

# Karakterisasi Polutan Logam dan Potensi Radioaktif dalam E-Liquid Rokok Elektrik

Haryono Setiyo Huboyo, Alif Aziz Naristiana Putra\*, Bimastyaji Surya Ramadhan,  
Ika Bagus Priyambodo

Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Diponegoro, Semarang

\*Koresponden email: alifaziz@students.undip.ac.id

Diterima: 20 Desember 2024

Disetujui: 14 Januari 2025

## Abstract

Electronic cigarettes have become a popular alternative for smokers, but research on the pollutants contained in these products remains limited, especially in Indonesia. This study aims to characterise the metal content and radioactive potential of e-liquid from electronic cigarettes marketed in Indonesia. Five e-liquid samples from popular brands were selected based on user surveys and analysed to detect potential hazards. The samples consisted of mango-flavoured saline nicotine e-liquid with a nicotine concentration of 30 mg, which was analysed using neutron activation analysis (NAA) and total alpha and beta radiation measurements. The results showed the presence of heavy metals such as aluminium (Al), titanium (Ti), copper (Cu), nickel (Ni), arsenic (As) and manganese (Mn) with varying concentrations between samples. Aluminium was the dominant metal with the highest concentration reaching  $66.256 \pm 6.131 \mu\text{g/g}$ . Although alpha and beta radiation activity was below the detection limit, the presence of certain heavy metals, such as nickel and arsenic, indicates potential health and environmental risks. This study provides valuable insights into the contaminants in e-liquid products in Indonesia, which can be used as a basis for developing regulations to improve product safety.

**Keywords:** *e-liquid, electronic cigarettes, metals, radioactive, neutron activation analysis (naa)*

## Abstrak

Rokok elektrik telah menjadi alternatif populer bagi perokok, tetapi penelitian mengenai kandungan polutan dalam produk ini, khususnya di Indonesia, masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi kandungan logam dan potensi radioaktif pada e-liquid rokok elektrik yang dipasarkan di Indonesia. Lima sampel e-liquid dari merek populer dipilih berdasarkan survei pengguna dan dianalisis untuk mendeteksi potensi bahaya yang ditimbulkan. Lima sampel e-liquid *salt nicotine* dengan rasa mangga dan kadar nikotin 30 mg dipilih berdasarkan survei pengguna dan dianalisis menggunakan metode Analisis Aktivasi Neutron (NAA) dan pengukuran radiasi alfa dan beta total. Hasil menunjukkan bahwa e-liquid mengandung logam berat seperti Aluminium (Al), Titanium (Ti), Tembaga (Cu), Nikel (Ni), Arsen (As), dan Mangan (Mn), dengan konsentrasi yang bervariasi antar sampel. Aluminium merupakan logam dominan dengan konsentrasi tertinggi mencapai  $66,256 \pm 6,131 \mu\text{g/g}$ . Meskipun aktivitas radiasi alfa dan beta berada di bawah batas deteksi, keberadaan logam berat tertentu seperti nikel dan arsen, mengindikasikan potensi risiko kesehatan dan lingkungan. Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai kandungan polutan dalam produk e-liquid di Indonesia, yang dapat menjadi dasar pengembangan regulasi untuk meningkatkan keamanan produk.

**Kata Kunci:** *E-Liquid, Rokok Elektrik, Logam, Radioaktif, Analisis Aktivasi Neutron (NAA).*

## 1. Pendahuluan

Rokok elektrik, atau *vape*, telah menjadi fenomena global yang menarik perhatian baik dari kalangan perokok maupun nonperokok. Seiring dengan popularitasnya yang meningkat, berbagai jenis rokok elektrik muncul di pasaran, menawarkan alternatif yang dianggap lebih aman dibandingkan rokok tembakau tradisional. Berbagai cara telah ditemukan untuk mencegah penyakit dan kematian akibat rokok, salah satunya adalah rokok elektrik, yang memberikan nikotin yang diupkan melalui hasil penguapan cairan yang disebut e-liquid [1]. E-liquid terdiri dari berbagai komponen, termasuk propilen glikol, gliserin nabati, nikotin, dan berbagai perasa [2]. Perkembangan teknologi dan inovasi dalam industri ini telah menyebabkan pergeseran signifikan dalam pola konsumsi rokok di kalangan masyarakat.

Sebelum munculnya rokok elektrik, rokok tembakau merupakan pilihan utama bagi banyak orang. Meskipun popularitasnya, rokok tembakau memiliki dampak buruk yang signifikan terhadap kesehatan, dengan angka kematian yang tinggi akibat penyakit terkait merokok. Asap rokok dan pencemaran udara

merupakan dua faktor risiko penting yang berkontribusi pada tingginya tingkat kematian, keduanya menjadi penyebab utama kematian yang sebenarnya dapat dihindari. Semakin sering seseorang terpapar asap rokok, semakin rentan ia terkena berbagai penyakit serius, termasuk gangguan pernapasan dan penyakit kardiovaskular [3], [4]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa rokok tembakau mengandung polutan logam berat dan radioaktif yang berkontribusi terhadap hal-hal tersebut.

Asap rokok yang dihasilkan melalui pembakaran tembakau menghasilkan campuran partikel dan gas yang sangat kompleks. Rokok juga mengandung lebih dari 8000 zat berbeda, yang sekitar 100 diantaranya merupakan zat karsinogenik. Selain beragam dan karsinogenik, asap rokok konvensional juga mengandung berbagai zat radioaktif, seperti polonium-210 ( $^{210}\text{Po}$ ), timbal-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ), dan berbagai zat radioaktif lainnya [5], [6]. Dengan berkembangnya penelitian mengenai polutan dalam rokok tembakau, kesadaran akan bahaya yang ditimbulkannya semakin meningkat.

Pergeseran menuju rokok elektrik sering kali dipicu oleh persepsi bahwa produk ini lebih aman dibandingkan rokok tembakau. Namun, pandangan ini tidak selalu didukung oleh bukti ilmiah yang memadai. Persepsi publik, baik di kalangan perokok maupun nonperokok, terhadap rokok elektrik masih beragam, mencerminkan ketidakpastian mengenai dampak kesehatan jangka panjang dari penggunaannya [7], [8].

Persepsi masyarakat mengenai rokok elektrik yang dianggap lebih aman ini membuat berbagai pihak meneliti lebih lanjut mengenai kandungan dalam rokok elektrik. Berbagai studi terbaru juga menemukan kandungan zat-zat berbahaya pada penggunaan jenis rokok ini. E-liquid dari rokok ini mengandung berbagai unsur logam, baik logam berat, logam esensial, maupun logam ringan [9], [10]. Efek berbahaya yang terkait dengan paparan rokok elektrik juga memicu efek kanker serta kerusakan DNA [11]. Selain itu, efek perilaku adiktif juga telah ditemukan pada subjek yang terpapar rokok elektrik secara kronis, seperti ketergantungan rokok elektrik yang terjadi setelah penggunaan rokok elektrik dalam jangka panjang [12].

Walaupun penelitian mengenai kandungan polutan pada rokok elektrik sudah dilakukan di luar negeri, studi yang sebanding di Indonesia masih sangat terbatas. Sejumlah penelitian internasional mengindikasikan adanya potensi polutan dalam e-liquid, namun informasi yang tersedia masih minim [13], [14]. Hal ini menimbulkan kebutuhan mendesak untuk menyelidiki secara mendalam tentang kontaminan ini, serta bagaimana potensi bahayanya saat berada dalam fase gas atau aerosol [9].

Penelitian lain juga telah melihat kandungan serta potensi emisi isotop dan radioaktif dari rokok konvensional di Indonesia, yang memiliki dampak potensial terhadap kesehatan manusia dan lingkungan [15]. Meskipun demikian, penelitian mengenai kandungan dan potensi emisi isotop dan radioaktif dari asap rokok elektrik di Indonesia masih terbatas. Kesenjangan pengetahuan ini menciptakan urgensi untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai karakterisasi polutan dalam rokok elektrik dan potensi bahayanya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan pengetahuan dengan metode Analisis Aktivasi Neutron atau *Neutron Activation Analysis* (NAA) dan analisis radiasi total untuk melakukan karakterisasi polutan dalam rokok elektrik. NAA dipilih sebagai metode untuk menganalisis kandungan polutan logam berat pada e-liquid karena keunggulannya dalam sensitivitas dan kemampuan untuk mendeteksi berbagai elemen secara simultan, bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah [16]. Meskipun NAA memerlukan fasilitas nuklir untuk iradiasi dan analisis, berbagai penelitian internasional telah menunjukkan keberhasilan metode ini dalam mengidentifikasi logam berat di berbagai matriks, menjadikannya pilihan yang paling cocok untuk penelitian di Indonesia.

Analisis radiasi total, khususnya pengukuran alfa dan beta total, dilakukan sebagai tahap penyaringan awal untuk menentukan apakah terdapat kandungan radioaktif dalam e-liquid rokok elektrik. Metode ini memberikan gambaran umum mengenai aktivitas radioaktif tanpa memerlukan identifikasi isotop spesifik [17], yang sangat penting mengingat belum ada data sebelumnya mengenai keberadaan radionuklida dalam produk ini. Fokus pada analisis radiasi alfa dan beta disebabkan oleh sifat berbahaya kedua jenis radiasi tersebut, terutama radioaktif buatan, terhadap kesehatan dan lingkungan ketika terakumulasi dalam jumlah yang besar [18]. Radiasi alfa memiliki kemampuan penetrasi yang rendah, namun dapat menyebabkan kerusakan parah pada jaringan jika terakumulasi dalam tubuh melalui inhalasi atau konsumsi. Di sisi lain, radiasi beta dapat menembus kulit dan menyebabkan kerusakan pada jaringan lebih dalam.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi kandungan logam berat dan radioaktif pada e-liquid rokok elektrik yang dipasarkan di Indonesia dengan menggunakan metode NAA dan pengukuran radiasi total alfa dan beta. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan data ilmiah yang komprehensif mengenai potensi bahaya polutan tersebut, baik terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan, sekaligus mengisi kesenjangan informasi yang ada terkait kandungan polutan dalam produk

rokok elektrik di Indonesia. Temuan dari penelitian ini juga dapat menjadi dasar dalam pengembangan kebijakan dan regulasi yang lebih baik untuk pengawasan produk rokok elektrik.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di dua laboratorium utama, yaitu Laboratorium Pengujian Radioaktivitas Lingkungan dan Laboratorium Analisis Aktivasi Neutron di Instalasi Reaktor Kartini, Kawasan Sains dan Edukasi (KSE) Achmad Baiquni BRIN, Sleman, untuk mengkaji kandungan logam berat dan zat radioaktif dalam sampel e-liquid rokok elektrik.

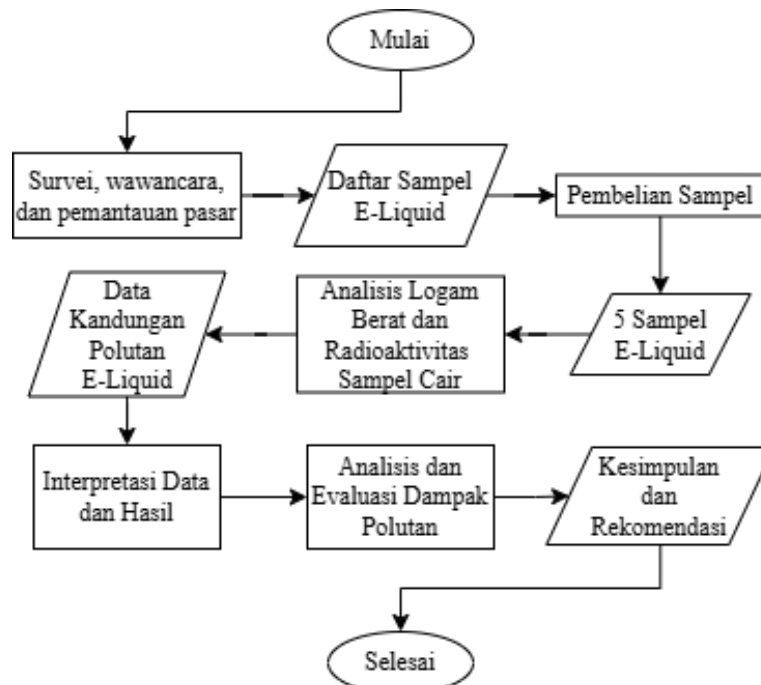
### Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. 5 varian e-liquid rokok elektrik rasa mangga dengan kandungan *salt nicotine* 30 mg,
2. Reaktor TRIGA Mark II (Reaktor Kartini)
3. *Gamma Spectrometer*
4. *iSolo Canberra Multi Channel Analyzer*

### Tata Laksana Penelitian

Alur penelitian dijelaskan dalam **Gambar 1** berikut:



**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

Dalam proses awal, dilakukan wawancara untuk mengidentifikasi preferensi masyarakat terhadap produk e-liquid yang paling sering digunakan. Wawancara ini menargetkan distributor dan pengguna rokok elektrik untuk mengumpulkan data mengenai jenis, merek, rasa, dan kandungan nikotin yang umum digunakan. Berdasarkan hasil survei, lima merek e-liquid rokok elektrik dipilih dengan kontrol berupa e-liquid jenis *salt nicotine*, rasa mangga, dan kadar nikotin sebesar 30 mg. Pemilihan jenis, rasa, dan kadar nikotin yang seragam pada semua sampel bertujuan untuk memastikan bahwa variasi polutan yang dianalisis hanya berasal dari perbedaan antar merek, bukan karena variasi pada jenis, rasa, atau kandungan nikotin.

Pengambilan sampel dilakukan langsung dari distributor resmi untuk memastikan keaslian produk. Setiap merek dipilih secara *purposive* guna mewakili variasi produk yang umum dijual di pasar rokok elektrik Indonesia. Dengan pendekatan ini, penelitian mampu memberikan gambaran mengenai perbedaan kandungan polutan antar merek yang banyak digunakan di pasar. Semua sampel diperlakukan secara konsisten dalam proses pengumpulan dan analisis, dengan volume e-liquid yang digunakan untuk setiap analisis dijaga agar sama guna menjaga validitas dan reliabilitas hasil penelitian.

Metode NAA dalam penelitian ini digunakan untuk mendeteksi unsur logam berat pada sampel e-liquid. Metode ini memungkinkan pengukuran yang akurat terhadap kandungan logam berat dengan

sensitivitas tinggi. Proses dimulai dengan memasukkan sampel e-liquid sebanyak 5 ml ke dalam vial plastik yang disegel rapat. Vial kemudian dimasukkan ke dalam *plastic ziplock* dan diberi nomor sesuai urutan serta jenis sampel. Hal ini bertujuan untuk mencegah kebocoran sampel, yang dapat menyebabkan kontaminasi oleh dan terhadap sampel, agar akurasi perhitungan dan keselamatan peneliti tetap tercapai. Setelah itu, sampel ditempatkan dalam kontainer plastik sebelum diradiasi menggunakan reaktor TRIGA Mark II.

Setelah iradiasi selesai, sampel diukur menggunakan spektrometer gamma untuk menganalisis unsur logam berat berdasarkan spektrum radiasi gamma yang dihasilkan. Analisis spektrum ini memungkinkan identifikasi unsur-unsur logam berat, serta menentukan konsentrasinya di dalam sampel e-liquid. Namun, metode ini hanya mencakup analisis unsur dengan waktu paruh pendek hingga menengah. Oleh karena itu, penelitian ini belum mencakup unsur-unsur dengan waktu paruh panjang atau konsentrasi yang sangat rendah, yang dapat memengaruhi hasil jika dilakukan analisis lebih lanjut.

Metode analisis radiasi alfa dan beta total selanjutnya digunakan sebagai tahap penyaringan awal untuk mendeteksi aktivitas radiasi alpha dan beta dalam sampel e-liquid rokok elektrik. Sampel e-liquid diratakan pada *planchet* untuk memastikan distribusi yang merata. Setelah itu, sampel dipanaskan agar hanya residu padat yang tertinggal di *planchet*. Residu ini kemudian dicacah menggunakan *Multi Channel Analyzer (MCA)* iSolo Canberra. Hasil cacahan, yang dihitung dalam satuan *count per second (cps)*, digunakan sebagai dasar untuk perhitungan radiasi total dalam satuan Becquerel per liter (Bq/L) menentukan tingkat radioaktivitas total dalam sampel e-liquid. Hasil ini memberikan indikasi awal tentang keberadaan radioisotop yang berpotensi berbahaya, yang selanjutnya bisa dianalisis lebih lanjut untuk menentukan jenis radioisotop yang ada.

Semua proses analisis di laboratorium dilakukan secara terstandar dengan prosedur operasional yang telah ditetapkan untuk memastikan keandalan hasil. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah merek dari lima produk e-liquid yang berbeda, sementara variabel terikat adalah konsentrasi logam berat dan radioisotop yang terdeteksi dalam setiap sampel. Dalam penelitian ini, kontrol variabel seperti jenis, rasa, dan kandungan nikotin dipertahankan agar tidak memengaruhi hasil, memastikan bahwa perbedaan yang ditemukan hanya disebabkan oleh perbedaan merek.

Hasil analisis dari NAA dan pengukuran radiasi alfa dan beta digunakan untuk mengukur konsentrasi zat polutan dalam fase gas, yang akan digunakan sebagai dasar untuk evaluasi risiko yang mungkin ditimbulkan oleh e-liquid rokok elektrik. Selain itu, penelitian ini dirancang untuk membuka peluang analisis lebih lanjut. Pengujian yang lebih mendalam dengan memperluas cakupan variasi jenis e-liquid (misalnya, *freebase nicotine*), rasa, dan kadar nikotin diperlukan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis ini diperoleh dari lima sampel e-liquid saltnicotine dengan variasi merek, tetapi rasa dan kadar nikotin yang seragam. Variasi jenis e-liquid lainnya, seperti *freebase nicotine*, serta rasa dan kadar nikotin yang berbeda, belum menjadi fokus penelitian ini. Metode yang digunakan, yaitu Analisis Aktivasi Neutron (NAA), difokuskan pada unsur dengan waktu paruh pendek hingga menengah, sehingga hasil analisis mungkin belum mencakup unsur dengan waktu paruh panjang atau konsentrasi sangat rendah. Dengan demikian, penelitian ini merupakan langkah awal dan memberikan gambaran awal tentang keberagaman unsur dalam e-liquid.

#### *Analisis Kandungan Unsur dalam E-Liquid*

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasikan kandungan unsur dalam e-liquid rokok elektrik menggunakan metode Analisis Aktivasi Neutron (NAA). Data yang diperoleh menunjukkan keberagaman senyawa logam berat, logam esensial, dan logam ringan di antara lima sampel e-liquid yang diuji, dengan satuan dalam  $\mu\text{g/g}$  (mikrogram per gram). Hasil yang disajikan pada **Tabel 1** menunjukkan bahwa e-liquid pada rokok elektrik yang dipasarkan di Indonesia mengandung sejumlah unsur seperti Al (Aluminium), Mg (Magnesium), Ti (Titanium), Cu (Tembaga), Ni (Nikel), Na (Natrium), K (Kalium), As (Arsen), dan Mn (Mangan).

**Tabel 1.** Konsentrasi Logam Berat yang Terdeteksi (dalam  $\mu\text{g/g}\pm\text{SD}$ ) di dalam E-Liquid

| Logam Berat | Sampel 1          | Sampel 2           | Sampel 3           | Sampel 4           | Sampel 5           |
|-------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Al          | 9,918 $\pm$ 2,092 | 30,515 $\pm$ 0,137 | 26,737 $\pm$ 0,811 | 56,644 $\pm$ 4,944 | 66,256 $\pm$ 6,131 |
| Mg          | 0,167 $\pm$ 0,024 | 0,189 $\pm$ 0,013  | 0,510 $\pm$ 0,109  | 0,942 $\pm$ 0,176  | 1,538 $\pm$ 0,658  |

| Logam Berat | Sampel 1    | Sampel 2      | Sampel 3     | Sampel 4     | Sampel 5    |
|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| Ti          | 0,470±0,140 | 1,645±0,419   | 0,266±0,046  | 0,523±0,065  | 0,400±0,056 |
| Cu          | 0,512±0,224 | 2,017±0,630   | 4,612±1,389  | 2,593±0,609  | 5,107±1,290 |
| Ni          | 0,638±0,230 | 0,390±0,125   | 0,128±0,045  | 0,132±0,043  | 0,258±0,090 |
| Na          | 0,209±0,013 | 0,320±0,008   | 0,107±0,007  | 0,074±0,004  | 0,181±0,013 |
| K           | 0,132±0,043 | 0,471±0,147   | 0,066±0,027  | 0,272±0,087  | 0,401±0,133 |
| As          | 0,007±0,001 | 0,002±0,00005 | 0,006±0,0004 | 0,005±0,0006 | 0,005±0,001 |
| Mn          | 0,196±0,035 | 0,797±0,209   | 0,196±0,035  | 0,202±0,048  | 0,198±0,065 |

Sumber: Hasil perhitungan (2024)

Berdasarkan hasil analisis, e-liquid mengandung berbagai jenis logam dengan konsentrasi yang bervariasi di antara sampel. Aluminium (Al) merupakan logam yang mendominasi, dengan konsentrasi tertinggi sebesar  $66,256 \pm 6,131 \mu\text{g/g}$  pada Sampel 5 dan terendah sebesar  $9,918 \pm 2,092 \mu\text{g/g}$  pada Sampel 1. Sebagai logam ringan yang reaktif, paparan kronis terhadap aluminium dapat memengaruhi sistem saraf, berpotensi menyebabkan gangguan neurologis seperti penyakit Alzheimer [19], [20].

Logam lain yang terdeteksi meliputi magnesium (Mg), titanium (Ti), tembaga (Cu), nikel (Ni), mangan (Mn), natrium (Na), dan kalium (K), dengan konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan aluminium. Magnesium, yang merupakan logam esensial, ditemukan dalam jumlah kecil dan aman pada konsentrasi yang terdeteksi. Namun, titanium, meskipun relatif inert, memiliki potensi menyebabkan stres oksidatif jika terkandung dalam bentuk nanopartikel [21].

Tembaga (Cu), yang merupakan logam esensial dengan peran dalam metabolisme tubuh, menjadi perhatian pada kadar tinggi karena dapat menyebabkan risiko kesehatan akut dan kronis, termasuk masalah pernapasan dan potensi efek karsinogenik [22]. Temuan tertinggi untuk tembaga mencapai  $5,107 \pm 1,290 \mu\text{g/g}$  pada Sampel 5. Nikel (Ni), dengan konsentrasi tertinggi  $0,638 \pm 0,230 \mu\text{g/g}$  pada Sampel 1, memiliki risiko signifikan terhadap kesehatan, terutama sebagai karsinogen potensial. Paparan kronis terhadap nikel dapat menyebabkan kanker saluran pernapasan, dermatitis, dan gangguan sistem kekebalan tubuh [22], [23].

Arsen (As) ditemukan dalam konsentrasi sangat rendah tetapi tetap menjadi perhatian serius karena sifatnya yang sangat beracun dan karsinogenik. Meski kadarnya kecil, akumulasi arsen dalam tubuh melalui inhalasi aerosol dari e-liquid dapat meningkatkan risiko gangguan kesehatan jangka panjang, seperti kanker paru-paru dan keracunan sistemik [24], [25]. Mangan (Mn), meskipun esensial dalam kadar kecil, dapat menyebabkan manganisme, gangguan neurologis mirip Parkinson, jika terakumulasi dalam tubuh [26], [27].

Dari sudut pandang lingkungan, pelepasan logam-logam berat ke udara melalui aerosol rokok elektrik berpotensi mencemari udara di sekitarnya. Partikel logam berat yang terdispersi dapat dihirup oleh individu lain di sekitar pengguna atau mengendap di permukaan, menciptakan risiko akumulasi di lingkungan tertutup seperti rumah atau ruang kerja [28]–[30].

Secara keseluruhan, dominasi aluminium sebagai logam utama dan keberadaan logam berat lainnya seperti tembaga, nikel, dan arsen menggarisbawahi pentingnya pengawasan ketat terhadap kandungan logam pada produk e-liquid. Meskipun beberapa logam seperti magnesium dan kalium tergolong esensial, variasi konsentrasi antar sampel menunjukkan adanya potensi perbedaan dalam proses produksi, bahan baku, atau pengendalian kualitas. Dampak kesehatan dari e-liquid ini tidak hanya terkait pada penggunaannya tetapi juga pada lingkungan di sekitar, sehingga diperlukan regulasi yang lebih ketat untuk mengontrol emisi aerosol dari perangkat rokok elektrik.

### *Kandungan Radioaktif dalam E-Liquid*

Pada penelitian ini, pengukuran aktivitas radioaktif dalam sampel e-liquid rokok elektrik dilakukan untuk mengidentifikasi potensi paparan radiasi alpha dan beta. Proses pengukuran ini menggunakan metode *gross alpha* dan *gross beta counting* dengan detektor *solid state silicon* PIPS (*Passivated Implanted Planar Silicon*) dari perangkat iSolo Canberra. Teknik ini dipilih karena kemampuannya mendeteksi aktivitas alfa dan beta dengan tingkat sensitivitas tinggi, yang relevan dalam pengujian sampel konsumen seperti e-liquid. Metode ini memanfaatkan karakteristik radiasi partikel alfa dan beta yang berbeda; radiasi alfa, meskipun memiliki daya ionisasi yang tinggi, mudah dihentikan oleh bahan ringan, sementara radiasi beta memiliki jangkauan lebih besar tetapi daya ionisasi lebih rendah.

Hasil analisis awal menunjukkan bahwa kadar radioaktif diperkirakan sangat rendah. Gambar 2 menunjukkan data yang diperoleh dari Multi Channel Analyzer (MCA) menunjukkan bahwa nilai counts per second (cps) untuk radiasi alfa berada di bawah 10 cps, sementara radiasi background terdeteksi dalam kisaran 0-3 cps. Meskipun pengukuran radiasi beta menunjukkan nilai sedikit lebih tinggi dari latar belakang, tetap saja tidak mencapai 3 kali lipat dari radiasi tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa potensi paparan radiasi dari e-liquid berada di bawah limit deteksi alat yang digunakan.



**Gambar 2.** Hasil Pencacahan Radiasi dalam Sampel E-Liquid menggunakan *Multi Channel Analyzer*  
 Sumber: Dokumentasi penelitian (2024)

Analisis lanjutan menunjukkan bahwa seluruh sampel e-liquid yang diuji memiliki aktivitas radiasi alfa dan beta yang berada di bawah *Minimum Detectable Activity* (MDA), yaitu 0,012 Bq/L untuk aktivitas alfa dan 0,133 Bq/L untuk aktivitas beta. Pengukuran dilakukan selama 10 menit untuk setiap sampel dengan tiga kali pengulangan, untuk memastikan keakuratan dan konsistensi hasil. Hasil pengukuran tersebut disajikan dalam Tabel 2, yang menyajikan nilai aktivitas alfa dan beta untuk lima sampel e-liquid. Hasil tabel menunjukkan bahwa semua sampel memiliki aktivitas radiasi yang sangat rendah dan berada di bawah nilai batas deteksi, menunjukkan bahwa kandungan radioaktif yang ada sangat minim.

**Tabel 2.** Hasil Perhitungan Aktivitas Radiasi Alfa dan Beta Total pada Sampel E-Liquid Rokok Elektrik

| Sampel | Parameter                 | MDA (Bq/L) | Hasil Uji (Bq/L) |
|--------|---------------------------|------------|------------------|
| A      | Radioaktivitas alfa total | 0,012      | <MDA             |
|        | Radioaktivitas beta total | 0,133      | <MDA             |
| B      | Radioaktivitas alfa total | 0,012      | <MDA             |
|        | Radioaktivitas beta total | 0,133      | <MDA             |
| C      | Radioaktivitas alfa total | 0,012      | <MDA             |
|        | Radioaktivitas beta total | 0,133      | <MDA             |
| D      | Radioaktivitas alfa total | 0,012      | <MDA             |
|        | Radioaktivitas beta total | 0,133      | <MDA             |
| E      | Radioaktivitas alfa total | 0,012      | <MDA             |
|        | Radioaktivitas beta total | 0,133      | <MDA             |

MDA: *Minimum Detectable Activity*

Sumber: Hasil perhitungan (2024)

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa risiko radiasi dari penggunaan e-liquid pada rokok elektrik di dalam ruangan sangat rendah dan tidak menambah ancaman paparan radiasi yang signifikan. Kendati demikian, penting untuk mempertimbangkan bahwa pengukuran ini tidak mengidentifikasi isotop tertentu dalam e-liquid, melainkan hanya mengukur aktivitas radiasi alfa dan beta total. Untuk penelitian lanjutan, penambahan teknik seperti spektrometer gamma dapat dilakukan untuk mengidentifikasi jenis radioisotop tertentu jika terdapat kandungan yang relevan dalam sampel. Hasil ini memberikan dasar

penting dalam mengevaluasi keamanan penggunaan e-liquid dari sisi kandungan radioaktif, sekaligus memastikan bahwa produk ini relatif aman dari sudut pandang kualitas udara dalam ruangan.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi kandungan logam berat dan potensi radioaktif dalam lima sampel e-liquid rokok elektrik di Indonesia. Aluminium ditemukan sebagai logam dominan dengan konsentrasi tertinggi hingga  $66,256 \pm 6,131 \mu\text{g/g}$ , diikuti oleh Tembaga, Nikel, dan Arsen yang memerlukan perhatian khusus karena sifat toksiknya. Variasi konsentrasi antar sampel menunjukkan adanya perbedaan dalam bahan baku dan proses produksi. Sementara itu, hasil pengukuran radiasi alfa dan beta menunjukkan aktivitas yang sangat rendah, berada di bawah batas deteksi, sehingga risiko paparan radiasi dari e-liquid ini dapat dianggap minimal.

Meskipun logam esensial seperti magnesium, natrium, dan kalium ditemukan dalam konsentrasi rendah yang tidak berbahaya, keberadaan logam berat seperti nikel dan arsen, berpotensi memberikan dampak kesehatan yang serius, terutama ketika terhirup dalam bentuk aerosol. Selain itu, pelepasan partikel logam berat melalui aerosol juga dapat mencemari udara di lingkungan sekitar pengguna. Oleh karena itu, pengawasan terhadap kandungan logam dalam e-liquid perlu ditingkatkan, dan penelitian lanjutan yang lebih mendalam diperlukan untuk memahami dampaknya terhadap kesehatan dan lingkungan.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai dari Hibah Penelitian Strategis RKAT Fakultas Teknik UNDIP berdasar SK Dekan FT. UNDIP Nomor: 67/UN7.F3/HK/V/2024 Tanggal 15 Mei 2024. Penelitian ini didukung oleh fasilitas riset, dan dukungan ilmiah serta teknis dari Laboratorium Radiasi Yogyakarta dan Laboratorium Analisis Aktivasi Neutron Yogyakarta di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

#### 6. Singkatan

|       |  |
|-------|--|
| NAA   | Neutron Activation Analysis                  |
| PIPS  | Passivated Implanted Planar Silicon          |
| TRIGA | Training, Research, Isotopes, General Atomic |
| MCA   | Multi-Channel Analyzer                       |
| MDA   | Minimum Detectable Activity                  |
| cps   | Count per second                             |
| Bq    | Becquerel                                    |

#### 7. Daftar Pustaka

- [1] M. S. Elsa and M. Nadjib, "Determinan rokok elektrik di Indonesia : data SUSENAS (Survei Sosial Ekonomi Nasional) tahun 2017," *Ber. Kedokt. Masy.*, vol. 35, no. 2, pp. 41–48, 2019.
- [2] P. N. Malani and K. L. Walter, "What Are E-Cigarettes?," *JAMA*, vol. 332, no. 9, pp. 768–768, Sep. 2024, doi: 10.1001/JAMA.2024.14334.
- [3] D. Fahmawati, "Perbedaan Tingkat Konsumsi dan Kadar Kolesterol Darah antara Perokok dan Non Perokok," *Indones. J. Public Heal.*, vol. 14, no. 2, pp. 243–251, Dec. 2019
- [4] S. Sun *et al.*, "Cigarette smoking increases deaths associated with air pollution in Hong Kong," *Atmos. Environ.*, vol. 223, no. 117266, 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117266.
- [5] A. T. Felix and A. V. Ntarisa, "Review of natural radioactivity in tobacco cigarette brands," *J. Environ. Radioact.*, vol. 272, 2024, doi: 10.1016/j.jenvrad.2023.107348.
- [6] D. Kubalek, G. Serša, M. Štok, L. Benedik, and Z. Jeran, "Radioactivity of cigarettes and the importance of  $^{210}\text{Po}$  and thorium isotopes for radiation dose assessment due to smoking," *J. Environ. Radioact.*, vol. 155–156, pp. 97–104, 2016, doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.02.015.
- [7] S. E. Jackson, H. Tattan-Birch, K. East, S. Cox, L. Shahab, and J. Brown, "Trends in Harm Perceptions of E-Cigarettes vs Cigarettes Among Adults Who Smoke in England, 2014-2023," *JAMA Netw. Open*, vol. 7, no. 2, pp. e240582–e240582, Feb. 2024,
- [8] S. Turfus and S. Cooney, "The Science Behind Vaping," *Drug Test. Anal.*, vol. 15, no. 10, pp. 1054–1057, 2023, doi: 10.1002/dta.3587.
- [9] P. Avino, A. Rosada, and M. Manigrasso, "The inorganic fraction in e-liquids used in vapor products including e-cigarettes," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 322, no. 2, pp. 423–430, 2019
- [10] G. M. Faria, T. D. Galvão, P. S. Parreira, and F. L. Melquiades, "Metals quantification in e-cigarettes liquids by Total Reflection X-ray spectrometry," vol. 200, no. March, 2023, doi: 10.1016/j.apradiso.2023.110964.

- [11] J. Jeon, Q. Zhang, P. S. Chepaitis, R. Greenwald, M. Black, and C. Wright, "Toxicological Assessment of Particulate and Metal Hazards Associated with Vaping Frequency and Device Age," *Toxics*, vol. 11, no. 2, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/toxics11020155.
- [12] F. Alasmari *et al.*, "E-cigarette aerosols containing nicotine modulate nicotinic acetylcholine receptors and astroglial glutamate transporters in mesocorticolimbic brain regions of chronically exposed mice," *Chem. Biol. Interact.*, vol. 333, 2021, doi: 10.1016/j.cbi.2020.109308.
- [13] S. Soulet and R. A. Sussman, "Critical Review of the Recent Literature on Organic Byproducts in E-Cigarette Aerosol Emissions," *Toxics 2022, Vol. 10, Page 714*, vol. 10, no. 12, p. 714, Nov. 2022, doi: 10.3390/TOXICS10120714.
- [14] S. Soulet and R. A. Sussman, "A Critical Review of Recent Literature on Metal Contents in E-Cigarette Aerosol," *Toxics*, vol. 10, no. 9, p. 510, Sep. 2022, doi: 10.3390/TOXICS10090510/S1.
- [15] P. Sukmabuana, "Kandungan 226Ra, 210Pb, 210Po DAN 40K pada Beberapa Tembakau Rokok di Indonesia," *J. Sains dan Teknol. Nukl. Indones.*, vol. 17, no. 2, p. 97, 2016, doi: 10.17146/jstni.2016.17.2.2696.
- [16] D. D. Das, N. Sharma, and P. A. Chawla, "Neutron Activation Analysis: An Excellent Nondestructive Analytical Technique for Trace Metal Analysis," *Crit. Rev. Anal. Chem.*, 2023, doi: 10.1080/10408347.2023.2178841.
- [17] M. Mashaba, D. Kotze, V. M. Tshivhase, and A. Faanhof, "A method validation for determining gross alpha-beta activity concentration in water samples using LSC," vol. 191, no. November 2022, 2023.
- [18] C. Lin, J. Wang, J. Huang, C. Yeh, M. Yuan, and B. Chang, "Evaluating practicability of an LSC method for routine monitoring gross alpha and beta activities in water samples in Taiwan," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 70, no. 9, pp. 1981–1984, 2012, doi: 10.1016/j.apradiso.2012.02.041.
- [19] E. Jakubowska *et al.*, "Metal toxicity exposure in Alzheimer ' s disease- literature review," *J. Educ. Heal. Sport*, vol. 69, p. 49403, 2024, doi: 10.12775/JEHS.2024.69.49403.
- [20] Y. Xue, M. Tran, Y. N. Diep, S. Shin, and J. Lee, "Environmental aluminum oxide inducing neurodegeneration in human neurovascular unit with immunity," *Sci. Rep.*, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-51206-4.
- [21] S. Yefimova *et al.*, "Effect of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Defect Structure on their ROS Scavenging Ability," in *2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/NAP62956.2024.10739734.
- [22] S. Zhao, X. Zhang, J. Wang, J. Lin, D. Cao, and M. Zhu, "Carcinogenic and non - carcinogenic health risk assessment of organic compounds and heavy metals in electronic cigarettes The California Office of Environmental Health Hazard Assessment," *Sci. Rep.*, no. 1160, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-43112-y.
- [23] A. Guraka *et al.*, "A comprehensive toxicological analysis of panel of unregulated e-cigarettes to human health," *Toxicology*, vol. 509, no. September, p. 153964, 2024, doi: 10.1016/j.tox.2024.153964.
- [24] W. Idbeaa and N. Puvača, "Arsenic Toxicological Importance in Air Pollution," *J. Agron. Technol. Eng. Manag.*, vol. 6, no. 3, pp. 919–925, 2023.
- [25] A. S *et al.*, "Systemic Health Effects Associated with Sodium Arsenite Exposure: A Reappraisal," *Biol. Clin. Sci. Res. Journa*, vol. 601, pp. 1–12, 2023, doi: <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2023i1.601%0d>.
- [26] R. Lucchini and K. Tieu, "Manganese-Induced Parkinsonism : Evidence from Epidemiological and Experimental Studies," pp. 1–14, 2023.
- [27] Y. Kim, "Manganese Neurotoxicity Research," vol. 21, no. 1, pp. 87–105, 2009.
- [28] T. Cui *et al.*, "Characteristics of second-hand exposure to aerosols from e-cigarettes : A literature review since 2010," *Sci. Total Environ.*, vol. 926, p. 171829, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171829.
- [29] W. Su, J. Lee, K. Zhang, S. Wong, and A. Buu, "E-Cigarette Aerosol through Passive Vaping," 2023.
- [30] A. H. Khoshakhlagh, S. Ghobakhloo, W. J. G. M. Peijnenburg, A. Gruszecka-Kosowska, and D. Cicchella, "To breathe or not to breathe: Inhalational exposure to heavy metals and related health risk," *Sci. Total Environ.*, vol. 932, p. 172556, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2024.172556.