaduk selama 30 menit pada suhu 60°C. Lalu, dilakukan pengadukan kembali selama 30 menit pada suhu ruang. NPM Fe₃O₄ termodifikasi APTMS dilarutkan dalam larutan Ag-MO dan 100 mL etanol, lalu diaduk selama 4 jam pada 600 rpm dan di suhu ruang. Setelah itu, larutan tersebut dicuci sebanyak 2 kali dan dituang. Kemudian, endapan diperoleh dan dikeringkan selama 2 jam pada suhu 60°C. NPM Fe₃O₄/Ag diproduksi sebagai agen hipertermia untuk analisis lebih lanjut SAR.

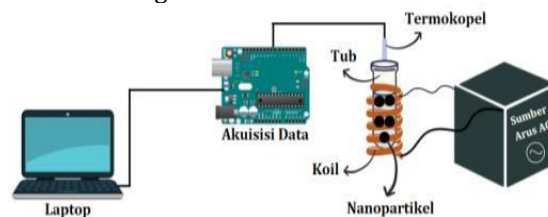
2.2 Karakterisasi Fe₃O₄/Ag

Karakterisasi *X-ray Diffraction* (XRD) dengan alat XRD Shimadzu digunakan untuk mengetahui struktur kristal, ukuran kristalit dan

parameter kisi dari sampel. Hasil karakterisasi ini adalah puncak-puncak hasil difraksi yang mengacu pada standar JCPDS No.00- 900-2647. *Fourier Transform Infrared* (FTIR) digunakan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada sampel. Karakterisasi ini menggunakan *Fourier Transform Infra-red Spectrophotometer* Shimadzu Prestige-21. *Ultraviolet and Visible Light Spectroscopy* (UV- VIS) digunakan untuk mengetahui spektrum absorpsi dan celah energi (*Energy Gap*). Karakterisasi ini menggunakan UV-VIS Shimadzu UV 1900.

2.3 Pengukuran Specific Absorption Rate

Gambar 2 menunjukkan sistem induksi magnetik yang digunakan untuk memanaskan sampel NPM. Proses pengukuran nilai SAR dilakukan dengan mensuspensikan tiap sampel ke dalam 0,15 mL akuades, lalu disonikasi selama 10 menit. Kemudian, sampel diletakkan pada tengah koil induksi dan sistem pemanas induksi magnetik dioperasikan pada frekuensi dan kekuatan magnet bolak-balik rendah.



Gambar 2. Sistem pemanas induksi dalam pengukuran SAR

2.4 Analisis Data

Kinerja NPM dalam menghasilkan panas akibat medan magnet bolak-balik diukur menggunakan metode kalorimetri. Perubahan suhu dari variasi massa NPM Fe₃O₄/Ag selama interval waktu tertentu dengan menggunakan frekuensi dan amplitudo medan magnet bolak-balik. Nilai SAR diperoleh menggunakan persamaan Box-Lucas:

$$SAR = \left(C_s \frac{m_s}{m_{NPS}} \right) \left(\frac{dT}{dt} \right)$$

dengan C_s , m_s , m_{NPS} , dan dT/dt masing-masing adalah kapasitas panas spesifik pelarut, massa pelarut, massa NPM, dan perubahan suhu terhadap waktu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sintesis Hijau Nanopartikel Magnetik Fe₃O₄/Ag

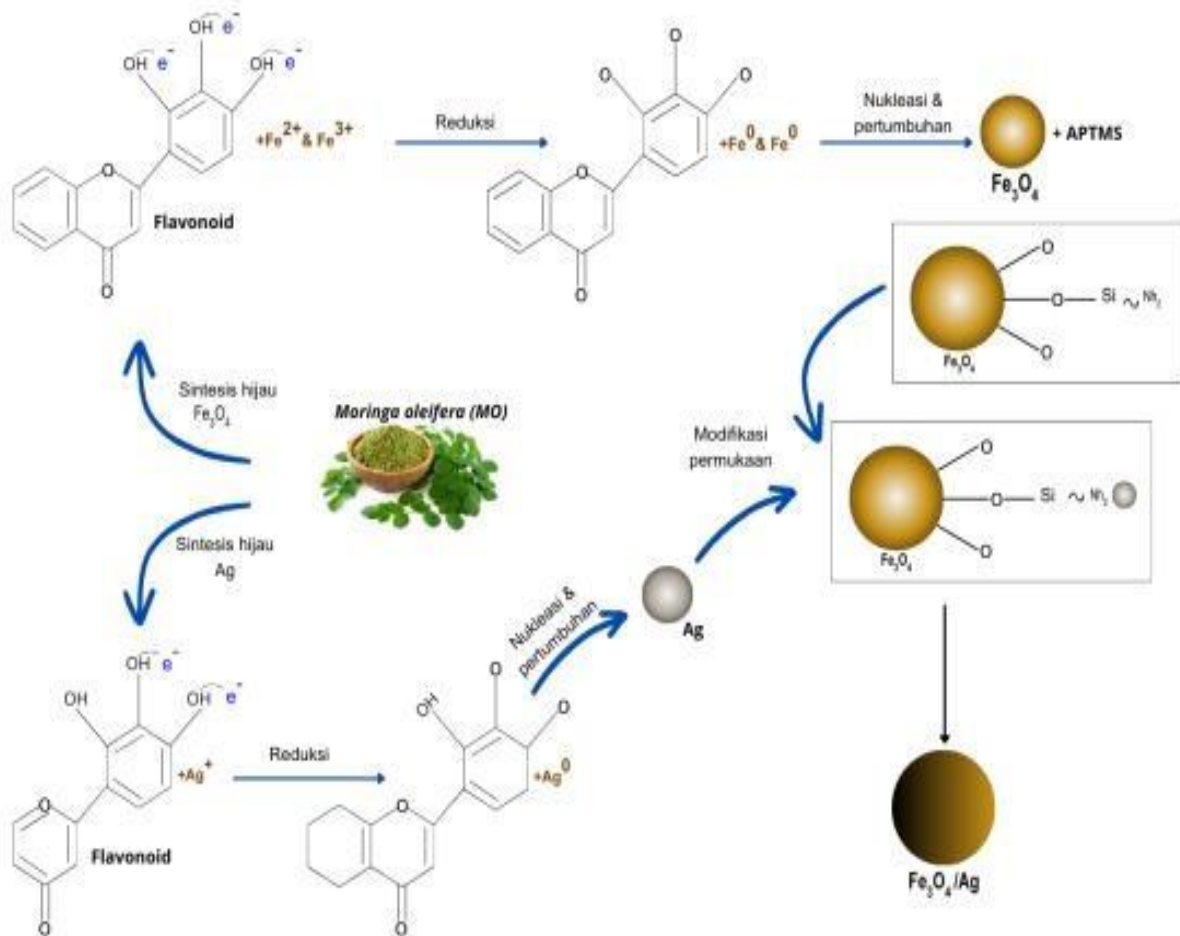
Gambar 3 menunjukkan mekanisme produksi sintesis hijau NPM Fe₃O₄/Ag.

Komponen kimia seperti flavonoid dan fenolik yang terdapat dalam ekstrak MO berperan dalam mengurangi ion Fe³⁺ dan Fe²⁺, serta menjaga stabilitas NPM Fe₃O₄ yang dihasilkan. Penggunaan larutan ekstrak MO mengurangi kebutuhan akan reagen kimia NH₄OH untuk menyediakan gugus hidroksil (Mabarroh *et al.*, 2022). Pendekatan ini mengurangi atau (b) menggantikan sebagian penggunaan bahan kimia tertentu, seperti amonium hidroksida (NH₄OH), yang biasanya digunakan dalam tahap pengendapan, menjadikan penggunaan bahan tanaman dalam sintesis NPM sebagai metode yang ramah lingkungan. Secara umum, proses GS-NPM melibatkan tiga tahap utama, yaitu aktivasi (melibatkan reduksi dan nukleasi), pertumbuhan, dan terminasi (Chokkareddy & Redhi, 2018). Flavonoid yang kaya elektron, dengan banyak gugus hidroksil, berfungsi secara efektif dalam mereduksi ion Fe³⁺ dan Fe²⁺ selama tahap aktivasi (Wu *et al.*, 2014).

Interaksi gugus hidroksil dengan ion Fe mengubah flavonoid dari bentuk enol menjadi bentuk keto, melepaskan atom hidrogen reaktif

untuk mereduksi ion Fe, dan pada akhirnya membentuk nanopartikel. Tahap nukleasi terjadi setelah reduksi ion Fe, menghasilkan nanopartikel kecil. Selama tahap pertumbuhan, nanopartikel bergabung membentuk berbagai morfologi, mencapai puncak aktivitas selama tahap terminasi di mana partikel nano mencapai bentuk dan ukuran yang stabil.

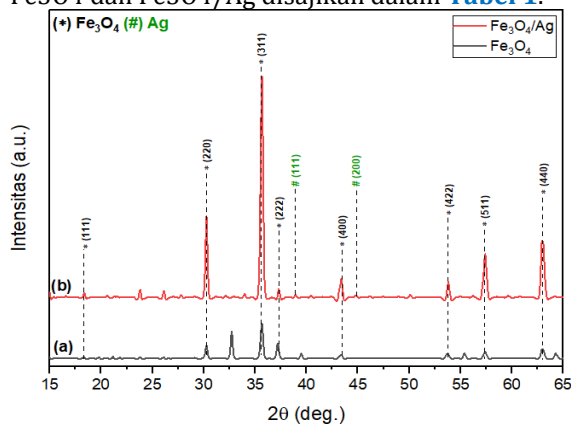
Mekanisme pembentukan partikel Ag mengikuti pendekatan serupa, di mana gugus hidroksil flavonoid memainkan peran penting dalam mereduksi ion perak (Ag⁺). Elektron dari gugus hidroksil Flavonoid disumbangkan ke ion perak (Ag⁺), mengakibatkan reduksi Ag⁺ menjadi Ag⁰. Hasilnya adalah banyak partikel Ag⁰ berukuran kecil yang terbentuk, kemudian bergabung membentuk partikel Ag (Some *et al.*, 2019). Sifat stabilisasi dari ekstrak tumbuhan memiliki peran kunci dalam fase ini. Permukaan NPM Fe₃O₄ diolah menggunakan APTMS sebagai penghubung antara Fe₃O₄ dan Ag. Langkah berikutnya adalah pengendapan Ag, dilakukan dengan mengaduk secara berkelanjutan campuran Fe₃O₄/APTMS dengan larutan Ag.



Gambar 3. Mekanisme pembentukan GS- NPM Fe₃O₄/Ag menggunakan ekstrak MO

3.2 Analisis Struktur Kristalit

Gambar 4 menunjukkan pola XRD dari Fe3O4 dan Fe3O4/Ag. Analisis XRD dari sampel dilakukan menggunakan metode Rietveld Refinement untuk mendapatkan puncak difraksi yang jelas dan tajam tanpa adanya kesalahan. Puncak difraksi dari Fe3O4/Ag teramati pada bidang (311). Puncak tertinggi tersebut akan digunakan dalam menentukan struktur kristalit dari NPM Fe3O4/Ag. Ukuran kristalit diperoleh dengan menggunakan persamaan Scherrer. Ukuran kristalit dan parameter kisi dari NPM Fe3O4 dan Fe3O4/Ag disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 4. Pola XRD dari (a) Fe3O4, dan (b) Fe3O4/Ag

Tabel 1. Parameter kisi dan ukuran kristalit Fe3O4 dan Fe3O4/Ag

Nanopartikel Magnetik	Parameter Kisi	Ukuran Kristalit (nm)
Fe3O4	8.15	42.69
Fe3O4/Ag	8.14	43.58

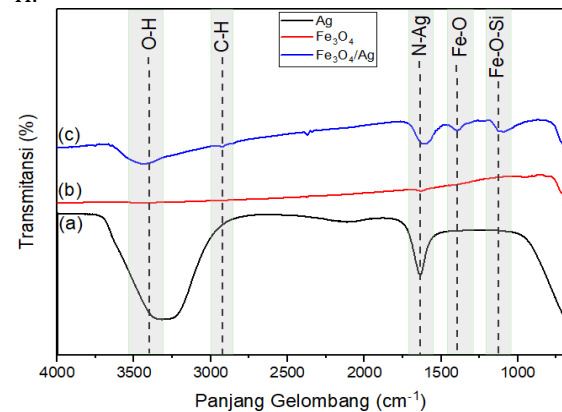
Ukuran kristalit yang diperoleh tersebut dipengaruhi oleh adanya pelapisan Ag pada NPM Fe3O4, sehingga terjadi peningkatan ukuran kristalit. Penambahan Ag secara efektif memperluas ukuran kristalit NPM yang menunjukkan bahwa komposit nanopartikel yang terbentuk terhubung secara efektif dalam kondisi magnetit murni. Intensitas puncak difraksi Fe3O4/Ag lebih rendah dibandingkan magnetit murni karena berkurangnya ketebalan NPM Ag pada permukaan Fe3O4 (Ghaseminezhad & Shojaosadati, 2016).

Hasil yang telah diperoleh tersebut dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Khaira dkk., menunjukkan bahwa ukuran kristalit dari NPM Fe3O4 adalah 26,66 nm (Khaira *et al.*, 2020). Hasil dari

penelitian yang dilakukan oleh Darmawan dkk., menunjukkan bahwa ukuran kristalit dari NPM Fe3O4/Ag sebesar 19,9 nm; 25,4 nm; 27,8 nm; 28,1 nm; dan 32,6 nm secara berurutan pada konsentrasi 0 mM, 20 mM, 40 mM, 60 mM, dan 80 mM (Darmawan *et al.*, 2023).

3.3 Analisis Gugus Fungsi Menggunakan FTIR

Gambar 5 menunjukkan Spektrum FTIR dari NPM Fe3O4, Ag, dan Fe3O4/Ag yang terletak dalam kisaran bilangan gelombang 400-4000 cm⁻¹. Puncak-puncak serapan tersebut dianalisis untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terkandung dalam Fe3O4, Ag, dan Fe3O4/Ag. Berdasarkan hasil analisis spektrum absorbansi pada Tabel 2 ditemukan bahwa Fe3O4/Ag memiliki ikatan Fe-O, O-H, Fe-O-Si, N- Ag, dan C-H.



Gambar 5. Spektrum FTIR dari NPM (a) Ag, (b) Fe3O4, dan (c) Fe3O4/Ag

Tabel 2. Hasil analisa bilangan gelombang FTIR

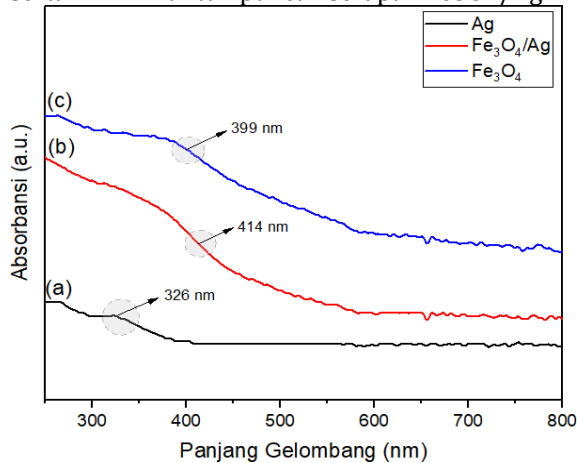
Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)		
	Ag	Fe3O4	Fe3O4/Ag
O-H	3315	3398	3441
C-H	-	-	2926
N-Ag	1639	-	1600
Fe-O	-	1398	1392
Fe-O-Si	-	1124	1102

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian ini, pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Darmawan dkk., menunjukkan adanya getaran regangan ikatan Fe-O pada bilangan gelombang 1396 cm⁻¹, getaran regangan ikatan O-H pada bilangan gelombang 3413 cm⁻¹, getaran regangan ikatan Fe-O-Si pada bilangan gelombang 1115 cm⁻¹, getaran regangan ikatan N-Ag pada bilangan gelombang 1652 cm⁻¹, getaran regangan ikatan C-H pada

bilangan gelombang 2916 cm⁻¹ (Darmawan *et al.*, 2023).

3.4 Analisis Optik Energy Gap Menggunakan UV-VIS Spektroskopi

Gambar 6 menunjukkan spektrum UV-VIS dari Fe₃O₄, Ag dan Fe₃O₄/Ag. Analisis sifat optik dari NPM menggunakan spektrofotometer UV-VIS ditentukan berdasarkan profil serapan sampel terhadap sinar UV-VIS dan besarnya energi celah pita pada NPM Fe₃O₄/Ag. Spektrum serapan NPM Fe₃O₄ menunjukkan spektrum yang luas meliputi rentang UV hingga cahaya tampak (Dash *et al.*, 2019). Puncak serapan NPM Ag berada pada 326 nm, dan NPM Fe₃O₄ bergeser ke arah panjang gelombang 399 nm serta 414 nm untuk puncak serapan Fe₃O₄/Ag.



Gambar 6. Spektrum UV-VIS dari NPM (a) Ag, (b) Fe₃O₄/Ag, dan (c) Fe₃O₄

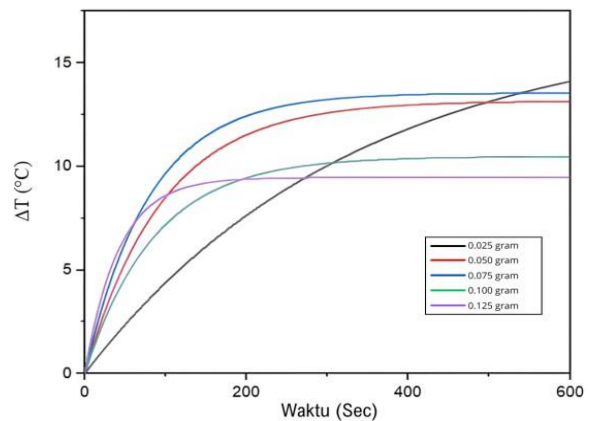
Energy gap sampel diperoleh dengan metode Tauc Plot dari spektrum UV-VIS, dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3. Energy gap NPM Fe₃O₄ setelah dilapisi Ag menurun menjadi 2,50 eV yang kemungkinan besar diakibatkan oleh adanya enkapsulasi Ag. Dibandingkan dengan hasil penelitian ini, penelitian sebelumnya memperoleh nilai energy gap dari Fe₃O₄/Ag sebesar 2,99 eV (Darmawan *et al.*, 2023).

Tabel 3. Energy gap dari masing-masing sampel

Sampel	Lebar pita energi (eV)	Panjang Gelombang (nm)
Ag	4.00	326
Fe ₃ O ₄	3.49	399
Fe ₃ O ₄ /Ag	2.50	414

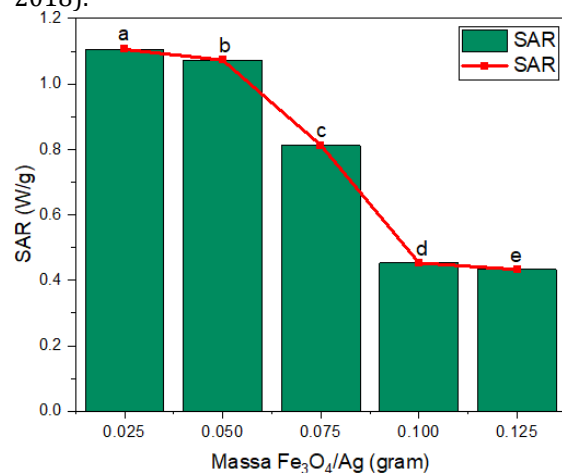
3.5 Analisis SAR

Gambar 7 menunjukkan adanya perubahan suhu pada semua variasi massa NPM Fe₃O₄/Ag, berkisar dari 0°C hingga 14,2°C dalam rentang waktu 600 detik, dengan menggunakan frekuensi 15 kHz dan amplitudo medan magnet bolak-balik 150 Oe. Perubahan suhu menunjukkan bahwa massa sampel NPM yang meningkat mengakibatkan panas yang dihasilkan kian meningkat selama interval waktu tersebut.



Gambar 7. Profil kenaikan suhu NPM Fe₃O₄/Ag dengan massa bervariasi

Dalam aplikasi HM, pengendalian suhu sangat penting untuk mempertahankan kisaran suhu yang moderat. Peningkatan suhu dapat secara selektif merusak tumor atau sel abnormal sekaligus menjaga sel sehat (Zahedi-Tabar *et al.*, 2019). Kenaikan suhu substansial dari NPM menghasilkan nilai SAR yang tinggi (Evans *et al.*, 2018).



Gambar 8. Nilai SAR suspensi NPM Fe₃O₄/Ag dengan massa bervariasi (a) 0,025 gram, (b) 0,050 gram, (c) 0,075 gram, (d) 0,100 gram, dan (e) 0,125 gram

Gambar 8 menunjukkan grafik nilai SAR dari NPM Fe₃O₄/Ag dengan massa yang bervariasi. Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa nilai SAR yang diperoleh kian meningkat seiring dengan menurunnya massa NPM Fe₃O₄/Ag. Nilai SAR terendah dan tertinggi untuk Fe₃O₄/Ag dalam penelitian ini adalah 0,43 W/g pada massa 0,125 gram dan 1,11 W/g pada massa 0,025 gram. Nilai SAR NPM pada aplikasi HM dipengaruhi oleh magnetisasi saturasinya, yang berarti dengan meningkatnya massa Fe₃O₄/Ag, maka nilai SAR menurun karena berkurangnya sifat kemagnetan. Meskipun NPM Fe₃O₄/Ag memiliki potensi yang cukup tinggi sebagai bahan pemanas dalam pengobatan hipertermia, nilai SAR yang diperoleh dalam penelitian ini relatif kecil, sehingga menghasilkan panas yang lambat. Nilai SAR yang diperoleh pada penelitian ini lebih besar dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, dimana diperoleh nilai SAR terendah 32 mW/g dan tertingginya 83,3 mW/g (Juwita, 2022).

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa massa NPM Fe₃O₄/Ag yang disintesis menggunakan metode GS dengan ekstrak MO secara signifikan mempengaruhi nilai SAR. Nilai SAR yang diperoleh meningkat seiring dengan menurunnya massa NPM. GS-NPM Fe₃O₄/Ag dengan massa yang divariasikan memiliki nilai SAR yang cukup menjanjikan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Nilai SAR terendah dan tertinggi yang diperoleh, secara berturut-turut, adalah 0,43 W/g pada massa Fe₃O₄/Ag 0,125 gram dan 1,11 W/g pada massa 0,025 gram. Hasil ini menegaskan bahwa ekstrak MO dapat menjadi alternatif yang menjanjikan dan ramah lingkungan untuk menghasilkan NPM dengan potensi aplikasi dalam terapi HM.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Kolaboratif Dosen Mahasiswa (RBDMS), Wakil Rektor Bidang Riset, Inovasi, dan Kewirausahaan, Universitas Kristen Satya Wacana 2024 dengan Nomor Kontrak: 020/SPK-RBDMS/RIK/06/2024.

REFERENSI

Chang, D., Lim, M., Goos, J. A. C. M., Qiao, R., Ng, Y. Y., Mansfeld, F. M., Jackson, M., Davis, T. P., & Kavallaris, M. (2018). Biologically Targeted Magnetic Hyperthermia: Potential and Limitations. *Front. Pharmacol*, 9, 386237.

<https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00831>

Chokkareddy, R., & Redhi, G. G. (2018). Green Synthesis of Metal Nanoparticles and its Reaction Mechanisms. *Green Met. Nanoparticles*, 1, 113-139. <https://doi.org/10.1002/9781119418900.ch4>

Darmawan, M. Y., Istiqomah, N. I., Adrianto, N., Tumbelaka, R. M., Nugraheni, A. D., & Suharyadi, E. (2023). Green Synthesis of Fe₃O₄ Composite Nanoparticles Using Moringa Oleifera: Exploring Microstructure, Optical, and Magnetic Properties for Magnetic Hyperthermia Applications. *Result in Chem.*, 6, 100999. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100999>

Dash, A., Ahmed, M. T., & Selvara, R. (2019). Mesoporous Magnetite Nanoparticles Synthesis Using The Peltophorum Pterocarpum Pod Extract, Their Antibacterial Efficacy Against Pathogens and Ability to Remove a Pollutant Dye. *J. Mol. Struct.* <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.10.042>

Dizaji, A. N., Yilmaz, M. & Piskin, E. (2016). Silver Or Gold Deposition Onto Magnetite Nanoparticles By Using Plant Extracts As Reducing And Stabilizing Agents. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol*, 44, 1109–1115. <https://doi.org/10.3109/21691401.2015.1019672>

Eseholi, T. 2011. Investigation of the Specific Absorption Rate (SAR) on Code Division Multiple Access (CDMA) 1.8 GHZ. Disertasi. Universitas Brawijaya.

Evans, B. A., Bausch, M. D., Sienerth, K. D., & Davern, M. J. (2018). Non-Monotonicity In The Influence Of Nanoparticle Concentration on SAR in Magnetic Nanoparticle Hyperthermia. *J. Magn. Mater.*, 465, 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.06.051>

Ghaseminazed, S. M., and Shojaosadati, S. A. (2016). Evaluation of The Antibacterial Activity of Ag/Fe₃O₄ Nanocomposites Synthesized Using Starch. *Carbohydr.*

- Polym.*, 144, 454-463.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.007>
- Giustini, A.J., Petryk, A.A.S., Cassim, M., Tate, J.A., Baker, I. A. N., & Hoop, P. J. (2010). Magnetic Nanoparticle Hyperthermia in Cancer Treatment. *Nano Life*, 1, 17-32.
<https://doi.org/10.1142/S179398441000067>
- Juwita, E. 2022. Sintesis Nanopartikel Bismuth Ferrite/SiO₂ dan Bismuth Ferrite/PEG Serta Karakterisasi dan Potensinya Sebagai Hipertermia Magnetik. Tesis. Universitas Gadjah Mada.
- Katata-Seru, L., Moremedi, T., Aremu, O. S., & Bahadur, I. (2018). Green Synthesis of Iron Nanoparticles Using Moringa Oleifera Extracts And Their Applications: Removal of Nitrate From Water And Antibacterial Activity Against Escherichia Coli. *J. Mol. Liq.*, 256, 296-304.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.093>
- Khaira, R., Ulinas, A., Azhar, M., & Mawardi. (2020). Sintesis Nanopartikel Magnetik Besi Oksida (Fe₃O₄) Menggunakan Ekstrak Daun Sirih Merah (Piper Crocatum) sebagai Agen Pelindung (Capping Agent). *J. Kimia*, 9(2), 42-46.
<https://doi.org/10.24036/p.v9i2.110381>
- Liu, L., Ni, F., Zhang, J., Jiang, X., Lu, X., Guo, Z., & Xu, R. (2010). Silver Nanocrystals Sensitize Magnetic Nanoparticle Mediated Thermo- Induced Killing of Cancer Cells. *Acta Biochim. Biophys. Sin.*, 43, 316-323.
<https://doi.org/10.1093/abbs/gmr015>
- Lubis, H. (2022). Perbandingan Karakterisasi Morfologi Fe₃O₄ terhadap Fe₃O₄ Merck Melalui Metode Kopresipitasi. *Juripol*, 5(2), 458-463.
[10.33395/juripol.v5i2.11775](https://doi.org/10.33395/juripol.v5i2.11775)
- Mabarroh, N., Alfansuri, T., Wibowo, N. A., Istiqomah, N. I., Tumbelaka, R. M., & Suharyadi, E. (2022). Detection Of Green-Synthesized Magnetite Nanoparticles Using Spin-Valve GMR-Based Sensor and Their Potential as Magnetic Labels. *J. Magn. Magn. Mater.*, 560, 169645.
<https://doi.org/10.1016/j.jmm.2022.169645>
- Maranciuc, A. N., Chicea, D., & Chicea, L.M. (2022). Ag Nanoparticles For Biomedical Applications; Synthesis And Characterization; A Review. *Int. J. Mol. Sci.*, 23(10), 5778.
<https://doi.org/10.3390/ijms23105778>
- Mateus, G. A. P., Paludo, M. P., Santos, T. R. T. D., Silva, M. F., Nishi, L. M., Klen, R. F., Gomes, R.G., & Bergamasco, R. (2018). Obtaining Drinking Water Using A Magnetic Coagulant Composed Of Magnetite Nanoparticles Functionalized With Moringa Oleifera Seed Extract. *J. Environ. Chem. Eng.*, 6(4), 4084-4092.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.050>
- Moodley, J. S., Krishna, S. B. N., Pillay, K., Sershen, & Govender, P. (2018). Green Synthesis of Silver Nanoparticles from Moringa Oleifera Leaf Extracts and Its Antimicrobial Potential. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, 9(1), 015011.
<https://doi.org/10.1088/2043-6254/aaabb2>
- Nur'aini, S., Arsyad, F. S., Setyabudidaya, D., Soerya, B., & Sari, B. R. L. (2023). Review Sifat-Sifat dan Karakteristik Fotokatalitik Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ Untuk Mengatasi Polusi Air. *J. Penelit. Sains*, 25(2), 180-191.
<https://doi.org/10.56064/jps.v25i2.849>
- Peiravi, M. et al. (2022). Magnetic hyperthermia: Potentials and limitations. *J. of the Indian Chem. Soc.*, 99(1), 100269.
<https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100269>
- Routray, K. L., Saha, S., & Behera, D. (2019). Green Synthesis Approach for Nano-Sized CoFe₂O₄ Through Aloe Vera Mediated Sol-Gel Auto Combustion Method for High-Frequency Devices. *Mater. Chem. and Phys.*, 224, 29-35.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.11.073>
- Shabrina, A. and Iskandarsyah, A. (2019). Pengambilan Keputusan Mengenai Pengobatan pada Pasien Kanker Payudara yang Menjalani Pengobatan Tradisional. *J. Psikol.*, 46(1), 72-84.
<https://doi.org/10.22146/jpsi.31902>
- Some, S., Bulut, O., Biswas, K., Kumar, A., Roy, A., Sen, I. K., Mandal, A., Franco, O.L., Ince, I. A., Neog, K., Das, S., Pradhan, S., Dutta, S., Bhattacharjya, D., Saha, S., Mohapatra, P. K. D., Bhumali, A., Unni, B.G., Kati, A., Mandal,

- A. K., Yilmaz, M.D., & Ocoy, I. (2019). Effect of Feed Supplementation with Biosynthesized Silver Nanoparticles Using Leaf Extract of *Morus Indica* L. V1 on *Bombyx mori* L. (Lepidoptera: Bombycidae). *Sci. Rep.*, 9(1), 14839. <https://doi.org/10.1038/s41598-01-50906-6>
- Wu, X., Lu, C., Zhou, Z., Yuan, G., Xiong, R., & Zhang, X. (2014). Green Synthesis and Formation Mechanism of Cellulose Nanocrystal-Supported Gold Nanoparticles with Enhanced Catalytic Performance. *Environ. Sci. Nano*, 1, 71–79. <https://doi.org/10.103/C3EN00066D>
- Zafrial, R.M. and Amalia, R. (2018). Anti Kanker dari Tanaman Herbal. *Farmaka*, 16(1), 15-23. <https://doi.org/10.24198/jf.v16i1.17332>
- Zahedi-Tabar, Z., Bagheri-Khoulenjani, S., Amanpour, S., Mirzadeh, H. (2019). A Review on the Application of In Vitro and In Vivo Models of Cancerous Tumors for the Study of the Hyperthermia Effect. *Basic Clin. Cancer Res.*, 11(1), 71-81. <https://doi.org/10.18502/bccr.v11i1.165>