

# POTENSI ELEKTROD SISTEM MIKROELEKTROMEKANIK (MEMS) DIELEKTROFORESIS (DEP) BERPROFIL SERONG SEBAGAI PEMISAH ION SESIUM

## (POTENTIAL OF TAPERED DIELECTROPHORESIS (DEP) MICROELECTROMECHANIC SYSTEMS (MEMS) ELECTRODE AS A CESIUM IONS SEPARATOR)

Nor Farzana Nadiah binti Nasruddin<sup>1</sup>, Muhamad Ramdzan bin Buyong<sup>2</sup>,  
Mohd Idzat bin Idris<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Program Sains Nuklear, Jabatan Fizik Gunaan, Fakulti Sains dan Teknologi

<sup>2</sup>Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik

Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia.

\*Corresponding author: idzat@ukm.edu.my

### ABSTRAK

Pencemaran radionuklid di dalam air adalah antara isu utama jika berlakunya kemalangan reaktor nuklear kerana ia boleh menyebabkan dedahan dalaman kepada hidupan. Kajian pemisahan sesium beradioaktif daripada air banyak dilakukan khususnya selepas kemalangan di reaktor nuklear Fukushima Daiichi. Oleh itu, kajian ini menggunakan Elektrod Sistem Mikroelektromekanik (MEMS) Dielektroforesis (DEP) berprofil serong bagi mengasingkan ion sesium dari garam sesium klorida sebagai gantikan Sesium-137 kerana mempunyai sifat kimia yang sama. Objektif kajian ini ialah menganalisis potensi elektrod Sistem Mikroelektromekanik (MEMS) Dielektroforesis (DEP) berprofil serong sebagai pemisah ion sesium daripada medium dan menentukan frekuensi optimum bagi pemisahan ion sesium tersebut. Simulasi dijalankan dengan menggunakan kaedah pencirian DEP sebelum ion sesium dipisahkan terlebih dahulu. Kaedah pencirian DEP boleh dibahagikan kepada dua iaitu permodelan faktor polarisasi dan permodelan perubahan dinamik dielektrik. Setelah menentukan frekuensi menggunakan perisian analitik MATLAB, ion sesium dipisahkan dengan menggunakan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong yang mempunyai aliran medium bersilang dengan medan elektrik menggunakan daya DEP ( $F_{DEP}$ ). Daya tersebut terbahagi kepada dua iaitu daya tarikan positif ( $P_{DEP}$ ) zarah secara mendatar pada paksi-y dan daya tolakan negatif ( $N_{DEP}$ ) zarah secara menegak pada paksi-z. Daripada data pencirian DEP, ion sesium akan lebih tertarik kepada elektrod berdaya  $P_{DEP}$  pada julat frekuensi 1 kHz sehingga 1 MHz manakala ion sesium mengalami daya  $N_{DEP}$  iaitu daya tolakan zarah daripada elektrod pada frekuensi 200 MHz ke atas. Kajian ini juga menunjukkan bahawa ion sesium boleh dipisahkan daripada medium menggunakan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong. Didapati hanya pada kepekatan 5 ppm sahaja jelas berlakunya proses pemisahan ion sesium daripada medium. Seterusnya, berdasarkan faktor Clausius-Mossotti yang diperolehi, frekuensi optimum bagi pemisahan ion sesium daripada medium ditentukan pada 55 dan 60 kHz kerana ion sesium lebih tertarik kepada elektrod ( $P_{DEP}$ ). Keputusan mendapati bahawa frekuensi 55 kHz adalah frekuensi yang terbaik bagi pemisahan ion sesium daripada medium kerana mempunyai peratusan pemisahan yang tinggi menghampiri 60% berbanding pada frekuensi 60 kHz iaitu hanya 53%.

**Kata kunci:** Elektrod, Sistem Mikroelektromekanik (MEMS), Dielektroforesis (DEP), Pemisahan serong, Ion sesium

## ABSTRACT

*Radionuclide contamination in water becomes a massive issue if a nuclear reactor accident occurs. It can cause internal exposure for living creatures. Studies on separation and adsorption of radionuclide have being done particularly after Fukushima Daichii Nuclear Power Plant accident. Therefore, this research was conducted to study the potential of tapered Dielectrophoresis (DEP) Microelectromechanics Systems (MEMS) electrode as a cesium ions separator and to determine the optimum frequency to separate the ion from a medium. Cesium Chloride (CsCl) was used as a replacement for a radionuclide Cesium-137 because they have similar chemical properties. Characterization of DEP was conducted using simulation before the separation process. This characterization can be divided into two aspects, polarization factors and changes in dielectric dynamic modeling. After frequencies have been determined using analytical MATLAB, cesium ions were separated using DEP (FDEP) force which has the flow of the medium is perpendicular to electric fields. DEP forces can be divided into two which are the attraction force (PDEP) horizontally at the y-axis and the repulsive force (NDEP) vertically at the z-axis. From the DEP characterization data, ion cesium was more attracted to the PDEP electrode in the range of 1 kHz to 1 MHz, while it was repelled from NDEP electrode at more than 200 MHz. This study also showed that tapered DEP (MEMS) electrode has a potential to separate the ion cesium. It revealed that only CsCl with a concentration of 5 ppm could be separated by this process. Subsequently, based on Clausius-Mossotti factor, the optimum frequencies for separation of ion cesium from medium were 55 and 60 kHz because the ion cesium was more attracted to PDEP electrode. Finally, as comparison from both frequencies, 55 kHz was the best value for separation of ion cesium from medium because it had the highest separation percentage up to nearly 60%, while at 60 kHz the separation percentage was only at 53%.*

**Keywords:** Electrode, Microelectromechanic Systems (MEMS), Dielectrophoresis (DEP), Tapered Separation, Cesium Ion

## PENGENALAN

Sejak Perang Dunia Kedua, tenaga nuklear telah diperluaskan penggunaannya **di mana** ianya dipercayai bakal menjadi sumber utama tenaga dunia pada masa hadapan. Walaupun tenaga nuklear seringkali dikaitkan dengan peperangan, ia mampu membekalkan tenaga elektrik kepada jutaan manusia di seluruh dunia. Walaubagaimanapun, telah banyak berlakunya kemalangan reaktor nuklear seperti di Three Miles Island pada tahun 1979, Chernobyl pada tahun 1986, dan yang terbaru Mac 2011 di Fukushima.

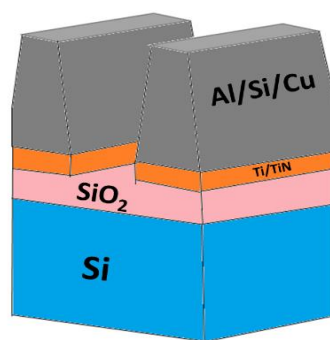
Kemalangan reaktor nuklear di Fukushima adalah disebabkan oleh gegaran muka bumi kerana pergerakan tektonik yang menghasilkan tsunami seterusnya menggagalkan beberapa sistem penyejuk dan akhirnya menyebabkan pencairan bahan api di dalam reaktor tersebut. Hal ini menyebabkan terbebasnya radionuklid berbahaya yang terhasil daripada proses pembelahan radionuklid seperti Sesium-137, Strontium-90 dan Iodin-

131 [1]. Dilaporkan bahawa kebocoran bahan beradioaktif ke persekitaran menyebabkan pencemaran radioaktif pada produk agrikultur khususnya [2]. Malah lebih berbahaya kerana pencemaran radioaktif ini tersebar bukan sahaja di sekitar kawasan nuklear reaktor tetapi juga sehingga 1000 km dari pusat kemalangan reaktor [3].

Setelah kemalangan reaktor nuklear di Fukushima berlaku, pencemaran radioaktif dalam air dikesan di beberapa loji penulenan air [4]. Pencemaran radionuklid di dalam air merupakan kebimbangan yang sangat besar kepada penduduk setempat kerana ia boleh menyebabkan pendedahan sinaran dalaman seterusnya menyebabkan peningkatan keberangskalian menghadapi kanser [2]. Maka, kajian ini dilakukan bagi melihat potensi elektrod Sistem Mikroelektromekanik (MEMS) Dielektroforesis (DEP) berprofil serong menapis atau memisahkan radionuklid yang larut dalam air terutamanya radionuklid Sesium-137 berpunca dari kemalangan reaktor.

Dalam kajian ini, sesium-137 digantikan dengan Sesium Klorida kerana kedua-duanya mempunyai sifat kima yang serupa. Elektrod (MEMS) DEP berprofil serong dilihat berpotensi untuk memisahkan ion sesium daripada medium agar kaedah ini boleh diguna pakai pada masa hadapan untuk memisahkan Sesium-137 daripada air tercemar. Elektrod (MEMS) DEP terkenal dengan kecekapan pemisahan zarah daripada medium pada frekuensi tertentu untuk memanipulasikan pergerakan zarah. Elektrod (MEMS) DEP ini akan menggerakkan zarah mengikut daya yang ditentukan dan mengalirkan zarah pada laluan yang dikhaskan tanpa menyebabkan zarah terlekat pada elektrod. Ini menyebabkan elektrod tidak tercemar dan boleh diguna pakai untuk jangka masa yang panjang tanpa perlu ditukar [5].

Elektrod ini dihasilkan daripada Aluminium, Silicon dan Kuprum. Elektrod ini berketebalan  $4\mu\text{m}$  dan mempunyai darjah keserongan sebanyak  $70^\circ$  seperti pada Rajah 1 [6]. Jika dibandingkan dengan elektrod yang mempunyai dinding tepi bersudut  $90^\circ$  (potongan tegak), elektrod yang mempunyai darjah keserongan sebanyak  $\sim 65^\circ$  menghasilkan medan elektrik yang paling besar pada dua bahagian yang berlainan (bucu atas dan bucu bawah), yang boleh menghasilkan medan elektrik tidak sekata yang paling berkesan di dalam medium [7]. Maka terhasillah daya tarikan ( $P_{\text{DEP}}$ ) dan daya tolakan ( $N_{\text{DEP}}$ ) terhadap zarah dengan lebih sekata dan terarah.



Rajah 1. Gambaran elektrod daripada AlSiCu yang mempunyai keserongan sebanyak  $70^\circ$ .

Justeru, kaedah ini amat sesuai digunakan untuk mengurangkan kos bagi penggantian elektrod untuk setiap pemisahan zarah yang berlaku terutamanya jika digunakan bagi pemisahan radionuklid daripada air. Ini adalah kerana elektrod ini memerlukan medium yang mengalir untuk memastikan pemisahan zarah berlaku dengan efektif pada laluan elektrod.

## BAHAN DAN KAEDAH

Kaedah kajian ini dimulakan dengan proses simulasi iaitu dengan mencari nilai kekonduksian dan ketulusan bagi ion sesium dan medium. Perisian analitik MATLAB R2013a digunakan bagi mencari faktor Clausius-Mossotti bagi pemisahan ion sesium. Seterusnya, kajian diteruskan dengan melakukan memidahkan ion sesium daripada medium dengan menggunakan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong bagi menentukan frekuensi optimum bagi pemisahan sesium ion daripada medium.

### *Penentuan frekuensi masukan menggunakan perisian analitik MATLAB*

Sebelum ion sesium dipisahkan, simulasi dijalankan dengan menggunakan kaedah pencirian DEP. Kaedah pencirian DEP boleh dibahagikan kepada dua iaitu permodelan faktor polarisasi dan permodelan perubahan dinamik dielektrik. Pemodelan faktor polarisasi terdiri daripada dua tindak balas iaitu nilai dielektrik di antara zarah sasaran dan medium kesan terhadap nilai frekuensi masukan yang dibekalkan. Tindak balas perubahan nilai dielektrik zarah boleh digunakan sebagai salah satu teknik bagi pengesanan zarah tersebut. Tindak balas ini akan menghasilkan pergerakan zarah seterusnya berlakunya proses manipulasi dan pemisahan zarah berdasarkan perbezaan nilai dielektrik zarah tersebut. Nilai kekonduksian medium yang menentukan arah pergerakan zarah adalah tindak balas dielektrik medium yang mengandungi zarah.

Pencirian DEP seterusnya dilakukan dengan menilai perubahan dinamik dielektrik di antara zarah dan medium. Pemodelan perubahan dinamik dielektrik adalah untuk memperjelaskan lagi tindakbalas frekuensi masukan terhadap zarah iaitu terhadap nilai ketulusan dan kekonduksian bagi zarah dan medium. Ini berbeza dengan nilai faktor polarisasi yang menunjukkan faktor polarisasi yang terdiri daripada magnitud dan arah pergerakan zarah sebagai tindakbalas frekuensi masukan terhadap zarah dan medium. Parameter utama adalah saiz zarah, faktor nilai ketulusan, kekonduksian, dan kekonduksian permukaan bagi zarah dan medium yang berkadar dengan peningkatan dan penurunan nilai frekuensi masukan. Oleh itu, sebelum ujikaji dilakukan, model faktor polarisasi dan perubahan dinamik dielektrik zarah dan medium dapat memberikan anggaran magnitud dan arah pergerakan zarah. Ini merupakan faktor utama penentuan pergerakan zarah tersebut mengikut arah atau berlawanan arah daripada kawasan keamatan medan elektrik yang tinggi. Setelah kesemua nilai masukan telah lengkap, nilai-nilai tersebut akan dimasukkan ke dalam pengkodan Matlab. Pengkodan Matlab adalah hasil daripada persamaan faktor polarisasi yang berdasarkan kedua-dua persamaan di bawah bergantung pada nilai frekuensi masukan yang dipilih. Perisian Matlab yang digunakan adalah MATLAB R2013a [5].

$$\text{CMF}_{\text{kekonduksian}} = \frac{\sigma_{\text{zarah}} - \sigma_{\text{medium}}}{\sigma_{\text{zarah}} + 2\sigma_{\text{medium}}} \quad (1)$$

$$\text{CMF}_{\text{ketulusan}} = \frac{\epsilon_{\text{zarah}} - \epsilon_{\text{medium}}}{\epsilon_{\text{zarah}} + 2\epsilon_{\text{medium}}} \quad (2)$$

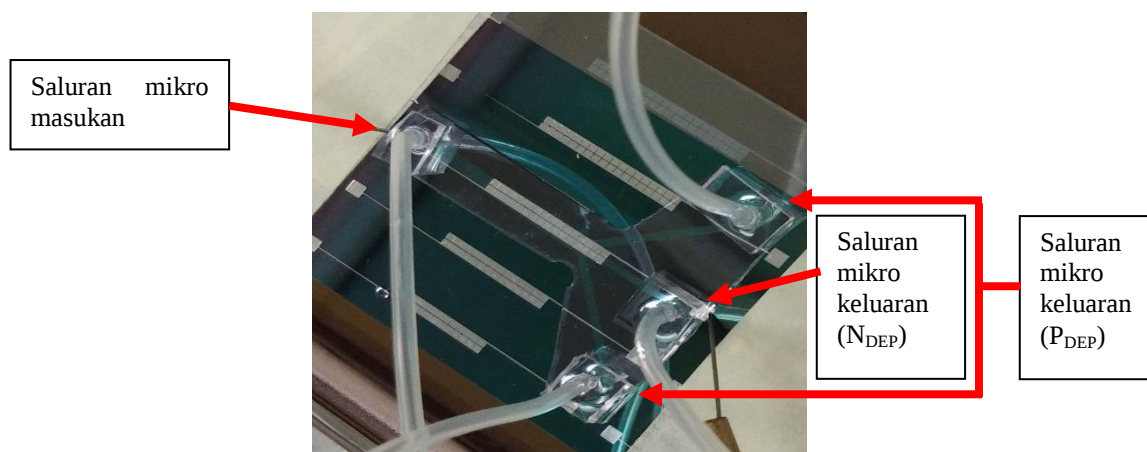
Pengkodan Matlab R2013a digunakan bagi memperjelaskan faktor polarisasi dengan menilai perubahan dinamik dielektrik zarah iaitu perubahan nilai ketulusan dan kekonduksian di antara zarah dan medium. Perisian ini memberikan ruang bagi pemilihan nilai frekuensi pindah silang yang baru dan optimum bagi proses manipulasi zarah pada  $F_{\text{DEP}}$  yang berbeza. Pemilihan nilai purata titik tengah iaitu nilai frekuensi pindah silang yang baru dan optimum di antara dua zarah akan menghasilkan penyelarasan dan pengimbangan  $F_{\text{DEP}}$  yang berbeza. Setelah semua faktor diambil kira, frekuensi yang digunakan dalam kajian ini ialah 20, 40, 60, 600 dan 6000 kHz.

***Pemisahan ion sesium daripada medium menggunakan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong***

Sampel disediakan dengan menimbang garam Sesium Klorida (99.65%, LeapChem) dengan menggunakan alat penimbang (SARTORIUS Model ENTRIS 2241-1S) pada 1, 3, dan 5 mg. Setelah itu, air suling akan diambil daripada penapis air (ELGA Model ELGASTAT PRIMA 2) sebanyak 3L dan diletakkan di dalam tiga bikar (DURAN) yang berisipadu 1L. Kemudian, setiap berat garam akan dimasukkan ke dalam setiap bikar tersebut. Seterusnya, garam Sesium Klorida akan dilarutkan di dalam air suling menggunakan pengadun magnet (FAVORIT ST0707V2) selama 20 minit untuk mendapatkan larutan Sesium Klorida yang homogen. Kepekatan 1, 3, dan 5 ppm ini dipilih adalah kerana ICP-MS ELAN 6000 yang disediakan hanya mampu mengesan kepekatan elemen sehingga 5 ppm sahaja. ICP-MS akan mudah rosak jika kepekatan elemen lebih tinggi daripada yang ditetapkan.

Seterusnya, 20 ml larutan Sesium Klorida pada kepekatan 1, 3, dan 5 ppm akan dimasukkan ke dalam tiga biji vial yang berisipadu 20 ml untuk dihantar ke ICP-MS di Jabatan Sains Sekitaran, UKM bagi menentukan kepekatan sebelum ion sesium dipisahkan. Kemudian, larutan Sesium Klorida pada setiap kepekatan ppm akan dipisahkan ion sesiumnya daripada medium dengan menggunakan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong yang mempunyai darjah keserongan pada 70°.

Sebelum ion sesium dipisahkan daripada medium, nilai frekuensi masukan haruslah ditentukan berdasarkan faktor Clausius-Mossotti yang diperolehi daripada pengkodan Matlab yang telah dijalankan. Pemisahan ion sesium dilakukan dengan memasukkan larutan Sesium Klorida pada kepekatan yang dipilih sebanyak 20 ml pada saluran masukan mikro di elektrod (MEMS) DEP berprofil serong pada frekuensi masukan yang ditentukan. Larutan Sesium Klorida dimasukkan pada saluran mikro masukan menggunakan pipet (FINNPIPETTE model F2) secara berterusan. Hasil pemisahan ion sesium dikeluarkan pada saluran mikro pengeluaran yang telah disambung dengan vial.



Rajah 2. Saluran mikro elektrod Sistem Mikroelektromekanik (MEMS) Dielektroforesis (DEP) berprofil serong

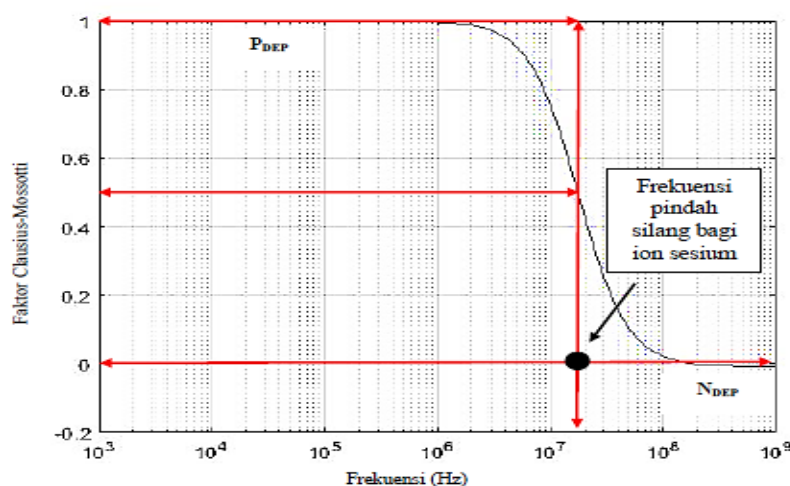
Saluran mikro pengeluaran pada elektrod (MEMS) DEP berprofil serong mempunyai tiga salur iaitu 2 saluran untuk  $P_{DEP}$  dan 1 saluran untuk  $N_{DEP}$  seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Walaupun  $P_{DEP}$  mempunyai dua saluran keluaran, tetapi jumlah isipadu keluaran bagi kedua-dua saluran  $P_{DEP}$  adalah sama dengan isipadu keluaran pada satu saluran  $N_{DEP}$ . Hasil keluaran pada  $P_{DEP}$  akan digabungkan sebelum dihantar ke ICP-MS. Maka, isipadu keluaran bagi saluran  $N_{DEP}$  dan  $P_{DEP}$  masing-masing adalah 10 ml. Hasil bagi keluaran  $N_{DEP}$  dan  $P_{DEP}$  bagi kepekatan 1, 3, dan 5 ppm untuk setiap nilai frekuensi masukan iaitu 20, 40, dan 60 kHz akan dihantar ke ICP-MS bagi menentukan kepekatan selepas ion sesium dipisahkan.

#### ***Analisis kepekatan ion sesium menggunakan ICP-MS***

Hasil daripada data yang diperolehi daripada ICP-MS akan dianalisis untuk melihat potensi elektrod (MEMS) DEP berprofil serong sebagai pemisah ion sesium daripada medium. Selain itu, hasil juga akan dianalisis untuk menentukan daya DEP berlaku berdasarkan faktor Clausius-Mossotti yang diperolehi setelah pengkodan Matlab dijalankan. Seterusnya, nilai frekuensi optimum bagi pemisahan ion sesium daripada medium ditentukan. Akhir sekali, data akan dikira peratus pemisahannya untuk melihat kecekapan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong sebagai pemisah ion sesium daripada medium.

#### ***Analisis kepekatan ion sesium menggunakan ICP-MS***

Penentuan peratusan pemisahan ion sesium daripada medium adalah berdasarkan rumus di bawah di mana  $R$  adalah peratusan pemisahan (%),  $C_0$  adalah kepekatan awal (mg/L), dan  $C_t$  adalah kepekatan akhir (mg/L) [8].



Rajah 3. Faktor Clausius-Mossotti dan frekuensi pindah silang bagi ion sesium

$$R (\%) = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

## HASIL DAN PERBINCANGAN

### *Dapatan frekuensi daripada perisian analitik MATLAB*

Setelah nilai kekonduksian dan ketulusan bagi zarah dan medium serta jejari ion bagi ion sesium di masukkan ke dalam pengkodan MATLAB, graf faktor Clausius-Mossotti akan terhasil. Rajah 3 menunjukkan graf faktor Clausius-Mossotti memberikan nilai frekuensi masukan bagi daya yang diperlukan sama ada  $P_{DEP}$  mahupun  $N_{DEP}$ . Berdasarkan Rajah 3, ion sesium akan lebih tertarik kepada elektrod iaitu daya  $P_{DEP}$  pada julat frekuensi 1 kHz sehingga 1 MHz manakala ion sesium mengalami daya  $N_{DEP}$  iaitu daya tolakan zarah daripada elektrod pada frekuensi 200 MHz ke atas. Nilai frekuensi pindah silang bagi ion sesium berdasarkan faktor Clausius-Mossotti adalah pada 1.9 MHz. Frekuensi pindah silang adalah satu nilai frekuensi tertentu daripada penyilangan dielektrik iaitu nilai kekonduksian diantara zarah dan medium yang menghasilkan transaksi dari  $P_{DEP}$  ke  $N_{DEP}$  atau  $N_{DEP}$  ke  $P_{DEP}$  [5].

### *Kepekatan ion sesium sebelum dipisahkan menggunakan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong*

Setelah sampel disediakan, sampel dihantar ke ICP-MS untuk memastikan kepekatan sebelum adalah sama seperti yang telah dianggarkan. Akan tetapi terdapat sedikit perbezaan kepekatan yang diperoleh dari ICP-MS dengan kepekatan yang dikira secara teori seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1. Ini adalah kerana berlakunya ralat ketika menimbang berat Sesium Klorida.

**Jadual 1.** Kepekatan ion sesium sebelum dipisahkan

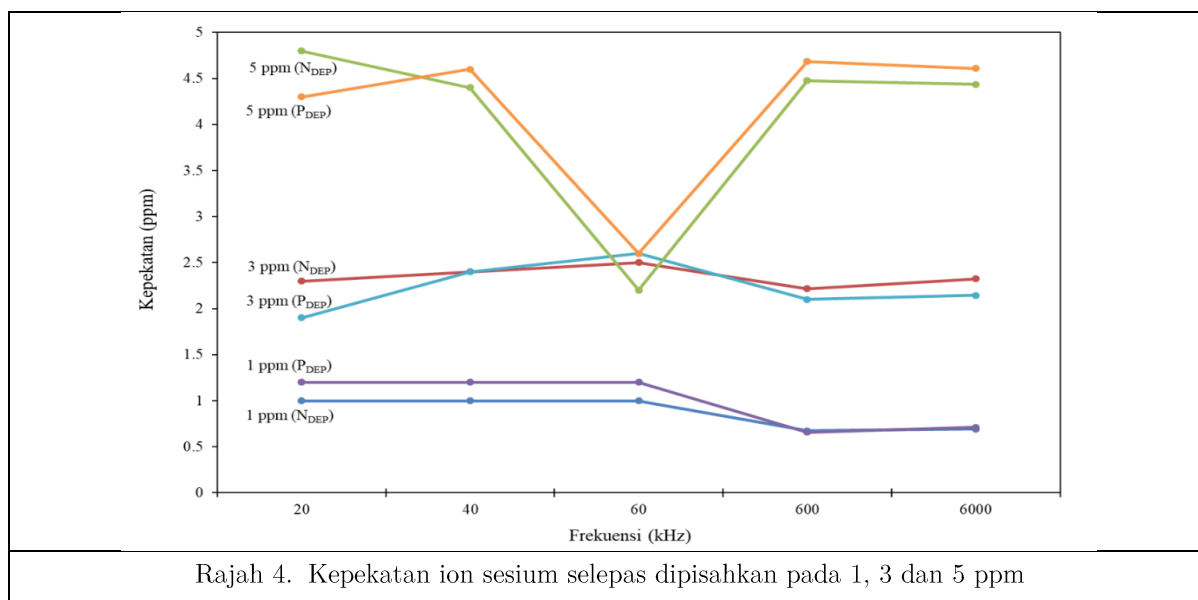
| Penyediaan Sampel  |                      |        | Kepekatan dari ICP-MS<br>bagi Ion Sesium (ppm) | Kepekatan Ion Sesium<br>secara Teori (ppm) |
|--------------------|----------------------|--------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Isipadu<br>air (L) | Berat<br>Klorida (g) | Sesium |                                                |                                            |
| 1.0                | 0.001                |        | 1.12                                           | 0.79                                       |

|       |      |      |
|-------|------|------|
| 0.003 | 2.62 | 2.37 |
| 0.005 | 4.67 | 3.95 |

### Hasil pemisahan ion sesium pada kepekatan 1, 3 dan 5 ppm

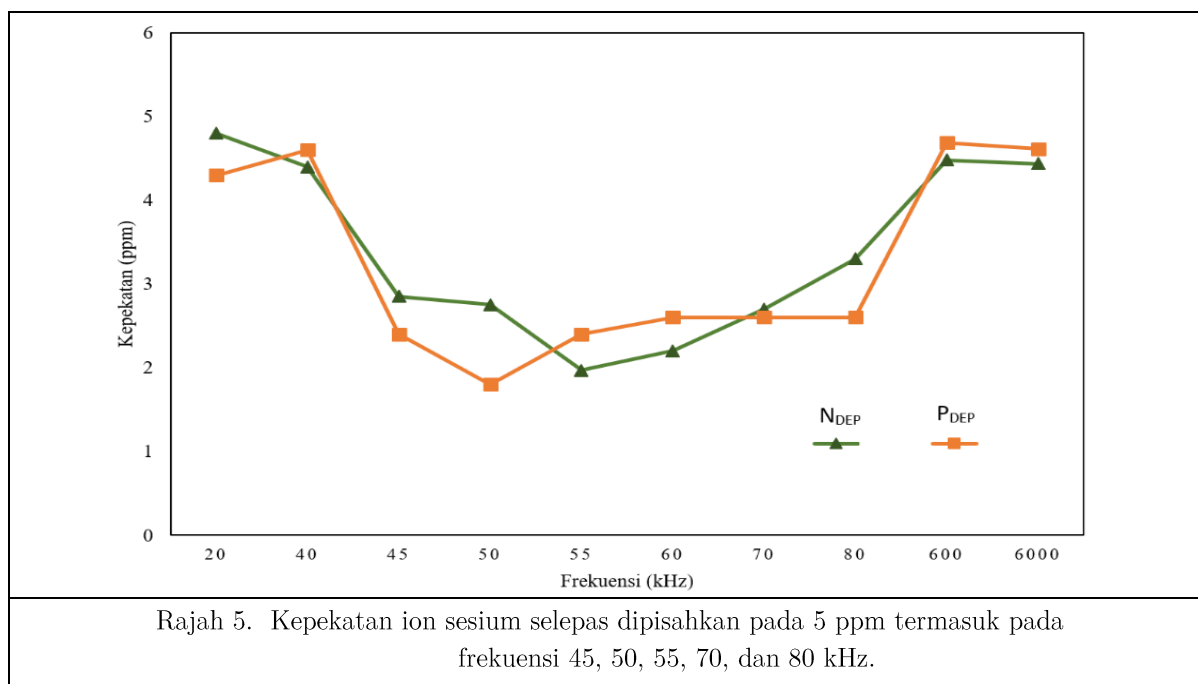
Hasil setelah pemisahan ion sesium pada 1, 3 dan 5 ppm diterjemah dalam Rajah 4 pada frekuensi 20, 40, 60, 600 dan 6000 kHz. Keputusan menunjukkan bahawa tiada pemisahan ion sesium yang sangat ketara berlaku pada kepekatan 1, 3 dan 5 ppm di setiap frekuensi masukan dimana kepekatan ion sesium selepas dipisahkan menggunakan elektrod adalah hampir sama dengan kepekatan ion sesium sebelum dipisahkan. Keputusan juga menunjukkan bahawa pada frekuensi rendah (20 dan 40 kHz) dan pada frekuensi tinggi (600 dan 6000 kHz) tidak menunjukkan sebarang perubahan. Ini adalah kerana kepekatan larutan Sesium Klorida yang terlalu rendah dan saiz ion sesium juga terlalu kecil iaitu 0.174 nm menyebabkan ion sesium sukar dipisahkan. Teori DEP amat berkesan jika menggunakan zarah yang bersaiz 1 hingga 100  $\mu\text{m}$  dengan mengambil kira penangkapan DEP, pusingan elektrik (*electrorotation*), gerakan gelombang-bergerak teraruh, dan kesan orientasi [9].

Mengikut teori konduktiviti Maxwell-Wagner dalam heterogen sistem, terdapat pada julat frekuensi yang rendah manakala nilai dielektrik menentukan sifat-sifat sistem dalam medan elektrik pada julat frekuensi yang tinggi [10]. Di dalam kajian ini, terdapat pemisahan dan penolakan yang berlaku pada julat frekuensi rendah, 40-600 kHz bagi sampel 5 ppm. Proses tersebut jelas kelihatan berlaku pada kritikal frekuensi pemisahan iaitu 60 kHz seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4. Mengikut kajian yang dijalankan oleh Libao, peningkatan kepekatan larutan karbon nanotub (CNT) menyebabkan lebih banyak CNT tertarik dan disimpan di kawasan elektrod pada masa yang ditetapkan setelah melalui proses DEP [11]. Oleh kerana terdapat pemisahan ion sesium daripada medium berlaku pada frekuensi 60 kHz, maka kajian ini membesarkan spektrum frekuensi pada 60 kHz dengan menambah frekuensi masukan pada 45, 50, 55, 70, dan 80 kHz



Berdasarkan Rajah 5, didapati bahawa terdapat pemisahan ion sesium daripada medium yang berlaku pada frekuensi masukan tambahan tersebut. Ini membolehkan pemilihan frekuensi optimum bagi pemisahan ion sesium daripada medium. Rajah tersebut juga menunjukkan terdapat perbezaan kepekatan ion sesium yang ketara pada kedua-dua daya keluaran iaitu daya tarikan zarah kepada elektrod ( $N_{\text{DEP}}$ ) dan daya tolakan zarah daripada elektrod ( $P_{\text{DEP}}$ ) pada frekuensi 50, 55 dan 60 kHz. Akan tetapi, pada frekuensi 50 kHz kepekatan ion sesium lebih banyak di  $N_{\text{DEP}}$  daripada  $P_{\text{DEP}}$  di mana ia tidak mematuhi faktor Clausius-Mossotti. Berdasarkan faktor Clausius-Mossotti, seharusnya kepekatan ion sesium lebih tertarik kepada  $P_{\text{DEP}}$  pada frekuensi tambahan

yang dibekalkan. Ini berbeza dengan kajian lain tentang respon koloid terhadap daya DEP. Ia menunjukkan bahawa  $N_{\text{DEP}}$  lebih dominan berdasarkan faktor Clausius-Mossotti pada frekuensi rendah dan tinggi [12]. Justeru, penentuan frekuensi optimum bagi pemisahan ion sesium daripada medium pada kepekatan 5 ppm dalam kajian ini haruslah berdasarkan faktor Clausius-Mossotti iaitu pada 55 dan 60 kHz. Ini adalah kerana hasil menunjukkan ion sesium mengalami daya  $P_{\text{DEP}}$  iaitu daya tarikan zarah terhadap elektrod walaupun tiada perbezaan kepekatan ion sesium yang ketara pada kedua-dua daya keluaran iaitu daya tarikan zarah kepada elektrod ( $N_{\text{DEP}}$ ) dan daya tolakan zarah daripada elektrod ( $P_{\text{DEP}}$ ).



### Peratusan pemisahan ion sesium pada kepekatan 5 ppm

Oleh kerana hanya pada kepekatan 5 ppm sahaja terdapat pemisahan ion sesium daripada medium yang berlaku, maka peratusan pemisahan ion sesium hanya ditentukan pada kepekatan 5 ppm. Peratusan pemisahan ion sesium hanya akan ditentukan pada frekuensi 45, 50, 55, 60, 70, dan 80 kHz pada setiap  $P_{\text{DEP}}$  dan  $N_{\text{DEP}}$ . Hasil daripada peratusan pemisahan ditunjukkan di dalam Jadual 2.

**Jadual 2.** Peratusan pemisahan ion sesium pada kepekatan 5 ppm

| Frekuensi (kHz)         |                  | 45    | 50    | 55    | 60    | 70    | 80    |
|-------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Peratusan Pemisahan (%) | $N_{\text{DEP}}$ | 38.97 | 41.11 | 57.82 | 52.89 | 42.18 | 29.34 |
|                         | $P_{\text{DEP}}$ | 48.61 | 61.46 | 48.61 | 44.33 | 44.33 | 44.33 |

Berdasarkan Jadual 2, didapati bahawa pada frekuensi 45, 50, 70 dan 80 kHz, peratusan pemisahan ion sesium masing-masing adalah 48.61 %, 61.46 %, 44.33 %, dan 44.33 %. Peratusan pemisahan bagi frekuensi ini lebih tinggi di kawasan  $P_{\text{DEP}}$  di mana ia adalah kawasan tarikan zarah kepada elektrod. Manakala pada frekuensi 55 dan 60 kHz, peratusan pemisahan ion sesium lebih tinggi di kawasan  $N_{\text{DEP}}$  iaitu pada 57.82 % dan 52.89 %. Walaupun peratusan pemisahan ion sesium daripada medium lebih besar pada frekuensi 50 kHz, akan tetapi frekuensi yang diberikan tidak mematuhi daya yang sepatutnya diperolehi berdasarkan faktor Clausius-Mossotti. Berdasarkan faktor optimum yang telah dipilih iaitu 55 dan 60 kHz, didapati bahawa pada frekuensi

55 kHz hampir separuh ion sesium dapat dipisahkan daripada medium. Ini menunjukkan bahawa frekuensi 55 kHz adalah frekuensi optimum yang terbaik untuk memisahkan ion sesium. Berdasarkan kajian Muhamad Ramdzan Buyong [6] yang menggunakan elektrod (MEMS) DEP berprofil serong bagi memisahkan 5 nisbah kepekatan berbeza campuran medium bersama sel darah merah dan platelet, kadar kecekapan bagi pemisahan kelima-lima kepekatan tersebut adalah 90 – 99.9%. Di mana bagi nisbah kepekatan 0.60:1 dan 0.70:1, peratus kecekapan pemisahannya adalah 90 % - 95 %. Manakala bagi nisbah kepekatan 0.27:1, 0.28:1, dan 0.45:1, peratus kecekapan pemisahan hampir 99.9 %.

## KESIMPULAN

Kajian ini dilakukan bagi melihat potensi Elektrod Sistem Mikroelektromekanik (MEMS) Dielektroforesis (DEP) berprofil serong sebagai pemisah ion sesium daripada medium dengan menggunakan frekuensi masukan 20, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 600 dan 6000 kHz yang ditetapkan menggunakan perisian analitik MATLAB. Daripada hasil kajian ini didapati bahawa tiada pemisahan ion sesium yang ketara pada kepekatan 1 dan 3 ppm walaupun frekuensi yang diberikan tinggi mahupun rendah. Dengan berpanduan faktor Clausius-Mossotti didapati ion sesium pada kepekatan 5 ppm dapat dipisahkan separuh (57.82%) daripada medium pada frekuensi 55 kHz. Justeru, dapat disimpulkan bahawa Elektrod Sistem Mikroelektromekanik (MEMS) Dielektroforesis (DEP) berprofil serong berupaya untuk merawat air yang tercemar dengan radionuklid Sesium-137 jika berlaku kemalangan reaktor.

## PENGHARGAAN

Kajian ini dibiaya oleh Geran Galakan Penyelidik Muda, Universiti Kebangsaan Malaysia (GGPM-2017-042). Kajian ini dilakukan di Jabatan Sains Nuklear, Jabatan Sains Sekitaran, dan Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik, UKM yang dibantu oleh pensyarah dan staff profesional.

## RUJUKAN

1. Tetsuji, I., Gohei, H., Satoru Endo. 2015. Comparison of the accident process, radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima-1. *Journal of Radiation Research*. 56(S1):56-61.
2. Sato, I., Kudo, H., & Tsuda, S. 2011. Removal Efficiency of Water Purifier and Adsorbent for Iodine, Cesium, Strontium, Barium and Zirconium in Drinking Water. *The Journal of Toxicological Sciences* 36(6): 829-834.
3. Hamasaki, T., Nakamichi, N., Teruya, K., & Shirahata, S. 2014. Removal efficiency of Radioactive Cesium and Iodine Ions by a Flow-Type Apparatus Designed for Electrochemically Reduced Water Production. *PLoS ONE* 9(7): 1-11.
4. Ministry Health, Labour, and Welfare. 2011. <http://www.mhlw.go.jp/english/stf/houdou/bukyoku/kenkou/html>. [25 Disember 2017]
5. Muhamad Ramdzan Buyong. 2016. Dielektroforesis Pemindahan Zarah Secara Mendatar dan Menegak Menggunakan Elektrod Berprofil Serong. Tesis Doktor Falsafah. Universiti Kebangsaan Malaysia.
6. Muhamad Ramdzan Buyong, Farhad Larki, Celine Elie Caille, Yuzuru Takamura, Azrul Azlan Hamzah, & Burhanuddin Y. Majlis. 2018. Determination of Lateral or Vertical Dielectrophoresis Forces Using Tapered Microelectrode Array. *Micro and Nano Letters* 13(2): 143-148.

7. Muhamad Ramdzan Buyong, Farhad Larki, Yuzuru Takamura, & Burhanuddin Y. Majlis. 2017. Tapered Microelectrode Array System for Dielectrophoretically Filtration: Fabrication, Characterization, and Simulation Study. *Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS, and MOEMS* 16(4): 044501.
8. Nsami, J.N. & Mbadcam, J.K. 2013. The Adsorption Efficiency of Chemically Prepared Activated Carbon from Cola Nut Shells by ZnCl<sub>2</sub> on Methylene Blue. *Journal of Chemistry* 46(9): 1-7.
9. Jones, T.B. 2003. Basic Theory of Dielectrophoresis and Electrorotation. *Engineering in Medicine and Biology Magazine* 22(6): 33-42.
10. Dukhin, A.S., Ulberg, Z.R., Gruzina, T.G., Karamushka V.I. 2014. Peculiarities of live cells' interaction with micro- and nanoparticles. *Colloid and Interface Science in Pharmaceutical Research and Development*. Elsevier, 193-222.
11. Libao, A., Craig, F. 2013. Dielectrophoretic assembly of carbon nanotubes and stability analysis. *Progress in Natural Science: Materials International*. 23 (4):367-373.
12. Vikhram, V.S., Mark, A.S., Rashid, B. 2015. Enhanced sub-micron colloidal particle separation with interdigitated microelectrode arrays using mixed AC/DC dielectrophoretic scheme. *Biomed Microdevices*. 17:29.