

DOI: doi.org/10.21009/03.1101.FA09

ULASAN UMUM: PENERAPAN DIELEKTROFORESIS KONVENSIONAL SEBAGAI METODE IDENTIFIKASI BAKTERI MONOCOCCUS

Muhammad Ridho Pratama^{a)}, Delila Septiani Dwi Putri^{b)}, Fadli Handoyo^{c)},
Umiatin^{d)}

*Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Jl.
Rawamangun Muka No. 01, Rawamangun 13220, Indonesia*

Email: ^{a)}ridhopratama221@gmail, ^{b)}delilaseptiani17@gmail.com, ^{c)}fadlihandoyo9@gmail.com,
^{d)}umiatin@unj.ac.id

Abstrak

Ilmu Biosensor telah mendorong adanya perkembangan dalam bidang biofisika. Hal ini ditandai dengan adanya metode penentuan sifat dielektrik dari sampel biologi dengan menggunakan gaya Dielektroforesis. Dielektroforesis (DEP) merupakan metode yang menitikberatkan interaksi pada partikel dielektrik dalam medan listrik tak seragam. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam proses analisis sel yang muatannya cenderung bersifat dielektrik. Setiap sel memiliki ciri khas melalui permitivitas bahannya, dimana parameter tersebutlah yang menjadi kunci dalam identifikasi sel dengan metode DEP. Identifikasi ini membutuhkan data permitivitas yang akan menjadi identitas sel tersebut. Sehingga, pustaka permitivitas sel perlu dikaji terlebih dahulu dengan mengkarantina sel murni dan mengamati laju terminal sel dalam medium tertentu. Manuskrip ini secara umum mengulas kajian mengenai identifikasi permitivitas yang menjadi ciri khas dari setiap sel. Adapun jenis sel yang ditinjau adalah sel bakteri *monococcus*. Kajian ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi para peneliti untuk memanfaatkan teknik DEP dalam ilmu biosensor. Dari ulasan kajian tersebut disimpulkan bahwa dielektroforesis (DEP) dapat digunakan sebagai metode identifikasi sel bakteri *monococcus* dengan menganalisis permitivitas bahan dan medium yang digunakan, hal ini disebabkan karena setiap sel memiliki spektrum frekuensi karakteristiknya sendiri.

Kata-kata kunci: dielektroforesis, dielektrik, permitivitas, bakteri *monococcus*, medan listrik

Abstract

Biosensor science has driven developments in the field of biophysics. This is indicated by the dielectric properties of biological samples using the dielectrophoresis force. Dielectrophoresis (DEP) is a method that focuses on the interactions of dielectric particles in a non-uniform electric field. Therefore, this method is widely used in the analysis of cells whose charges tend to be dielectric. Each cell has its own characteristics through the permittivity of the material, where these parameters are the key in finding cells using the DEP method. This identification requires permittivity data that will be the identity of the cell. Thus, the cell permittivity library needs to be studied first by quarantining the cells first and observing the cell terminal rates in certain media. This manuscript generally reviews the study of permission to be a characteristic of each cell. The type of cell being reviewed is a monococcal bacterial cell. This study is expected to be a reference for researchers to utilize the DEP technique in biosensors. From this review, it is concluded that dielectrophoresis (DEP) can be used as a method of identification monococcal bacterial cells by analyzing the permittivity of the material and medium used, this is because each cell has its own characteristic frequency spectrum.

Keywords: dielectrophoresis, dielectric, permittivity, monococcal bacteria, electric field

PENDAHULUAN

Dalam sudut pandang mikroskopis, elektromagnetisme yang merupakan suatu bentuk hasil dari hubungan antara listrik dan gaya magnetik mempunyai peran penting di dalamnya. Elektromagnetisme dihasilkan ketika aliran listrik mengalir melewati konduktor sederhana, elektron yang bergerak berhubungan dalam medan magnet dan medan magnet yang bergerak dapat menghasilkan arus [1]. Lantaran elektromagnetisme dapat mendeskripsikan bagaimana gerak partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik E. Efek medan listrik E terhadap gerak partikel bermuatan memiliki aplikasi dalam perancangan jenis muatan partikel yang memiliki energi. Muatan partikel tersebut mempengaruhi *device* partikel yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, seperti fisika, astrofisika, geofisika, plasma biologi, bioteknologi dan lain sebagainya [2].

Pemisahan mikropartikel seperti biopartikel sangat penting dalam perkembangan bioteknologi [3]. Selain dalam bidang bioteknologi, analisis mikropartikel seperti biopartikel ini juga telah banyak diteliti dan dikembangkan dalam bidang biosensor. Pasalnya, biosensor merupakan ilmu yang digunakan untuk mendeteksi salah satu komponen biologis [4]. Dalam perkembangannya, pemisahan biopartikel ini memerlukan metode yang digunakan untuk mendeteksi mikroba. Metode atau alat yang telah digunakan antara lain, *Bactometer*, *Batrac*, teknologi DNA, *Biochemical*, DEFT, dsb. Namun, metode-metode tersebut masih memiliki kekurangan dalam melakukan pendeteksian mikroba. Mikroba perlu dikembangkan terlebih dahulu, sehingga akan memerlukan waktu yang cukup lama. Selain itu, suhu juga sangat mempengaruhi proses ini dan tidak semua jenis mikroba dapat terdeteksi [5]. Karena ukurannya yang sangat kecil, maka salah satu metode alternatif yang tepat untuk mendeteksi biopartikel (mikroba) yaitu dengan memanfaatkan gaya dielektroforesis. Biopartikel mampu digerakkan dengan medan listrik yang timbul akibat adanya medan listrik yang tidak homogen. Partikel yang bermuatan listrik mampu diseleksi dengan gaya elektroforesis, sedangkan untuk partikel bermuatan netral dapat dengan mudah digerakkan dengan gaya dielektroforesis [3].

Dielektroforesis pertama kali dikenalkan oleh Pohl pada tahun 1951 dan dapat didefinisikan sebagai gerak dari partikel yang terpolarisasi dalam medan listrik tak seragam. Gaya dielektroforesis hanya dapat terlihat pada partikel yang berada dalam medan listrik tak seragam. Proses dielektroforesis dapat digunakan untuk manipulasi, transfer maupun pemisahan berbagai jenis partikel yang berbeda. Telah dilakukan beberapa penelitian mengenai aplikasi dielektroforesis, seperti untuk pengembangan teknologi DEPArray (*Menarini Silicon Biosystem*) [6], sebagai metode dalam penerapan teknologi di bidang medis [7], metode pemisahan zarah dalam buah pinggang tiruan [8], menentukan jenis sel darah merah [2].

Dengan memanfaatkan salah satu kegunaan yakni pemisahan jenis partikel yang berbeda, dielektroforesis dapat digunakan untuk menganalisis sifat fisis biopartikel, dalam hal ini yaitu bakteri dalam suatu medium. Bakteri merupakan biopartikel yang dapat dibedakan berdasarkan permitivitas dan konduktivitas dari membran sel dan sitoplasmanya [9]. Sehingga, sifat fisis yang dimaksud adalah permitivitas dan konduktivitas bakteri terkait, sebab dua parameter tersebut akan menjadi tolak ukur dalam menentukan jenis bakteri dengan metode dielektroforesis. Dengan begitu diharapkan hal tersebut dapat menambahkan pustaka mengenai permitivitas sel bakteri sehingga dapat menganalisis atau mengidentifikasi suatu jenis bakteri dengan menggunakan metode dielektroforesis.

METODOLOGI

Kajian ini merupakan ulasan umum mengenai pemanfaatan dielektroforesis yang digunakan sebagai metode identifikasi sel bakteri yang telah dipublikasikan di berbagai jurnal ilmiah nasional dan internasional. Kajian ini diawali dengan studi literatur dengan menggunakan kata kunci sebagai berikut: dielektroforesis, dielektrik, permitivitas, bakteri *monococcus*, medan listrik. Adapun jumlah literatur yang dikaji yaitu sebanyak 56 yang diterbitkan antara tahun 2010-2022. Artikel penelitian yang dikaji meliputi riset dan pengembangan kajian dalam bidang dielektroforesis dan penerapannya.

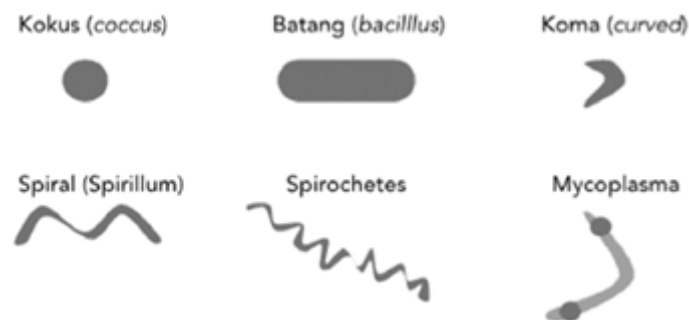
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan Dielektrik

Dielektrik merupakan suatu bahan yang memiliki daya hantar arus yang sangat kecil atau bahkan tidak ada. Bahan dielektrik tidak mempunyai elektron konduksi yang bebas bergerak di seluruh bahan oleh pengaruh medan listrik. Medan listrik tidak akan menyebabkan pergerakan muatan dalam bahan dielektrik. Sifat inilah yang menyebabkan bahan dielektrik itu merupakan isolator yang baik. Dalam bahan dielektrik semua elektron terikat dengan kuat pada intinya sehingga [10]. Dielektrik dalam medan listrik adalah susunan dipol mikroskopis dalam ruang hampa, terdiri dari muatan positif dan negatif tanpa sambungan pusat. Muatan ditahan di tempatnya oleh gaya interatomik dan intramolekul dan hanya dapat bergeser sedikit dengan adanya medan eksternal. Muatan ini adalah muatan yang digabungkan, berlawanan dengan muatan yang dapat diperlakukan sebagai sumber medan elektrostatik [11]. Dalam bahan dielektrik, konstanta dielektrik merupakan salah satu karakteristik bahan tersebut. Konstanta dielektrik mempresentasikan rapat fluks elektrostatik dalam suatu bahan jika diberi beda potensial [12].

Bakteri

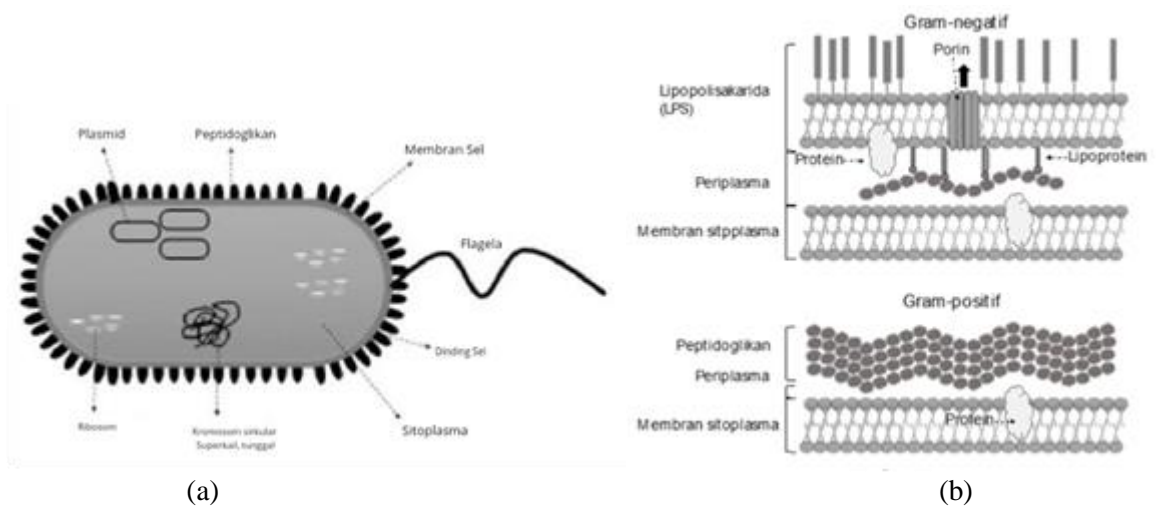
Bakteri merupakan salah satu golongan mikroorganisme prokariotik (bersel tunggal) yang hidup berkoloni dan tidak mempunyai selubung inti namun mampu hidup dimana saja [13]. Ukuran sel bakteri, umumnya dinyatakan dalam satuan mikrometer (μm) dan cukup bervariasi. Ukuran diameter sel bakteri adalah $0,2 - 2,0 \mu\text{m}$, dan panjang selnya berkisar antara $2 - 8 \mu\text{m}$. Bentuk dasar sel bakteri dikelompokkan menjadi tiga, yaitu: sel bakteri berbentuk bola (*coccus*), batang (*basil*), dan spiral. Bentuk sel bakteri *coccus*, membentuk penataan sel sebagai berikut: diplobasil, tetrad, sarcina, streptokokus, stafilkokus. Bentuk sel bakteri basil membentuk penataan sel sebagai berikut: diplokokus, streptobasil [14]. Sedangkan sel bakteri yang berbentuk spiral, penataan selnya biasanya sendiri-sendiri. Selain ketiga bentuk dasar tersebut, jenis bakteri berdasarkan bentuknya juga mencakup: koma (menyerupai tanda koma dengan batang melengkung), spirochetes (dari *speira* yang berarti kumparan dan *chaite* yang berarti rambut), Actinomycetes (berbentuk seperti filamen dan berserabut serta bercabang), Mycoplasma (berbentuk boval atau bulat atau filamen saling bertautan) [15]. Berdasarkan struktur dinding sel, maka bakteri dikelompokkan ke dalam bakteri Gram negatif dan bakteri Gram positif. Selain struktur dinding sel, sifat lain yang membedakan bakteri Gram negatif dengan bakteri Gram positif adalah: kerentanan terhadap penisilin, gangguan fisik, dan pesyaratan nutrisi [14].



GAMBAR 1. Bentuk Sel Bakteri

Bakteri yang merupakan salah satu jenis sel prokariotik tersusun atas beberapa komponen, yakni Dinding sel, berfungsi untuk mempertahankan bentuk sel dan melindungi dari lisis osmotik. Dinding sel tidak dapat dilihat dengan mikroskop cahaya langsung; Struktur membran luar hanya terdapat pada bakteri Gram-negatif yang berfungsi sebagai perlindungan terhadap kondisi di luar sel dan perubahan lingkungan. Membran ini tersusun dari lipopolisakarida (LPS) dan fosfolipid; Membran sitoplasma, terdapat tepat di bawah lapisan dinding sel, ditemukan pada bakteri Gram - positif dan negatif.

Berfungsi sebagai membran semi-permeabel yang mengendalikan masuk dan keluarnya aliran metabolit dari protoplasma; Ribosom, merupakan kompleks makromolekul asam ribonukleat (RNA) dan protein yang berperan dalam pusat sintesis protein seluler; Mesosom merupakan tempat penting dari dari enzim yang berkerja pada proses respirasi sel serta berperan dalam reproduksi sel. Mesosom digunakan untuk mengatur pembelahan sel dan tempat pertukaran gas; Inklusi sitoplasma (Granula volutin), merupakan agregat polimer yang dihasilkan dari kelebihan nutrisi di lingkungan dan berperan sebagai cadangan penyimpanan fosfat, dan granula sulfur; Kapsul, merupakan lapisan paling luar dari bakteri (ekstra seluler) yang mengelilingi sel; Flagela, merupakan protein berbentuk rambut panjang seperti filamen spiral (heliks) dengan panjang dan diameter yang sama; Pili, merupakan faktor virulensi penting yang berfungsi untuk mengikatkan sel ke semang, transfer DNA, pembentukan biofilm, pemisahan sel dan motilitas [15]; Plasmid, mengandung gen-gen tertentu, misalnya gen patogen dan gen kebal antibiotic, berbentuk sirkuler dan terletak di luar DNA kromosom. Plasmid mampu memperbanyak diri, dalam satu sel bakteri bisa terbentuk kurang lebih 10-20 [16]; Sitoplasma merupakan sistem heterogen yang mengandung organel intraseluler, protein, asam nukleat, dan sebagainya. Dengan demikian, sifat listriknnya tidak konstan dan mungkin bergantung pada frekuensi. Jika sel mikroba dipengaruhi oleh medan listrik bolak-balik, maka muatan listrik muncul pada antarmuka antara struktur seluler [17].



GAMBAR 2. (a) Struktur sel bakteri (Prokariotik), (b) Skema membran sel gram-negatif dan gram-positif.

Dengan menganggap sel sebagai bola konduksi sitoplasma yang dikelilingi oleh membran isolasi. Membran sel dan dinding sel dapat dimodelkan menurut resistansinya ($R_{cell\ wall}$, persamaan (1)), kapasitansinya ($C_{cell\ wall}$, persamaan (2)), dan impedansinya ($Z_{cell\ wall}$, persamaan (3)). Sedangkan sitoplasma dimodelkan dengan cara yang sama dan direpresentasikan dalam persamaan (4)–(5) [18].

$$R_{cell-wall} = \left(\frac{k}{\sigma_{cell-wall}} \right) \left(\frac{d}{r} \right) \tag{1}$$

$$C_{cell-wall} = \left(\frac{\epsilon_{cell-wall}}{k} \right) \left(\frac{r}{d} \right) \tag{2}$$

$$Z_{cell-wall} = \left(\frac{kd}{j\omega\epsilon_{cell-wall} + \sigma_{cell-wall}} \right) \tag{3}$$

$$R_{cytoplasm} = \left(\frac{k}{\sigma_{cytoplasm}} \right) \tag{4}$$

$$C_{cytoplasm} = \left(\frac{\epsilon_{cytoplasm}}{k} \right) \quad (5)$$

di mana k adalah konstanta sel, d adalah ketebalan dinding sel, r adalah jari-jari sel, R adalah resistansi, C adalah kapasitansi, s adalah konduktivitas, dan e adalah permitivitas.

Bakteri Monococcus Sebagai Bahan Dielektrik

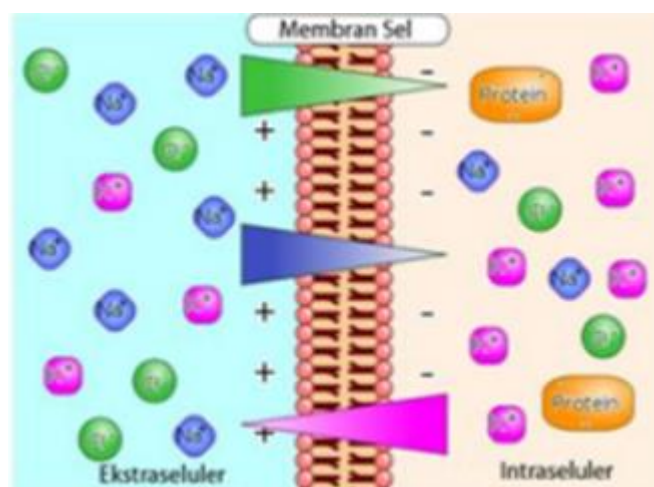
Bakteri *coccus* adalah bakteri dengan bentuk sel bulat seperti bola ataupun elips dengan ukuran diameter antara 0,5 – 1 μ m [19]. Bakteri berjenis *coccus* ini dapat ditemui pada sejumlah bakteri, seperti *Chlorococcus*, *Nitrococcus*, *Streptococcus Lactis*, *Streptococcus Thermophilus*, *Staphylococcus Aureus*, *Streptococcus Pneumoniae*, dan lain sebagainya [20]. Secara alamiah setiap jenis mikroorganisme (bakteri, virus, atau fungi) memiliki sifat kelistrikan, kemagnetan, dan frekuensi diri. Jika mikroorganisme dikenai medan listrik AC maka di dalam mikroorganisme akan terbentuk dipol listrik induksi [21].

Bakteri merupakan biopartikel yang dapat dibedakan berdasarkan permitivitas dan konduktivitas dari membran sel dan sitoplasmanya [9]. Setiap bakteri memiliki membrane sel yang berperan sebagai kapasitor bola yang terdiri dari dua keping konduktor. Membran sel yang merupakan salah satu komponen penyusun bakteri merupakan batas antara sel dengan lingkungannya dimana pada bagian ekstraseluler dan intraseluler membran terdapat cairan berisi ion-ion dan nutrisi yang diperlukan untuk kelangsungan hidup sel. Struktur membran terdiri dari dua lapis lipid (lipid bilayer) dan memiliki permeabilitas tertentu sehingga tidak semua molekul dapat melalui membran sel. Membran sel terdapat kanal ion yang berfungsi sebagai pintu gerbang masuk dan keluarnya cairan sehingga menyebabkan terciptanya lalu lintas membran. Lalu lintas membran akan membuat perbedaan konsentrasi ion sehingga menimbulkan beda potensial pada membran. Beda potensial pada membran tersebut menyebabkan muatan-muatan di sekitar membran bergerak dan berpindah sehingga menghasilkan arus listrik [22].

Dua keping konduktor dalam membran sel masing-masing bermuatan positif pada bagian luar (ekstraseluler) dan bermuatan negatif pada bagian dalam (intraseluler) pada luasan tertentu yang dipisahkan oleh bahan dielektrik (lipid bilayer) dengan ketebalan tertentu. Dalam lipid bilayer, kehadiran medan listrik E menyebabkan muatan - muatan yang berada pada daerah luar dan dalam membran sedikit terpisah sehingga menimbulkan momen dipol listrik p .

$$p = qh \quad (6)$$

Dimana q adalah muatan dan h adalah jarak antar muatan.



GAMBAR 3. Lalu lintas membrane sel

Pemisahan muatan dalam membran menciptakan medan listrik internal yang berarah dari keping positif menuju keping negatif. Banyaknya dipol listrik sepanjang arah medan, membuat membran menjadi terpolarisasi. Dalam sebuah medium dielektrik, polarisasi yang terjadi adalah sejajar dengan medan listrik sehingga mengalami perpindahan medan listrik [22].

Pemberian medan listrik E pada bakteri menyebabkan elektron-elektron pada bakteri mengalami gaya yang arahnya berlawanan dengan arah medan E . Medan listrik akan menyebabkan posisi muatan positif dan negatif bergeser atau terpolarisasi. Akan tetapi, pada umumnya dengan menghilangkan medan listrik, maka posisi atom atau molekul akan kembali ke keadaan normalnya atau reversible. Setiap molekul yang terpolarisasi akan membangkitkan medannya sendiri. Sehingga, jika diambil pendekatan bahwa molekul berbentuk bola dengan jari-jari R sama dengan setengah jarak muatan dalam dipole, maka kuat medan internal memenuhi persamaan:

$$E_{\text{int}} = E + b \frac{P}{\epsilon_0} \quad (7)$$

Persamaan (7) dikenal sebagai *Lorentz relation*. p_{total} merupakan momen dipol molekul dalam dielektrik isotropik terpolarisasi [23]. Pada persamaan (7), E merupakan medan yang disebabkan oleh

muatan bebas pada elektroda, sedangkan $b \frac{P}{\epsilon_0}$ merupakan medan yang disebabkan oleh muatan permukaan rongga bola dalam hal ini bakteri *monococcus*. Diketahui besarnya medan listrik pada molekul akibat muatan permukaan adalah:

$$E_z = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^\pi \frac{-P \cos \theta}{a^2} dS \quad (8)$$

Dimana dS adalah elemen permukaan bola, oleh karena itu,

$$E_z = \frac{P}{2\epsilon_0} \int_0^\pi \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{P}{3\epsilon_0} \quad (9)$$

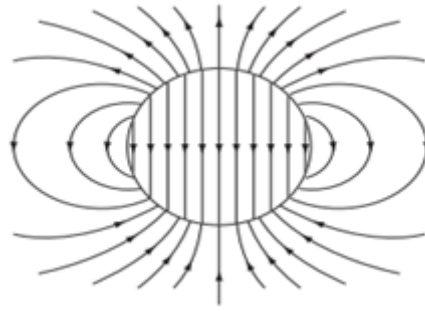
Sehingga dapat dituliskan kembali bahwa besar kuat medan internal yaitu, [24].

$$E_{\text{int}} = E + \frac{P}{3\epsilon_0} \quad (10)$$

Dengan demikian bilamana kuat medan lokal tersebut terjadi pada membran sel bakteri, maka akan meningkatkan tegangan transmembran [23].

Medan Listrik pada Benda Dielektrik Berbentuk Bola

Benda yang bermuatan listrik di setiap titiknya mempunyai kuat medan listrik. Medan listrik di sekitar bahan ini mengakibatkan atom-atom pada bahan membentuk momen-momen dipol listrik [25]. Jika dielektrik ditempatkan pada medan listrik, maka bergantung pada molekul-molekul yang terdapat pada dielektrik. Jika molekul-molekul dalam dielektrik bersifat polar, maka dielektrik tersebut memiliki momen dipol listrik permanen. Jika molekul-molekul dielektrik bersifat non polar, maka dielektrik tersebut tidak mempunyai momen dipol listrik permanen. Namun, dalam pengaruh suatu medan listrik luar molekul-molekul dielektrik menghasilkan suatu pemisahan muatan dan suatu momen dipol listrik yang terinduksi [26]. Hal tersebut mengakibatkan terciptanya pengutuban dielektrik. Oleh karena pengutuban dielektrik, muatan positif bergerak menuju kutub negatif medan listrik, sedang muatan negatif bergerak pada arah berlawanan (yaitu menuju kutub positif medan listrik). Hal ini menimbulkan medan listrik internal (di dalam bahan dielektrik) yang menyebabkan jumlah keseluruhan medan listrik yang melingkupi bahan dielektrik menurun [27].



GAMBAR 4. Bola dielektrik dalam medan listrik

Jika diterapkan medan listrik di bidang kristal, momen dipol makroskopik muncul dan dimungkinkan untuk menentukan kerapatan polarisasi \vec{P} . Jika medan listrik diterapkan secara ortogonal ke kristal 2D, tidak ada polarisasi makroskopik yang dapat dibuat. Memang untuk memiliki polarisasi makroskopik, dipol mikroskopis perlu disejajarkan, untuk menghasilkan pemisahan muatan secara makroskopik.

Medan listrik mendistorsi distribusi muatan dalam kristal, menghasilkan dipol listrik, berorientasi sebagai \vec{E}_i , di lokasi kisi. Sebuah kerapatan polarisasi permukaan sebanding dengan total medan makroskopik \vec{E} dalam kristal dapat muncul.

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (11)$$

Dimana ϵ_0 adalah permitivitas, χ adalah suseptibilitas permukaan listrik dan,

$$\vec{E} = \vec{E}_i + \vec{E}_p \quad (12)$$

Dimana \vec{E}_p adalah medan listrik yang dihasilkan oleh materi polarisasi itu sendiri. Kerapatan polarisasi juga dapat dihitung dari definisinya.

$$\vec{P} = N\vec{p} \quad (13)$$

Di mana N adalah kerapatan permukaan dipol,

$$\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_{loc} \quad (14)$$

Persamaan (14) adalah momen dipol induksi pada setiap titik retikuler, dan \vec{E}_{loc} adalah medan yang bekerja pada satu dipol [28].

Polarisasi Bahan Dielektrik

Polarisasi bahan merupakan penyearahan muatan positif dan negatif dari posisi kesetimbangan yang disebabkan oleh penerapan medan listrik eksternal E_0 di atas bahan dielektrik. Jarak yang dibentuk oleh rektifikasi ini sangat kecil (kurang dari diameter atom), dan rektifikasi ini membentuk sejumlah besar dipol dengan momen dipol dalam arah medan [29]. Polarisasi dielektrik biasanya dihasilkan dari medan listrik yang melapisi dipol atom atau molekul. Untuk banyak zat, polarisasi sebanding dengan medan dengan syarat E tidak terlalu kuat.

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \quad (15)$$

Dengan E adalah total medan bidang. Hal ini kemungkinan disebabkan karena sebagian muatan merupakan muatan bebas dan sebagian lagi muatan karena polarisasi itu sendiri. Jika sepotong dielektrik diletakkan dalam medan eksternal E_0 , nilai P tidak dapat dihitung langsung dari persamaan (15), medan eksternal akan mempolarisasi material dan polarisasi ini akan menghasilkan medannya sendiri yang kemudian berkontribusi pada medan total dan pada gilirannya akan mengubah polarisasi [30]. Sedangkan χ_e merupakan konstanta proporsionalitas atau disebut juga suseptibilitas listrik dari

medium, yakni salah satu sifat terpenting dari bahan yang mengandung elektron yang sangat spesifik, seperti bahan non-kristal dan bahan optik lainnya, yang merupakan bahan isolasi. Suseptibilitas listrik dapat mengindikasikan tingkat kemampuan material untuk terpolarisasi terhadap bidang elektrik [31]. Nilai dari ini tergantung pada struktur mikroskopis zat yang bersangkutan dan juga pada kondisi eksternal seperti suhu.

Di dalam bahan linear [30],

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 \chi_e E = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) E \quad (16)$$

Maxwell menyatakan bahwa polarisasi listrik identik dengan perpindahan listrik. Polarisasi listrik dari bagian dasar dielektrik adalah keadaan paksa di mana media dilemparkan oleh aksi gaya gerak listrik, dan menghilang saat gaya itu dihilangkan. Ketika gaya gerak listrik bekerja pada media penghantar menghasilkan arus yang melaluinya, tetapi jika media adalah nonkonduktor atau dielektrik, arus tidak dapat mengalir melalui media, tetapi listrik dipindahkan dalam media ke arah intensitas gerak listrik, besarnya perpindahan ini tergantung pada besarnya intensitas gerak listrik [$D = E$], sehingga jika intensitas gerak listrik bertambah atau berkurang, perpindahan listrik bertambah dan berkurang dengan perbandingan yang sama. Besarnya perpindahan diukur dengan besaran listrik yang melintasi suatu satuan luas, sedangkan perpindahan bertambah dari nol sampai besarnya sebenarnya. Oleh karena itu, D juga merupakan ukuran polarisasi listrik [32].

Sehingga D juga sebanding dengan E .

$$D = \varepsilon E \quad (17)$$

Dimana,

$$\varepsilon \equiv \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \quad (18)$$

Konstanta baru ε disebut permitivitas material. Dalam ruang hampa dimana tidak ada materi yang terpolarisasi, suseptibilitasnya adalah nol, dan permitivitasnya adalah ε_0 . Sehingga disebut sebagai permitivitas ruang bebas. Hal tersebut menunjukkan bahwa ruang hampa hanyalah sebuah jenis khusus dielektrik linier dimana permitivitas memiliki nilai $8.85 \times 10^{-12} C^2 / Nm^2$. Jika faktor ε_0 dihilangkan, maka kuantitas tak berdimensi yang tersisa yaitu:

$$\varepsilon_r \equiv 1 + \chi_e = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (19)$$

Dengan ε_r disebut permitivitas relatif, atau konstanta dielektrik [30]. Sehingga konstanta dielektrik (ε_r) merupakan nilai perbandingan relatif antara permeativitas material dengan permeativitas ruang hampa udara. Besarnya polarisasi dapat disebabkan oleh 4 sumber yaitu : (a) komponen elektronik yang disebabkan oleh induksi medan pada awan elektron yang mengelilingi tiap atom pada suatu material, (b) kontribusi ionik yang diasosiasikan dengan gerak relatif kation dan anion dalam medan elektrik, (c) Polarisasi orientasional disebabkan karena rotasi dipol molekul dalam medan. Selain ketiga penyebab tersebut, sumber polarisasi suatu material juga disebabkan oleh pergerakan pembawa muatan, yaitu perpindahan ion atau elektron dibawah pengaruh medan listrik [33].

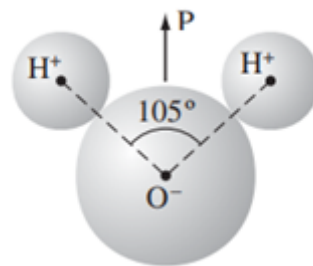
TABEL 1. Konstanta dielektrik pada beberapa jenis bahan [30]

Bahan	Konstanta Dielektrik
Ruang Hampa	1
Helium	1.000065
Neon	1.00013
Hidrogen	1.000254
Argon	1.000517
Nitrogen	1.000548
Uap Air	1.00589
Benzena	2.28
Berlian	5.7 – 5.9

Bahan	Konstanta Dielektrik
Garam	5.9
Silikon	11.7
Metanol	33.0
Air	80.1
Es ($-30^{\circ}C$)	104
KTaNbO ₃ ($-0^{\circ}C$)	34,00

Dielektroforesis

Partikel/*coccus* yang netral tidak memiliki momen dipol untuk p diinduksi oleh medan yang diterapkan. Beberapa molekul memiliki momen dipol permanen bawaan. Sebagai contoh molekul air, misalnya electron cenderung mengelompok di sekitar atom dan karena molekul dibengkokkan pada $105^{\circ}C$, ini menimbulkan adanya muatan negatif di puncak dan muatan positif bersih di sisi yang berlawanan.



GAMBAR 5. Arah momen dipol pada molekul air

Ketika molekul tersebut adanya suatu energi, maka akan terjadi pemutaran atau penyelarasan yang diakibatkan oleh torsi [34]. Pengertian dari torsi itu sendiri adalah momen gaya (*moment of force*) yang mengelilingi suatu sumbu putar atau nilai gaya dikalikan dengan lengan momen (*level arm*).

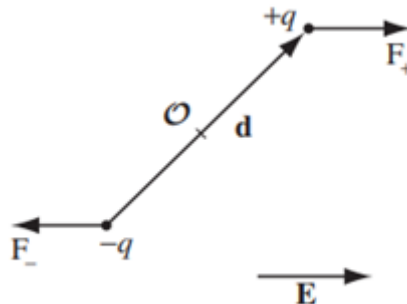
$$N = rF_{\perp} \text{ atau}$$

$$N = r_{\perp} F \tag{20}$$

Dimana, r adalah lengan momen dan F adalah gaya [35]. Jika medan listriknya seragam, maka gaya pada ujung positif, $F_{+} = qE$, secara tepat meniadakan gaya pada ujung negatif, $F_{-} = -qE$. Maka dari itu, dapat menghitung nilai dari torsi sebagai berikut.

$$N = (r_{+} \times F_{+}) + (r_{-} \times F_{-}) \tag{21}$$

$$N = [(d/2) \times (qE)] + [(-d/2) \times (-qE)] = qd \times E \tag{22}$$



GAMBAR 6. Arah-arrah gaya pada torsi

Sehingga, dipol $\mu = qd$ dalam medan seragam E mengalami torsi bernilai.

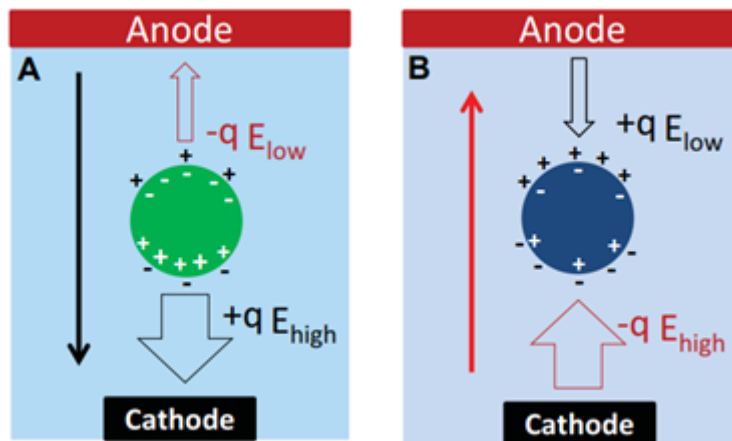
$$N = p \times E \tag{23}$$

Ketika molekul/partikel ditempatkan dalam medan listrik tak seragam, maka F_+ tidak secara tepat menyeimbangkan F_- , akan terdapat gaya total pada dipol, selain torsi. Nilai E mesti berubah agar terdapat variasi signifikan di dalam satu molekul/partikel tersebut. Maka, gaya pada dipol dalam medan yang tidak seragam sebagai berikut [34].

$$F = (\mu \cdot \nabla)E \tag{24}$$

Gaya inilah yang dikenal dengan gaya dielektroforesis. Pengertian dari dielektroforesis itu sendiri merupakan suatu fenomena dimana gaya yang diberikan pada suatu partikel dielektrik ketika mengenai medan listrik yang tidak sama atau seragam. Dimana partikel ini dapat bermuatan netral dan gaya akan tetap diberikan [36]. Dari pengertian diatas, gaya dipol yang digunakan dalam dielektroforesis adalah gaya pada dipol dalam medan yang tidak seragam. Semua partikel menunjukkan aktivitas dielektroforesis dengan adanya medan listrik. Namun, kekuatan gaya ini sangatlah bergantung pada medium dan sifat listrik, bentuk, ukuran, dan frekuensi medan listrik partikel itu sendiri [37]. Gaya pisah dalam medan listrik E yang tidak homogen dan berubah terhadap waktu sebanding dengan volume suatu bahan dielektrik yang ditinjau. Dengan demikian, bahan tersebut memiliki karakteristik dielektrik yang berbeda akan mengalami gaya dielektroforesis diferensial ketika dikenai medan listrik DC yang tidak homogen [38].

Perbedaan yang paling signifikan antara elektroforesis dengan dielektroforesis yaitu terletak dalam medan listriknya. Untuk elektroforesis, partikel menanggapi arus searah (DC) yang seragam untuk memberi energi pada elektroda dan menarik partikel. Sedangkan dielektroforesis, partikel bergerak dalam medan listrik yang tidak seragam. Pergerakan partikelnya pun didasarkan pada perbedaan polarisasi antara partikel dan mediumnya (dalam hal ini medium air) [39].



GAMBAR 7. Dielektroforesis partikel dalam medan listrik tidak seragam.

Pada GAMBAR 7 bagian A, Partikel lebih terpolarisasi daripada medium dan mengalami gaya total menuju daerah medan listrik (E_{high}) yang lebih tinggi. Proses ini dikenal sebagai pDEP. Sedangkan bagian B, Partikel kurang terpolarisasi daripada medium, dan gaya total pada partikel bekerja menuju daerah medan listrik yang lebih rendah (E_{low}). Jenis gerakan partikel ini dikenal sebagai nDEP [40].

Ketika partikel dielektrik tersuspensi dalam media cair dan medan listrik non-seragam diterapkan, maka akan menghasilkan gradien medan listrik yang dapat menyelaraskan semua dipol listrik di setiap partikel individu, menjadikan seluruh partikel sebagai dipol listrik besar [39]. Karena medan listrik tidak seragam, maka interaksi antara dipol induksi dan medan listrik menghasilkan gaya [41].

Gaya Yang Bekerja Pada Sel Monococcus

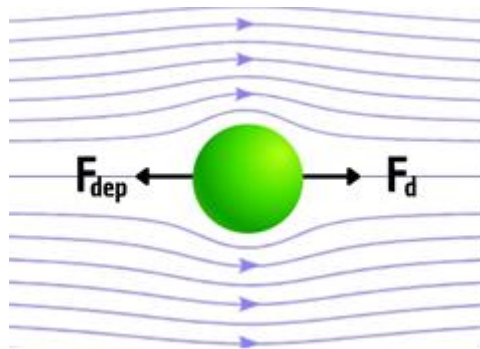
Gaya Stokes Pada Benda Bola

Istilah viskositas umumnya digunakan dalam deskripsi aliran fluida untuk mengkarakterisasi derajat gesekan internal dalam fluida. Gesekan internal ini, biasanya berhubungan dengan hambatan yang dimiliki oleh dua lapisan fluida yang berdekatan untuk bergerak relatif satu sama lain [42]. Secara matematis, viskositas(η) dinyatakan sebagai koefisien proporsionalitas antara tegangan maju(σ) dan laju regangan (v) [43]. Besarnya viskositas dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, gaya tarik antar molekul, dan ukuran serta jumlah molekul terlarut. Fluida, baik zat cair maupun gas yang jenisnya berbeda memiliki tingkat kekentalan yang berbeda-beda [44].

TABEL 2. Koefisien Viskositas Untuk beberapa Fluida[45]

Fluida (temperatur °C)	Koefisien Viskositas η (Pa.s)
Air (0 °C)	1.8×10^{-3}
Air (20 °C)	1.0×10^{-3}
Air (100 °C)	0.3×10^{-3}
Semua Darah (37 °C)	$\approx 4 \times 10^{-3}$
Plasma darah (37 °C)	$\approx 1.5 \times 10^{-3}$
Etil Alkohol (20 °C)	1.2×10^{-3}
Oli (30 °C)	200×10^{-3}
Gliserin (20 °C)	1500×10^{-3}
Udara (0 °C)	0.018×10^{-3}
Hidrogen (0 °C)	0.009×10^{-3}
Uap air (100 °C)	0.013×10^{-3}

Ketika sebuah biopartikel bergerak dalam medium fluida, maka ia akan berinteraksi dengan medium tersebut dan menghasilkan gaya gesek fluida. Dalam gaya dielektroforesis, sel *Monococcus* bergerak cukup lambat sehingga menjaga aliran fluida di sekeliling sel tetap laminar.



GAMBAR 8. Aliran laminar fluida di sekitar benda bola.

Untuk sebuah partikel yang bergerak dengan bilangan Reynold yang laminar, hubungan koefisien gesek dengan bilangan Reynold dituliskan sebagai berikut [46]:

$$C_D = \frac{24}{Re} \tag{25}$$

Namun, persamaan Navier-Stokes tidak untuk semua rentang bilangan Reynold. Untuk partikel bola hanya terbatas pada rentang $Re < 30$ [46]. Maka dari itu, sel *Monococcus* yang bergerak relatif pelan di bawah pengaruh gaya DEP dapat didekati dengan persamaan hukum Stokes. Sehingga persamaan geseknya dapat ditulis dengan,

$$\vec{F}_{Drag} = f(\vec{u}_f - \vec{u}_p) \tag{26}$$

Dimana \vec{u}_f adalah vektor kecepatan fluida dan \vec{u}_p adalah vektor kecepatan partikel, dan f adalah faktor skalar hambatan [47]. Dengan mengetahui bahwa koefisien gesek adalah rasio dari gaya gesek dengan gaya dinamik, maka [48].

Drag – Coefficient

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (27)$$

Dalam bejana fluida dianggap statis ($\vec{u}_f = 0$), maka $\vec{u}_p = \vec{u}$ [48].

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho \vec{u}^2 \quad (\text{area yang terproyeksi})$$

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho \vec{u}^2 \pi r^2 \quad (28)$$

Dengan mensubstitusi $C_D = \frac{24}{Re}$, dan $Re = \rho \vec{u} d_p / \mu_f$, dimana μ adalah viskositas fluida dinamik [49], sehingga,

$$f = \frac{24\mu}{\rho \vec{u} (2r)} \cdot \frac{1}{2} \rho \vec{u} \pi r^2 = 6\pi r \mu \quad (29)$$

Sehingga gaya gesek stokes untuk sel *Monococcus* dapat ditulis dalam bentuk persamaan berikut [50]:

$$F = 6\pi r \mu \vec{u} \quad Kn \rightarrow 0 \quad (Kn \rightarrow 0) \quad (30)$$

Faktor Clausius Mossoti

Relasi antara respon listrik mikroskopis dan listrik makroskopis dikembangkan oleh Clausius, Mossotti, Lorenz, dan Lorentz [51]. Hal ini mulanya Relasi tersebut kemudian dikenal dengan faktor Clausius-Mossotti. Faktor Clausius-Mossotti adalah bilangan tak berdimensi yang mengkuantifikasi interaksi antara partikel dan medium dalam hal polarisasi kompleks masing-masing, dan menentukan arah gaya DEP. Persamaan Clausius-Mossotti diperoleh dari polarisasi muatan dalam bahan dielektrik dan total medan listrik yang bekerja pada bahan dielektrik. Dimana, jika susepsibilitas dielektriknya χ_e diperoleh dari persamaan (19), maka persamaan Clausius-Mossottinya menjadi [52].

$$\frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r - 2} \right) \quad (31)$$

Karena dalam kasus Dielektroforesis, sel *monococcus* memerlukan media dalam pengamatannya, maka perlu menambahkan faktor permittivitas medium dalam faktor Clausius-Mossotti, sehingga persamaannya menjadi,

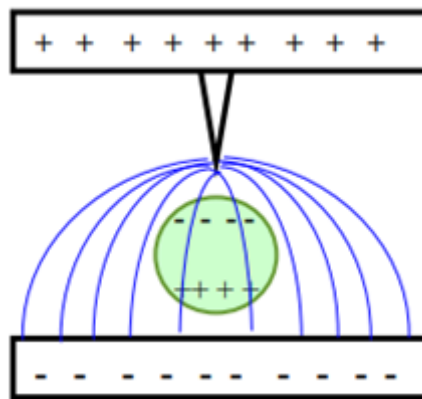
$$f_{CM}(\omega) = \left(\frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \right) \quad (32)$$

Dimana ϵ_p^* adalah permitivitas kompleks partikel dan ϵ_m^* adalah permitivitas kompleks medium. Permitivitas kompleks ϵ^* dituliskan dalam bentuk $\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$, dimana $j = \sqrt{-1}$, σ adalah konduktivitas bahan dan ω adalah frekuensi sudut. Dari faktor Clausius-Mossotti inilah polarisabilitas relatif sel dan suspensi medium dapat di manipulasi dengan mengontrol frekuensi dari medan listrik yang diterapkan. Terdapat titik domain frekuensi yang menyebabkan dikenal dengan frekuensi *crossover*. Frekuensi ini menyebabkan nilai bagian real dari faktor Clausius-Mossotti bernilai $Re[f_{CM}$

$(\omega)] = 0$ [39]. Hal ini membuat sel yang ditinjau akan diam karena gaya DEP bernilai sama dengan nol. Besar nilai $Re[f_{CM}(\omega)]$ ini juga menentukan arah gerak partikel. Ketika partikel lebih terpolarisasi dari pada medium ($Re[f_{CM}(\omega)] > 0$), gaya akan membawa ke arah daerah dengan intensitas medan listrik yang besar, kemudian fenomena ini disebut dengan “positive DEP” (pDEP). Sedangkan jika partikel kurang terpolarisasi dari medium ($Re[f_{CM}(\omega)] < 0$), maka gaya akan melawan gradien medan menuju ke daerah dengan intensitas medan listrik yang lebih rendah, yang kemudian dikenal sebagai “negatif DEP” (nDEP) [53].

Gaya Dielektroforesis Pada Bola

Ketika terdapat bio partikel dielektrik berada dalam medan tak homogen (seperti gambar dibawah). Maka medan listrik akan menyebabkan terjadinya polarisasi (pemisahan muatan) dalam partikel. Interaksi momen dipol listrik induksi dengan medan listrik menimbulkan sebuah gaya dielektroforesis.



GAMBAR 9. Skema biopartikel yang terpolarisasi di antara dua elektroda tak homogeny.

Karena perbedaan distribusi muatan dalam bio partikel, bio partikel bergerak ke daerah dengan kuat medan listrik yang lebih tinggi. Jika polaritas elektroda dibalikkan, maka muatan pada partikel akan melompat ke sisi yang berlawanan, tetapi arah gaya tidak akan berubah [54].

Gaya dielektroforesis adalah suatu gaya yang bekerja pada benda, partikel, atau sel yang netral secara elektrik, karena perbedaan polarisasinya dari medium pensuspensi. Dengan mempertimbangkan sebuah partikel berjari-jari R dalam media air yang memiliki konduktivitas listrik dan permitivitas.

$$F_{DEP} = 2\pi\epsilon_s R^3 \nabla(E^2) \text{Re}[K(\omega)] \quad (33)$$

dengan E menyatakan medan listrik antara dua elektroda [55].

Gaya dielektroforesis (DEP) pada partikel bergantung pada besar dan ketidakseragaman medan listrik yang diterapkan secara eksternal, serta parameter fisik dan listrik dari media sekitarnya dan sel, seperti konduktivitas dan permeabilitas[56]. Gaya dielektroforesis juga dapat dihitung berdasarkan kesetimbangan antara energi listrik dan momentum pada partikel dielektrik dalam medium dielektrik. Pohl (1951) telah menemukan suatu gambaran untuk gaya dielektroforesis pada sel/bio partikel yang berada dalam medium dengan memodelkan sel sebagai bola padat [54]. Medium yang digunakan dalam pembahasan dielektroforesis ini berupa medium fluida yang didalamnya terdapat bahan dielektrik.

SIMPULAN

Dielektroforesis konvensional merupakan model dari partikel dielektrik berbentuk bola. Partikel dielektrik ini identik dengan bakteri *monococcus*. Namun dalam kasus sel bakteri, partikel dielektrik tidak tersusun atas satu konstanta permitivitas. Hal ini karena bakteri tersusun atas beberapa bagian utama seperti membran sel, sitoplasma, membran inti, dan inti sel. Dimana masing-masing bagian ini memiliki permitivitasnya sendiri. Hal inilah yang membuat tiap jenis sel bersifat spesial dan terbedakan

antara satu dan lainnya. Sehingga, setiap jenis sel memiliki pita spektrum frekuensi yang berbeda pula. Oleh karena itu, dielektroforesis dapat digunakan sebagai metode untuk mengidentifikasi jenis sel bakteri dengan memvariasikan frekuensi sumber arus AC yang digunakan dalam memanipulasi medan listrik.

REFERENSI

- [1] Prayuda, S. T. Achmad, W. H. Akbar Putra, "Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian Eddy Current terhadap Crack Toe pada Sambungan Tee Material Aluminium 5083 yang Dilapisi Non-Conductive Coating dengan Variasi Kedalaman dan Panjang Crack," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 10, no. 1, pp. 14-21, 2021.
- [2] Nuri *et al.*, "Penentuan Jenis Muatan Sel Darah Merah melalui Metode Dielektroporesis," *Variabel*, vol. 3, no. 1, pp. 5-11, 2020.
- [3] M. Azam, "Pengujian Bahan Untuk Elektroda Pada Sistem Dielektroforesis," *Youngster Physics Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 186-190, 2017.
- [4] Wulandari, Ike Wahyuni, "Studi Literatur Review: Integrasi Kurikulum Pembelajaran Cerdas Biosensor Menggunakan Teknologi Internet of Things," *Jurnal Tiarsie*, vol. 18, no. 3, pp. 97-101, 2021.
- [5] F. Amanah, "Pengaruh Konsentrasi Bakteri Asam Laktat *Lactobacillus Casei* Dan Lama Fermentasi Terhadap Karakteristik Kimia Tepung Kulit Singkong (*Manihot Esculenta*) Terfermentasi," *PhD dissertation*, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, 2020.
- [6] B. Sarno *et al.*, "Dielectrophoresis: Developments and applications from 2010 to 2020," *Electrophoresis*, vol. 42, no. 5, pp. 1-54, 2020.
- [7] S. Mahabadi, H. L. Fatima, P. H. Michael, "Effects of cell detachment methods on the dielectric properties of adherent and suspension cells," *Electrophoresis*, vol. 36, no. 13, pp. 1493-1498, 2015.
- [8] Farahdiana *et al.*, "Kepenggunaan Dielektroforesis (Dep) Di Dalam Pengasinan Zarah Bagi Aplikasi Buah Pinggang Tiruan," *Jurnal Kejuruteraan, Teknologi dan Sains Sosial*, vol. 3, no. 2, pp. 40-46, 2017.
- [9] M. Azam *et al.*, "Penentuan Konduktivitas Listrik dan Frekuensi Karakteristik Sel Ragi dengan Memanfaatkan Proses Dielektroforesis," *Majalah Ilmiah Biologi BIOSFERA: A Scientific Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 17-21, 2010.
- [10] S. Siagian *et al.*, "Analisis Jumlah Muatan Listrik Serta Energi Pada Kapasitor Berdasarkan Konstanta Dielektrik Suatu Material," *ORBITA: Jurnal Kajian, Inovasi, dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, vol. 7, no. 1, pp. 176-180, 2021.
- [11] M. Sidi, B. Pahlanop Lapanporo, Y. Arman, "Perbandingan Kapasitansi dari Beberapa Jenis Bahan Menggunakan Kapasitor Silinder," *PRISMA FISIKA*, vol. 8, no. 2, pp. 128-134, 2020.
- [12] Parnasari *et al.*, "Studi Kapasitansi dan Konstanta Dielektrik Pada Karbon Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit," *PRISMA FISIKA*, vol. 10, no. 1, pp. 98-104, 2022.
- [13] Holderman *et al.*, "Identifikasi Bakteri Pada Pegangan Eskalator Di Salah Satu Pusat Pembelanjaan Di Kota Manado," *Jurnal Ilmiah Sains*, vol. 17, no. 1, pp. 13-18, 2017.
- [14] Boleng, Didimus Tanah, "Morfologi dan Struktur Halus (Ultrastructure)," in *Bakteriologi Konsep-Konsep Dasar*, Malang: UMM Press, vol. 5, no. 1, pp. 27-42, 2015.
- [15] Koentjoro *et al.*, "Sel Bakteri dan Struktur Dasar Penyusunnya," In *Dinamika Struktur Sel Bakteri*, Surabaya: Jakad Media Publishing, vol. 1, no. 1, pp. 3-24, 2017.

- [16] Wagiranti, Hafidah, "Pembelajaran Biologis Beorientasi Wikipedia Untuk Meningkatkan Penguasaan Konsep dan Mengukur Keterampilan Literasi Informasi Pada Materi Bakteri," *PhD Thesis*, FKIP UNPAS, 2019.
- [17] M. V. Kanevsky *et al.*, "Electrophysical sensor systems for in vitro monitoring of bacterial metabolic activity," *Journal Pre-proof*, vol. 10, pp. 3-27, 2022.
- [18] M. Elitas *et al.*, "Dielectrophoresis as a single cell characterization method for bacteria," *Biomedical Physics & Engineering Express*, vol. 3, no. 1, pp. 1-7, 2017.
- [19] Hasanuddin, "Bakteri *Coccus* Pada Pekasam Durian Makanan Khas Bengkulu," *Agro Industri*, vol. 7, no. 1, 2017.
- [20] Restuaty, Ayu, "Uji Kualitas Bakteri *Escherichia Coli* Pada Depot Air Minum Isi Ulang Di Kecamatan Bandung Wetan," *PhD dissertasi*, FKIP UNPAS, 2016.
- [21] Wiranti, Ana, "Penentuan Frekuensi Karakteristik Sel *Saccharomyces Cerevisiae* Pada Proses Dielektroforesis Menggunakan Elektroda Kawat Sejajar," *PhD dissertasi*, FMIPA, Universitas Diponegoro, 2016.
- [22] Alfiyah Dini, "Pengaruh Medan Elektromagnetik Pada Bakteri *Staphylococcus aureus*," *PhD dissertasi*, FST Universitas Airlangga, 2012.
- [23] Tirono, Mokhamad, "Efek Medan Listrik Ac Terhadap Pertumbuhan Bakteri *Klebsiella Pneumoniae*," *Jurnal Neutrino*, vol. 5, no. 2, pp. 116-122, 2013.
- [24] Mitic, V. Vojislav *et al.*, "Clausius–Mossotti relation fractal modification," *Ferroelectrics*, vol. 536, no. 1, pp. 60-76, 2018.
- [25] M. Salsabila, "Medan Listrik Berpulsa Untuk Menghambat Pertumbuhan Bakteri *Salmonella Typhi* Pada Susu Sapi Murni," *PhD dissertasi*, FST UIN Maulana Malik Ibrahim, 2019.
- [26] Mustain, A. V. Fitrotin, "Pengaruh Konsentrasi Larutan Sukrosa Terhadap Nilai Konstanta Dielektrik Menggunakan Sensor Kapasitor," *PhD dissertasi*, FMIPA, Universitas Jember, 2017.
- [27] S. L. Kusakari *et al.*, "High voltage electric fields have potential to create new physical pest control systems," *Insects*, vol. 11, no. 7, pp. 1-14, 2020.
- [28] Dell' Anna, Luca, M. Merano, "Clausius-Mossotti Lorentz-Lorenz relations and retardation effects for two-dimensional crystals," *Physical Review A*, vol. 93, no. 5, pp. 1-6, 2016.
- [29] Dendi Hari, Sulistiyo, "Dampak Ukuran Butir Nanopartikel Copper Ferrite (CuFe_2O_4) Terhadap Sifat Dielektrik," *Jurnal Mekanikal*, vol. 8, no. 2, pp. 777-783, 2017.
- [30] Griffiths, J. David, "Electric Fields In Matter," *In Introduction to Electrodynamics Fourth Edition*, United States of America: Pearson Education Inc, vol. 4, no. 4, pp. 185-208, 2013.
- [31] Akl, A. Alaa, A. Safwat Mahmoud, "Effect of growth temperatures on the surface morphology, optical analysis, dielectric constants, electric susceptibility, Urbach and bandgap energy of sprayed NiO thin films," *Optik*, vol. 127, pp. 783-793, 2018.
- [32] Yaghjian, D. Arthur D, "Maxwell's definition of electric polarization as displacement," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 88, pp. 65-72, 2020.
- [33] Didik, A. Lalu A, "Pengaruh Pemberian Medan Magnet Terhadap Konstanta Dielektrik Material AgCrO_2 ," *KONSTAN*, vol. 2, no. 1, pp. 1-4, 2016.
- [34] Griffiths, J. David, "Electric Fields In Matter," *In Introduction to Electrodynamics Fourth Edition*, United States of America: Pearson Education Inc, vol. 4, no. 1, pp. 167-173, 2013.
- [35] Giancoli, C. Douglas C, "Gerak Rotasi," *In Fisika Prinsip dan Aplikasi*, Jakarta: Erlangga, vol. 8, no. 4, pp. 258-259, 2014.

- [36] Jin, W. Chang, "Fabrication of a Dielectrophoretic Particle Trap," *In Conferences UWM Undergraduate Research Symposium*, Milwaukee, p. 168, 2019.
- [37] C. Marios *et al.*, "Simultaneous Tunable Selection and Self-Assembly of Si Nanowires from Heterogeneous Feedstock," *ACS Nano*, vol. 10, no. 4, pp. 1-36, 2016.
- [38] Yousuff *et al.*, "Microfluidic device for Multitarget separation using DEP techniques and its applications in clinical research," *In 2020 Sixth International Conference on Bio Signals, Images, and Instrumentation (ICBSII)*, IEEE, pp. 1-6, 2020.
- [39] Abd Rahman *et al.*, "Dielectrophoresis for Biomedical Sciences Applications: A Review," *Sensors*, vol. 17, no. 3, pp. 1-27, 2017.
- [40] Z. Talukder *et al.*, "Dielectrophoretic separation of bioparticles in microdevices: A review," *Electrophoresis*, vol. 35, no. 5, pp. 671-713, 2014.
- [41] M. Ammam, "Electrophoretic Deposition Under Modulated Electric Fields: a Review," *RSC ADVANCES*, vol. 2, no. 20, pp. 7633-7646, 2012.
- [42] R. A. Serway, J. W. Jewett, "Fluids Mechanics," *in Ninth Edition Physic for Scientists and Engineers with Modern Physics*, Boston: Cengage Learning, vol. 14, no. 5, pp. 427-430, 2014.
- [43] D. Banerjee *et al.*, "Odd viscosity in chiral active fluids," *Nature communications*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2017.
- [44] Lubis, A. Nur, "Pengaruh Kekentalan Cairan Terhadap Waktu Jatuh Benda Menggunakan Falling Ball Method," *Fisitek : Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*, vol. 2, no. 2, pp. 27-28, 2018.
- [45] Giancoli, "Fluids," *In Physics Principles With Applications*, Michigan: Prentice-Hall, vol. 10, no. 11, p. 279, 2015.
- [46] Yang, Hongli *et al.*, "General formulas for drag coefficient and settling velocity of sphere based on theoretical law," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 219-223, 2015.
- [47] C. Zhang *et al.*, "Determination of the scalar friction factor for nonspherical particles and aggregates across the entire Knudsen number range by direct simulation Monte Carlo (DSMC)," *Aerosol Science and Technology*, vol. 46, no. 10, pp. 1065-1078, 2012.
- [48] F. M. White, "Dimensional Analysis and Similarity," *In Fluid Mechanics 8Th Edition In SI Units*, Noida : Mc Graw Hill India, vol. 5, no. 4, pp. 304-313, 2017.
- [49] G. J. Rubinstein, J. J. Derksen, S. Sundaresan, "Lattice Boltzmann simulations of low-Reynolds-number flow past fluidized spheres: effect of Stokes number on drag force," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 788, pp. 576-601, 2016.
- [50] Gopalakrishnan *et al.*, "The electrical mobilities and scalar friction factors of modest-to-high aspect ratio particles in the transition regime," *Journal of Aerosol Science*, vol. 82, pp. 24-39, 2015.
- [51] Wang *et al.*, "Clausius-Mossotti Relation Revisited: Media with Electric and Magnetic Response," *arXiv preprint arXiv:2008.09178*, 2020.
- [52] B. Sarno *et al.*, "Dielectrophoresis: Developments and applications from 2010 to 2020," *Electrophoresis*, vol. 42, no. 5, pp. 539-564, 2021.
- [53] J. Cottet *et al.*, "MyDEP: a new computational tool for dielectric modeling of particles and cells," *Biophysical journal*, vol. 116, no. 1, pp. 12-18, 2019.
- [54] M. Azam, "Simulasi Numerik Gaya Dielektroforesis Pada Biopartikel Berbentuk Bola," *Youngster Physics Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 110-114, 2017.
- [55] B. Techaumnat *et al.*, "Study on the discrete dielectrophoresis for particle-Cell separation," *ELECTROPHORESIS*, vol. 41, no. 1-11, pp. 991-1001, 2020.

- [56] M. Elitas *et al.*, “Dielectrophoresis as a single cell characterization method for bacteria,” *Biomedical Phys. Eng. Express*, vol. 3, no. 1, pp. 2-8, 2017.

