

Karakterisasi Muatan Nanopartikel Silika (SiO_2) dengan Metode Elektroforesis

Purwoko Haryadi Santoso^{1*}, Yohanes Kurniawan², Havid Noor Pamungkas³,
dan Suparno⁴

¹Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Sulawesi Barat, Majene

²Program Studi Pendidikan Matematika, Universitas Katolik Indonesia Santu Paulus, Ruteng

³SMA Negeri 1 Tenganan, Semarang

⁴Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Sleman

*Email : purwokoharyadisantoso@unsulbar.ac.id

ABSTRACT

Electrophoresis is one of the experimental methods employed in this study to characterize unique properties of charges of silica nanoparticles (SiO_2) by observing their electrophoretic phenomena while they are situated in the electric field. This study is aimed to measure one of the SiO_2 properties, namely the charge, using electrophoresis method through the variation of electric fields. The charge dependencies of SiO_2 was probed towards five times variation of electric fields 1000, 1250, 1500, 1750, and 2000 V/m in 20 mL of aquades. The displacement of SiO_2 could be observed through the light microscope with 160x magnification which the recorded observations then were analyzed by timeline-based software to measure the displacement time of particles during the observation. The results revealed that silica nanoparticles have the kind of positive charges in the colloidal solution. It is caused the magnitude of SiO_2 charges is ranged constantly despite the variational effect of electric field in the environment. Light microscope has been optimized in this study to measure the velocity of SiO_2 that tends to increase with respect to the magnifying electric fields given in the experiment.

Keywords: charge characterization, silica nanoparticles, electrophoresis.

ABSTRAK

Elektroforesis merupakan salah satu metode eksperimen yang telah diterapkan dalam penelitian ini untuk mengkarakterisasi muatan nanopartikel silika (SiO_2) dengan mengamati fenomena elektroforetik ketika SiO_2 ditempatkan dalam medan listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur salah satu karakteristik SiO_2 yaitu muatannya dengan menggunakan metode elektroforesis melalui variasi medan listrik. Muatan SiO_2 diuji ketergantungannya terhadap lima kali perubahan medan listrik 1000, 1250, 1500, 1750, dan 2000 V/m dalam 20 mL aquades. Gerakan nanopartikel SiO_2 diamati dengan bantuan mikroskop cahaya dengan perbesaran 160 kali yang rekamannya dianalisis dengan aplikasi berbasis *timeline* untuk mengukur waktu gerak tempuh partikel dalam pengamatan. Hasil penelitian telah menunjukkan bahwa SiO_2 berjenis muatan positif di dalam koloid. Hal ini menyebabkan besar muatan SiO_2 konstan meskipun medan listrik yang dimasukkan ke dalam larutan telah divariasi. Mikroskop cahaya yang digunakan mampu memfasilitasi peneliti untuk mengukur kecepatan mobilitas SiO_2 yang semakin meningkat akibat adanya variasi medan listrik yang diberikan dalam eksperimen.

Kata kunci: karakterisasi muatan, nanopartikel silika, elektroforesis.

PENDAHULUAN

Nanoteknologi merupakan salah satu bidang penelitian yang telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang seperti fabrikasi sensor ^[1], pengantar obat ^[2], budidaya pertanian ^[3], ^[4], pestisida ^[5], penjernih air (adsorben) ^[6], dan bahkan hingga merambah pada sektor industri pangan ^[7], ^[8], seperti pada penggunaan nanopartikel silika (SiO_2) sebagai bahan aditif makanan yang diizinkan. Jumlah maksimum silika yang bisa digunakan di dalam makanan tergantung pada karakteristik nanopartikel silika yang digunakan. Sebagai contoh, silika sintesis telah digunakan pada pemurnian bir dan anggur serta digunakan pada pembuatan pasta agar tetap lembut dan tidak kering. Selain itu, silika juga telah dianggap sebagai bahan yang aman untuk dicampurkan ke dalam komposisi makanan hewan ^[9]. Akan tetapi, beberapa hasil penelitian telah mendokumentasikan bahwa terdapat efek samping dari penggunaan nanopartikel silika dalam bahan makanan ^[10]. Salah satu diantaranya adalah nanopartikel silika yang berukuran dibawah 100 nm memiliki kemungkinan untuk menyebabkan gangguan kehamilan atau sindrom koagulasi sistemik pada tikus. Namun, nanopartikel silika yang luas permukaannya termodifikasi ternyata mampu mengurangi efek sampingnya. Dengan demikian, mempelajari karakteristik nanopartikel silika merupakan pekerjaan yang penting dilakukan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya efek samping ketika dimanfaatkan pada bidang pangan.

Elektroforesis merupakan salah satu metode eksperimen yang telah dimanfaatkan untuk mengkarakterisasi nanopartikel termasuk nanopartikel silika. Telah banyak studi terdahulu yang sudah memanfaatkan metode elektroforesis ini dalam mengkarakterisasi ukuran nanopartikel seperti *quantum dots* ^[11], nanopartikel emas ^[12], dan beberapa nanopartikel logam seperti hematit ^[13], ^[14] dan silika ^[15]. Akan tetapi, metode elektroforesis memiliki keterbatasan antara lain menghabiskan banyak waktu dan membutuhkan biaya yang relatif tinggi untuk mempersiapkan instrumentasinya. Oleh karena itu, tantangan penelitian dengan metode ini meminta suatu desain peralatan dengan memanfaatkan alat-alat yang cukup sederhana, mudah dijangkau, dan menghasilkan data yang ajeg (reliabel). Penelitian ini telah mengajukan metode elektroforesis yang dibantu dengan mikroskop cahaya dengan perbesaran 160 kali untuk mengamati pergerakan elektroforetik nanopartikel silika yang dilarutkan ke dalam air. Beberapa peneliti terdahulu seperti Ardiani, S. ^[16] dan Astuti, D. A. ^[17] telah mengujicoba metode yang sama akan tetapi mereka menerapkannya untuk mengkarakterisasi partikel titania (TiO_2) dan juga bukan partikel yang berukuran nano. Berdasarkan penelusuran tersebut, penerapan metode elektroforesis secara khusus untuk mengkarakterisasi nanopartikel silika masih perlu diberikan perhatian lebih banyak.

Pernyataan kebaruan (*novelty*) dari penelitian dalam artikel ini dapat ditegaskan bahwa penulis menyarankan metode elektroforesis untuk mengkarakterisasi nanopartikel silika yang memiliki banyak kebermanfaatan yang sudah dijelaskan pada paragraf sebelumnya. Kemudian, penulis mengajukan satu pertanyaan penelitian yang akan dijawab pada keseluruhan artikel ini yaitu bagaimana karakteristik muatan nanopartikel silika (SiO_2) melalui metode elektroforesis dengan memvariasi lima kali medan listrik ?

DESKRIPSI SINGKAT TENTANG ELEKTROFORESIS

Elektroforesis adalah teknik pemisahan suatu partikel/ ion atau partikel koloid berdasarkan kemampuan berpindah partikel ion melalui suatu medium konduktif, biasanya berupa larutan bufer, sebagai respon adanya suatu medan listrik ^[18]. Secara teknis, elektroforesis merupakan istilah yang diberikan untuk mengamati gerak partikel yang bermuatan akibat diberikan arus listrik searah atau DC (*Direct Current*). Secara umum, metode elektroforesis diinisiasi bertujuan untuk menentukan muatan dari suatu koloid ^[19].

Metode elektroforesis dapat dimanfaatkan untuk menentukan muatan yang ada pada partikel. Karena partikel ketika dilarutkan menjadi ion atau kovalen polar yang bermuatan maka mereka dapat bergerak dalam medan listrik. Jika ke dalam koloid dimasukkan arus searah melalui elektroda, maka partikel bermuatan positif akan bergerak menuju elektroda negatif dan atau sebaliknya. Secara eksperimen, metode elektroforesis akan mengukur perubahan posisi nanopartikel yang melakukan gerak elektroforesis dalam interval waktu tertentu sehingga data ini bisa menentukan kecepatan gerak partikelnya dalam larutan.

Partikel bermuatan yang bergerak di bawah pengaruh medan listrik akan mendapatkan dua gaya sekaligus yakni gaya elektrostatis (F_e) dan gaya gesek larutan (F_s). Gaya gesek larutan selalu berlawanan arah gerak partikel dan besarnya sebanding dengan kecepatan gerak partikel. Dalam analisis ini, gerak partikel diasumsikan satu dimensi dan tidak ada pengaruh gaya gravitasi vertikal (F_g) yang signifikan. Hal ini disebabkan karena orde gaya gravitasi yang berada pada skala 10^{-16} dan orde kedua gaya lain yang jauh lebih besar daripada itu. Dengan demikian, beberapa penelitian sebelumnya seperti Nuri et al ^[20] dan Perry & Kandlikar ^[21] mungkin juga perlu dikonsultasikan karena penelitian tersebut juga melakukan metode analisis gaya dengan cara yang sama.

Berdasarkan hukum Coulomb, gaya elektrostatis F_e pada partikel q yang berada dalam pengaruh medan listrik E dapat dinyatakan dalam persamaan di bawah ini.

$$F_e = qE \quad (1)$$

Sedangkan, gaya gesekan (gaya Stokes) larutan F_s yang disebabkan oleh viskositas koloid (η) itu sendiri dapat dijelaskan oleh persamaan di bawah ini.

$$F_s = 6\pi\eta Rv \quad (2)$$

Seperti yang sudah ditegaskan sebelumnya, gerak horizontal satu dimensi diasumsikan tidak menerima gaya eksternal lainnya yang mempengaruhi, berdasarkan hukum I Newton jika sistem dalam keadaan setimbang.

$$\Sigma F = 0$$

$$\Sigma F = F_e - F_s = 0$$

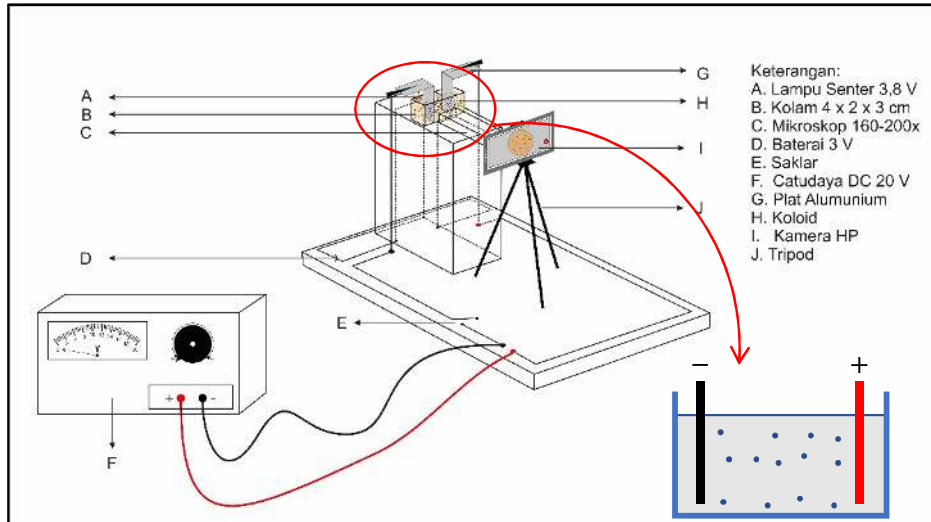
$$qE = 6\pi\eta Rv \quad (3)$$

$$q = \frac{6\pi\eta Rv}{E} \quad (4)$$

dimana η viskositas larutan, R adalah radius partikel dan v adalah kecepatan partikel. Mengingat bahwa, viskositas larutan (η) yang digunakan dalam praktikum ini menggunakan nilai viskositas aquades pada suhu 28 °C sebesar 0,001 Pa.s ^[22]. Pilihan ini ditentukan karena nanopartikel silika yang ditambahkan dalam eksperimen diasumsikan tidak merubah viskositas maupun massa jenis air (aquades) secara signifikan sehingga viskositas nanopartikel masih bisa dianggap sebagai viskositas air.

METODE

Secara skematis, perlengkapan alat dan bahan yang digunakan sebagai metode elektroforesis dalam penelitian ini dapat diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Rangkaian Alat pada Metode Elektroforesis

Nanopartikel silika yang digunakan dalam penelitian ini merupakan nanopartikel standar berbentuk suspensi yang dibeli dari perusahaan *nanoComposix*®, USA. Supplier telah mengkonfirmasi bahwa diameter rata-rata partikel yang diukur melalui *transmission electron microscopy* (TEM) adalah berukuran $99,2 \pm 5,8$ nm. Selanjutnya, nanopartikel silika diambil sebanyak 3 mL yang dilarutkan ke dalam aquades murni 20 mL dan dimasukkan ke dalam kolam yang berada di dalam aparatus (Gambar 1 huruf B).

Selanjutnya, catu daya searah (DC) (Gambar 1 huruf F) dihidupkan dan diatur pada nilai beda potensial awal sebesar 10 volt sebagai batas awal medan listrik. Nilai beda potensial awal 10 volt ditentukan berdasarkan hasil pencarian agar gerak nanopartikel horizontal 1 dimensi sehingga kita bisa mengasumsikan persamaan (4). Nilai tegangan di bawah 10 volt ditemukan masih menyebabkan gerak nanopartikel yang dipengaruhi oleh faktor gerak acak (Brown). Hal ini diindikasikan dari arah gerakan nanopartikel yang tidak bersifat satu dimensi ketika beda potensial masih berada di bawah 10 volt. Padahal, persamaan (4) dapat diterapkan ketika tidak ada pengaruh gerak acak ini. Oleh karena itu, penulis menentukan batas ini untuk memenuhi asumsi yang telah ditetapkan di awal.

Setelah nanopartikel silika sudah bergerak, fokus mikroskop harus diatur sedemikian rupa agar mampu menangkap tampilan gerakan nanopartikel yang terlarut di dalam kolam. Untuk mengamati pergerakan nanopartikel yang tampak di dalam mikroskop, peneliti tidak bisa menjangkaunya secara langsung dikarenakan dimensi nanopartikel silika yang kecil yang mengakibatkan gerakan yang relatif cepat. Oleh karena itu, kami harus mengukur waktu gerakan partikel dengan cara merekam gerakan nanopartikel yang terlihat pada mikroskop dengan menggunakan *smartphone* (Gambar 1 huruf I) dan menyimpan hasil pengamatannya dalam suatu file digital. Langkah-langkah ini selanjutnya dilakukan secara berulang-ulang, pada larutan nanopartikel yang sama, dengan memvariasi beda potensial pada power supply sebesar 12.5 volt; 15 volt; 17.5 volt; dan 20 volt sebagai variasi medan listrik yang diberikan kepada nanopartikel. Kami perlu memastikan bahwa hasil pengamatan yang telah dilakukan merupakan nanopartikel silika dan bukan merupakan gumpalan-gumpalan partikel. Hal ini mengacu pada metode yang pernah dilakukan oleh Nuri et al [20], Li et al [23], Yang et al [24], dan referensi yang paling klasik yaitu Bangham et al [25].

Cara yang dipilih untuk mengukur waktu gerak partikel terinspirasi dari proses pencarian yang tiada hentinya untuk mengukur waktu tempuh yang dilalui oleh nanopartikel silika

mengingat gerakannya yang cepat karena dimensinya sangat kecil. Penelitian ini mengusulkan untuk mengukur waktu yang ditempuh partikel dengan rekaman video yang dihasilkan pada file digital sebelumnya melalui perangkat lunak berbasis *timeline* seperti pada pengolah video Adobe Premiere. Langkah pertama pengukuran ini adalah menentukan posisi awal partikel dalam jangkauan mikroskop, seperti yang tampak pada Gambar 2 dibawah ini. Dua blok hitam panjang yang tampak pada gambar merupakan daerah ukur yang dilewati nanopartikel silika, yang telah ditentukan oleh peneliti dengan cara memberikan goresan pada dinding kaca kolam larutan sejauh 0.5 mm. Kemudian, kami mencatat waktu awal ketika partikel berada pada posisi tersebut (ditunjukkan pada blok hitam sebelah kiri pada Gambar 2) berdasarkan waktu yang tercatat pada Adobe Premier (perhatikan persegi merah pada Gambar 2).



Gambar 2. Penentuan posisi awal gerakan nanopartikel silika

Kemudian kami menentukan posisi akhir partikel tersebut dalam jangkauan mikroskop, seperti yang tampak pada persegi merah yang diberikan pada Gambar 3. Lalu, kami mencatat waktu akhir partikel pada posisi akhir tersebut (pada balok sebelah kanan pada Gambar 3). Akhirnya, kami telah berhasil mengukur waktu yang ditempuh partikel dari posisi awal menuju posisi akhir sehingga dengan menyelisihkan keduanya diperoleh waktu tempuh partikel pada jarak ukur yang diamati.



Gambar 3. Penentuan posisi akhir gerakan nanopartikel silika

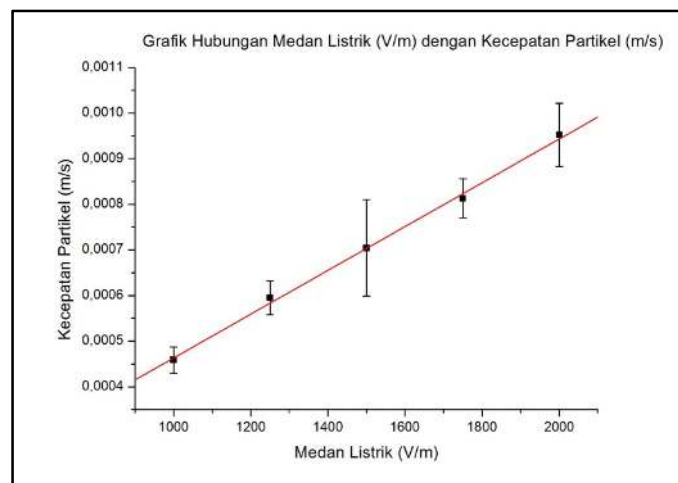
Partikel bergerak pada rentang jarak tertentu yaitu jangkauan mikroskop yang ditunjukkan garis hitam tebal pada penampakan video yang sedang dianalisis pada Gambar 2 dan 3. Dengan cara ini, jarak tempuh partikel yang diamati sudah ditentukan yaitu sebesar 0,5 mm, yang telah dijelaskan pada paragraf di atas. Akhirnya kecepatan (v) disertai dengan

viskositas (η), jari-jari (R), dan medan listrik (E) yang telah ditentukan di awal dapat mengkarakterisasi muatan nanopartikel silika berdasarkan persamaan (4) yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, kami menggunakan metode elektroforesis untuk mengkarakterisasi muatan nanopartikel silika (SiO_2) berdasarkan variasi nilai medan listrik sebanyak lima kali. Gambar 4 menunjukkan perilaku kecepatan nanopartikel silika ketika peubah medan listrik diberikan. Kelima kecepatan nanopartikel pada masing-masing medan listrik memiliki kecenderungan perilaku yang sama yaitu semakin besar medan listrik menyebabkan semakin besar pula kecepatan partikel yang melintas dalam pengaruh medan listrik. Hal ini bisa dijelaskan karena medan listrik menentukan gaya listrik (F_e) yang menyebabkan nanopartikel bergerak. Semakin besar medan listrik, seperti yang telah dijelaskan pada persamaan (1) pada bagian landasan teori, semakin besar pulalah gaya listrik (F_e) yang mempengaruhi ion nanopartikel silika yang bergerak. Apabila gaya listrik (F_e) semakin besar maka kecepatan partikel (v) juga semakin besar. Pada grafik dalam Gambar 4, terlihat bahwa hubungan antara medan listrik (E) dan kecepatan nanopartikel (v) adalah linier. Hubungan linier ini sebagai bukti dari persamaan (3) pada bagian dasar teori. Ardiani ^[16] dan Astuti ^[17] yang mengamati perilaku elektroforetik partikel titania (TiO_2) juga menemukan kecenderungan yang sama bahwa terdapat hubungan yang linear antara medan listrik yang diberikan terhadap kecepatan partikel yang terdapat di dalam larutan koloid.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, terlihat bahwa nanopartikel SiO_2 bergerak ke kanan (lihat Gambar 2 dan 3). Pada pengamatan tersebut sisi kiri video merupakan daerah elektroda positif dan sisi kanan merupakan daerah elektroda negatif. Artinya, partikel bergerak ke kanan sama saja dengan partikel bergerak menuju ke elektroda negatif (katode). Hasil ini menunjukkan bahwa nanopartikel silika yang diamati gerakannya merupakan jenis elektroforesis pada partikel bermuatan positif. Oleh karena itu, elektroforesis nanopartikel silika disebut kataforesis karena partikel yang diamati bermuatan positif.



Gambar 4. Hubungan medan listrik dengan kecepatan partikel

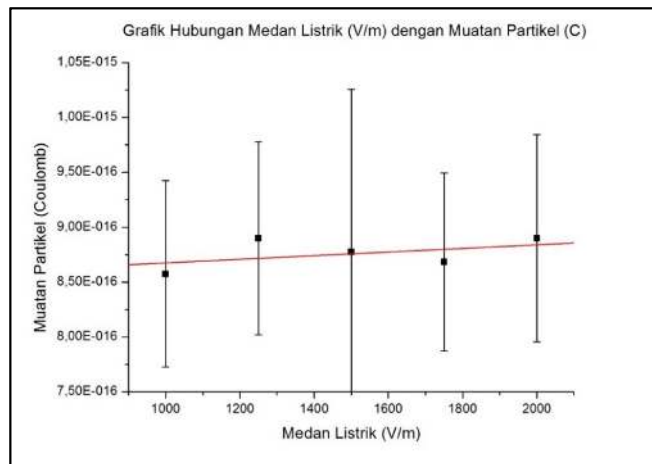
Selanjutnya, muatan listrik yang terukur pada masing-masing medan listrik dapat dilihat hasilnya yang terangkum pada Tabel 1. Secara rata-rata, nilai muatan listrik (q) yang terukur relatif konstan dan tidak dipengaruhi oleh faktor perubahan medan listrik. Hal ini bisa dijelaskan bahwa muatan listrik yang terkandung dalam nanopartikel silika dihasilkan oleh kovalen polar (diistilahkan sebagai berikut karena SiO_2 merupakan ikatan kovalen yang

memiliki beda elektronegativitas < 2) yang terlarut di dalam aquades seperti yang dijelaskan oleh [19] dan [22]. Ketika konsentrasi nanopartikel yang terlarut atau konsentrasi aquades yang digunakan tidak diubah maka tidak terdapat perubahan jumlah ion di dalam bak kolam karena molaritas larutan tetap. Pada akhirnya, perubahan besarnya medan listrik dalam percobaan hanya akan menyebabkan semakin besarnya gaya elektrostatis (F_e) nanopartikel silika berdasarkan persamaan (1) yang telah dijelaskan sebelumnya dan tidak mengubah muatan kovalen polar yang terkandung dalam larutan koloid.

Tabel 1. Hasil karakterisasi muatan nanopartikel silika dengan metode elektroforesis

E (V/m)	ΔE (V/m)	η (Pa.s)	R (m)	ΔR (m)	\bar{v} (m/s)	Δv (m/s)	q (C)	Δq (C)
1000	50	0,001	$4,96 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$4,59 \times 10^{-4}$	$0,28 \times 10^{-4}$	$8,57 \times 10^{-16}$	$0,85 \times 10^{-16}$
1250	63	0,001	$4,96 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$5,95 \times 10^{-4}$	$0,37 \times 10^{-4}$	$8,90 \times 10^{-16}$	$0,88 \times 10^{-16}$
1500	75	0,001	$4,96 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$7,04 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-4}$	$8,77 \times 10^{-16}$	$1,48 \times 10^{-16}$
1750	88	0,001	$4,96 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$8,13 \times 10^{-4}$	$0,25 \times 10^{-4}$	$8,68 \times 10^{-16}$	$0,81 \times 10^{-16}$
2000	100	0,001	$4,96 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$9,52 \times 10^{-4}$	$0,23 \times 10^{-4}$	$8,90 \times 10^{-16}$	$0,94 \times 10^{-16}$

Kecenderungan yang ditemukan dapat diperjelas jika kita menyaksikan Gambar 5 yang menunjukkan plot grafik hubungan antara medan listrik dengan muatan listrik dari nanopartikel silika. Berdasarkan grafik tersebut, kita dapat melihat bahwa dari kelima medan listrik yang dicobakan dalam eksperimen selalu menghasilkan kecenderungan besar muatan listrik yang tetap konstan. Artinya, medan listrik (E) yang berubah sebanyak lima kali tidak mempengaruhi besar muatan nanopartikel silika yang terlarut di dalam air.



Gambar 5. Hubungan medan listrik dengan muatan nanopartikel silika

Sampai bagian ini, kita sudah berhasil untuk menjawab pertanyaan penelitian yang diajukan pada bagian pendahuluan. Muatan nanopartikel silika yang terlarut di dalam larutan air memiliki karakteristik dimana besarnya konstan tanpa dipengaruhi oleh perubahan medan listrik yang diberikan selama percobaan (Gambar 5). Dua gaya yang dipertimbangkan dalam metode elektroforesis yaitu gaya elektrostatis (F_e) dan gaya viskositas (F_s) menghasilkan nanopartikel silika bisa bergerak satu dimensi dalam medan listrik yang diberikan secara linear. Dengan kata lain, perilaku kecepatan nanopartikel silika menunjukkan perilaku yang linear terhadap perubahan medan listrik yang semakin besar.

Akhirnya, penelitian ini telah menerapkan salah satu metode pemisahan campuran yaitu elektroforesis untuk mempelajari salah satu karakteristik nanopartikel silika yaitu

muatannya dalam beberapa variasi medan listrik. Akan tetapi, peneliti mengakui bahwa beberapa pilihan yang telah peneliti putuskan secara metodologi mungkin bisa memberikan simpangan terhadap hasil yang seharusnya diperoleh. Misalnya, pada dua gaya yang ditinjau dalam gerakan nanopartikel silika dalam penelitian ini. Kerumitan gaya yang bekerja dalam gerakan nanopartikel seperti efek gerak Brown, gaya gravitasi, atau gaya lain mungkin bisa mempengaruhi terhadap analisis gerakan secara dinamika. Beberapa hasil penelitian sebelumnya seperti Barisik, et al ^[26] mungkin perlu dikonsultasikan untuk memberikan model muatan permukaan nanopartikel yang lebih ekstensif. Selain itu, penelitian Barisik, et al ^[26] juga telah mempelajari ternyata terdapat pengaruh pelarut yang digunakan dalam percobaan dan ukuran nanopartikel silika yang digunakan terhadap muatan yang dihasilkan dalam ion nanopartikel silika yang terlarut. Dua variabel ini tidak diselidiki dalam penelitian ini berdasarkan tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Penulis merasa bahwa kedua masalah ini bisa menjadi sisa pekerjaan pada topik metode elektroforesis nanopartikel silika untuk peneliti selanjutnya yang bisa diusahakan. Selain itu, pilihan penulis untuk mengukur pergerakan nanopartikel silika dalam larutan dengan menggunakan rekaman video yang kemudian dianalisis melalui software mungkin bisa menyebabkan gangguan akurasi pengukuran waktu. Hal ini disebabkan karena terdapat dua kali pengamatan yang seharusnya dilakukan secara langsung melalui pengamatan pada bantuan mikroskop cahaya. Keterbatasan ini mungkin akan menambah ketidakpastian hasil pengukuran waktu tempuh partikel meskipun penelitian terbaru oleh Nuri et al ^[20] juga masih melakukan metode pengukuran yang sama dengan cara yang dilakukan dalam penelitian ini.

KESIMPULAN

Metode elektroforesis telah diterapkan dalam penelitian ini untuk mengkarakterisasi muatan nanopartikel silika yang bermuatan positif sehingga termasuk ke dalam kataforesis. Muatan positif yang terukur berada pada rentang 8,57 ~ 8,90 pada orde mikro Coulomb dan berperilaku konstan dalam pengaruh medan listrik yang berubah. Meskipun, masih ditemukan keterbatasan metodologi yang dimiliki perangkat yang kami gunakan dalam penelitian ini, peneliti bisa menyarankan bahwa elektroforesis merupakan metode eksperimen yang cukup menjanjikan dalam mempelajari sifat-sifat nanopartikel yang lain pada penelitian-penelitian selanjutnya yang mungkin bisa dilaksanakan.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Zougagh, M. & Ríos, Á. 2009. Micro-electromechanical sensors in the analytical field. *Analyst*, Vol 134, No. 7, Hal. 1274-1290.
- 2 Amalia, R.F., Purwaningsih, H., Susanti, D. & Pratiwi, V.M., 2020. Analisis Pengaruh Rasio Pelarut Etanol Terhadap Kinerja Nanopartikel Silika Mesopori dari Sekam Padi sebagai Material Pengantar Obat. *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 9, No. 1, Hal. F66-F71.
- 3 Wahyudi, B. & Muljani, S., 2019. Pupuk Multinutrient Berbasis Silika Dari Limbah Geothermal Sludge Dengan Proses Asidifikasi. *Jurnal Teknik Kimia*, Vol. 14, No. 1, Hal. 22-27.
- 4 Ketii, Y., Eko, S., Diah, A.A., Yoyon, W. & Dita, W., 2015. Pengaruh kombinasi silika dan kitosan berbasis nanoteknologi sebagai bahan dasar pembuatan pupuk nano slow release terhadap penyerapan unsur hara oleh tanamandalam meningkatkan hasil pertanian di indonesia. *Artik. Ilm. Teknol. Kim. dan Ind.*
- 5 Kah, M., Machinski, P., Koerner, P., Tiede, K., Grillo, R., Fraceto, L.F. & Hofmann, T., 2014. Analysing the fate of nanopesticides in soil and the applicability of regulatory

- protocols using a polymer-based nanoformulation of atrazine. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 21, No. 20, Hal. 11699-11707.
- 6 Zougagh, M., Salghi, R., Dhair, S. & Rios, A., 2011. Nanoparticle-based assay for the detection of virgin argan oil adulteration and its rapid quality evaluation. *Analytical and bioanalytical chemistry*, Vol. 399, No. 7, Hal. 2395-2405.
 - 7 Duncan, T.V., 2011. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of colloid and interface science*, Vol. 363, No. 1, Hal. 1-24.
 - 8 Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M. & Cummins, E., 2012. Nanotechnologies in the food industry—Recent developments, risks and regulation. *Trends in food science & technology*, Vol. 24, No. 1, Hal. 30-46.
 - 9 Athinarayanan, J., Periasamy, V.S., Alsaif, M.A., Al-Warthan, A.A. & Alshatwi, A.A., 2014. Presence of nanosilica (E551) in commercial food products: TNF-mediated oxidative stress and altered cell cycle progression in human lung fibroblast cells. *Cell biology and toxicology*, Vol. 30, No. 2, Hal. 89-100.
 - 10 Yamashita, K., Yoshioka, Y., Higashisaka, K., Mimura, K., Morishita, Y., Nozaki, M., Yoshida, T., Ogura, T., Nabeshi, H., Nagano, K. & Abe, Y., 2011. Silica and titanium dioxide nanoparticles cause pregnancy complications in mice. *Nature nanotechnology*, Vol. 6, No. 5, Hal. 321-328.
 - 11 Pereira, M., Lai, E.P. & Hollebone, B., 2007. Characterization of quantum dots using capillary zone electrophoresis. *Electrophoresis*, Vol. 28, No. 16, Hal. 2874-2881.
 - 12 Li, B.Y., Hu, Y., Liang, Y.Z., Xie, P.S. & Du, Y.P., 2004. Quality evaluation of fingerprints of herbal medicine with chromatographic data. *Analytica Chimica Acta*, Vol. 514, No. 1, Hal. 69-77.
 - 13 Vanifatova, N.G., Spivakov, B.Y., Mattusch, J., Franck, U. & Wennrich, R., 2005. Investigation of iron oxide nanoparticles by capillary zone electrophoresis. *Talanta*, Vol. 66, No.3, Hal. 605-610.
 - 14 Ducatte, G.R., Ballou, N.E., Quang, C. & Petersen, S.L., 1996. Separation and characterization of oxide particles by capillary electrophoresis. *Journal of Microcolumn Separations*, Vol. 8, No. 6, Hal. 403-412.
 - 15 Vanifatova, N.G., Spivakov, B.Y., Mattusch, J. & Wennrich, R., 2003. Size separation of silica nanospheres by means of capillary zone electrophoresis. *Talanta*, Vol. 59, No. 2, Hal. 345-353.
 - 16 S. Ardiani, 2013. Menentukan Muatan Partikel Titania dalam Larutan KCl dengan Teknik Elektrofisis. *J. Pendidik. Fis. UNY*,
 - 17 D. P. Astuti, 2013. Mobilitas Partikel Titania (TiO₂) dengan Variasi Tegangan dan Variasi Konsentrasi Larutan KCl Menggunakan Metode Elektrofisis,” *J. Pendidik. Fis. UNY*.
 - 18 Harvey, D., 2000. *Modern analytical chemistry* (Vol. 1). New York: McGraw-Hill.
 - 19 Patnaik, P., 2004. *Dean’s analytical chemistry handbook*. McGraw-Hill Education.
 - 20 Nuri, N., Bijanto, B., Proborini, E. & Rachmawanto, E.H., 2020. Penentuan Jenis Muatan Sel Darah Merah melalui Metode Dielektroporesis. *Variabel*, Vol. 3, No. 1, Hal. 5-11.

- 21 Perry, J.L. & Kandlikar, S.G., 2006, January. Investigation of fouling in microchannels. In *The 4th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, Vol. 47608, Hal. 837-845.
- 22 Pavlovic, M., 2015. Bioengineering. *A Conceptual Approach*.
- 23 Li, L., Yu, H., Liu, D. & You, T., 2013. A novel dark-field microscopy technique coupled with capillary electrophoresis for visual analysis of single nanoparticles. *Analyst*, Vol. 138, No. 13, Hal. 3705-3710.
- 24 Yang, C., Dabros, T., Li, D., Czarnecki, J. & Masliyah, J.H., 2001. Measurement of the zeta potential of gas bubbles in aqueous solutions by microelectrophoresis method. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 243, No. 1, Hal. 128-135.
- 25 Bangham, A.D., Heard, D.H., Flemans, R. & Seaman, G.V.F., 1958. An apparatus for microelectrophoresis of small particles. *Nature*, Vol. 182, No. 4636, Hal. 642-644.
- 26 Barisik, M., Atalay, S., Beskok, A. & Qian, S., 2014. Size dependent surface charge properties of silica nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 118, No. 4, Hal. 1836-1842.