

KEPENGUNAAN DIELEKTROFORESIS (DEP) DI DALAM PENGASINGAN ZARAH BAGI APLIKASI BUAH PINGGANG TIRUAN

Farahdiana, Wan Yunus, Azrul Azlan, Hamzah, Jumril, Yunas,
Burhanuddin, Yeop Majlis

¹Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN), Universiti Kebangsaan Malaysia
(UKM)

azlanhamzah@ukm.edu.my

ABSTRAK

Dielektroforesis (DEP) adalah tenaga yang dikenakan pada medan dielektrik zarah apabila ianya tertakluk pada medan elektrik tidak seragam. Terdapat banyak aplikasi DEP dan salah satunya merupakan pemisahan zarah-zarah. Di dalam penulisan ini, terdapat empat elektrod yang diperbuat daripada bahan sejenis dan ketebalan yang sama namun mempunyai perbezaan dari segi lengkungan radius ($0\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$) dan digunakan untuk mengenalpasti arah, nilai maksimum dan taburan medan elektrik. Medan elektrik di analisa pada paksi z menggunakan perisian COMSOL Multiphysics untuk zarah biologi di dalam buah pinggang tiruan. Keputusan menunjukkan bahawa medan elektrik pada elektrod lengkungan radius $0\mu\text{m}$ mempunyai medan elektrik tertinggi, $5.011 \times 10^6 \text{V/m}$ dan elektrod lengkungan radius $15\mu\text{m}$ mempunyai medan elektrik terendah, $0.889 \times 10^6 \text{V/m}$. Namun, berdasarkan keputusan simulasi, elektrod lengkungan radius $15\mu\text{m}$ menunjukkan medan elektrik lebih sekata berbanding tiga elektrod yang lain. Oleh itu, elektrod lengkungan radius $15\mu\text{m}$ dipilih bagi kegunaan caj negatif DEP di dalam buah pinggang tiruan.

Kata kunci: dielektroforesis caj negatif, buah pinggang tiruan, zarah biologi, DEP

1. Pendahuluan

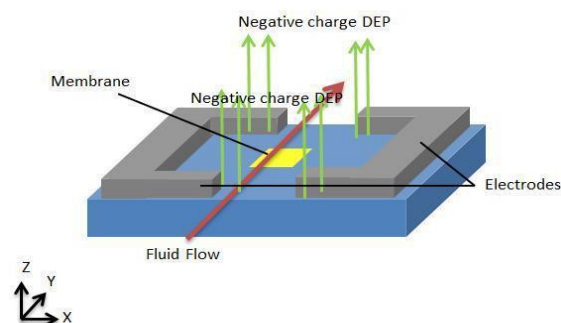
Konsep dielektroforetik (DEP) mula diperkenalkan oleh Pohl pada 1951 [Morgan, 1999, Pohl, 1971]. Dielektroforetik merupakan pergerakan zarah secara tidak seragam menggunakan arus ulang alik [Li, 2005]. Terdapat banyak aplikasi dielektroforetik dan salah satunya ialah aplikasi terhadap sel biologi [Suehiro, 1998]. Tenaga dielektroforetik mampu untuk mengasing [Jung, 2007], memanipulasi [Hughes, 1998, Li, 2002], memerangkap [Asbury, 2002] dan pengangkatan [Suehiro, 1998] zarah dari pelbagai saiz mengikut frekuensi tersendiri. Lebih 10 tahun yang lalu, terdapat lebih daripada 2000 penerbitan berkenaan dengan dielektroforetik [Pethig, 2010]. Terdapat pelbagai cabang dielektroforetik seperti biosensor, penyampaian ubat-ubatan, diagnostic perubatan, dan penapisan zarah [Pethig, 2010]. Zarah-zarah yang dimaksudkan termaksudlah sel biologi. Antara sel biologi yang pernah dikaji adalah DNA [Asbury, 2002], virus HSV-1 [Hughes, 1998, Morgan, 1999], virus "tobacco mosaic", sel darah merah [Jung, 2007, Piacentini, 2011], sel darah putih [Piacentini, 2011], platelet [Piacentini, 2011], sel kanser payudara [Kang, 2008, Shafiee, 2009], sel yis [Hunt, 2006, Cetin, 2009, dan sel mamalia [Diaz, Jen, 2009]. Kajian-kajian yang dilakukan terhadap sel biologi tersebut membuktikan bahawa sel biologi mampu dimanipulasi menggunakan tenaga dielektroforetik. Oleh itu, kajian lebih terperinci akan

dilakukan dengan menggunakan teknik-teknik lepas untuk digunakan pada buah pinggang tiruan.

Penyakit buah pinggang merupakan salah satu penyakit yang terkenal pada masa kini. Kegagalan buah pinggang mungkin juga disebabkan oleh penyakit kencing manis dan obesiti. Penyakit ini senang didapati pada masa kini kerana ramai manusia gagal untuk menjalani gaya hidup yang sihat. Di Malaysia, terdapat lebih kurang 38,000 pesakit yang di diagnos mempunyai kegagalan buah pinggang [Bernama,2016]. Daripada 38,000 pesakit hanya 16,000 yang mampu menjalani pemindahan buah pinggang. Akan tetapi, statistic menunjukkan hanya seramai 70 orang penderma untuk setahun [Bernama,2016]. Kekurangan penderma ini mampu membawa maut kepada pesakit buah pinggang yang kronik.

Mesin dialisis mula diperkenalkan sejak 1947 [Jansen, 2014] untuk membantu pesakit yang mempunyai kegagalan buah pinggang. Akan tetapi, terdapat beberapa kekurangan terhadap mesin dialisis ini seperti kegagalan untuk menapis darah dengan baik [Twardowski,2006]. Saiz mesin dialisis yang terlalu besar juga menyebabkan pergerakan pesakit buah pinggang ini tersekat kerana mereka perlu untuk menjalani dalisis sebanyak 3-4 kali seminggu [Humes, 2014]. Tidak lama kemudian, buah pinggang implan [Fissell,2009] mula diperkenalkan. Terdapat kelebihan pada buah pinggang implan ini iaitu pesakit yang menunggu untuk pendermaan buah pinggang tidak perlu risau dengan barisan yang panjang. Namun, buah pinggang implan ini masih tidak dapat di komersialkan kerana masih terdapat masalah seperti sumbat pada membran silikon [Humes, 2004].

Di dalam kertas kerja ini, tenaga dielektroforetik akan dikenakan berdekatan dengan membran buah pinggang tiruan bagi mengelakkan membran silikon itu dari tersumbat. Kaedah ini dinamakan caj negative DEP. Terdapat banyak aplikasi dielektroforetik dan salah satunya adalah untuk kegunaan pemisahan sel biologi [Chen,2007,Piacentini, 2011]. Dalam kajian lepas oleh M.R. Buyong ada mengatakan tenaga dielektroforetik mampu digunakan pada penapisan glomerular [Buyong 2016]. Kajian lain daripada M.R. Buyong telah membuktikan elektrod tirus mempunyai medan elektrod lebih tinggi daripada elektrod biasa [Abidin, 2013]. Oleh itu, dengan menggunakan elektrod lengkungan radius ianya mempunyai kemungkinan yang besar untuk mencapai medan elektrik yang tinggi bagi paksi z. Objektif kajian ini adalah untuk mencapai arah paksi z dan taburan medan elektrik yang baik dengan menggunakan elektrod berbeza radius. Satu kajian telah membincangkan bahawa sifat-sifat elektrik pada elektrod boleh dikaji untuk kegunaan bioperubatan [Buyong, 2015]. Gambarajah 1 dibawah menunjukkan matlamat kajian ini. Ketika cecair melalui elektrod tersebut, protin akan ditolak kearah paksi z. Ini bertujuan untuk mengelakkan zarah-zarah tersebut memasuki membran dan menyebabkan tersumbat.



Gambarajah 1. Gambarajah skematik cecair dan caj negatif DEP dikenakan untuk menolak zarah biologi

2. Teori Tenaga Dielektroforetik (F_{DEP})

Dielektroforetik adalah pergerakan zarah didalam medan elektrik tidak seragam tertakluk pada arus ualng alik (AC) [Buyong, 2014]. Tenaga dielektroforetik bergantung pada medium dan sifat-sifat zarah elektrik, saiz dan bentuk zarah, dan juga frekuensi medan elektrik. Di dalam medan elektrik E , zarah berdielektrik bertindak sebagai “*dipole*” yang berkesan dengan “*dipole moment*” p berkadar terus dengan medan elektrik, iaitu [Buyong, 2014]

$$p \propto E \quad (1)$$

Konstan berkadar terus bergantung pada reka bentuk zarah dielektrik. Dengan adanya kecerunan medan elektrik, tenaga “*dipole*” adalah [Buyong, 2014]

$$F = (p \cdot \nabla) E \quad (2)$$

Dimana P adalah konstan pada “*dipole moment*” vektor, ∇ adalah del vektor dan E adalah medan elektrik luar. Gabungan kedua-dua persamaan ini (F_{DEP}) adalah untuk zarah homogen yang di gantung di dalam kecerunan medan elektrik yang diberi oleh [Buyong, 2014]

$$F_{DEP} = 2\pi \text{ medium } R^3 \text{ CMF } (\nabla E^2) \quad (3)$$

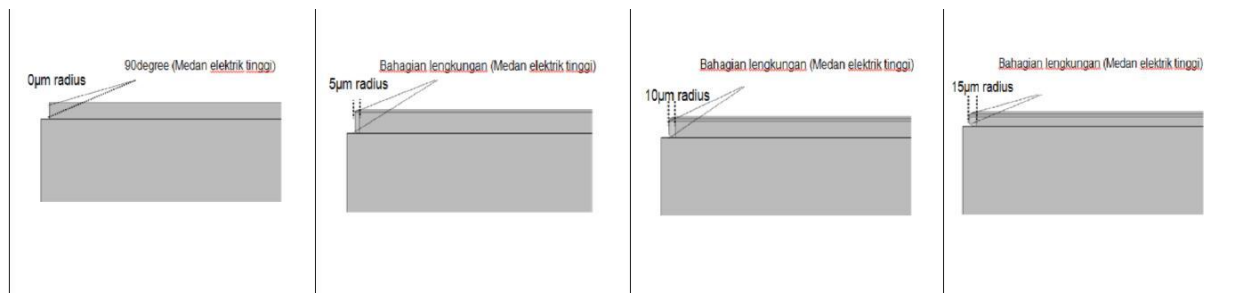
Dimana r ialah radius zarah tersebut, m adalah ketelusan suspending medium dan ∇E ialah kecerunan rms medan elektrik. CMF adalah bahagian sebenar didalam Clausius-Mossotti factor dimana [Buyong, 2014]

$$\text{CMF} = (\epsilon_{\text{particle}} - \epsilon_{\text{medium}}) / (\epsilon_{\text{particle}} + 2 \epsilon_{\text{medium}}) \quad (4)$$

Oleh itu, di dalam kajian ini, medan elektrik akan dikaji bagi memastikan jenis elektrod lengkungan mampu diguakan untuk aplikasi dielektroforetik. Seperti dinyatakan di Eq. (3) F_{DEP} bergantung pada kecerunan medan elektrik rms.

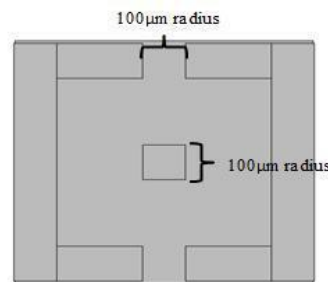
3. Rekabentuk Permodelan COMSOL

Seterusnya, rekabentuk elektrod telah di lukis dengan menggunakan perisian COMSOL Multiphysic. Elektrod diperbuat daripada bahan sejenis samada di “*sputtered*” atau di “*evaporated*” [Hamzah, 2008] menggunakan aluminium (Al) di atas substrat silikon dengan ketebalan pada 40µm. Frekuensi yang digunakan adalah pada 1000Hz dan voltage pula pada 10V. Keempat-empat elektrod mempunyai radius yang berbeza pada 0µm, 5µm, 10µm dan 15µm seperti ditunjukkan dalam Gambarajah 2 dibawah. Lengkuangan dibentuk menggunakan punaran isotropi dimana kadar punarannya adalah sekata samada menegak atau melintang [Hamzah, 2007, Aziz, 2008].



Gambarajah 2. Gambarajah skematik menunjukkan pandangan sisi empat elektrod berlainan radius (0µm, 5µm, 10µm dan 15µm)

Peranti-peranti tersebut mempunyai saiz $700\mu\text{m} \times 700\mu\text{m}$ dan mempunyai membran sebesar $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ dengan jarak antara elektrod ialah $100\mu\text{m}$ seperti ditunjukkan dalam Gambarajah 3.



Gambarajah 3. Gambarajah skematik menunjukkan pandangan depan elektrod-elektrod.

Rekabentuk elektrod berlainan lengkungan radius adalah bertujuan untuk menganalisa yang mana antara keempat elektrod tersebut paling sesuai untuk kegunaan zarah biologi pada paksi z. Keputusan perlu menunjukkan arah medan elektrik, pengedaran medan elektrik dan juga nilai maksima medan elektrik.

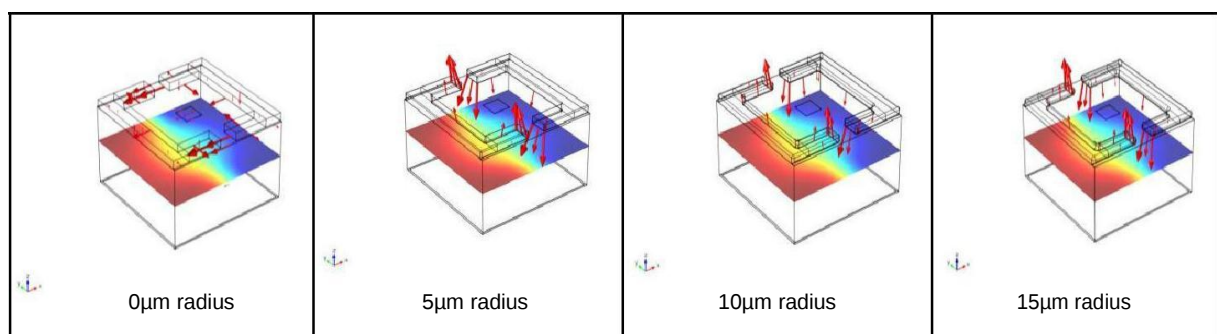
4. Hasil dan Perbincangan

Keputusan di Rajah 1 menunjukkan elektrod lengkungan radius $0\mu\text{m}$ mempunyai nilai medan elektrik tertinggi manakala elektrod lengkungan radius $15\mu\text{m}$ radius menghasilkan medan elektrik paling rendah.

Jadual 1. Nilai Maksima Medan Elektrik bagi Empat Berlainan Elektrod Lengkungan Radius

Electrode Radius	$0\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$	$10\mu\text{m}$	$15\mu\text{m}$
Maximum Value, 10 (V/m)	5.011	1.058	1.287	0.889

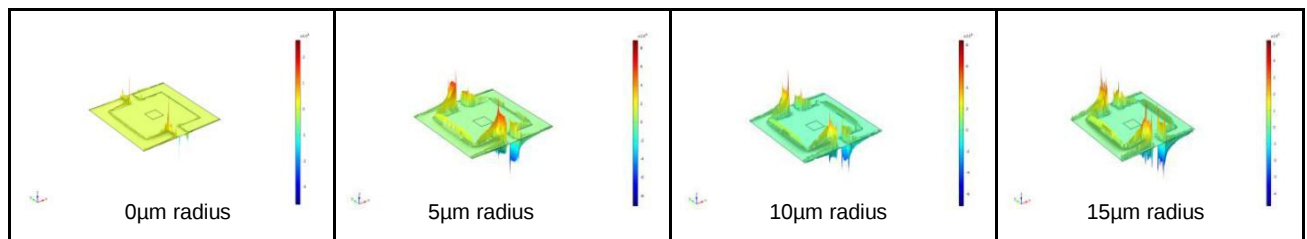
Terdapat kemungkinan bagi elektrod lengkungan radius $0\mu\text{m}$ mencapai titik maksima berbanding yang lain kerana arah berkadar terus medan elektrik dia atas permukaan elektrod seperti ditunjukkan dalam Gambarajah 4.



Gambarajah 4. Gambarajah skematik menunjukkan arah medan elektrik bagi empat elektrod lengkungan radius ($0\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ dan $15\mu\text{m}$) menggunakan COMSOL Multiphysics.

Arah medan elektrik bagi elektrod lengkungan radius $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ dan $15\mu\text{m}$ adalah tidak berkadar terus (rujuk Gambarajah 4), oleh itu medan elektrik lebih rendah berbanding elektrod lengkung radius $0\mu\text{m}$. Antara ketiga-ketiga elektrod, $10\mu\text{m}$ elektrod mempunyai

medan elektrik tertinggi, $1.287 \times 10^6 \text{ V/m}$. Struktur pada elektrod lengkungan radius $10 \mu\text{m}$ jelas kelihatan lengkungannya lebih kecil berbanding elektrod lengkungan radius $5 \mu\text{m}$ (rujuk Gambarajah 2). Ini menghasilkan jarak elektrod lengkungan radius $5 \mu\text{m}$ lebih jauh berbanding elektrod lengkungan radius $10 \mu\text{m}$. Selain itu, elektrod lengkungan radius $15 \mu\text{m}$ mempunyai nilai medan elektrod terendah dengan nilainya $0.889 \times 10^6 \text{ V/m}$ berbanding ketiga-tiga elektrod. Bahagian lengkungan elektrod lengkungan radius $15 \mu\text{m}$ lebih melengkung berbanding tiga yang lain (rujuk Gambarajah 2). Akan tetapi, aliran medan elektrik bagi $15 \mu\text{m}$ adalah lebih sekata berbanding yang lain seperti yang ditunjukkan dalam Gambarajah 5.



Gambarajah 5. Gambarajah skematik menunjukkan aliran medan elektrik bagi empat elektrod lengkungan radius ($0 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ dan $15 \mu\text{m}$) dengan menggunakan COMSOL Multiphysics.

Elektrod lengkungan radius $0 \mu\text{m}$ jelas menunjukkan aliran medan elektrik tidak sekata. Ianya menunjukkan dua puncak tertinggi akan tetapi pada bahagian lain, aliran elektrod menunjukkan medan elektrik yang rendah (rujuk Gambarajah 5). Manakala, elektrod lengkungan radius $5 \mu\text{m}$ menunjukkan aliran medan elektrik yang cantik. Namun, puncak aliran elektrik hanya terdapat pada hujung elektrod. Ini menunjukkan aliran tersebut tidak sekata. Pasangan elektrodnya pula tidak menunjukkan sebarang puncak tertinggi dan di tengah-tengah elektrod pula menunjukkan medan elektrik yang sangat rendah disebabkan oleh jarak antara elektrod yang jauh. Seterusnya, elektrod lengkungan radius $10 \mu\text{m}$ mempunyai puncak elektrod yang agak tinggi akan tetapi, aliran medan elektriknya tidak menunjukkan aliran yang sekata. Gambarajah elektrod lengkungan radius $10 \mu\text{m}$ (rujuk Gambarajah 4) menunjukkan hanya dua anak panah muncul bagi arah medan elektrik. Ini dapat dikaitkan medan elektrik yang rendah di bucu elektrod. Elektrod lengkungan radius $15 \mu\text{m}$ menunjukkan elektrod dikedua-dua belah mempunyai puncak tertinggi. Aliran medan elektrik bagi elektrod ini adalah lebih sekata berbanding tiga yang lain. Keadaan medan elektrik yang sekata seperti ini yang diperlukan bagi cecair untuk mengalir melintasi elektrod tersebut.

Apabila cecair mengalir pada paksi y, zarah-zarah di dalam cecair akan ditolak oleh teknik caj negatif DEP pada paksi z. Jika aliran medan elektrik lebih sekata, keputusan yang lebih baik akan diperolehi di akhir eksperimen ini. Walaupun nilai medan elektriknya adalah paling rendah, tetapi perbezaannya tidaklah begitu ketara. Ianya masih mampu digunakan untuk tenaga dielektroforetik caj negatif bagi mengelakkan membran-membran tersumbat.

5. Kesimpulan

Sebagai kesimpulan, elektrod lengkungan radius $0 \mu\text{m}$ mempunyai medan elektrik yang tertinggi akan tetapi keseragaman aliran elektriknya begitu rendah. Selain itu, arah medan elektrik bagi elektrod ini berbeza dari objektif kajian ini. Elektrod lengkungan radius $15 \mu\text{m}$ mempunyai nilai medan elektrik terendah, tetapi keseragamannya lebih stabil berbanding dan arah medan elektrik juga adalah seperti yang diinginkan dalam kajian ini. Walaupun medan elektriknya lebih kecil, tetapi keseragaman dan arah medan elektrik adalah lebih penting untuk kajian ini. Oleh itu, elektrod lengkungan radius $15 \mu\text{m}$ dipilih di dalam kajian ini.

Rujukan

- A.A.Hamzah , B. Y. Majlis, I. Ahmad, HF etching of sacrificial spin-on glass in straight and junctioned microchannels for MEMS microstructure release. *Journal of Electrochemical Society* 154 (8) (2007), D376-D382.
- A. A. Hamzah, J. Yunas, B. Y. Majlis, I. Ahmad, Sputtered encapsulation as wafer level packaging for isolatable MEMS devices: A technique demonstrated on a capacitive accelerometer. *Sensor* 8 (11) (2008), 7438-7452.
- Bernama. (2016, January 23). RM50 juta untuk rawatan pesakit buah pinggang [Newspaper online]. Available: <http://www.theborneopost.com/2016/01/23/rm50-juta-untuk-rawatan-pesakit-buah-pinggang/>.
- B. Cetin, Y. Kang, Z. Wu, D. Li, Continuous particle separation by size via AC-dielectrophoresis using lab-on-a-chip device with 3D-electrodes. *Electrophoresis* 30 (2009) 766-772.
- C. L. Asbury, A. H. Diercks, G. v. d. Engh Trapping of DNA by dielectrophoresis. *Electrophoresis* 23 (2002), 2658-2666.
- C. P. Jen and T. W. Chen, Selective trapping of live and dead mammalian cells using insulator-based dielectrophoresis within open-top microstructures. *Biomed Microdevices* 11 (2009) 597-607.
- D. F. Chen, H. Du, W. H. Li, Bioparticle separation and manipulation using dielectrophoresis. *Sensors and Actuators A* 133 (2007) 329-334.
- H. A. Pohl and J. S. Crane, Dielectrophoresis of Cells. *Biophysical Journal* 11 (1971) 711-727.
- H. D. Humes, D. Buffington, A. J. Westover, S. Roy, W. H. Fissell, Review Article The bioartificial kidney: current status and future promise, *Pediatr Nephrol* 29 (2014) 343-351.
- H. E. Z. Abidin, A. A. Hamzah, B. Y. Majlis, J. Yunas, N. A. Hamid, U. Abidin, Electrical characteristic of double stacked Ppy-PVA supercapacitor for powering biomedical MEMS devices. *Microelectronic Engineering* 111 (2013) 374-378.
- H. Li, Y. Zheng, D. Akin, R. Bashir, Senior Member IEEE, Characterization and Modeling of a Microfluidic Dielectrophoresis Filter for Biological Species. *Journal of Microelectromechanical System* 14(1) (2005) 103-112.
- H. Li and R. Bashir, Dielectrophoretic separation and manipulation of live and heat-treated cells of *Listeria* on microfabricated devices with interdigitated electrodes. *Sensors and Actuators* 86 (2002) 215-221.
- H. Shafiee, J. L., Caldwell, M. B. Sano, R. V. Davalos, Contactless dielectrophoresis: a new technique for cell manipulation. *Biomed Microdevices* (2009) 997-1006.
- H. Morgan, M. P. Hughes, N. G. Green, Separation of Submicron Bioparticles by Dielectrophoresis. *Biophysical Journal* 77 (1999), 516-525.
- J. Jansen, M. Fedecostante, M.J. Wilmer, L.P. van den Heuvel, J.G. Hoenderop, R. Masereeuw, Biotechnological challenges of bioartificial kidney engineering. *Biotechnology Advances* 32 (2014) 1317-1327.
- J. Suehiro and R. Pethig, The dielectrophoretic movement and positioning of a biological cell using a three-dimensional grid electrode system. *J. Phys. D.: Appl. Phys* 31 (1998) 3298-3305.
- J. Y. Jung and H. Y. Kwak, Separation of Microparticles and Biological Cells Inside and Evaporating Droplet using Dielectrophoresis. *Anal. Chem.* 79 (2007) 5087-5092.
- M. P. Hughes, H. Morgan, F. J. Rixon, J. P. H. Burt, R. Pethig. Manipulation of herpes simplex virus type 1 by dielectrophoresis. *Biochimica et Biophysica Acta* 1425 (1998) 119-126.
- M. R. Buyong, F. Larki, M. S. Faiz, A. A. Hamzah, J. Yunas, B. Y. Majlis, A Tapered Aluminium Microelectrode Array for Improvement of dielectrophoresis-based particle manipulation. *Sensors* 15 (2015) 10973-10990.
- M. R. Buyong, F. Larki, Y. Takanamura, N. A. Aziz, J. Yunas, A. A. Hamzah, B. Y. Majlis, "Implementing the Concept of Dielectrophoresis in Glomerular Filtration of Human

- Kidney,” in Semiconductor Electronics (ICSE), 2016 IEEE International Conference on, 2016, pp. 33-37.
- M. R. Buyong, N. A. Aziz, A. A. Hamzah, M. F. M. R. Wee, B. Y. Majlis, “Finite Element Modeling of Dielectrophoretic Microelectrodes Based on a Array and Ratchet Type,” in Semiconductor Electronics (ICSE), 2014 IEEE International Conference on, 2014, pp. 252-255.
- M. R. Buyong, N. A. Aziz, A. A. Hamzah, B. Y. Majlis, “Dielectrophoretic Characterization of Array Type Microelectrodes,” in Semiconductor Electronics (ICSE), 2014 IEEE International Conference on, 2014, pp. 240-243.
- N. A. Aziz, B. Bais, A.A. Hamzah, B. Y. Majlis, “Characterization of HNA etchant for silicon microneedles array fabrication” in Semiconductor Electronics (ICSE), 2008 IEEE International Conference on, 2008, pp. 203-206.
- N. Piacentini, G. Mernier, R. Tornay, P. Renaud, Separation of platelets from other blood cells in continuous-flow by dielectrophoresis field-flow-fractionation. *Biomicrofluidics* 5 (2011) 034122-1 – 034122-8.
- R. Diaz and S. Payen, Biological cell separation using dielectrophoresis in a microfluidic device.
- R. Pethig, Review Article-Dielectrophoresis: Status of the theory, technology and applications. *Biomicrofluidics* 4 (2010), 022811.
- T. P. Hunt and R. M. Westervelt, Dielectrophoresis tweezers for single cell manipulation. *Biomed Microdevices* 8 (2006) 227-230.
- W. H. Fissell, S. Roy “The Implantable Artificial Kidney”, in Seminar in Dialysis, California, 2009, pp. 665-670.
- Y. Kang, D. Li, S. A. Kalams, J.E. Eid, DC-Dielectrophoretic separation of biological cells by size. *Biomed Microdevices* 10 (2008) 243-249.
- Z. J. Twardowski, “Dialyzer Reuse – Part II: Advantages and Disadvantages,” in Seminar in Dialysis, Columbia, 2006, pp. 217-226.