

Original paper

PERKEMBANGAN NANOSAINS DAN NANOTEKNOLOGI: FENOMENA DARI SIFAT FISIKA DAN KIMIA

Safira Arta Paramita, Priyono

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
Email: priyono@lecturer.undip.ac.id

Received: 1 Juli 2024; revised: 11 Juli 2024; accepted: 15 Juli 2024

ABSTRACT

Nanoscience breakthroughs in almost every field of science and nanotechnologies make life easier in this era. Interest in nanomaterials and especially nanoparticles has exploded in the past decades primarily due to their novel or enhanced physicochemical properties compared to bulk material. Nanoscience and nanotechnology represent an expanding research area, which involves structures, devices, and systems with novel properties and functions due to the arrangement of their atoms on the 1–100 nm scale. These extraordinary properties have created a multitude of innovative applications in the fields of medicine and pharma, electronics, agriculture, chemical catalysis, food industry, and many others. We try to provide a comprehensive overview of the different classes of nanoparticles and their novel or enhanced physicochemical properties including mechanical, thermal, magnetic, electronic, optical, and catalytic properties. We hope that this makes the many different methods more accessible to the readers, and to help with identifying the proper methodology for any given nanoscience problem.

Keywords: *nanoscience; nanotechnology; nanomaterials; nanoparticle; physicochemical*

PENDAHULUAN **Etimologi Nano**

Pada tahun 1947, didefinisikan prefiks ‘nano’ yang berasal dari kata Yunani yaitu nanos artinya ‘kurcaci’. Nano secara resmi menggambarkan bagian yang sangat kecil yaitu satu miliar meter (10^{-9}) dari suatu unit. Dalam literatur ilmiah bidang sains modern, untuk menggambarkan entitas dan proses yang sangat kecil atau dalam skala nano digunakan istilah prefiks nano. Beberapa istilah nano diantaranya nanoscience, nanotechnology, nanorobots, nanomedicine, nanoelectronics dan lain-lain [1].

Definisi

Nanosains merupakan cabang ilmu yang terdiri dari tentang sifat-sifat materi pada skala nano, dan secara khusus berfokus pada sifat-sifat bahan padat yang unik dan bergantung pada ukuran [2]. Nanoteknologi merupakan cabang teknologi yang terdiri dari sintesis, rekayasa, dan pemanfaatan bahan yang berukuran 1-100 nm yang dikenal dengan nanomaterial [3].

Sejarah Nanoteknologi

Pada abad keempat Masehi oleh Romawi, nanopartikel dan struktur yang digunakan oleh manusia menunjukkan salah satu contoh paling menarik dari nanoteknologi didunia kuno yaitu “La Piala Lycurgus” atau cangkir Lycurgus sekitar tahun 1600

[4]. Berdasarkan hasil analisis transmission electron microscopy (TEM) pada tahun 1990 (TEM) para saintis berhasil menjelaskan fenomena kaca dichroic yang terdapat pada Cangkir Lycurgus [5].

Kaca dichroic yang dianalisis yang memiliki sifat optik yang tidak biasa yaitu dapat berubah warna dalam kondisi pencahayaan tertentu. Dalam cahaya alami, cangkir berwarna hijau, tetapi ketika diterangi dari dalam (dengan lilin), menjadi merah. Analisis terbaru dari cangkir ini menunjukkan bahwa ia mengandung 50-100 nm Au dan Ag nanopartikel [5]. Hal ini ditunjukkan melalui efek *plasmon excitation of electrons* [6]. Penggunaan nanoteknologi kuno tidak berhenti sampai disini, faktanya, ada bukti awal penggunaan proses nanoteknologi di Mesopotamia, India Kuno, dan Maya [7,8].

Dampak daripada Nanomaterial

Faktor utama yang memberi dampak berbeda pada sifat bahan nano jika dibandingkan dengan material bulknya ada pada efek permukaan dan efek kuantum [9]. Faktor-faktor ini membuat nanomaterial menunjukkan sifat mekanik, termal, magnetik, elektronik, optik, dan katalitik yang baru. Bahan nano sering digunakan dalam berbagai aplikasi karena sifatnya yang unik [1,10,11].

Pada efek permukaan, nanomaterial memiliki efek yang berbeda dengan material bulknya karena: bahan nano memiliki luas permukaan yang besar sehingga mudah terdispersi, jumlah partikel persatuan massa yang tinggi, dan fraksi atom yang terdapat di permukaan dalam bahan nano meningkat.

Sebagai konsekuensi dari masing-masing sifat fisika dan kimia bahan nano jika dibandingkan dengan material bulknya adalah atom yang memiliki lebih sedikit atom tetangga (terdekatnya) yang terletak dipermukaan menghasilkan penurunan energi ikat per atom. Perubahan ini secara langsung mempengaruhi titik leleh

nanomaterial yang lebih rendah dibandingkan dengan bulknya, misalnya titik leleh nanopartikel emas yang berukuran 2,5 nm adalah 407 °C lebih rendah dibandingkan emas bulk [9]. Luas permukaan yang lebih besar pada umumnya akan meningkatkan reaktivitas bahan nano karena permukaan reaksinya lebih besar serta memberikan efek yang signifikan pada strukturnya [12]. Meskipun efek permukaan pada material nano memiliki dispersivitas yang tinggi, secara negatif juga dapat mempengaruhi sifat aglomerasi dan agregasi yang tinggi juga, karena adanya interaksi tarik-menarik yang kuat antar partikel [13]. Aglomerasi dapat dicegah dengan meningkatkan zeta potensial bahan nano (meningkatkan gaya tolak) [14], mengoptimalkan derajat hidrofilitas/hidrofobitas bahan nano, atau dengan mengoptimalkan pH dan kekuatan ion dari media suspensi [15].

Fenomena kuantum pada nanomaterials memberikan efek ketika radius material mendekati radius asimtotik eksiton Bohr (jarak pemisahan antara elektron dan lubang), pengaruh pembatasan kuantum (*quantum confinement*) menjadi jelas [12]. Dengan kata lain, mengecilnya ukuran material, efek kuantum menjadi lebih jelas, dan material nano menjadi kuantal. Struktur kuantum tersebut merupakan struktur fisis dimana semua pembawa muatan (elektron dan *hole*) terkurung dalam dimensi fisis [16]. Akibat efek quantum confinement, misalnya, beberapa bahan non-magnetik dalam jumlah besar seperti paladium, platinum, dan emas menjadi magnet dalam skala nano [9]. *Quantum confinement* juga dapat mengakibatkan perubahan signifikan dalam afinitas elektron atau kemampuan untuk menerima atau menyumbangkan muatan listrik, yang secara langsung tercermin pada sifat katalitik material. Sebagai contoh, aktivitas katalitik gugus platina kationik dalam dekomposisi N₂O ditentukan oleh

jumlah atom dalam gugus. Jumlah atom 6-9, 11, 12, 15, dan 20 merupakan kluster yang mengandung atom sangat reaktif, sedangkan kluster dengan 10, 13, 14, dan 19 atom memiliki reaktivitas rendah [9].

Klasifikasi Nanomaterial

Berdasarkan dimensinya, material nano dibedakan menjadi 4 kelas yang berbeda, yaitu:

- (1) Nanomaterial berdimensi nol (0-D): material nano di kelas ini memiliki ketiga dimensinya dalam rentang skala nano. Contohnya adalah titik kuantum, fullerene, dan nanopartikel.
- (2) Bahan nano satu dimensi (1-D): bahan nano di kelas ini memiliki satu dimensi di luar skala nano. Contohnya adalah nanotube, nanofibers, nanorods, nanowires, dan nanohorn.
- (3) Nanomaterial dua dimensi (2-D): material nano di kelas ini memiliki dua dimensi di luar skala nano. Contohnya adalah nanosheets, nanofilms, dan nanolayers.
- (4) Bahan nano dimensi pohon (3-D) atau bahan nano massal: di kelas ini bahan tidak terbatas pada skala nano dalam dimensi apa pun. Kelas ini berisi serbuk bulk, dispersi partikel nano, susunan kawat nano dan tabung nano, dll.

Sifat Fisika dan Kimia Nanopartikel *Sifat Mekanik*

Sifat mekanik mengacu pada karakteristik mekanik bahan di bawah kondisi yang berbeda, lingkungan, dan berbagai kekuatan eksternal. Adapun bahan tradisional, sifat mekanik nanomaterial umumnya terdiri dari sepuluh bagian: kekuatan, kerapuhan, kekerasan, ketangguhan, kekuatan leleh, plastisitas, elastisitas, keuletan, kekakuan, dan tegangan luluh [17]. Sebagian besar anorganik, seperti bahan nonlogam merupakan bahan yang getas dan tidak memiliki sifat ketangguhan, plastisitas,

elastisitas, atau daktilitas yang signifikan. Bahan organik di sisi lain merupakan bahan yang fleksibel dan tidak harus memiliki sifat rapuh dan kaku.

Sifat Termal

Proses perpindahan panas yang terjadi pada nanopartikel bergantung pada konduksi energi karena elektron sebagaimana foton (getaran kisi) dan efek hamburan yang menyertai keduanya [18]. Komponen utama dari sifat termal suatu material adalah konduktivitas termal, daya termoelektrik, kapasitas panas, dan stabilitas termal. Ukuran nanopartikel memiliki dampak langsung pada konduktivitas listrik dan termal. Ketika ukuran nanopartikel semakin kecil maka rasio luas permukaan partikel terhadap volume meningkat secara hiperbolik [18,19]. Rasio permukaan-ke-volume yang lebih tinggi dalam nanopartikel memberikan jumlah elektron yang lebih tinggi dalam proses perpindahan panas secara konduksi electron dibandingkan dengan material bulk [20]. Selain itu, sifat konduktivitas termal pada nanopartikel didukung dengan adanya mikrokonveksi yang dihasilkan dari gerak Brown [21]. Namun demikian, fenomena ini hanya terjadi ketika nanopartikel berbentuk padat yang terdispersi dalam cairan sehingga menghasilkan Nanofluid [22].

Daya termoelektrik suatu bahan bergantung pada koefisien Seebeck dan konduktivitas listriknya. Nanopartikel yang dimodifikasi dengan pendopongan diketahui dapat meningkatkan faktor daya termoelektrik [23]. Peningkatan ini bisa berasal dari peningkatan koefisien Seebeck atau peningkatan konduktivitas listrik. Penambahan nanopartikel dengan mengontrol ukuran dalam bahan termoelektrik dapat membantu mengurangi konduktivitas termal kisi dan meningkatkan koefisien Seebeck karena pemfilteran energi electron [24,25]. Secara umum, peningkatan konduktivitas listrik disertai dengan penurunan koefisien Seebeck dan

sebaliknya.

Faktor utama penyebab kapasitas panas pada suhu sekitar ditentukan oleh derajat kebebasan getaran, yaitu, kekhasan spektrum fonon (energi getaran yang muncul dari atom yang berosilasi di dalam kristal) bertanggung jawab atas perilaku anomali kapasitas panas nanopartikel [26]. Nanopartikel biasanya menunjukkan penurunan suhu leleh yang signifikan dibandingkan dengan material bulknya [27]. Alasan utama untuk fenomena ini adalah bahwa energi antarmuka cair/uap umumnya lebih rendah dari rata-rata energi antarmuka padat/uap [28]. Ketika ukuran partikel menurun, rasio permukaan terhadap volume meningkat, dan suhu leleh menurun sebagai akibat dari peningkatan energi bebas pada permukaan partikel [29]. Selain itu, komposisi nanopartikel dalam paduan juga berperan penting terhadap stabilitas termal. Umumnya, nanopartikel paduan bimetalik menunjukkan stabilitas termal dan suhu leleh yang lebih tinggi daripada nanopartikel monometalik karena efek paduan [30,31].

Sifat Magnetik

Beberapa bahan menjadi magnet dalam bentuk nanopartikel sebagai akibat dari distribusi elektronik yang tidak merata. Misalnya FeAl tidak bersifat magnetis dalam jumlah besar tetapi dalam bentuk nanopartikel menjadi magnet [32], contoh lain termasuk Pd dan Au [33]. Dalam bahan bulk, parameter kunci untuk menentukan sifat magnetik adalah komposisi, struktur kristalografi, anisotropi magnetik, dan cacat kekosongan [34,35]. Namun, pada skala nano, dua parameter penting lainnya sangat terlibat, yaitu ukuran dan bentuk [36].

Salah satu fenomena nanopartikel yang bergantung pada ukuran adalah superparamagnetisme [36]. Ketika ukuran partikel berkurang, energi anisotropi magnetik per partikel berkurang. Energi anisotropi magnetik adalah energi yang menjaga momen magnetik dalam orientasi

tertentu. Pada ukuran karakteristik untuk setiap jenis nanopartikel, energi anisotropi menjadi sama dengan energi termal, yang memungkinkan perubahan acak dari momen magnetik [37], dalam hal ini, nanopartikel didefinisikan sebagai superparamagnetik.

Efek ukuran nanopartikel juga dapat diamati pada perubahan koersivitas magnetik, yaitu resistensi bahan magnetik terhadap perubahan magnetisasi. Berbeda dengan partikel besar atau material bulk, yang memiliki beberapa struktur domain magnetik, partikel dengan ukuran kecil memiliki struktur domain magnetik tunggal dibawah radius kritis tertentu, dimana semua putaran magnetik di nanopartikel sejajar secara searah. Dalam daerah domain tunggal, antara radius partikel superparamagnetik dan radius kritis, koersivitas magnetik meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran nanopartikel hingga mencapai maksimum pada radius kritis [38]. Jari-jari kritis yang dihitung untuk beberapa bahan magnetik umum adalah 35 nm Ni, 8 nm untuk Co, dan 1 nm untuk Fe [39].

Parameter selanjutnya untuk menentukan sifat magnetik pada nanopartikel adalah bentuk nanopartikelnya. Dibandingkan dengan parameter ukuran, ada penelitian yang kurang signifikan tentang pengaruh bentuk pada sifat magnetik nanopartikel yang memiliki volume yang sama [38]. Mirip dengan material bulk, komposisi juga mempengaruhi magnetisme nanopartikel. Fase magnetokristalin dari nanopartikel signifikan dalam menentukan koersivitas magnetnya [40].

Sifat Elektronik dan Optik

Nanopartikel logam dan semikonduktor memiliki penyerapan linier, emisi fotoluminesensi, dan sifat optik non linier yang menarik karena *quantum confinement* dan efek *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Fenomena LSPR muncul ketika frekuensi foton kejadian

konstan dengan eksitasi kolektif elektron konduktif. Karena fenomena ini, nanopartikel logam mulia menunjukkan pita penyerapan UV-Vis yang bergantung pada ukuran skala nano, hal ini tidak terjadi pada material bulk. Umumnya, sifat optik NP bergantung pada ukuran, bentuk, dan lingkungan dielektrik nanopartikel [41]. Eksitasi kolektif elektron konduktif dalam logam disebut plasmon [42].

Dalam kasus nanopartikel, ketika mereka disinari oleh cahaya tampak, medan listrik beresilasi menyebabkan elektron konduktif yang beresilasi secara koheren. Ketika awan elektron dipindahkan relatif terhadap inti, gaya pemulih naik dari daya tarik Coulomb antara elektron dan inti yang menghasilkan osilasi awan elektron relatif terhadap kerangka inti [41]. Hal ini membentuk muatan tak terkompensasi pada permukaan nanopartikel. Karena efek utama yang menghasilkan gaya pemulih adalah polarisasi permukaan nanopartikel, osilasi ini disebut plasmon permukaan dan memiliki frekuensi resonansi yang terdefinisi dengan baik.

Peneliti yang sama menemukan bahwa bentuk nanopartikel juga sangat penting untuk sifat optik, panjang gelombang resonansi plasmon bergeser ke kanan saat nanopartikel menjadi lebih oblate, menunjukkan bahwa resonansi plasmon sangat bergantung pada bentuk nanopartikel. Selain bentuk dan ukuran partikel hal yang perlu diperhatikan untuk sifat optic juga ada pada pelarut dan substrat yang digunakan pada lingkungan dielektrik [41].

Sifat Katalitik

Sifat katalitik nanopartikel secara signifikan ditingkatkan melalui reaktivitas dan selektivitas jika dibandingkan dengan material bulk. Sifat katalitik nanopartikel bergantung pada ukuran, bentuk, komposisi, jarak antar partikel, dan kondisi oksidasi. Hubungan antara aktivitas katalitik dengan ukuran partikel berbanding terbalik, yaitu semakin kecil ukuran partikel

maka semakin aktif sifat katalitiknya [31].

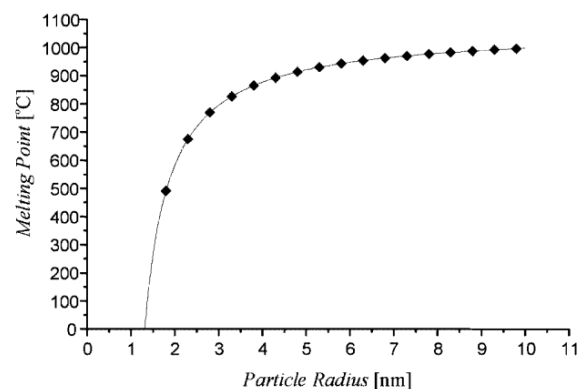
Bentuk dari nanopartikel juga diketahui mempengaruhi reaktivitas dan selektivitas. Untuk oksidasi CO oleh Au NPs, NP hemispherical ditemukan lebih aktif daripada yang spherical. Hal ini dapat terjadi karena peningkatan/penurunan area relatif dari faktor permukaan yang aktif secara katalitik atau karena perbedaan stabilitas untuk bentuk nanopartikel yang berbeda [43].

Pada beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan paduan di nanopartikel dapat meningkatkan aktivitas katalitik sebagai akibat dari efek paduan menyebabkan perubahan sifat elektronik katalis, mengurangi efek racun, dan memberikan selektivitas yang berbeda. Secara umum, perubahan komposisi nanopartikel mengubah struktur elektronik permukaan logam dengan pembentukan ikatan bimetal serta modifikasi panjang ikatan logam dengan logam [31].

DATA EMPIRIS

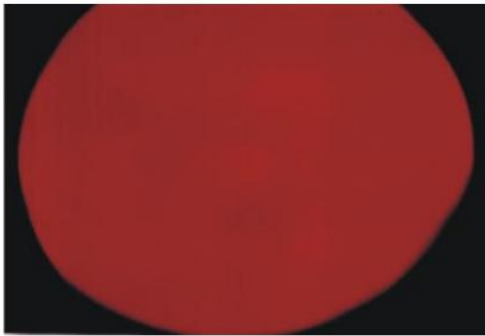
Karakterisasi Nanopartikel Emas

Emas dalam ukuran skala nano memiliki sifat fisika dan kimia yang unik. Perubahan sifat emas dalam skala nano jika dibandingkan dengan material bulknya salah satunya dapat dilihat pada titik leleh dan warna. Gambar 1 menunjukkan titik leleh nanopartikel emas dari diameter 10 hingga 2 nm [44].



Gambar 1. Hubungan antara ukuran partikel dan titik leleh nanopartikel emas.

Pada Gambar 1, semakin kecil ukuran partikel maka titik leleh akan semakin turun dibawah titik leleh emas bulk (1064 °C), jika jari-jari partikel kurang dari 10 nm. Hal ini berkaitan dengan meningkatnya jumlah atom permukaan dengan penurunan ukuran partikel. Atom permukaan memiliki bilangan koordinat yang lebih rendah daripada atom bagian dalam dan oleh karena itu menjadi lebih mudah bergerak [41].

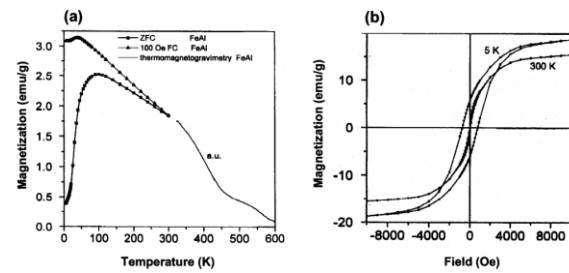


Gambar 2. Membran alumina berpori nano, diisi dengan nanopartikel emas 10 ± 5 nm.

Gambar 2 menunjukkan warna khas nanopartikel emas berukuran 10 ± 5 nm. Dalam kasus khusus ini partikel tertanam dalam pori-pori membran alumina transparan. Perubahan warna dari nanopartikel logam terjadi karena adanya fenomena yang disebut resonansi plasmon. Jadi ukuran yang berbeda dapat menghasilkan warna yang berbeda dari material bulknya.

Sifat Magnetik Nanopartikel FeAl

FeAl tidak bersifat magnetis dalam bentuk bulknya tetapi dalam bentuk nanopartikel, menjadi magnet. Bahan kristal FeAl (20-30% berat Al) bersifat nonmagnetik, nanopartikel FeAl ditemukan bersifat feromagnetik bahkan jauh di atas suhu kamar. Koersivitas orde 50 Oe hampir tidak tergantung pada suhu diamati dari suhu kamar hingga 40 K, di bawahnya nilai koersivitas meningkat hingga 700 Oe pada 5 K [32].

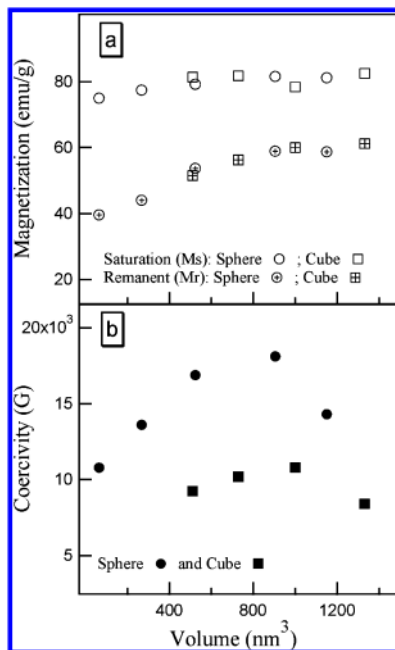


Gambar 3. (a) ZFC dan momen FC versus suhu nanopartikel FeAl. (b) Histeresis loop pada suhu yang berbeda dari nanopartikel FeAl [32].

Dalam hal nanopartikel bersifat magnet karena adanya efek anisotropi pertukaran definitif, yang mungkin timbul dari efek antar permukaan pada lapisan oksigen yang teradsorpsi tipis pada partikel-partikel ini. Hal ini juga mendefinisikan perpindahan yang diamati dari loop histeris di sepanjang sumbu medan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 [32].

Beberapa hasil penelitian menunjukkan grafik yang kurang signifikan tentang pengaruh bentuk pada sifat magnetik nanopartikel yang memiliki volume yang sama [38]. Namun, perbedaan besar dalam koersivitas ditemukan dalam nanopartikel CoFe_2O_4 kubik dan bola seperti yang ditunjukkan Gambar 4 [46]. Nanopartikel CoFe_2O_4 kubik memiliki lebih sedikit atom oksigen yang hilang, dan dihipotesiskan bahwa ini menyebabkan lebih sedikit pinning permukaan dan koersivitas yang lebih rendah untuk struktur kubik daripada struktur bola.

Studi eksperimental pada nanopartikel Ag menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam sifat optiknya berdasarkan ukuran partikel. Untuk nanopartikel Ag dengan radius 30 nm, puncak absorbansi utama berada pada panjang gelombang 369 nm, sedangkan untuk nanopartikel Ag dengan radius 60 nm, sifat yang berbeda telah diamati, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 [41].



Gambar 4. (a) saturasi dan magnetisasi remanen sebagai fungsi volume nanokristal bola dan kubik. Panel (b) koersivitas yang bergantung pada volume dari kristal nano bulat dan kubik [46].

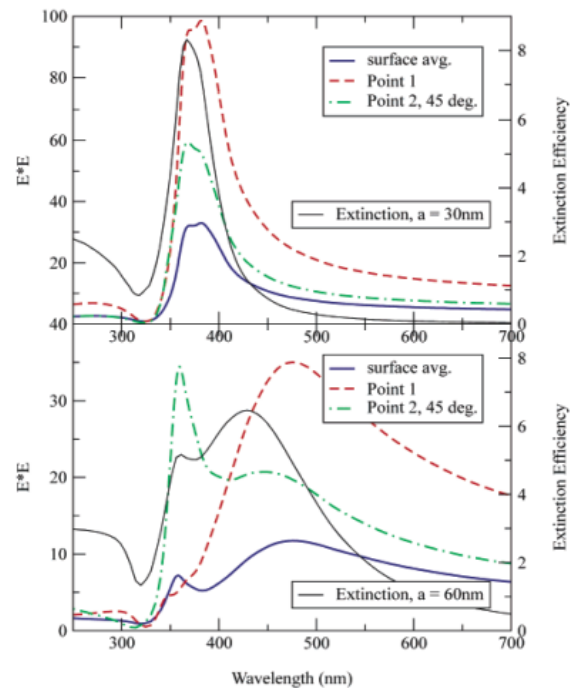
Peneliti yang sama menemukan bahwa bentuk nanopartikel juga sangat penting untuk sifat optik, panjang gelombang resonansi plasma bergeser ke merah saat nanopartikel menjadi lebih oblate [41], menunjukkan bahwa resonansi plasmon sangat bergantung pada bentuk nanopartikel.

KESIMPULAN

Kemajuan nanosains dan nanoteknologi di berbagai bidang ilmu pengetahuan telah berkembang ke arah yang berbeda. Skala yang lebih kecil dari material bulknya akan memberikan sifat fisika dan kimia yang unik. Hanya dalam beberapa dekade, nanoteknologi dan nanosains telah menjadi bagian sangat penting dalam semua bidang. Kami berharap ulasan ini dapat membantu dalam mengidentifikasi metodologi yang tepat untuk masalah nanosains yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Buzea C, Pacheco II, Robbie K.



Gambar 5. Perbandingan efisiensi extinction [41].

Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases*. 2007;2(4):MR17–71.

- [2] Mulvaney P. *Nanoscience vs nanotechnology—defining the field*. ACS Nano. 2015
- [3] Hasan S. A review on nanoparticles: their synthesis and types. *Res J Recent Sci*. 2015; 2277:2502.
- [4] The British Museum. Available online: www.britishmuseum.org/research/collection_online/collection_object_details.aspx?objobjec=61219&partId=1 (accessed on 22 July 2019).
- [5] Barber DJ, Freestone IC. An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus Cup by analytical transmission electron microscopy. *Archaeometry*. 1990;32:33–45.
- [6] Atwater HA. The promise of plasmonics. *Sci Am*. 2007;296(4):56–63.
- [7] Brill RH, Cahill ND. A red opaque glass from Sardis and some thoughts on red opaques in general. *J Glass*

- Stud. 1988;30:16–27
- [8] Sharon M. *History of nanotechnology: from prehistoric to modern times*. New Jersey: Wiley. 2019.
- [9] Roduner E. Size matters: why nanomaterials are different. *Chem Soc Rev*. 2006;35(7):583–92.
- [10] Lines MG. Nanomaterials for practical functional uses. *J Alloys Compd*. 2008;449(1–2):242–5.
- [11] Gade A, Ingle A, Whiteley C, Rai M. Mycogenic metal nanoparticles: progress and applications. *Biotechnol Lett*. 2010;32(5):593–600.
- [12] Ikhmayies SJ. Characterization of nanomaterials. *JOM*. 2014;66(1):28–29.
- [13] Ashraf MA, Peng W, Zare Y, Rhee KY. Effects of size and aggregation/agglomeration of nanoparticles on the interfacial/interphase properties and tensile strength of polymer nanocomposites. *Nanoscale Res Lett*. 2018;13(1):1–7.
- [14] Suttiponparnit K, Jiang J, Sahu M, Suvachittanont S, Charinpanitkul T, Biswas P. Role of surface area, primary particle size, and crystal phase on titanium dioxide nanoparticle dispersion properties. *Nanoscale Res Lett*. 2011;6(1):1–8.
- [15] Fubini B, Ghiazza M, Fenoglio I. Physico-chemical features of engineered nanoparticles relevant to their toxicity. *Nanotoxicology*. 2010;4(4):347–363.
- [16] Geofrion LD, Guisbiers G. Quantum confinement: size on the grill! *J Phys Chem Solids*. 2020;140: 109320.
- [17] Wu Q, Miao W, Gao H, Hui D. Mechanical properties of nanomaterials: a review. *Nanotechnol Rev*. 2020;9(1):259–273
- [18] Savage T, Rao AM. *Thermal properties of nanomaterials and nanocomposites*. In: *Thermal conductivity*. Springer; 2004. p. 261–284.
- [19] Andrievski RA. Review of thermal stability of nanomaterials. *J Mater Sci*. 2014;49(4):1449–1460.
- [20] Qiu L, Zhu N, Feng Y, Michaelides EE, Żyła G, Jing D, et al. A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: from solid state to colloids. *Phys Rep*. 2020;843:1–81.
- [21] Shima PD, Philip J, Raj B. Role of microconvection induced by Brownian motion of nanoparticles in the enhanced thermal conductivity of stable nanofluids. *Appl Phys Lett*. 2009;94(22): 223101.
- [22] Syam Sundar L, Sharma KV. Thermal conductivity enhancement of nanoparticles in distilled water. *Int J Nanoparticles*. 2008;1(1):66–77
- [23] Zebarjadi M, Esfarjani K, Shakouri A, Bahk J-H, Bian Z, Zeng G, et al. Effect of nanoparticle scattering on thermoelectric power factor. *Appl Phys Lett*. 2009;94(20): 202105.
- [24] Zeng G, Zide JMO, Kim W, Bowers JE, Gossard AC, Bian Z, et al. Crossplane Seebeck coefficient of Er As: In Ga As/In Ga Al As superlattices. *J Appl Phys*. 2007;101(3):34502.
- [25] Kim W, Singer SL, Majumdar A, Vashaee D, Bian Z, Shakouri A, et al. Cross-plane lattice and electronic thermal conductivities of Er As: In Ga As/ In Ga Al As superlattices. *Appl Phys Lett*. 2006;88(24):242107.
- [26] Likhachev VN, Vinogradov GA, Alymov MI. Anomalous heat capacity of nanoparticles. *Phys Lett A*. 2006;357(3):236–239.
- [27] Borel J-P. Thermodynamical size effect and the structure of metallic clusters. *Surf Sci*. 1981;106(1–3):1–9.
- [28] Gülseren O, Ercolessi F, Tosatti E. Premelting of thin wires. *Phys Rev B*. 1995;51(11):7377.
- [29] Shim J-H, Lee B-J, Cho YW. Thermal stability of unsupported gold nanoparticle: a molecular dynamics study. *Surf Sci*. 2002;512(3):262–268.

- [30] Mottet C, Rossi G, Baletto F, Ferrando R. Single impurity effect on the melting of nanoclusters. *Phys Rev Lett*. 2005;95(3):35501.
- [31] Cuenya BR. Synthesis and catalytic properties of metal nanoparticles: size, shape, support, composition, and oxidation state effects. *Thin Solid Films*. 2010;518(12):3127–3150.
- [32] Pithawalla YB, El-Shall MS, Deevi SC, Ström V, Rao KV. Synthesis of magnetic intermetallic FeAl nanoparticles from a non-magnetic bulk alloy. *J Phys Chem B*. 2001;105(11):2085–2090.
- [33] Hori H, Teranishi T, Nakae Y, Seino Y, Miyake M, Yamada S. Anomalous magnetic polarization effect of Pd and Au nano-particles. *Phys Lett A*. 1999;263(4–6):406–410.
- [34] McCurrie RA. *Ferromagnetic materials: structure and properties*. Cambridge: Academic Press. 1994.
- [35] Edelstein AS, Cammarata RC. *Nanomaterials: synthesis, properties and applications*. Boca Raton: CRC Press. 1998.
- [36] Jun Y, Seo J, Cheon J. Nanoscaling laws of magnetic nanoparticles and their applicabilities in biomedical sciences. *Acc Chem Res*. 2008;41(2):179–189.
- [37] Skumryev V, Stoyanov S, Zhang Y, Hadjipanayis G, Givord D, Nogués J. Beating the superparamagnetic limit with exchange bias. *Nature*. 2003;423(6942):850–853.
- [38] Kolhatkar AG, Jamison AC, Litvinov D, Willson RC, Lee TR. Tuning the magnetic properties of nanoparticles. *Int J Mol Sci*. 2013;14(8):15977–16009.
- [39] Podaru G, Chikan V. *Magnetism in nanomaterials: heat and force from colloidal magnetic particles*. In: *Magnetic Nanomaterials: Applications in Catalysis and Life Sciences*. Royal Society of Chemistry. 2017.
- [40] Lee W, Kim MG, Choi J, Park J-I, Ko SJ, Oh SJ, et al. Redox-transmetalation process as a generalized synthetic strategy for core-shell magnetic nanoparticles. *J Am Chem Soc*. 2005;127(46):16090–16097.
- [41] Kelly KL, Coronado E, Zhao LL, Schatz GC. *The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment*. Washington: ACS Publications. 2003.
- [42] Kreibig U, Vollmer M. *Theoretical considerations*. In: *Optical properties of metal clusters*. Springer. 1995. p. 13–201.
- [43] Henry CR. Morphology of supported nanoparticles. *Prog Surf Sci*. 2005;80(3–4):92–116.
- [44] Castro T, Reifemberger R, Choi E, Andres RP. Size-dependent melting temperature of individual nanometer-sized metallic clusters. *Phys. Rev. B*. 1990;13:8548.
- [45] Hornyak GL, Kröll M, Pugin R, et al. Gold Clusters and Colloids in Alumina Nanotubes. *Chem. Eur. J*. 1997;3(12):1951-1956.
- [46] Song Q, Zhang ZJ. Shape control and associated magnetic properties of spinel cobalt ferrite nanocrystals. *J Am Chem Soc*. 2004;126(19):6164–6168.