

RADIOKALORIMETRI

Rohadi Awaludin

Pusat Pengembangan Radioisotop dan Radiofarmaka (P2RR)
Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 15314, Telp/fax (021) 7563141

1. PENDAHULUAN

Pelepasan panas akibat radioaktivitas pertama kali dilaporkan oleh P. Curie dan A. Laborde pada tahun 1903. Pada waktu itu ditemukan bahwa 1 gram radium menghasilkan panas sebesar 100 kalori dalam satu jam. Hasil tersebut diperoleh dengan menggunakan kalorimeter benzena beku. Mereka meneliti lebih lanjut fenomena itu dan menemukan bahwa besarnya panas yang dihasilkan tidak dipengaruhi oleh suhu. Hasil ini membawa mereka pada kesimpulan bahwa pelepasan panas secara terus menerus yang terjadi pada radium bukanlah akibat perubahan kimia biasa karena reaksi kimia biasa dipengaruhi oleh suhu. Akhirnya diketahui bahwa pelepasan panas itu disebabkan oleh radioaktivitas atom radium. [1]

Penemuan ini memberikan peluang dilakukannya pengukuran radioaktivitas secara kuantitatif dengan mengukur panas yang dihasilkan (radiokolorimetri). Sejak itu, berbagai upaya dilakukan untuk merealisasikannya. Hanya saja, upaya tersebut menemui kendala berupa kenyataan bahwa panas yang dihasilkan dari peluruhan radioaktif sangat kecil. Pengukuran radioaktivitas dari panas yang dihasilkan memerlukan kalorimeter dengan ketelitian tinggi. Besarnya panas dari perubahan fasa, reaksi kimia dan fenomena lain pada umumnya pada kisaran miliwatt dengan jumlah sampel pada kisaran miligram. Sedangkan pada peluruhan radioaktif, panas yang dihasilkan pada kisaran mikrowatt untuk radioaktivitas beberapa milicurie. Oleh karenanya, kalorimeter untuk pengukuran radioaktivitas kadang kadang disebut pula mikrokalorimeter.

Pada makalah ini akan disajikan secara ringkas radiokolorimetri, yaitu pengukuran radioaktivitas menggunakan panas yang dihasilkan. Prinsip-prinsip pengukuran, kelebihan dan keterbatasan yang dimilikinya akan dibahas dalam makalah ini. Pengembangan metode radiokolorimetri ini diharapkan dapat memberikan sumbangan yang lebih besar lagi dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir di tanah air, khususnya pada pengukuran radioaktivitas.

2. PRINSIP RADIOKALORIMETRI

Saat ini telah ditemukan lebih dari 1500 jenis isotop. Dari jumlah itu, hanya sebagian kecil yang merupakan isotop stabil. Sebagian besar berupa radioisotop yang selalu mengalami peluruhan dalam berbagai bentuk dengan memancarkan radiasi ke sekitarnya, baik berupa radiasi α , radiasi β atau radiasi γ . Ketika radiasi diserap oleh materi, terjadilah serah terima energi dari radiasi kepada materi penyerap. Energi yang dimilikinya akan diubah menjadi bentuk lain dan perubahan energi tersebut akhirnya bermuara kepada panas.[1]

Apabila sebuah sumber radiasi diletakkan di dalam sel kalorimeter, maka di dalam sel tersebut akan dihasilkan panas secara konstan. Panas tersebut akan disebarkan ke lingkungan dengan kecepatan perambatan sebagai berikut.

$$dQ/dt = -k(T_c - T_e) \quad (1)$$

Di mana,

- dQ/dt : jumlah panas yang mengalir ke lingkungan tiap satuan waktu (J/s=W)
- k : koefisien perambatan panas (W/K)
- T_c : temperatur sel kalorimeter (K)
- T_e : temperatur lingkungan (dibuat konstan) (K)

Apabila kapasitas panas dari sel dan sampel adalah C (J/K) dan panas yang dihasilkan dari peluruhan radioaktif sebesar P (J/s=W), maka perubahan suhu pada sel kalorimeter dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$dT_c/dt = [P-k(T_c-T_e)]/C \tag{2}$$

Apabila persamaan ini diselesaikan dan diberi batas $T_c=T_e$ pada saat $t=0$, maka diperoleh persamaan berikut.

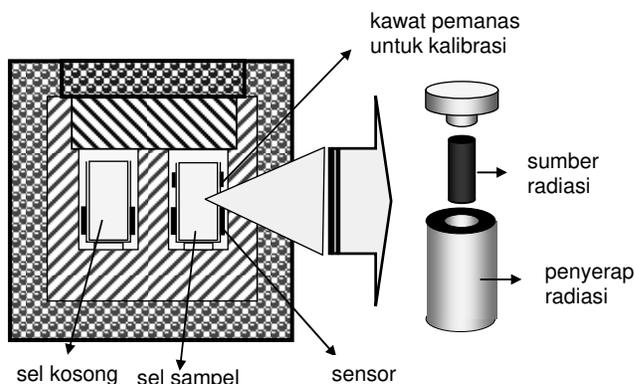
$$T_c-T_e = (P/k) (1-e^{-kt/C}) \tag{3}$$

Dari persamaan (3) di atas, jika waktu (t) sangat besar maka $e^{-kt/C}$ mendekati angka nol dan persamaan dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut.

$$P = k(T_c - T_e) \tag{4}$$

Persamaan (4) menunjukkan bahwa hubungan antara panas yang dihasilkan (P) dan perbedaan temperatur tidak dipengaruhi oleh besarnya kapasitas panas (C) sel dan sampel. Ini berarti bahwa apapun jenis material yang digunakan sebagai penyerap radiasi di dalam sel sampel tidak berpengaruh pada hubungan di atas. Besarnya C berpengaruh pada besarnya waktu (t) yang diperlukan agar $e^{-kt/C}$ mendekati angka nol. Semakin besar nilai C semakin besar pula nilai t yang diperlukan. Ini dapat diartikan bahwa semakin besar nilai kapasitas panas material yang digunakan, semakin lama waktu yang diperlukan

untuk mencapai kestabilan. Dengan kata lain, semakin besar C , semakin lama waktu pengukuran yang diperlukan.



Gambar 1. Skema sel kalorimeter untuk radiokalorimetri.



Gambar 2. Tampak luar kalorimeter untuk pengukuran radioaktivitas di P2RR BATAN

Skema kalorimeter untuk pengukuran radioaktivitas ditunjukkan pada Gambar 1. Besarnya panas yang dihasilkan dari peluruhan diperoleh dari besarnya panas yang mengalir dari sel sample ke lingkungan. Besarnya aliran ini diperoleh dari besarnya perbedaan suhu yang diukur oleh sensor yang diletakkan pada sel

sampel dan sel kosong yang memiliki suhu sama dengan lingkungan (konstan). Hubungan antara besarnya aliran panas dengan keluaran berupa beda potensial diperoleh dengan kalibrasi menggunakan kawat penghasil panas yang dililitkan pada sel sample. Kawat yang dililitkan memiliki hambatan sebesar $100,0 \Omega$. Besarnya panas yang diberikan diatur melalui beda potensial yang diberikan kepadanya.

3. PERHITUNGAN RADIOAKTIVITAS

Prinsip dasar dari metode radiokolorimetri adalah mengukur jumlah panas yang dihasilkan dari peluruhan radioaktif. Jika panas yang dihasilkan tiap satuan waktu adalah E ($J/s=W$), sedangkan besarnya panas rata-rata yang dihasilkan dari peluruhan adalah E_{av} (W/Ci), maka besarnya radioaktivitas sumber radiasi dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$A = \frac{E}{E_{av}} \quad (5)$$

Besarnya nilai E_{av} untuk tiap radioisotop dapat dihitung dari tabel peluruhan radioisotop [2]. Energi rata-rata dihitung dari seluruh energi yang dilepaskan sejalan dengan terjadinya peluruhan, misalnya energi rata-rata partikel beta, internal bremsstrahlung dan rata-rata energi gamma tiap peluruhan. Misalnya, ^{32}P memiliki energi rata rata radiasi beta sebesar 695 keV (bukan energi maksimum yang sebesar 1,71 MeV) dan internal bremsstrahlung 1,2 keV, sehingga memiliki energi rata rata 696,2 keV per peluruhan. Nilai 1 keV sama dengan $1,6 \times 10^{-16}$ J dan 1 mCi sama dengan $3,7 \times 10^7$ dps. Sehingga $696,2 \text{ keV per peluruhan setara dengan } (696,2 \times 1,6 \times 10^{-16} \times 3,7 \times 10^7) \text{ J/s per mCi} = 4,13 \times 10^{-6} \text{ J/s per mCi} = 4,13 \mu\text{W/mCi}$. Hasil perhitungan besarnya E_{av} dari beberapa jenis radioisotop lain ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Panas yang dihasilkan dari peluruhan radioaktif beberapa jenis radioisotop[2,3].

Jenis Radioisotop	Waktu paro	Jenis peluruhan	Panas yang dihasilkan ($\mu\text{W/mCi}$)
^3H	123 th	β^-	0,034
^{14}C	5730 th	β^-	0,293
^{32}P	14,26 hari	β^-	4,13
^{35}S	87,5 hari	β^-	0,288
^{90}Y	64,1 jam	β^-	5,55
^{153}Gd	241,6 hari	EC	0,839
^{169}Yb	32,02 hari	EC	2,514
^{192}Ir	73,83 hari	β^- , EC	6,10

Persamaan 5 di atas menunjukkan bahwa pada pengukuran radioisotop besarnya E_{av} harus diketahui sebelumnya. Oleh sebab itu pengukuran radioaktivitas hanya dapat dilakukan untuk radioisotop yang telah diketahui jenisnya. Apabila ada lebih dari satu jenis radioisotop di dalamnya, maka perbandingannya harus diketahui.

4. AKURASI PENGUKURAN

4.1. Data radioisotop

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, di dalam perhitungan radioaktivitas digunakan data radioisotop. Akurasi hasil pengukuran bergantung secara langsung kepada akurasi data radioisotop. Data-data radioisotop yang ada saat ini dapat dikatakan memiliki akurasi yang tinggi. Misalnya tingkat ketidakpastian (1σ) data rata-rata energi tritium adalah 0,07%, karbon-14 sebesar 0,0061% dan fosfor-32 sebesar 0,043%[4].

4.2. Kebocoran radiasi

Apabila ada sebagian energi peluruhan lepas ke lingkungan sebelum berubah menjadi panas, kebocoran energi ini akan mempengaruhi hasil pengukuran. Pada pengukuran pemancar α dan pemancar β , dapat dikatakan bahwa tidak ada kebocoran karena daya tembus keduanya sangat kecil. Perhatian perlu diberikan pada pengukuran pemancar γ karena radiasi ini memiliki daya tembus yang besar. Untuk radiasi γ dengan energi kurang dari 600 keV, seluruh radiasi γ diserap oleh penyerap tungsten setebal 1,5 cm[4]. Kalorimeter yang ada saat ini telah dilengkapi dengan penyerap tersebut. Jika radioisotop yang diukur memancarkan radiasi γ dengan energi melebihi angka tersebut, diperlukan koreksi besarnya radiasi yang lepas untuk mendapatkan hasil pengukuran.

5. KELEBIHAN DAN KETERBATASAN

Radiokolorimetri memiliki beberapa kelebihan dan keterbatasan seperti metode-metode pengukuran lainnya. Metode ini memiliki kelebihan – kelebihan sebagai berikut.

- Tidak bergantung pada bentuk sumber radiasi.

Pengukuran ini dilakukan dengan mengukur besarnya panas yang dihasilkan. Oleh karenanya, hasil pengukuran tidak dipengaruhi oleh bentuk sumber radiasi. Sumber radiasi dapat berupa padat, cair atau gas. Yang diperlukan dalam pengukuran hanyalah wadah yang tepat sesuai dengan bentuknya. Untuk pengukuran larutan, misalnya, diperlukan wadah yang rapat dan sangat stabil secara kimiawi. Wadah yang rapat dimaksudkan untuk mencegah terjadinya penguapan pelarut yang menyebabkan terjadinya penyerapan panas. Kesetabilan kimia dimaksudkan untuk mencegah terjadinya reaksi kimia karena panas yang dilepaskan atau diserap dari reaksi kimia tersebut akan mempengaruhi hasil pengukuran.

Kelebihan ini sangat bermanfaat pada pengukuran sumber-sumber pemancar beta yang akhir-akhir ini semakin banyak dikembangkan. Nilai radioaktivitas yang tepat dari pemancar beta, khususnya pemancar beta murni atau yang mendekatinya, sulit didapatkan karena radiasi beta memiliki daya tembus yang kecil. Sebagian besar radiasi beta diserap oleh materi di sekelilingnya. Pengukuran dapat dilakukan dengan kamar ionisasi memanfaatkan sinar-X yang keluar sebagai akibat dari efek bremsstrahlung. Namun, intensitas sinar-X ini sangat bergantung kepada materi penyusun sumber radiasi tersebut. Secara umum, kamar ionisasi dikalibrasi menggunakan sumber radiasi berbentuk larutan dalam wadah tertentu, biasanya polietilena. Oleh sebab itu, untuk mendapatkan radioaktivitas yang tepat, sumber radiasi harus dalam bentuk yang sama dengan kondisi kalibrasi. Hal ini sulit dilakukan, khususnya untuk sumber-sumber tertutup yang tidak mungkin dilarutkan.[3]

Metode lain yang umum dilakukan pada pengukuran pemancar beta adalah dengan *liquid scintillation counter* (LSC). Dengan metode ini besarnya radioaktivitas secara tepat dapat diperoleh karena scintilator dilarutkan ke dalam larutan sumber radiasi. Sehingga, radiasi beta langsung berinteraksi dengan detektor (scintilator). Di sini pun ada kendala yaitu sumber radiasi harus dalam bentuk larutan. Hal ini sulit dilakukan untuk beberapa jenis sumber radiasi pemancar beta.

- Pengukuran tidak merusak.

Pada pengukuran dengan kalorimeter ini, radioaktivitas diperoleh dari besarnya panas yang dihasilkan dari peluruhan. Pengukuran dapat dilakukan dengan memasukkan produk beserta wadahnya ke dalam kalorimeter. Setelah pengukuran selesai, produk bisa dikirim kepada pengguna tanpa mempengaruhi kuantitas dan kualitasnya. Kelebihan ini sangat bermanfaat di dalam

proses produksi radioisotop karena setelah itu produk dapat dikirim dan dimanfaatkan tanpa dipengaruhi oleh proses pengukuran. Sumber radiasi dapat pula diukur tanpa mengeluarkan dari perisainya, karena panas dapat diukur dari panas yang dilepaskan dari permukaan perisai. Oleh karenanya, metode pengukuran ini menjanjikan pengukuran dengan keselamatan yang baik.

- Tidak memerlukan sumber radiasi standar

Kelebihan ini sangat memudahkan karena penyediaan sumber radiasi standar bukan hal yang mudah, lebih-lebih lagi penyediaan sumber radiasi standar dengan waktu paro tidak terlalu panjang. Bahkan, pengembangan metode pengukuran ini membuka peluang untuk penentuan radioaktivitas sumber-sumber radiasi sebagai sumber standar.

Di samping beberapa kelebihan seperti telah dijelaskan di atas, metode ini memiliki beberapa keterbatasan. Keterbatasan – keterbatasan tersebut adalah sebagai berikut.

- Batas minimal radioaktivitas yang diperlukan

Dengan kalorimeter yang ada saat ini, batas minimum yang dapat diukur sebesar $16 \mu\text{W}$ panas. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan wilayah ukur sensor yang digunakan. Untuk fosfor-32, misalnya, panas yang dihasilkan sebesar $4,13 \mu\text{W}/\text{mCi}$ seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Sehingga, pengukuran fosfor-32 memerlukan radioaktivitas minimal sebesar 4 mCi.

Angka minimal ini cukup besar pada beberapa bidang pemanfaatan radioisotop yang dapat menggunakan radioisotop dengan radioaktivitas pada kisaran μCi . Namun, angka ini angka yang relatif kecil pada beberapa bidang produksi radioisotop. Untuk brachytherapy dosis rendah dengan iridium-192, misalnya, iridium-192 yang digunakan

memiliki radioaktivitas sebesar puluhan milicurie[5]. Angka ini jauh di atas batas minimal pengukuran Iridium-192, karena besarnya energi rata-rata tiap peluruhan sebesar $6,10 \mu\text{W}/\text{mCi}$.

- Jenis radioisotop harus diketahui.

Pada pengukuran ini, jenis radioisotop harus diketahui sebelumnya. Pengukuran ini tidak memiliki peluang untuk identifikasi. Hal ini dikarenakan hasil pengukuran hanyalah panas total yang keluar dari sumber radiasi. Di samping itu, pengukuran ini juga agak sulit dilakukan jika di dalamnya mengandung lebih dari satu sumber radiasi.

- Waktu pengukuran.

Pada pengukuran dengan metode ini diperlukan waktu yang relatif lama, sekitar 3 jam. Waktu ini diperlukan sampai panas yang keluar dari sel sampel hanya panas yang dihasilkan dari peluruhan. Dengan kondisi ini, metode ini sulit digunakan untuk pengukuran radioisotop dengan waktu paro yang pendek karena radioaktivitas akan jauh berkurang selama pengukuran berlangsung.

6. PENUTUP

Demikianlah gambaran secara garis besar tentang radiokolorimetri, metode pengukuran radioaktivitas menggunakan kalorimeter. Pada prinsipnya, pengukuran ini dilakukan dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari radioaktivitas. Kelebihan dari metode ini adalah tidak tergantung pada bentuk sampel, pengukuran tidak merusak dan tidak memerlukan sumber radiasi standar. Pengukuran ini sangat bermanfaat untuk pengukuran pemancar beta, khususnya pemancar beta murni atau yang mendekatinya dalam bentuk sumber tertutup karena sulit mendapatkan radioaktivitas yang sebenarnya dengan metode lain. Sumber radiasi dapat pula diukur tanpa mengeluarkan dari perisai radiasi. Keterbatasan dari pengukuran ini terletak pada

batas minimal radioaktivitas yang relatif besar, jenis radioisotop harus diketahui sebelumnya dan waktu pengukuran yang relatif lama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Tsugou Genka, peneliti senior dari JAERI (~2001) dan *Japan Atomic Energy Forum* (JAIF) (2001~ sekarang), atas bimbingan yang telah diberikan dalam mendalami radiokalorimetri.

DAFTAR PUSTAKA

1. T. Genka and S. Iwamoto, Application of Microcalorimeter to Radioactivity Measurement, *Hihakaikensya*, No 48 (1999) (Bahasa Jepang)
2. NCRP, Table of Nuclear Nuclear Decay Data, No 58, 2nd Edition (1985).
3. T. Genka, Komunikasi Pribadi (2001)
4. T. Genka and R. Awaludin, Radiocalorimetry for radioisotope product measurements, Proceeding of the 6th nuclear energy symposium, Jakarta (2001).
5. T. Genka, S. Iwamoto, N. Takeuchi, A. Uritani and C. Mori, Radioactivity measurement of ¹⁹²Ir metallic sources with a calorimeter, *Nucl. Instr. and Meth.*, (1989).