

Judul asli Buku ini : **KIMIA INTI, RADIOKIMIA dan penggunaan RADIOISOTOP**

Disusun oleh : Dr. Achmad Amiruddin
Ketua Bagian Kimia,
Ketua Komisi Teknik Kursus Penggunaan Radioisotop,
Badan Tenaga Atom Nasional,
Konsultan Pusat Reaktor Bandung.

Diterbitkan oleh JAJASAN KARJAWAN KIMIA pada tahun 1965.

Dengan perkenan Penulis, buku ini direvisi, antara lain dengan menyesuaikan ejaan, istilah, dan yang lebih penting agar mengikuti perkembangan ilmu.

Edisi yang direvisi ini diterbitkan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) tahun 2008

Tim Revisor : Pratiwi Sapto
Hendriyanto Hadi Tjahyono
Sudi Ariyanto
Indragini
Anda

Redaksi Pelaksana : Ruliyanti Pardewi
Supria
IG. Ketut Pribadi

Tata Letak : Moh. Zen

© 2008, BATAN. Hak Cipta dilindungi undang-undang
Diterbitkan oleh Pusat Pengembangan Informatika Nuklir- **BATAN**

Pusat Pengembangan Informatika Nuklir (PPIN)
Kawasan Puspipetek, Serpong – Tangerang
Telp. 021-7560905
Fax. 021-7560923

Dilarang keras memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

DAFTAR ISI

BAB	JUDUL	Halaman
6.	FISIKA KESEHATAN DAN TEKNIK PENGGUNAAN RADIOISOTOP	1
6.1.	PENGANTAR	1
6.2.	FISIKA KESEHATAN	2
6.2.1	Bahaya Radiasi	3
6.2.2.	Pemaparan Maksimum terhadap Radiasi yang Dbolehkan	4
6.2.3.	Ciri Khas Laboratorium Radioisotop	6
6.2.4.	Prosedur Keamanan dan Pencegahan Bahaya Radiasi	8
6.3.	BATAS KEMAMPUAN RADIOISOTOP SEBAGAI PERUNUT	11
6.3.1.	Pengaruh Isotop	12
6.3.2.	Pengaruh Radiasi	13
6.4.	PERSIAPAN SEBELUM PENCACAHAN	15
6.4.1.	Persiapan Radiasi	15
6.4.2.	Penyiapan Cuplikan untuk Pencacahan	17
6.5.	PENCACAHAN	21
6.5.1.	Standardisasi Sumber	21
6.5.2.	Peneraan Detektor	23
6.6.	PENENTUAN ENERGI DAN UMUR PARO	32
6.6.1.	Penentuan Umur Paro	33
6.6.2.	Cara Koinsidensi	34
7.	CARA PEMISAHAN RADIOKIMIA	36
7.1.	PENGANTAR	36
7.2.	CARA PENGENDAPAN DAN KOPRESIPITASI	38
7.2.1.	Kopresipitasi	39
7.3.	EKSTRAKSI CAIR-CAIR	41
7.3.1.	Ekstraksi Tunggal	41
7.3.2.	Distribusi Alir-balik	44
7.3.3.	Mekanisme Ekstraksi Pelarut	45
7.3.4.	Faktor Penting yang Harus Diperhatikan pada Proses Ekstraksi	47
7.3.5.	Teknik Bekerja dengan Ekstraksi Pelarut	48
7.4.	PENUKAR ION	49
7.4.1.	Mekanisme Penukaran Ion	50
7.4.2.	Faktor yang Mempengaruhi Koefisien Distribusi	52
7.4.3.	Faktor yang Mempengaruhi Pemilihan Penukar Ion	54

7.4.4.	Teknik Penggunaan Penukar Ion	56
7.5.	CARA KHROMATOGRAFI	59
7.5.1.	Khromatografi Penyerapan	60
7.5.2.	Khromatografi Partisi	62
8.	PENGGUNAAN RADIOISOTOP DALAM KIMIA	67
8.1.	PENGGUNAAN RADIOISOTOP SEBAGAI PERUNUT DALAM KIMIA ANALITIK	67
8.1.1.	Analisis Aktivasi	68
8.1.2.	Analisis Pengenceran Isotop	80
8.1.3.	Analisis Radiometrik	87
8.1.4.	Evaluasi Cara Analitik	89
8.2.	PENGGUNAAN PERUNUT DALAM CABANG KIMIA YANG LAIN	90
8.2.1.	Reaksi Pertukaran	91
8.2.2.	Kinetikan dan Mekanisme Reaksi	93
8.3.	RADIOISOTOP SEBAGAI SUMBER RADIASI	95
8.3.1.	Peresapan dan Penghambatan Balik Radiasi Beta	95
8.3.2.	Radiografi dan Autoradiografi	97
8.3.3.	Eksitasi Radiasi X dengan Partikel Beta	98
8.4.	CARA PENANDAAN	99
9.	RADIOISOTOP DALAM PERTANIAN < BIOLOGI DAN KEDOKTERAN	104
9.1.	PENGANTAR	104
9.2.	PENGGUNAAN RADIOISOTOP DALAM PERTANIAN	105
9.2.1.	Radioisotop dalam Pemupukan	105
9.2.2.	Translokasi	106
9.2.3.	Fotosintesis	107
9.2.4.	Mutasi Jenis Tumbuh-tumbuhan	108
9.2.5.	Iradiasi Pembasmi Serangga	110
9.2.6.	Penggunaan yang lain dalam Pertanian	110
9.3.	PENGGUNAAN RADIOISOTOP DALAM KEDOKTERAN DAN BIOLOGI	111
9.3.1.	Penggunaan Sebagai Perunut	111
9.3.2.	Penelitian Penyakit Kanker	117
9.4.	PENGGUNAAN RADIOISOTOP DALAM DIAGNOSIS	118
9.5.	PENGGUNAAN DALAM TERAPI	119
9.5.1.	Penempatan Secara Biokimia	120
9.5.2.	Penempatan Fisik	121
9.5.3.	Teleterapi	122

10.	RADIOISOTOP DALAM PENGETAHUAN BUMI DAN ANGKASA LUAR	123
10.1.	PENGANTAR	123
10.2.	JAM RADIOAKTIF	123
10.2.1.	Penentuan Umur Secara Karbon-14	124
10.2.2.	Cara Uranium-Timbal	126
10.2.3.	Cara Timbal-Timbal	127
10.2.4.	Perbandingan Kadar Uranium terhadap Helium	128
10.2.5.	Cara Kalium-40 dan Argon-40	129
10.2.6.	Cara Rubidium-Strontium	130
10.3.	RADIOISOTOP DALAM PENELITIAN ANGKASA LUAR	130
10.3.1.	Meteorit	131
10.3.2.	Reaksi Inti dalam Bintang	132
10.4.	RADIOISOTOP DALAM GEOLOGI	133
10.5.	RADIOISOTOP DALAM HIDROLOGI	134
	BEBERAPA ISTILAH PENTING	136
	INDEX	140
	LAMPIRAN 1 DAFTAR ISOTOP	142
	LAMPIRAN 2 TETAPAN DAN KONVERSINYA	204
	LAMPIRAN 3 PENGARUH ISOTOP PADA KINETIKA REAKSI	206
	LAMPIRAN 4 PENENTUAN UNSUR MENGUNAKAN RADIOISOTOP UMUR PENDEK	207
	DAFTAR PUSTAKA	208

DAFTAR GAMBAR

No.	JUDUL	Halaman
6.1.	Kamar Asam	8
6.2.	Glove box	8
6.3.	Alat penyaring	18
6.4.	Cara pemasangan cuplikan	19
6.5.	Kurva peresapan sendiri pada aktivitas total tetap	26
6.6.	Kurva peresapan sendiri pada aktivitas jenis tetap	26
6.7.	Persentasi kesalahan bolehjadi suatu pengukuran terhadap Jumlah cacahan	28
6.8.	Distribusi tinggi denyut radiasi gamma radionuklida murni	30
6.9.	Penentuan kelimpahan gamma secara pengulitan	31
6.10.	Cara penentuan kelimpahan gamma	32
6.11.	Kurve peluruhan zat radioaktif untuk penentuan umur paro	33
6.12.	Rangkaian koinsidensi tertunda untuk penentuan waktu paro	34
7.1.	Ekstraksi tunggal	42
7.2.	Bagan ekstraksi alir balik	45
7.3.	Beberapa bentuk corong pemisah untuk ekstraksi	49
7.4.	Alat ekstraksi komtinu	50
7.5.	Peresapan unsur dari larutan asam hidroklorida	56
7.6.	Peresapan unsur dari larutan HCL dan HCl-HF	57
7.7.	Peresapan unsur dari larutan hidrofluorida	57
7.8.	Peresapan unsur dari larutan asam nitrat	58
7.9.	Kolom dengan penyekat kaca wol	59
7.10.	Beberapa jenis alat untuk penukaran ion	60
7.11.	Kurva elusi analisis frontal	61
7.12.	Kurva elusi pencuci	62
7.13.	Corong pemisah	63
7.14.	Denah jumlah zat terlarut	63
7.15.	Khromatografi partisi	63
7.16.	Khromatografi mendaki	64
7.17.	Khromatografi menurun	65
8.1.	Bagan analisis pengaktifan	75
8.2.	Titration konduktometri	88
8.3.	Titration konduktometri	88
8.4.	Bagan suatu rangkaian teknik vakum untuk sintesis dan penandaan	101
9.1.	Percobaan translokasi	106

9.2.	Percobaan translokasi	106
9.3.	Pembentukan darah pada hewan anemi	113
9.4.	Pengambilan I ¹³¹ pada berbagai penderita penyakit	116
9.5.	Normal	117
9.6.	Penderita	117

DAFTAR TABEL

Nomor	Judul	Halaman
6.1	Bahaya dalam relatif beberapa isotop pemancar β dan γ	4
6.2	Pemaparan maksimum yang diperbolehkan pada berbagai jenis radiasi mengion	6
6.3	Laboratorium kerja untuk radioisotop	7
7.1	Suku ekspansi binomial	46
8.1	Reaksi dengan neutron cepat	69
8.2	Sumber kesalahan pada iradiasi suatu inti	77
8.3	Sumber neutron	79
9.1	Distribusi Ca-45, Sr-89 dan P-32 dalam bagian tubuh tikus, 24 jam setelah pemberian dosis	114

PENGANTAR (EDISI 2008)

Empat puluh tahun lalu, di awal tahun enam puluhan, gairah Pemerintah untuk mengembangkan pengetahuan mengenai tenaga atom sangat besar.

Beberapa reaktor direncanakan (Bandung dan Serpong). Demikian juga kegiatan penelitian mengenai penggunaan radiasi nuklir dan isotop mulai dikembangkan oleh Lembaga Tenaga Atom, lembaga yang cikal bakalnya radiologi kemudian diubah namanya menjadi Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN).

Melihat perkembangan ini maka Bagian Kimia, Fakultas Ilmu Pasti dan Ilmu Alam (FIPIA), Institut Teknologi Bandung merasa terpanggil untuk memulai pendidikan dalam bidang yang dapat menunjang ini dengan memulai kuliah radiokimia dan kimia radiasi untuk mahasiswa tingkat sarjana.

Kegiatanpun dimulai dalam keadaan yang serba terbatas. Laboratorium dan pustaka sangat minim, kalau tidak dapat dikatakan belum ada. Buku teks pun tidak tersedia.

Masalah laboratorium dapat diatasi dengan 'ndompleng' di Pusat Reaktor Atom Bandung, salah satu pusat penelitian BATAN. Namun buku tidak ditemukan di pasaran. Satu-satunya buku yang ada ialah karangan Friedlander dan Kennedy yang berjudul *NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY*, yang dibawa oleh Penulis dari Amerika Serikat. Karena itulah Penulis terpaksa membuat diktat kuliah dengan cara stensilan.

Setelah dua tahun digunakan, akhirnya diktat tersebut dicetak secara stensilan menjadi bentuknya yang selama empat puluh tahun lebih belum pernah mengalami perubahan baik wajah maupun isinya.

Dapat dipastikan bahwa banyak dari isinya yang sudah kadaluwarsa, mengingat perkembangan ilmu yang sangat pesat. Penulis sendiri sudah jelas tidak lagi memiliki kemampuan untuk merevisi karena sudah hampir dua puluh tahun tidak mengikuti perkembangan.

Karena itulah ketika ada tawaran dari Perkumpulan Lanjut Usia BATAN (*BATAN Golden Age Group, BGA-Club*) untuk merevisi buku ini, dengan rasa syukur Penulis setuju. Suatu penghargaan bagi Penulis yang tentunya akan sukar dilupakan.

Semoga bagian kedua dari edisi yang kedua ini dapat berguna bagi para mahasiswa dan bagi mereka ingin mengetahui apa kimia inti dan radiokimia itu.

Jakarta, September 2008

A. Amiruddin

Untuk
Kus, isteriku
dan
Tria, serta Doddi, anakku

BAB 6

FISIKA KESEHATAN DAN TEKNIK PENGGUNAAN RADIOISOTOP

6.1. PENGANTAR

Penggunaan radioisotop baik sebagai perunut maupun sebagai sumber radiasi (lihat Bab 8), memerlukan beberapa perhatian khusus, disebabkan oleh adanya bahaya terhadap radiasi yang dipancarkan. Kontaminasi radiasi, selain dapat merupakan bahaya terhadap para pekerja, dapat pula menimbulkan kenaikan aktivitas radiasi latar belakang, yang menimbulkan persoalan pada pencacahan serta menimbulkan keraguan terhadap kebenaran hasil yang diperoleh. Berdasarkan hal ini, maka harus diberikan perhatian istimewa terhadap sifat bahan yang digunakan untuk lantai, meja kerja, bak cuci, ventilasi dinding dan lain-lain, serta cara kerja dalam laboratorium. Hal ini akan dibahas dalam Pasal 6.2 dengan judul Fisika Kesehatan.

Bergantung pada soal yang dihadapi, urutan pekerjaan radiokimia dapat meliputi sebagian ataupun semua langkah berikut :

- 1). Mereaksikan, misalnya menyiapkan dan menembaki dengan neutron dalam analisis aktivasi, menambahkan isotop perunut dalam analisis pengenceran isotop dan pada penggunaan perunut yang lain, menandai suatu molekul dengan radioisotop, ataupun menyiapkan dan menyinari zat dalam penelitian mengenai pengaruh radiasi terhadap suatu sistem.
- 2). Melarutkan dan memisahkan komponen sistem yang hendak diteliti lebih lanjut. Persoalan ini lebih sering jika yang akan dicacah ialah sinar beta. Pada pencacahan gamma seringkali langkah ini dilampaui.
- 3). Menyiapkan sumber untuk pencacahan zat radioaktif yang hendak ditentukan. Cara serta bentuk sumber harus disesuaikan dengan alat pencacah yang akan digunakan.
- 4). Pencacahan untuk menentukan aktivitas. Secara ideal alat serta cara pencacahan ini harus disesuaikan dengan jenis persoalan yang dihadapi.
- 5). Interpretasi hasil pengukuran dan pencacahan. Langkah ini seringkali merupakan inti persoalan. Seringkali segala pekerjaan dalam langkah 1 sampai 4 tidak akan berarti jika seorang pekerja tidak dapat mengadakan interpretasi tepat mengenai hasil yang diperoleh. Termasuk dalam langkah ini ialah meneliti batas kemampuan serta kekurangan penggunaan radioisotop.

Cara pemisahan akan dibicarakan tersendiri dalam bab berikut. Di antara persoalan mengenai cara mereaksikan yang akan dibicarakan dalam bab ini hanyalah persiapan iradiasi dan cara iradiasi dalam reaktor, sedang cara penandaan molekul dan iradiasi untuk meneliti pengaruh radiasi akan dibahas tersendiri dalam bab terakhir, yakni Bab 10.

Cara menyiapkan sumber akan dibicarakan bersama-sama dengan cara persiapan iradiasi dalam reaktor, dalam Bab 6.4, yang diberi judul persiapan sebelum pencacahan. Cara serta soal pencacahan diuraikan dalam Bab 6.5.

Mengenai interpretasi umumnya persoalan ini erat hubungannya dengan tujuan penelitian dan lebih merupakan persoalan khas tiap bidang yang menggunakan radioisotop. Dalam hal ini hanya akan dibahas batas kemampuan penggunaan radioisotop, dan akan diuraikan dalam Bab 6.3 mendahului langkah yang lain.

6.2. FISIKA KESEHATAN

Seperti diuraikan sebelum ini radiasi dapat membahayakan pekerja. Bahaya ini berasal dari antaraksi materi dengan radiasi, yang secara langsung atau tidak langsung menimbulkan ionisasi dan eksitasi. Perubahan fisik dan kimia yang kemudian menyusul dapat menimbulkan kerusakan pada sel. Kalau jumlah sel yang dirusak secara demikian cukup besar maka jaringan yang dibentuk oleh sel tersebut dapat mengalami perubahan atau kerusakan.

Sebenarnya tidak perlu terlalu pesimistik mengenai akibat radiasi ini asal saja yang dirusak bukan inti sel. Karena seperti diketahui tubuh manusia cukup tahan dan mempunyai daya sembuh yang mengagumkan. Sel yang rusak setiap kali diganti dengan sel yang baru. Jadi asal saja kecepatan terjadinya kerusakan tidak terlalu besar dibandingkan dengan pembentukan penggantinya, maka pengaruh radiasi yang disebabkan oleh proses jenis ini tidak perlu ditakuti. Yang lebih berbahaya ialah jika terjadi tumbukan langsung dengan inti sel. Proses ini walaupun kemungkinannya kecil, tetapi kalau terjadi, akibatnya lebih parah, oleh karena dapat mengakibatkan perubahan genus atau kromosom. Lebih-lebih lagi kalau diingat bahwa proses ini dapat terjadi walaupun jumlah energi radiasi tidak besar.

Oleh karena hal yang diuraikan di atas maka pekerja dalam laboratorium radioisotop harus selalu berhati-hati dan selalu berusaha menghindari pemaparan terhadap dosis radiasi yang besar. Seperti akan diuraikan dalam bab berikut, pengalaman menunjukkan bahwa asal saja dosis toleransi tubuh tidak dilampaui, maka bahaya akibat radiasi dapat diabaikan.

6.2.1. Bahaya Radiasi

Faktor yang menentukan bahaya perusakan biologis suatu radiasi antara lain ialah :

- a). Dosis total yang diterima,
- b). Daya pengaruh biologis relatif jenis radiasi,
- c). Energi radiasi,
- d). Jaringan biologi yang kena radiasi,
- e). Luas atau volume tubuh yang terpapar, dan
- f). Apakah radiasi berasal dari luar atau dari dalam tubuh.

Oleh karena radiasi dapat membahayakan sedang indera tubuh tidak dapat mengetahui ada tidaknya suatu radiasi, maka sudah menjadi keharusan bahwa pada tempat bekerja tersedia alat yang dapat memberi petunjuk mengenai adanya dan tingkat aktivitas suatu radiasi. Alat ini dapat berbentuk sebagai suvai meter yang menunjukkan aktivitas pada suatu skala, atau yang memberi bunyi, yang tiap kali aktivitas bertambah bunyinya juga bertambah.

Jika alat tersebut menunjukkan bahwa suatu radiasi terlalu aktif sehingga radiasinya mungkin berbahaya, maka dosis yang diterima oleh pekerja dapat dikurangi dengan salah satu cara berikut,

- a). Memperbesar jarak antara zat dengan pekerja,
- b). Mengurangi lamanya waktu pemaparan bagian badan terhadap radiasi, atau
- c). Menggunakan perisai yang tebalnya sedemikian rupa sehingga radiasi yang membahayakan tertahan.

Bahaya yang timbul jika zat radioaktif masuk dalam tubuh dan menyebabkan penyinaran-dalam, bergantung pada beberapa faktor, antara lain pada

- a). Berapa besar umur paro dan energi radioisotop,
- b). Berapa besar umur paro biologi, yakni waktu yang dibutuhkan untuk menghilangkannya dari tubuh setelah zat yang tertelan,
- c). Apakah pengumpulan terjadi pada suatu alat tubuh yang kritis, dan
- d). Kemungkinan pembentukan hasil samping beracun sebagai akibat radiolisis molekul atau reaksi bebas yang terbentuk pada radiasi.

Radioisotop yang merupakan bahaya jika tertelan umumnya ialah isotop dengan umur paro beberapa bulan sampai beberapa tahun. Radioisotop dengan umur paro pendek karena lekas meluruh, daya rusaknya terbatas, sedang radioisotop dengan umur paro panjang umumnya aktivitas jenisnya sangat rendah, sehingga sulit mengumpul di satu bagian dalam jumlah aktivitas yang dapat membahayakan. Bahaya internal dapat dicegah dengan menjaga agar zat radioaktif tidak dapat masuk ke dalam tubuh, misalnya melalui makanan, minuman, rokok ataupun melalui pipet.

Agar jangan masuk ke dalam paru-paru maka laboratorium harus bersih, ventilasi baik dan bekerja menurut aturan.

Sebagian dari daftar yang berisi radioisotop yang berbahaya terdapat dalam Tabel 6.1.

6.2.2. Pemaparan Maksimum terhadap Radiasi yang Dbolehkan

Telah diuraikan mengenai bahaya radiasi dan kemungkinan cara radiasi merusak dalam tubuh. Dalam bab ini akan diuraikan batas toleransi tubuh dan satuan yang digunakan untuk menyatakan pengaruh radiasi.

a. Satuan radiasi teresap

Satuan röntgen, seperti diuraikan dalam Bab 1, terbatas pada sinar X atau sinar γ dalam udara dan tidak dapat digunakan untuk menyatakan pemindahan energi radiasi lain seperti misalnya partikel beta, alfa, neutron dan jenis radiasi yang lain.

Tabel 6.1
Bahaya-dalam relatif beberapa isotop pemancar β dan γ .

Golongan isotop	Batas aktivitas		
	Rendah	Sedang	Tinggi
Bahaya kecil Na ²⁴ , K ⁴² , Cu ⁶⁴ , Mn ⁵² , As ⁷⁶ , As ⁷⁷ , Kr ⁸⁵ , Hg ¹⁹¹ .	1 mC	1 – 10 mC	10 mC
Bahaya sedang H ³ , C ¹⁴ , Na ²² , Cl ³⁶ , Mn ⁵⁴ , Fe ⁵⁶ , Co ⁶⁰ , Sr ⁸⁹ , No ⁹⁵ , Ru ¹⁰³ , P ³² , Tc ¹²⁷ , Te ¹²⁹ , Ir ¹³¹ , Cs ¹³⁷ , Ba ¹⁴⁰ , La ¹⁴⁰ , Ce ¹⁴¹ , Pr ¹⁴³ , Nd ¹⁴⁷ , Au ¹⁹⁸ , Au ¹⁹⁹ , Hg ²⁰³ .	0,1 mC	0,1 – 1 mC	1 mC
Sangat berbahaya Ca ⁴⁵ , Fe ⁵⁵ , Sr ⁹⁰ , Y ⁹¹ , Zr ⁹⁵ , Ce ¹⁴⁴ , Pm ¹⁴⁷ , Bi ²¹⁰ .	0,01 mC	0,01 – 0,1 mC	0,1 mC

Selain itu definisi röntgen dibatasi pada pemindahan energi pada antaraksi radiasi dengan udara, sedang, terutama dalam fisika kesehatan, yang dipentingkan ialah pengaruh antaraksi radiasi dengan jaringan. Oleh karena itu diperlukan satuan yang lebih umum yang dapat menyatakan bermacam-macam pengaruh radiasi terhadap bermacam-macam sistem.

Satuan dosis teresap yang sering digunakan ialah rad yang didefinisikan sebagai peresapan 100 erg oleh tiap gram zat yang diradiasi. Mudah dapat dilihat bahwa dosis rad tidak bergantung pada macam radiasi, sedang suatu kenyataan ialah pengaruh suatu radiasi bukan hanya ditentukan oleh jumlah energi yang diterima tetapi juga berapa banyak ion yang terbentuk tiap satuan panjang jalan yang ditempuh radiasi, terakhir ini yang dikenal dengan ionisasi jenis. Selain bergantung pada jenis radiasi juga bergantung pada zat yang diradiasi, makin besar ionisasi jenis ini makin besar pengaruh biologi yang mungkin terjadi. Untuk membandingkan pengaruh biologi bermacam-macam radiasi maka digunakan standar pembanding, yakni sinar-X berenergi 200 keV. Perbandingan pengaruh suatu sinar dengan standar menghasilkan pengertian RBE, kependekan bahasa Inggris yaitu pengaruh biologi relatif, yang didefinisikan sebagai :

$$E = \frac{\text{dosis rad sinar-X 200 keV yang menghasilkan pengaruh khas}}{\text{dosis rad suatu radiasi yang menyebabkan efek yang sama}} \quad (6.1)$$

Dalam Tabel 6.2 tertera nilai RBE bermacam-macam radiasi. Untuk menghitung pengaruh gabungan dosis bermacam-macam radiasi digunakan satuan dosis yang disebut REM yakni singkatan “röntgen equivalent man (mammal)”. RBE dinyatakan dengan

$$\text{Dosis dalam rem} = \text{dosis dalam rad} \times \text{RBE} \quad (6.2)$$

Menurut definisi ini dan definisi RBE maka 1 rem semua macam radiasi akan menghasilkan pengaruh biologi yang sama. Oleh karena itu jumlah aljabar dosis macam-macam radiasi yang dinyatakan dalam rem dapat digunakan untuk menilai pengaruh jumlah macam-macam radiasi.

b. Pemaparan maksimum yang diizinkan

Nilai batas paparan maksimum yang dibolehkan cukup banyak dibahas dalam pustaka. Komisi Internasional Pelindung Terhadap Radiasi, ICRP, dalam buku petunjuknya mengemukakan nilai batas yang dikutip dalam Tabel 6.2.

Tabel 6.2
Pemaparan maksimum yang diperbolehkan
pada berbagai jenis radiasi mengion.

Jenis radiasi	RBE	Pemaparan dasar mrad/minggu
Sinar X dan γ	1	100
Sinar β , elektron	1	100
Neutron termik	2,5	40
Neutron cepat	10	10
Partikel alfa	10	10
Proton	10	10
Ion berat	20	5

Dalam salah satu buku petunjuk Biro Standardisasi Nasional Amerika Serikat, Petunjuk 59, juga diberikan pembatasan lain yang mencakup pemaparan dalam waktu lama. Kriteria yang digunakan ialah dosis D, yang tidak boleh melebihi

$$D = 5 (N - 18) \quad (6.3)$$

D dinyatakan dalam rem dan N dalam tahun. Berdasarkan kriteria ini maka dianjurkan bahwa seorang pekerja tidak menerima lebih dari 5 rem tiap tahun, dan tidak melebihi 0,1 rem atau 100 mrem tiap minggu, yang sesuai dengan hasil dalam Tabel 6.2.

Dosis yang dikumpulkan selama 13 minggu berturut-turut harus lebih kecil dari 3 rem. Kriteria ini berlaku untuk pemaparan terhadap lensa mata, alat pembentuk darah dan juga untuk radiasi seluruh tubuh. Tangan dibolehkan menerima sampai 75 rem tiap tahun dan 20 rem selama 13 minggu.

Pada keadaan darurat maka pemaparan sampai 25 mrem dalam sebulan dibolehkan asal saja terjadi sekali saja selama hidup. Sedang kalau dalam keadaan perang, jika pemaparan ini dimaksudkan untuk menolong jiwa atau guna kepentingan negara, maka dibolehkan pemaparan sampai 100 rem dalam satu hari, sampai 150 rem dalam seminggu dan sampai 300 rem dalam sebulan.

6.2.3. Ciri Khas Laboratorium Radioisotop

Berdasarkan keterangan di atas maka laboratorium tempat mengerjakan radioisotop harus mempunyai perlengkapan :

- 1). Untuk mencegah atau mengurangi kontaminasi hingga seketijl mungkin, dan
- 2). Yang memungkinkan dekontaminasi dalam waktu yang singkat.

Fasilitas ini dan mungkin perlengkapan lain serta cara kerja lebih lanjut ditentukan oleh sifat pekerjaan yang akan dilakukan. Dalam buku petunjuk "IAEA" yang disebutkan di atas laboratorium dapat dibagi dalam 3 bagian (lihat Tabel 6.3.).

Tabel 6.3.
Laboratorium kerja untuk radioisotop

Keracunan Isotop	Jumlah minimum peracunan berarti	Laboratorium yang diperlukan		
		C Lab kimia yang baik	B Lab radioisotop	A Lab. Panas
sangat tinggi	0,1 μ C	< 10 μ C	10 μ C - 10 mC	> 10 mC
tinggi	1,0 μ C	< 100 μ C	100 μ C - 100 mC	> 100 mC
sedang	10 μ C	< 1 mC	1 mC - 1 C	> 1 C
rendah	100 μ C	< 10 mC	10 mC - 10 C	> 10 C

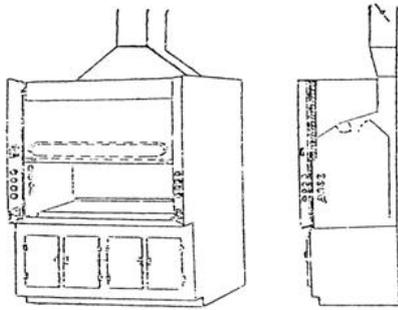
Sebagai laboratorium jenis C dapat digunakan setiap laboratorium biasa yang dilengkapi dengan kamar asam dan ventilasi yang baik. Lantai dan meja harus dapat dibersihkan dengan mudah. Laboratorium jenis C ini biasanya digunakan untuk pekerjaan kimia cacahan.

Jika hendak bekerja dengan radioisotop dalam jumlah besar maka harus disediakan suatu laboratorium jenis B. Ciri khas laboratorium jenis ini menurut buku petunjuk tersebut di atas ialah sebagai berikut :

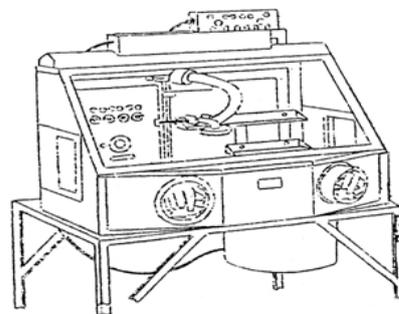
- 1). Setiap isotop disimpan pada tempat tertentu,
- 2). Kamar pencacah terpisah dari ruang laboratorium,
- 3). Ventilasi laboratorium harus baik, dengan aliran udara dari tempat yang aktivitasnya paling rendah menuju daerah dengan aktivitas paling tinggi,
- 4). Kamar asam harus dilengkapi dengan alat untuk menyaring debu radioaktif,
- 5). Semua pekerjaan yang mungkin menimbulkan debu radioaktif harus dijalankan dalam "glove box" atau kamar asam, seperti tertera pada Gambar 6.1 dan 6.2, lantai dan meja kerja harus ditutup dengan plastik atau dilapisi dengan cat untuk memudahkan pengawa-kontaminasi,
- 6). Keran harus dapat dibuka dengan siku atau kaki untuk menghindarkan kontaminasi dari tangan atau sarung tangan,
- 7). Harus tersedia lubang saluran air dilantai,
- 8). Tidak ada lekukan dan sudut yang sukar dibersihkan dari debu,

- 9). Perabot harus terbuat dari bahan yang tidak berpori dan kalau dapat dari bahan tahan asam,
- 10). Dalam kamar pencacahan tidak boleh terdapat tabung pendar fluor yang dapat menimbulkan ionisasi dalam udara, yang selanjutnya dapat menaikkan cacah latar belakang. Demikian pula tidak boleh terdapat sumber radioaktif dengan aktivitas tinggi atau mesin rontgen dalam kamar yang berdampingan.

Laboratorium jenis A, umumnya ditemukan dalam reaktor. Ciri khas laboratorium jenis ini ialah adanya tangan mekanik dan sel panas dengan dinding tebal.



Gambar 6.1. Kamar asam



Gambar 6.2. Glove box.

6.2.4. Prosedur Keamanan dan Pencegahan Bahaya Radiasi

Sebagian besar hal yang berhubungan dengan fasal ini telah diuraikan dalam Bab 6.2.1. Selain berusaha mengurangi radiasi dengan perisai timbal, maka pekerja juga harus memakai alat yang dapat mencatat jumlah radiasi yang diterima. Alat ini dapat berbentuk “film badge” yang dipakai di pergelangan tangan atau pada jam laboratorium, atau sebagai dosimeter kantong.

Dosis yang diterima dapat diperoleh dari penghitungan yang ditimbulkan pada film setelah dicuci atau dapat dibaca langsung pada perubahan muatan dosimeter. Selain dosimeter kantong dan “film badge” juga sering digunakan “badge” logam, terutama untuk pengukuran dosis neutron yang diterima.

a. Kontaminasi laboratorium

Seperti telah diuraikan, kontaminasi sedapat mungkin harus dihindarkan karena berbahaya untuk kesehatan, juga dapat mengganggu percobaan sehingga hasilnya meragukan.

Oleh karena itu diharuskan bahwa setiap pekerja dalam laboratorium radiokimia menuruti peraturan yang ada.

- 1). Setiap pekerja dalam laboratorium radioisotop diharuskan memakai jas laboratorium. Jas ini hanya dipakai dalam ruang laboratorium dan harus ditinggalkan sebelum meninggalkan ruang kerja. Sama sekali tidak dibenarkan untuk memakai jas ini masuk ke kamar pencacah.
- 2). Tidak diperkenankan memegang atau melakukan pekerjaan dengan zat radioaktif yang mungkin menimbulkan kontaminasi tangan, tanpa memakai sarung tangan. Jika pada tangan terdapat bekas luka sebaiknya ditutup dulu dengan plester untuk menghindari masuknya zat radioaktif ke dalam peredaran darah. Sarung tangan harus ditinggalkan segera bahaya kontaminasi terhadap kulit sudah hilang. Hal ini perlu untuk menghindarkan pemindahan zat radioaktif dari sarung tangan ke tempat lain yang dipegang.
- 3). Terutama pada pekerjaan yang besar kemungkinan menimbulkan kontaminasi pada sarung tangan, seperti misalnya membuka cuplikan aktif yang baru diradiasi, ekstraksi pelarut dengan menggunakan corong pemisah, harus digunakan kertas peresap antara sarung tangan dengan alat.
- 4). Sepatu sering merupakan alat pembawa kontaminasi. Oleh karena itu sebaiknya ditutupi dengan plastik atau pakai sepatu khusus dalam laboratorium.
- 5). Tidak diperkenankan makan, minum dan merokok dalam laboratorium. Demikian pula alat yang memerlukan bantuan mulut, misalnya pipet harus dikerjakan dengan alat khusus, misalnya dengan pompa karet.
- 6). Pemeriksaan dengan survai meter harus sering dilakukan terutama pada tempat yang dicurigai telah terkontaminasi. Setiap terjadi kontaminasi harus segera dibersihkan menurut aturan cara dekontaminasi.
- 7). Manipulasi radioisotop seperti misalnya memipet, memindahkan, memisahkan endapan dari larutan, dan lain-lain, harus dilakukan dengan menggunakan baki yang diberi beralas dengan kertas peresap. Alat ini harus dibuang setiap selesai percobaan.
- 8). Sedapat mungkin pipet, "syringe" dan pompa pemindah digunakan hanya untuk satu jenis radioisotop saja. Hal ini penting agar tidak terjadi kontaminasi suatu zat radioaktif oleh zat radioaktif yang lain.
- 9). Sumber zat radioaktif hanya dapat dimasukkan ke dalam laboratorium dengan fasilitas yang sesuai dengan aktivitasnya (lihat 6.3)
- 10). Sampah radioaktif harus dibuang ke dalam tempat khusus yang sudah disediakan, zat cair ke dalam botol plastik dan zat padat ke dalam tong khusus. Pembuangan selanjutnya harus menuruti nasehat ahli fisika kesehatan.
- 11). Setiap wadah, bejana kimia dan botol yang mengandung zat radioaktif harus diberi bertanda dengan keterangan mengenai jenis dan aktivitas zat radioaktif

isinya. Botol ini harus disimpan lagi dalam botol atau bejana yang lebih besar, antara botol dan bejana harus dilapisi dengan kertas penyerap.

- 12). Manipulasi suatu zat yang mungkin menimbulkan debu radioaktif sebaiknya dijalankan dalam “glove box” (lihat Gambar 6.2)
- 13). Sebelum meninggalkan laboratorium periksa tangan, pakaian dan sepatu dengan monitor yang sesuai.

b. Cara dekontaminasi

Cara dekontaminasi pekerja laboratorium dan alat merupakan persoalan pokok dalam suatu laboratorium radiokimia. Walaupun semua aturan telah ditaati dengan baik, namun tidak dapat dihindari bahwa dapat terjadi kecelakaan yang menimbulkan kontaminasi. Selain itu alat yang sudah digunakan sudah jelas harus didekontaminasi sebelum dapat digunakan kembali.

1. Kulit

Cara paling baik ialah mencuci dengan sabun dan air, mungkin dengan menggunakan sikat halus. Kadang-kadang cara ini tidak dapat berhasil. Dalam hal demikian dapat digunakan larutan perunut atau dapat pula digunakan zat kimia seperti pasta titanium dioksida atau untuk kontaminasi berat dapat digunakan larutan jenuh kalium permanganat dalam asam sulfat 0,2 N. Penggunaan pasta dilakukan dengan menutupi bagian yang terkontaminasi, gosok dengan lembut dan cuci bersih. Pada dekontaminasi dengan larutan permanganat, larutan tidak boleh dibiarkan lebih dari 2 menit sebelum dicuci untuk menjaga agar kulit tidak termakan. Kemudian cuci dengan air hangat dan gunakan larutan natrium bisulfit 5% yang baru, seperti penggunaan larutan permanganat. Setelah itu basuh dengan sabun dan air secukupnya. Periksa kembali dan kalau belum juga bersih ulangi lagi.

2. Pakaian

Jika aktivitas disebabkan oleh radioisotop golongan bahaya rendah dan bahaya sedang yang tidak melebihi 1.000 cpm (cacah per menit) atau untuk golongan sangat berbahaya tidak melebihi 100 cpm, maka dapat dicuci dengan cara biasa. Untuk aktivitas antara 1.000 sampai 10.000 cpm maka pakaian harus dicuci dengan menggunakan zat kimia, biasanya larutan panas asam sitrat 3%. Kalau lebih dari 10.000 cpm maka sebaiknya dicuci terpisah.

3. Perlengkapan laboratorium

Untuk alat seperti misalnya kaca, permukaan logam atau permukaan yang dicat, yang terkontaminasi dengan radioisotop beradioaktivitas tinggi, maka dekontaminasi dapat dilakukan secara membasuh dengan perunut.

Kaca dapat didekontaminasi secara baik dengan larutan asam nitrat 10% dalam asam klorida.

Aluminium dengan larutan asam nitrat 10% atau larutan natrium metasilikat ataupun natrium metafosfat 10%.

Baja dengan asam fosfat atau ditambah “spreading agent”

Permukaan bercat, dicuci dengan “spreading agent” dan amonium bifluorida.

Kayu atau beton. Kontaminasi bahan ini sedapat mungkin dihindarkan. Biasanya kalau sudah kena kontaminasi bagian terkontaminasi harus dibuang.

Pada umumnya cara kerja yang baik dan cermat sangat diperlukan. Pemeriksaan dengan monitor harus sering dilakukan, dan setiap kali terdapat kontaminasi harus segera dibersihkan.

6.3. BATAS KEMAMPUAN RADIOISOTOP SEBAGAI PERUNUT

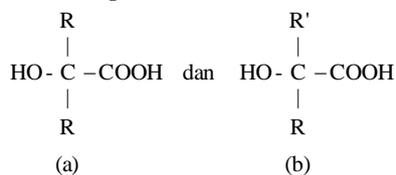
Walaupun pemakaian radioisotop sudah demikian meluas dan dapat digunakan dalam berbagai cabang pengetahuan dan aktivitas manusia, namun perlu sekali diinsafi bahwa radioisotop sebagai alat mempunyai kekurangan dan batas kemampuan.

Pertama, sinar yang dipancarkan oleh perunut radioaktif mungkin dapat merusak molekul atau sel hidup cuplikan yang diteliti. Kemungkinan lain ialah ion yang terbentuk karena radiasi mempengaruhi proses yang diteliti. Gejala semacam ini dinamakan pengaruh radiasi.

Kedua, ialah kemungkinan bahwa anggapan sifat kimia isotop radioaktif dianggap sama dengan isotopnya yang tidak aktif tidak selalu benar. Gejala ini dinamakan pengaruh isotop dan seperti akan diuraikan kemudian persoalan ini terutama penting pada penelitian kecepatan reaksi.

Pengaruh ketiga ditemukan dalam biokimia, yakni kenyataan bahwa molekul yang biasanya simetrik jika ditandai susunan ruangnya jadi berbeda walaupun secara kimia tetap sama. Hal ini disebabkan karena perbedaan massa antara atom radioaktif dengan yang tidak aktif. Gejala ini dinamakan *efek isotop* atau *diskriminasi ruang*.

Pengaruh ini terutama ditemukan pada reaksi enzima, misalnya pada asam sitrat.



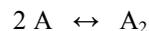
R ialah $\text{CH}_2\text{-COOH}$ dan R' ialah CH_2^*COOH . Secara kimia kedua bentuk molekul tersebut sama, tetapi karena perbedaan masa C^{12} dan C^{14} , maka molekul (b) oleh enzima dapat dianggap asimetrik.

6.3.1. Pengaruh Isotop

Anggapan dasar pada penggunaan radioisotop sebagai perunut ialah kesamaan sifat kimia antara isotop radioaktif dan isotop tidak aktif.

Anggapan ini mendapat dukungan dari pengamatan bahwa susunan isotop unsur dalam alam selalu tetap dan hanya dapat dipisahkan dengan menggunakan alat khusus seperti difusi termik, difusi gas, ultrasentrifuge dan distilasi atau elektrolisis bertingkat. Namun demikian harus diinsafi bahwa sebenarnya terdapat perbedaan sifat antara isotop dalam suatu unsur, dan adalah sangat penting untuk mengetahui dan mempunyai suatu bayangan mengenai pengaruh perbedaan masa ini terhadap sifat kimia.

Pada umumnya pengaruh isotop akan terlihat pada perbedaan kecepatan reaksi. Hal ini mudah terlihat pada rumus persamaan kecepatan reaksi. Misalkan suatu reaksi sederhana dinyatakan oleh persamaan



menurut teori kinetik kecepatan reaksi dapat dinyatakan dengan persamaan

$$k = \frac{1}{2} \pi \sigma^2 v e^{-E_d/RT} \quad (6.4)$$

k ialah kecepatan reaksi, π tetapan yang besarnya 3,14, σ diameter tumbukan molekul, E_d energi dimensi molekul dan v kecepatan rata-rata molekul.

Ternyata massa isotop berpengaruh baik dalam v maupun dalam E_d karena

$$v = v_0 \sqrt{\frac{rt}{\mu m}} \quad (6.5)$$

dan

$$E_d = E - E_0 = E - \frac{b}{Vm} \quad (6.6)$$

M ialah massa molekul dan untuk molekul beratom dua sama dengan $2m$; m ialah massa atom atau isotop pembentuk molekul.

Jika persamaan (6.5) dan (6.6) disubstitusikan ke dalam (6.1) diperoleh :

$$k = 1/2 v \sigma^2 \times 4 \sqrt{\frac{RT}{\mu M e^{-(E-b\sqrt{m})/RT}}} \quad (6.7)$$

Misalkan kecepatan isotop dengan massa m dinyatakan dengan k dan isotop dengan massa m' dengan k' , maka jika harga-harga ini disubstitusikan dalam persamaan (6.7) dan kedua persamaan yang diperoleh dibagi satu dengan yang lain, didapat

$$\frac{k}{k'} = \frac{m'}{m e^{b(1/m - 1/m')/RT}}$$

Jika $m' > m$ maka baik faktor di muka tanda eksponensial maupun faktor eksponensial sendiri keduanya lebih besar dari pada satu, yang berarti bahwa k/k' juga lebih besar daripada satu. Dengan perkataan lain isotop yang lebih ringan bergerak lebih cepat.

6.3.2. Pengaruh Radiasi

Gambaran mengenai pengaruh radiasi dapat diperoleh dengan menggunakan perhitungan di bawah ini.

Misalkan suatu percobaan yang menggunakan n liter larutan M molar suatu senyawa yang mengandung n atom C tiap Mol, dan yang ditandai dengan isotop $C-14$ dengan akvitas jenis S . Selanjutnya misalkan bahwa percobaan harus dilakukan selama 1 jam. Dari pustaka diperoleh data untuk $C-14$ sebagai berikut. Umur paro M ialah 5568 tahun, energi maksimum sinar beta yang dipancarkan 0,155 MeV, jarak tempuh R dalam aluminium sama dengan 30 mg/cm² dan akvitas A sama dengan 4,61 curie/gram.

Dengan menggunakan data ini dapat dihitung bahwa jumlah aktivitas yang terdapat dalam sistem ialah

$$M \times V \times n \times \text{Sn}14,0 \times 4,61 = 64,5 \text{ MVnS curie}$$

Karena energi rata-rata radiasi beta yang dipancarkan dapat dianggap sama dengan sepertiga energi maksimumnya, maka energi partikel beta yang dipancarkan ialah

$$64,5 \text{ MVnS} \times 3,7 \times 10^{10} \times V3 \times 11,55 \times 10^5 = 1,23 \times 10^{17} \text{ MVnS eV/detik}$$

Jika selanjutnya dianggap bahwa jarak tempuh radiasi beta dalam sistem sama dengan jarak tempuh dalam aluminium yakni 30 mg/cm², dan rapat massa sama dengan massa air yakni 1 g/cm³, maka jarak tempuh radiasi beta dalam sistem ialah,

$$0,03 \text{ g/cm}^2 : 1 \text{ g/cm}^3 = 0,3 \text{ mm}$$

Jika volume larutan V cukup besar maka dapat dianggap bahwa jumlah radiasi beta yang menempati permukaan setebal 0,3 mm ini sangat sedikit, akan dapat diabaikan. Jadi dapat dianggap bahwa semua energi radiasi beta yang dipancarkan diresap dalam tubuh larutan, dan oleh karena itu kecepatan peresapan energi oleh larutan sebanding dengan kecepatan pemacaran energi oleh atom radioaktif, yakni :

$$1,23 \times 10^{17} \text{ MVnS eV/detik}$$

Efisiensi perusakan oleh radiasi dapat dihitung, jika nilai G, yakni bilangan yang menyatakan jumlah molekul zat yang diubah setiap terserap 100 eV energi diketahui.

Jadi dinyatakan dalam G maka jumlah yang rusak jika percobaan dijalankan selama t jam ialah :

$$1,23 \times 10^{17} \text{ MVnS} \times 3600t \times G/100 = 4,44 \times 10^{18} \text{ MVnStG molekul}$$

Karena pada permukaan percobaan terdapat : $MV \times 6,02 \times 10^{23}$ molekul, jadi persentase yang rusak ialah :

$$\frac{4,44 \times 10^{18} \text{ MVnStG}}{MV \times 6,02 \times 10^{23}} = 7,36 \times 10^{-6} \text{ nSGT}$$

atau $(7,36 \times 10^{-6} \text{ nSGt})$ btj (bagian tiap juta)

Misalkan $n = 6$, $S = 1$ (semua atom C ialah atom C-14), $G = 1$ (tiap meresap 10 eV rusak satu molekul) dan $t = 10$ jam, maka persentase atom yang rusak ialah :

$$7,36 \times 6 \times 1 \times 1 \times 10 = 442 \text{ btj} = 0,04\%$$

Kalau diingat bahwa percobaan dengan perunut ketelitiannya biasanya tidak pernah melebihi 1%, maka pengaruh radiasi dapat diabaikan, walaupun digunakan C-14 dengan aktivitas jenis satu, hal yang tentunya jarang terjadi.

Misalkan yang digunakan ialah S-35 pemancar beta berenergi 0,167 MeV dengan kecepatan peluruhan sebesar $4,28 \times 10^4$ curie/g. Dengan menggunakan perhitungan yang sama diperoleh bahwa bagian yang mengurai besarnya :

$$(1,84 \times 10^5 \text{ nSGt}) \text{ btj} = (18,4 \text{ nSGt}) \%$$

Jika dalam hal ini juga dianggap bahwa $S = 1$, $G = 1$ dan $t = 10$ jam, maka jumlah penguraian ialah :

$$1,85 \times 10^5 \times 1 \times 1 \times 10 = 184 \text{ n \%}$$

Jadi kerusakan cukup besar dan perlu dihindari. Agar kerusakan lebih kecil dari 1% maka aktivitas jenis tidak boleh melebihi 0,005 curie tiap gram.

Perhitungan yang sama dapat digunakan untuk pemancar radiasi yang lain. Untuk pemancar beta keras dan radiasi gamma hal lain yang perlu diperhatikan ialah bagian energi radiasi yang tidak teresap dalam sistem. Pada umumnya dapat dikatakan bahwa jika aktivitas total yang digunakan masih kurang dari 1 milicurie maka pengaruh radiasi dapat diabaikan. Tetapi jika lebih, terutama untuk pemancar beta keras dan gamma, maka koreksi harus dilakukan.

6.4. PERSIAPAN SEBELUM PENCACAHAN

Seperti telah diutarakan yang termasuk dalam bab ini ialah reaksi, pemisahan dan persiapan sumber. Persoalan reaksi, dimaksudkan mencakup semua pekerjaan seperti menembaki zat dengan partikel dalam penelitian reaksi inti, dan produksi radioisotop, menyuntikkan perunut dalam tubuh hewan atau manusia untuk tujuan diagnosis dan terapi, meradiasi biji dalam persoalan penelitian efek genetik radiasi, dan semua langkah pertama dalam penggunaan radioisotop, dan lain-lain semacamnya.

Oleh karena luasnya maka dalam fasal ini hanya akan dibicarakan persiapan untuk radiasi dan faktor yang perlu diperhatikan pada radiasi.

Mengenai cara pemisahan ini akan dibicarakan dalam Bab 7, karena itu tidak akan dibahas dalam fasal ini.

6.4.1. Persiapan Radiasi

Seperti telah diuraikan cara mereaksikan bergantung pada jenis pekerjaan dan persoalan yang dihadapi.

Dalam penelitian yang menyangkut reaksi inti misalnya, pada pembentukan isotop untuk diteliti lebih lanjut, maka seringkali perlu diperhatikan mengenai bahan wadah yang digunakan. Kaca pyrex sudah jelas harus dihindari karena konsentrasi boronnya besar. Kalau penyinaran tidak terlalu lama dan fluks neutron tidak terlalu tinggi dapat digunakan botol plastik, lembaran aluminium murni dapat juga sebagai pembungkus zat yang hendak disinari. Karena waktu paruh Al-28 yang terjadi sangat pendek yakni hanya 2,3 menit maka pendinginan hanya sekitar beberapa menit sampai satu jam. Tetapi kalau radiasi lama apa lagi kalau fluks yang digunakan tinggi maka umumnya digunakan tabung kwarsa yang kedua ujungnya dilebur.

Oleh karena komponen utama kwarsa ialah silikon, dan Si-31 yang terbentuk setelah radiasi waktu paruhnya 2,6 menit, maka diperlukan waktu pendinginan kurang lebih 10 – 24 jam sebelum dapat dikerjakan lebih lanjut.

Selain persoalan wadah ini maka persoalan mengenai zat yang hendak diiradiasi sendiri dapat bermacam-macam, misalnya, perlu diteliti bagaimana pengaruh radiasi terhadap zat yang diiradiasi, stabilitasnya selain terhadap radiasi juga terhadap panas dalam reaktor atau panas akibat penembakan. Persoalan ini terutama penting untuk zat organik dan cuplikan biologi. Untungnya dalam reaktor biasanya tersedia fasilitas yang memenuhi persyaratan yang diperlukan.

Persoalan dalam mengiradiasi larutan ialah kemungkinan radiolisis air, penguraian karena radiasi, yang menimbulkan gas yang kalau tekanannya tinggi mungkin memecahkan wadah. Hal ini penting diperhatikan kalau radiasi dilakukan dalam waktu yang lama.

Persoalan lain yang mungkin timbul ialah perisaian sendiri zat terhadap penembak. Hal ini akan mengakibatkan bahwa molekul sebelah dalam akan menerima lebih sedikit partikel dari pada molekul yang berada pada bagian luar. Hasilnya ialah fluks yang diterima lebih sedikit daripada fluks yang diharapkan. Hal ini terutama penting jika dalam zat yang diiradiasi terdapat unsur denganampang lintang besar, misalnya boron, wolfram, kadmium dan sejenisnya.

Persoalan lain lagi ialah mengenai partikel penembak sendiri. Seringkali diinginkan mengetahui fluks iradiasi penembak agar dapat dilakukan perhitungan. Secara sederhana penentuan ini dapat dilakukan dengan mengiradiasi zat yang telah diketahuiampang aktivasi dengan pasti. Yang sering digunakan ialah emas Au-197. Inti ini menangkap neutron termal denganampang lintang sebesar 99 barn dan menjadi Au-198.

Dengan menggunakan rumus yang akan diturunkan dalam Bab 8 dan jika penembakan dilakukan dengan fluks sebesar f selama t detik diperoleh :

$$N_{198} = f\sigma_a x \frac{w}{197} x 6,02 x 10^{23} \left(\frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} \right) \quad (6.9)$$

N_{198} ialah tetapan peluruhan Au-198 dinyatakan dalam detik⁻¹, f fluks dalam jumlah partikel tiap cm² tiap detik, w berat emas yang diradiasi dan σ_a dan karena semuanya diketahui maka dengan mengukur aktivitas N_{198} , fluks dapat ditentukan. Selain menggunakan Au-197 dapat pula digunakan reaksi $\text{Co}^{59}(n,\gamma)\text{Co}^{60}$.

Selain fluks partikel penembak mungkin juga diperlukan untuk mengetahui energinya. Pada umumnya cara paling baik untuk penentuan energi partikel bermuatan ialah pembelokan arah partikel bermuatan dalam medan magnet.

Akhir-akhir ini penentuan energi partikel bermuatan terutama untuk berkas dengan energi rendah lebih banyak dilakukan dengan pencacah zat padat. Selain itu untuk energi 50 – 100 MeV cara penentuan jarak tempuh masih cukup sering digunakan.

6.4.2. Penyiapan Cuplikan untuk Pencacahan

Setelah zat diiradiasi maka langkah berikutnya ialah pemisahan. Berbagai macam cara pemisahan yang dapat digunakan akan diuraikan dalam Bab 7. Apapun cara pemisahan yang digunakan maka persoalan berikutnya ialah bagaimana penyiapan sumber yang akan dicacah. Pemilihan bentuk misalnya padat, cair atau gas, bergantung pada alat pencacah yang tersedia.

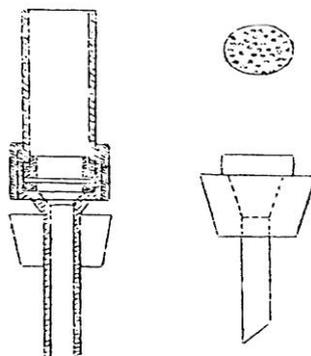
Persoalan penting dalam penyiapan sumber untuk dicacah ialah bagaimana cara memperoleh sumber dengan susunan geometri, jumlah hamburan dan resapan yang sama setiap sumber dengan perkataan lain penyiapan sumber harus dapat diulang. Ketelitian mengenai reproduibilitas ini lebih penting lagi jika sumber digunakan untuk pencacahan atau penentuan energi secara mutlak.

a. Sumber padat

Bentuk ini merupakan bentuk yang paling banyak digunakan terutama untuk alat deteksi yang sederhana seperti pencacah Geiger. Faktor penting yang harus diperhatikan ialah luas, keserbasamaan tebal dan kemantapan endapan. Tebal ini penting terutama untuk pemancar alfa dan beta lunak karena kemungkinan terjadinya peresapan sendiri oleh endapan. Dengan menggunakan tabel yang sama koreksi mengenai peresapan sendiri dapat diabaikan.

Penyiapan sumber padat meliputi pengerjaan penyiapan penadahan, pelekatan atau pengendapan pada penadah, kemudian endapan yang diperoleh harus ditutup. Zat penadah ini dapat berbentuk kertas saring, planset tembaga, aluminium atau planset baja tahan karat maupun plastik.

Penadah mana yang digunakan bergantung pada sifat sistem yang hendak diendapkan, larutan asam atau basa, misalnya, sudah jelas tidak dapat menggunakan aluminium atau kertas saring. Kaca tidak tahan terhadap HF, dan sebagainya. Selain itu pemilihan zat penadah juga mempengaruhi penghamburan kembali. Pengendapan umumnya dapat dilakukan dengan menggunakan alat seperti tertera pada Gambar 6.3.



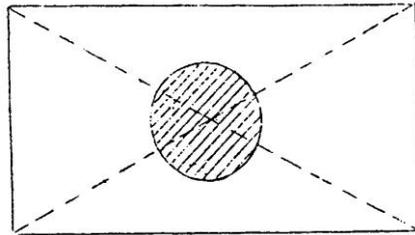
Gambar 6.3. Alat penyaring.

Tabung bagian atas selain menahan larutan yang hendak disaring juga bertindak untuk memberikan bentuk pada endapan yang terjadi. Agar endapan serba sama dan rata maka penyaringan sebaiknya dilakukan secara lambat. Setelah penyaringan, kertas saring yang mengandung endapan dapat diambil untuk pengerjaan selanjutnya.

Cara lain, jika endapan tidak terlalu banyak atau kalau yang hendak dicacah ialah larutan yang dapat langsung diuapkan, ialah penggunaan planset. Untuk membatasi luas permukaan maka seringkali pada dasar planset terdapat lekukan berbentuk lingkaran sepusat. Jadi kalau larutan hanya sedikit, yang digunakan hanya bagian yang dibatasi oleh lingkaran paling dalam, kalau zatnya lebih banyak, lingkaran luar juga dapat diisi. Pada penggunaan planset ini larutan atau suspensi maupun bubur endapan dalam pelarut yang sesuai dipipetkan ke dalam planset. Dengan jalan memutar planset larutan atau bubur endapan akan merata dalam planset. Endapan atau larutan ini kemudian dikeringkan dengan menggunakan lampu pemanas. Selama pengeringan ini planset sebaiknya sekali-sekali diputar agar endapan tidak menggumpal di satu tempat, dan selain itu waktu endapan hampir kering pemanasan harus dikurangi untuk menjaga agar tidak terjadi pemercikan yang mengakibatkan selain kehilangan endapan dapat pula menimbulkan kontaminasi.

Endapan yang sudah kering, baik yang dalam kertas saring maupun yang berada dalam planset, biasanya dilakukan pada suatu kertas yang ukurannya disesuaikan dengan rak dalam tempat penyimpanan sumber dalam sistem detektor. Untuk mendapatkan geometri yang dapat diulang maka planset atau kertas saring berisi endapan selalu ditempatkan di pusat karton seperti tertera pada Gambar 6.4. Endapan kemudian ditutup dengan menggunakan film tipis, misalnya selofan, polistiren. Penutup ini digunakan untuk menghindarkan tercecernya zat pada pemindahan ke tempat lain yang mungkin menimbulkan kontaminasi. Selain itu

penutup ini juga dapat menjaga endapan dari keretakan atau goresan yang dapat mengubah keserbasamaan.



Gamabr 6.4. Cara pemasangan cuplikan.

Dalam beberapa hal penutupan digunakan untuk meresap radiasi lembut sehingga yang sampai pada detektor hanya yang keras saja, penutupan ini sudah jelas mengurangi efisiensi karena adanya peresapan terutama pada pemancaran alfa dan beta lunak, peresapan ini mungkin menimbulkan kesalahan.

Pekerjaan terakhir ialah memberi tanda pengenal pada sumber yang telah disiapkan. Selain untuk menjaga kekeliruan, tanda pengenal juga berguna untuk menghindarkan bahaya radiasi terhadap orang lain yang tidak mengetahui. Sekurang-kurangnya harus dituliskan jenis pemancar, tanggal pembuatan, nama pembuat dan mungkin nomor kode.

Dalam beberapa hal endapan dapat pula dilakukan secara elektrolisis. Keuntungan cara ini ialah keserbasamaan endapan dan karena yang diendapkan ialah unsur dan bukan senyawa maka aktivitas jenis lebih tinggi.

b. Sumber cair

Dalam beberapa hal jauh lebih mudah untuk mengukur aktivitas suatu zat dalam keadaan cair, misalnya :

- 1). Jika perubahan menjadi zat padat atau gas sukar dilakukan atau terlalu banyak memakan waktu,
- 2). Jika diperlukan kepekaan serta volum yang lebih besar,
- 3). Jika diinginkan bahwa zat yang mula-mula cair diperoleh kembali dalam keadaan tidak berubah.

Untuk suatu sumber pemancar gamma maka umumnya larutan cair dalam tabung reaksi dapat langsung dicacah dengan menggunakan detektor sintilasi padat berbentuk sumur, atau dengan tabung Geiger. Hal ini menghindarkan proses rumit persiapan sumber padat.

Untuk sumber beta, walaupun cara pencacahan langsung suatu cairan dengan menggunakan detektor tabung Geiger yang berbentuk khusus mungkin, namun karena persoalan peresapan diri, hamburan kembali dan persoalan lain yang berhubungan dengan sifat partikel beta, cara pengukuran cairan dengan Geiger jarang dilakukan.

Pada umumnya pemancar beta dalam keadaan cair dicacah dengan menggunakan detektor sintilasi cair. Teori mengenai sintilator cair telah diuraikan dalam Bab 4 buku kesatu. Jadi dalam fasal ini hanya akan diuraikan syarat cuplikan radioaktif agar dapat dicacah secara sintilasi cair.

Cuplikan yang hendak dicacah sebaiknya diubah ke dalam bentuk senyawa yang mudah larut dalam pelarut sintilator. Cuplikan cair harus bukan peredam radiasi karena zat peredam dapat mengganggu proses pemancaran foton pada sintilator. Selain itu cuplikan tidak boleh berwarna karena mungkin dapat meresap gelombang tertentu radiasi yang dipancarkan oleh sintilator.

Untuk pencacahan zat dengan aktivitas tinggi sebaiknya ukuran cuplikan yang digunakan kecil agar peredaman dapat dikurangi. Jika aktivitas rendah maka volume sebaiknya sebesar mungkin asal saja tidak menimbulkan pengurangan efisiensi.

Sebagai wadah biasanya digunakan botol kaca. Botol timbang telah digantikan oleh vial medisinal yang lebih murah dan kurang kemungkinan bocor. Botol berwarna sebaiknya dihindari dan kaca tipis lebih berguna karena mengurangi latar belakang yang disebabkan oleh K-40.

c. Sumber gas

Beberapa unsur hanya dapat dicacah dalam bentuk gas seperti misalnya gas mulia, oksigen, nitrogen. Demikian pula beberapa unsur, walaupun dapat dicacah dalam bentuk padat atau cair, lebih menguntungkan jika dicacah dalam bentuk gas.

Hal ini terutama ditemukan pada pemancar beta lunak misalnya T-3, C-14, S-35 dengan energi maksimum masing-masing sebesar 0,0176, 0,155 dan 0,167 MeV. Karena rendahnya energi yang dipancarkan maka jika peresapan tidak dapat dihindarkan, efisiensi pencacahan akan sangat rendah. Dengan mengubah zat tersebut menjadi gas, kesulitan tersebut dapat dihindari. Senyawa gas yang terbentuk dapat dijadikan sebagai gas pencacah pada tabung Geiger, kamar ionisasi dan tabung proporsional, dengan demikian diperoleh efisiensi maksimum.

Pada umumnya penyiapan sumber untuk ketiga jenis detektor tadi, meliputi

- 1). Pembuatan dan pemurnian gas radioaktif, dan
- 2). Pemindahan gas ke dalam pencacah.

Teknik hampa merupakan keharusan dalam cara penyiapan sumber gas.

6.5. PENCACAHAN

Teori tentang berbagai pencacahan telah diuraikan dalam Bab 4 Buku 1. Dalam fasal ini akan diberikan sedikit ikhtisar mengenai teknik pencacahan. Seperti telah diuraikan, secara ideal pemilihan alat dan teknik kerja ditentukan oleh persoalan yang dihadapi dan keterangan yang diinginkan dari pengukuran.

Sebaiknya suatu laboratorium radioisotop jenis B (Tabel 6.3.) mempunyai sekurang-kurangnya satu pencacah Geiger Muller untuk pencacahan beta atau gamma yang berasal dari isotop tunggal radioaktif, dan sebuah pencacah sintilasi dengan detektor natrium iodida untuk mencacah gamma, dan lebih baik ada sebuah pencacah proporsional aliran gas yang dapat digunakan untuk pencacahan alfa maupun beta.

Juga harus disediakan suatu set peresap yang terbuat dari aluminium atau timbal untuk penentuan jarak tempuh atau untuk mengeliminasi radiasi lunak kalau yang hendak diukur ialah radiasi gamma atau beta karena mungkin ada baiknya juga menyediakan peresap seperti berilium, parafin atau polietilen. Peresap jenis ini sangat berguna karena koefisien resapnya sangat kecil terhadap semua sinar elektromagnetik kecuali untuk yang paling lemah.

Semua alat sebaiknya diperiksa secara berkala, kalau dapat setiap hari. Secara ideal aktivitas standar yang digunakan sebaiknya mendekati aktivitas yang hendak diukur. Cacahan latar belakang sebaiknya diukur tiap hari, bahan dalam satu hari dilakukan beberapa kali. Demikian pula plateau Geiger dan proporsional harus sering diperiksa. Sebagai standar untuk beta dapat digunakan Cl-36 dengan waktu paruh 3×10^5 tahun dan energi maksimum sebesar 0,7 MeV. Untuk pencacah gamma diperlukan pemeriksaan sering mengenai penguraian puncak foton tertentu misalnya radiasi dengan energi 0,66 MeV yang berasal dari standar Ca-137 .

6.5.1. Standardisasi Sumber

Walaupun pada umumnya dalam pekerjaan sehari-hari digunakan cara pencacahan dengan membandingkan aktivitas suatu zat yang belum diketahui terhadap zat yang telah diketahui, namun dalam beberapa hal sangat diperlukan untuk mengetahui

jumlah zat radioaktif yang sebenarnya ada. Penentuan kecepatan peluruhan mutlak suatu sumber dinamakan standardisasi sumber. Jika kecepatan peluruhan ini dapat diperoleh langsung dari pembacaan kecepatan cacahan maka pengukuran dinamakan pencacahan mutlak.

Sesuai dengan kebiasaan maka standar radioaktif dapat dibagi ke dalam standar primer dan standar sekunder bergantung pada apakah standar ditentukan langsung dengan alat yang memerlukan kalibrasi atau tidak. Standardisasi suatu alat pencacah untuk digunakan menstandarisasi sumber sekunder dapat dilakukan dengan menggunakan sumber primer yang umumnya dapat diperoleh dari biro standardisasi.

Istilah sumber pembanding (*reference source*) hedaknya digunakan untuk suatu sumber yang aktivitasnya telah dibandingkan dengan sumber standar yang terdiri dari radionuklida lain.

a. Cara standardisasi primer

Standardisasi primer ini dapat dilakukan baik dengan alat pencacah 4π maupun pencacah koinsidensi. Cara 4π banyak digunakan untuk mencacah beta tetapi dapat juga digunakan untuk sumber pemancar beta dan gamma, jika gamma dipancarkan serentak dengan beta sehingga tidak menimbulkan denyut yang berbeda. Jika pada peluruhan suatu radionuklida dipancarkan dua radiasi secara berturut-turut maka untuk penentuan kecepatan peluruhan lebih baik digunakan cara koinsidensi.

Sebagai contoh, misalkan sekumpulan radiasi beta diikuti oleh radiasi gamma tunggal.

Kecepatan pencacahan beta N_β ialah :

$$N_{\beta} = N_o \varepsilon_{\beta} \quad (6.10)$$

N_o ialah kecepatan peluruhan sumber dan ε_{β} efisiensi pencacahan. Demikian pula diperoleh kecepatan pencacahan N_{gamma} , yakni

$$N_{\text{gamma}} = N_o \varepsilon_{\gamma} \quad (6.11)$$

ε_{γ} ialah efisiensi detektor gamma. Kecepatan koinsidensi N_c ialah :

$$N_c = N_o \varepsilon_{\beta} \varepsilon_{\gamma} \quad (6.12)$$

Dari ketiga persamaan di atas diperoleh

$$N_o = \frac{N_{\beta} N_{\gamma}}{N_c} \quad (6.13)$$

Persaman (6.13) menunjukkan bahwa pada cara ini efisiensi masing-masing pencacah tidak perlu diketahui.

Cara koinsidensi memerlukan pengetahuan mengenai bagan peluruhan inti, oleh karena itu penggunaannya terbatas seperti misalnya pada nuklida Na-22, Co-60, I-131 dan Au-198. Selain itu cara ini tidak dapat digunakan pada pemancar beta murni. Selain cara koinsidensi beta-gamma juga dapat digunakan koinsidensi gamma-gamma.

b. Cara sekunder

Jika kecepatan peluruhan standar primer telah ditentukan maka standar sekunder dapat ditentukan dengan jalan membandingkan aktivitasnya dengan aktivitas sumber primer dengan menggunakan detektor yang sesuai. Jadi sebenarnya detektor yang ditera dengan standar primer. Misalkan aktivitas sumber primer yang dicatat oleh suatu detektor ialah N_1 , sedang kecepatan peluruhannya standar ialah N_o , maka koefisien deteksi detektor ialah

$$y = \frac{N_1}{N_o} \quad (6.14)$$

Jika suatu sumber lain menunjukkan kecepatan pencacahan sebesar N_2 maka ini berarti bahwa kecepatan peluruhan sumber sebenarnya ialah

$$N_o = \frac{N_2}{y} \quad (6.15)$$

Perlu dijelaskan disini bahwa kalau tidak disebutkan lain maka kecepatan pencacahan ialah hasil cacahan sumber dikurangi dengan cacahan latar belakang.

6.5.2. Peneraan Detektor

Efisiensi suatu detektor Geiger dapat didefinisikan sebagai :

$$Y = \frac{\text{kecepatan pencacahan}}{\text{kecepatan peluruhan mutlak}} \quad (6.16)$$

Y ternyata merupakan hasil kali beberapa faktor yakni :

$$Y = I.G.W.A.B.C.H.S.L \quad (6.17)$$

I ialah kemungkinan deteksi, G faktor geometri, W faktor peresapan udara dan jendela detektor, A faktor penghamburan udara, B faktor penghamburan kembali zat penadah sumber, C faktor peresapan penutup sumber, H faktor penghamburan sumber, dinding perisai dan bahan lain yang ada dalam ruang tempat sumber, S faktor peresapan sendiri oleh zat, dan L kehilangan koinsidensi. L tidak bergantung pada sumber tetapi merupakan sifat karakteristik instrumen.

Oleh karena kebanyakan pekerjaan dalam laboratorium menggunakan cara membandingkan aktivitas zat yang hendak ditentukan terhadap suatu standar yang diketahui maka enam faktor yang pertama dalam persamaan (6.17) akan tetap sama pada pencacahan zat yang tidak diketahui dan zat standar, asal dijaga bahwa keadaan pengukuran tidak berubah. Oleh karena itu persamaan (6.17) dapat juga ditulis dalam bentuk

$$Y = Y_c \cdot S \cdot L \tag{6.18}$$

S ialah faktor persiapan sendiri dan L ialah kehilangan koinsidensi.

a. Kehilangan koinsidensi

Faktor ini disebabkan oleh karena detektor mempunyai daya penguraian yang terbatas. Dua buah denyut yang terjadi secara berturut-turut dalam jangka waktu yang sangat singkat mungkin tidak dapat dibedakan, sehingga jumlah yang dicatat lebih kecil dari yang seharusnya. Kehilangan ini akan bertambah besar dengan bertambah besarnya kecepatan peluruhan sumber.

Berdasarkan hal ini maka jika dua buah sumber dengan aktivitas yang hampir sama mula-mula diukur secara terpisah dan kemudian diukur bersama-sama dapat diharapkan bahwa aktivitas pada pengukuran terakhir akan lebih kecil dari pada jumlah aktivitas yang dicacah secara terpisah.

Jangka waktu yang pendek antara dua proses yang masih dapat dibedakan sebagai proses terpisah oleh detektor disebut waktu penguraian atau waktu mati detektor atau seringkali juga dinamakan waktu tidak peka.

Misalkan waktu mati besarnya τ menit, dan suatu sumber memancarkan N partikel tiap menit. Misalkan selanjutnya bahwa setiap menit pencacah mencatat sebesar R cacahan. Ini berarti bahwa dalam satu menit alat tidak mencatat selama $R\tau$.

Jadi jika kehilangan lain dapat diabaikan maka kehilangan karena koinsidensi (N-R) dinyatakan oleh persamaan

$$\frac{N - R}{R} = \tau R \tag{6.19}$$

atau $N = R + \tau R^2$ (6.20)

Untuk pekerjaan yang lebih teliti masih perlu diadakan koreksi lain. Secara teori hubungan antara N dan R dinyatakan oleh persamaan :

$$N = c_0 + c_1R + c_2R^2 + c_3R^3 + \dots \tag{6.21}$$

Dalam keadaan $c_0 = c_1 = 1$ dan c_3, c_4 dan seterusnya $= 0$, maka diperoleh

$$N = R + cR^2 \quad \text{atau} \quad N = R + R^2 \quad (6.22)$$

Jadi dalam hal istimewa ini persamaan (6.20) berlaku.

Waktu mati τ umumnya dapat ditentukan dengan menggunakan cara sumber berpelebaran. Pada cara ini dua buah sumber dengan aktivitas yang hampir sama diukur. Misalkan kecepatan pencacahan masing-masing N_A dan N_B . Kemudian kedua sumber dicacah bersama-sama dan misalkan aktivitasnya N_C . Jika latar belakang besarnya b maka pencacahan bersih ialah :

$$N_A' = N_A - b = R_A + \tau R_A^2 - b \quad (6.23)$$

$$N_B' = N_B - b = R_B + \tau R_B^2 - b \quad (6.24)$$

$$N_C' = N_A' + N_B' = N_C - b = R_C + \tau R_C^2 - b \quad (6.25)$$

Jika persamaan (6.23) disubstitusikan ke dalam persamaan (6.25) diperoleh :

$$R_C + \tau R_C^2 - b = R_A + R_B + \tau(R_A^2 + R_B^2) - 2b$$

atau

$$\tau(R_C^2 - R_A^2 - R_B^2) = R_A + R_B - R_C - b$$

atau

$$\tau = \frac{R_A + R_B - R_C - b}{(R_C^2 + R_A^2 - R_B^2)} \quad (6.26)$$

Jadi dapat ditentukan.

b. Koreksi peresapan sendiri

Pada suatu sumber yang tebal, peresapan dan penghamburan dalam sumber akan terjadi. Proses ini biasanya dinamakan proses peresapan-sendiri dan penghamburan-sendiri. Kecepatan peresapan dan penghamburan bergantung pada tebal sumber, nomor atom zat yang meresap dan faktor lain yang semuanya menghasilkan suatu pengaruh yang rumit.

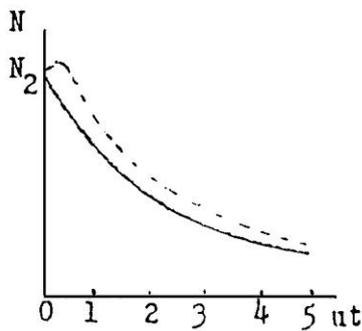
Secara sederhana S , koefisien resapan sendiri, dapat dihitung sebagai fungsi tebal t , jika dianggap bahwa peresapan berlangsung secara eksponensial dengan koefisien resap μ yang tetap. Jika jumlah cacahan yang diamati pada suatu sumber tanpa tebal ialah N_0 maka jika tidak ada peresapan, cacahan yang berasal dari sumber dengan kekuatan sama tetapi tebalnya dx ialah :

$$dN = N_0 \frac{dx}{t} \quad (6.27)$$

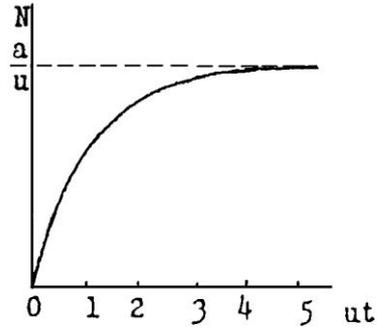
Adanya peresapan akan mengurangi jumlah cacahan dengan e^{-ux} sehingga jumlah aktivitas yang terukur menjadi :

$$N = \int dN = \int N_o \frac{dx}{t} e^{-ux} = \frac{N_o}{ut} (1 - e^{-ux}) \quad (6.28)$$

Gambar 6.6 menunjukkan kurve peresapan teoretik dan kurve yang sebenarnya akan diperoleh. Kenaikan aktivitas pada kurve sebenarnya disebabkan oleh penghamburan kembali oleh zat penadah. Proses ini menyebabkan radiasi yang tadinya harus hilang kembali lagi masuk detektor.



Gambar 6.5.
Kurva peresapan sendiri pada aktivitas total tetap



Gambar 6.6.
Kurva peresapan sendiri pada aktivitas jenis tetap

Jika yang digunakan ialah aktivitas jenis $\mu = \frac{N_o}{t}$, maka persamaan (6.27) dapat ditulis dalam bentuk :

$$N = \frac{a}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \quad (6.29)$$

Mudah dilihat bahwa pada sumber yang tebal, persamaan (6.29) berubah menjadi :

$$N = \frac{a}{\mu} \quad (6.30)$$

Jadi setelah suatu tebal tertentu yang disebut tebal jenuh maka aktivitas yang dicacah berbanding lurus dengan aktivitas jenis. Hal ini memungkinkan suatu cara pengukuran aktivitas relatif untuk sumber dengan aktivitas jenis yang seragam. Cara ini sangat penting terutama pada pemancar beta lunak seperti misalnya C-14 ($E_{maks} = 0,155 \text{ MeV}$) dan S-35 ($E_{maks} = 0,167 \text{ MeV}$).

Dalam praktek umumnya tidak dilakukan perhitungan tetapi dibuat suatu kurve kalibrasi. Jadi cacahan pada sumber dengan aktivitas tebal tetap ditentukan pada berbagai tebal.

Hal ini dapat dilakukan misalnya dengan menambahkan isotop aktif ke dalam sejumlah isotop tidak aktif yang berbeda-beda dan kemudian mengendapkannya secara kuantitatif. Jika luas permukaan endapan yang terbentuk sama, maka tebal sumber akan sebanding dengan berat endapan. Dari hasil yang diperoleh dibuat denah kecepatan cacahan terhadap tebal atau berat endapan sumber. Kurva ini kemudian dapat digunakan untuk melakukan koreksi pada bermacam-macam tebal yang diperoleh dari praktek.

Pada cara kedua, cara aktivitas jenis tetap, diukur kecepatan cacahan pada beberapa tebal untuk menentukan tebal jenuh (lihat Gambar 6.6). Setelah tebal jenuh diketahui maka ditentukan kecepatan cacahan beberapa sumber radioisotop sama yang aktivitas jenisnya berbeda-beda dan tebalnya lebih besar dari pada tebal jenis. Denah antara kecepatan cacahan terhadap aktivitas jenis dapat digunakan sebagai kurve kalibrasi.

c. Kesalahan statistik

Seperti telah diuraikan, pemancaran radiasi pada zat radioaktif dapat dibahas secara statistik. Misalkan peristiwa radioaktivitas dianggap terjadi sebagai akibat kelolosan partikel dari inti, maka kemungkinan P_x , bahwa partikel x akan dipancarkan tiap satuan waktu dari sejumlah inti radionuklida dinyatakan oleh hukum distribusi Boisson,

$$P_x = \frac{M^x \cdot e^{-M}}{x!} \quad (6.31)$$

M ialah jumlah rata-rata peluruhan tiap satuan waktu.

Dalam setiap proses yang berlangsung tidak teratur, jumlah peristiwa dalam satu satuan waktu tidak sama dengan jumlah peristiwa yang terjadi dalam satuan waktu berikutnya. Fraksi selisih antara satu pengukuran dengan harga rata-rata sejumlah besar pengukur dinamakan *kesalahan statistik*. Besaran ini akan berbeda-beda untuk setiap pengukuran, dan tidak dapat diberi harga yang tertentu. Oleh karena itu kesalahan sering kali dinyatakan dengan *deviasi standar* yang didefinisikan sebagai :

$$\sigma_x = \sqrt{N} \quad (6.32)$$

atau kesalahan bolehjadi yang didefinisikan sebagai

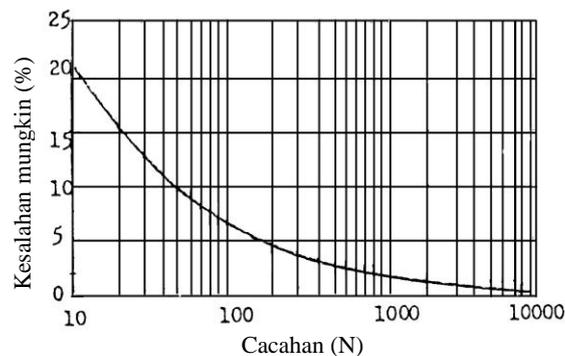
$$p_x = 0,6745 \sqrt{N} \quad (6.33)$$

N ialah jumlah peristiwa yang tercatat.

Hasil bagi harga mutlak kesalahan bolehjadi dengan harga yang diukur dinamakan persentase kesalahan bolehjadi,

$$p_x () = \frac{0,6745\sqrt{N}}{N} \times 100\% \quad (6.34)$$

Seperti ternyata dari persamaan (6.34) makin besar jumlah peristiwa dicatat, N, makin kecil persentase kesalahan boleh-jadi. Secara grafik hubungan antara persentase kesalahan boleh-jadi dengan jumlah cacahan yang diukur, N, tercantum pada Gambar 6.7.



Gambar 6.7. Persentase kesalahan boleh jadi suatu pengukuran, terhadap jumlah cacahan.

Perlu diperhatikan bahwa p_x tidak bergantung pada lamanya pencacahan tetapi hanya pada jumlah N yang tercatat. Oleh karena itu untuk memperoleh kesalahan p yang kecil misalnya lebih kecil dari pada 2% (lihat Gambar 6.7), N, harus melebihi 1000. Jika aktivitas cuplikan kecil maka perlu dilakukan pengukuran yang cukup lama agar N mencapai harga yang diperlukan.

Selain dua cara diatas maka kesalahan dapat pula dinyatakan dengan kesalahan rata-rata yang didefinisikan sebagai :

$$a_x = 0,7979 \sqrt{N} \quad (6.35)$$

Kesalahan jumlah atau hasilkali dan hasilbagi beberapa hasil pencacahan dapat diperoleh dari hubungan-hubungan berikut :

1. Penjumlahan dan pengurangan

Jika Q ialah jumlah atau selisih dua buah cacahan X dan Y,

$$Q = X + Y \quad \text{atau} \quad Q = X - Y$$
$$\text{Maka } \sigma_Q = (\sigma_X^2 + \sigma_Y^2) \quad (6.36)$$

Dan jika $Q = aX + bY$

$$\text{Maka } \sigma_Q = (a^2\sigma_X^2 + b^2\sigma_Y^2)^{1/2} \quad (6.37)$$

2. Perkalian dan pembagian

Jika

$$Q = XY \quad \text{atau} \quad Q = X/Y$$
$$\text{Maka } \sigma_Q^2 = Y^2\sigma_X^2 + X^2\sigma_Y^2 =$$
$$(XY)^2 \left\{ \frac{\sigma_X^2}{X^2} + \frac{\sigma_Y^2}{Y^2} \right\} \quad (6.38)$$

$$\text{atau } \sigma_Q^2 = \left(\frac{X}{Y}\right)^2 \left\{ \frac{\sigma_X^2}{X^2} + \frac{\sigma_Y^2}{Y^2} \right\}$$
$$\text{dan } \frac{\sigma_Q}{Q} = \left\{ \frac{\sigma_X^2}{X^2} + \frac{\sigma_Y^2}{Y^2} \right\} \quad (6.39)$$

3. Pangkat dan akar

Jika

$$Q = X^n$$
$$\text{maka } \sigma_Q = (nX^{n-1}, \sigma_X) = (nX^n \frac{\sigma_X}{X})^2$$
$$\text{dan } \frac{\sigma_Q}{Q} = \frac{n \sigma_X}{X} \quad (6.40)$$

4. Logaritme

Jika $Q = \ln X$

$$\text{Maka } \sigma_Q = \frac{\sigma_X}{X} \quad (6.41)$$

Dan untuk logaritme biasa

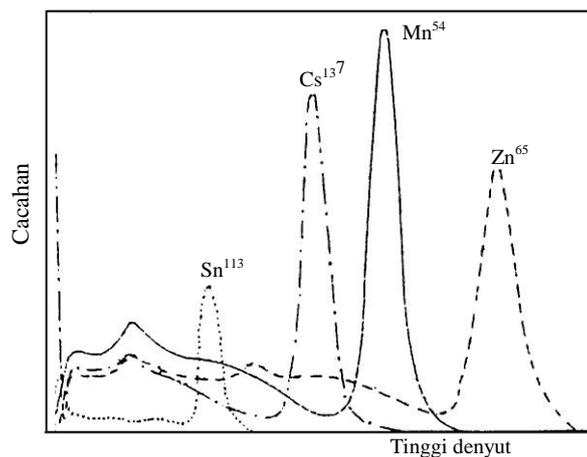
$$\sigma_Q = 0,434 \frac{\sigma_X}{X} \quad (6.42)$$

d. Cara penentuan kelimpahan gamma

Distribusi tinggi denyut pemancar gamma mempunyai ciri sebagai berikut.

Pada energi rendah terdapat puncak yang berasal dari sinar X yang ditimbulkan oleh macam-macam proses dalam inti (lihat fasal 4.3.3. Buku Kesatu) kemudian pada energi yang lebih tinggi terdapat puncak yang disebabkan oleh hamburan Compton. Pada energi lebih tinggi terdapat puncak yang khas untuk radionuklida pemancar. Perpotongan garis simetri yang membelah puncak ini dengan absis menunjukkan energi sinar gamma yang dinyatakan oleh puncak tersebut.

Pada sinar gamma berenergi tunggal harga ordinat setiap titik pada kurva distribusi sebanding dengan kecepatan pemancar gamma (lihat fasal 4.6.3 Buku Kesatu), oleh karena itu luas permukaan di bawah kurva sebanding dengan kecepatan pemancaran. Tetapi pada campuran dua atau lebih radionuklida, distribusi yang diperoleh akan merupakan jumlah titik demi titik distribusi masing-masing sinar gamma setiap radionuklida.

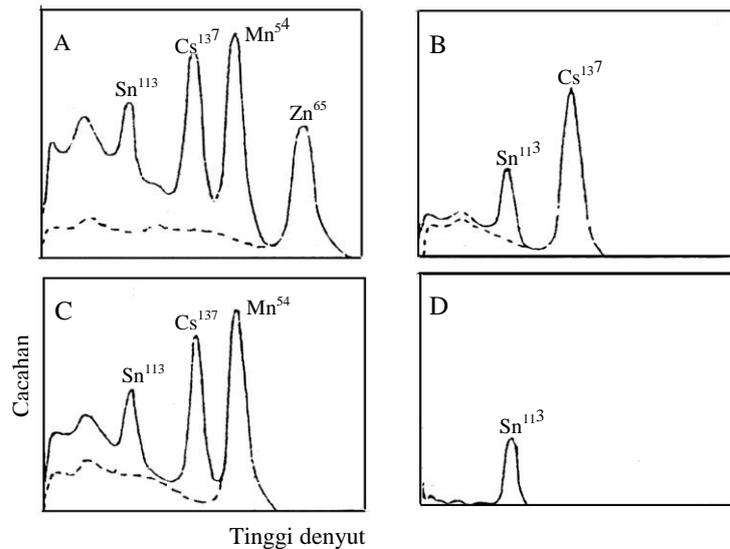


Gambar 6.8. Distribusi tinggi denyut radiasi gamma radionuklida murni.

Pada Gambar 6.8 tertera distribusi tinggi denyut radiasi gamma masing-masing radionuklida jika terdapat sendiri-sendiri dan jika dalam cuplikan. Jika semuanya berada bersama-sama dan dicacah bersama-sama akan diperoleh distribusi tinggi denyut seperti tertera dalam gambar 6.9A.

Seperti dapat dilihat satu-satunya puncak yang masih dapat secara langsung menunjukkan kecepatan pemancaran dari pengukuran luas permukaan di bawah kurve hayalah Zn-65, yang secara kebetulan puncaknya berada pada energi

paling tinggi. Puncak-puncak yang lain semuanya bertumpuk di atas garis dasar yang bukan absis. Garis dasar dalam hal terakhir ini umumnya tidak mudah ditentukan secara tepat, dengan hanya mengamati distribusi jumlah.

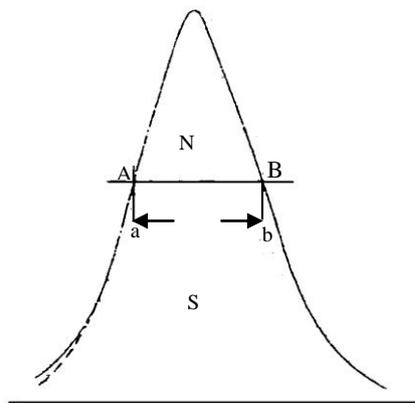


Gambar 6.9. Penentuan kelimpahan gamma secara pengulitan

Dalam hal demikian cara yang biasa digunakan ialah cara yang dinamakan pengulitan. Menurut cara ini kelimpahan pemancar gamma dengan energi paling tinggi ditentukan langsung dari harga ordinat titik maksimum pada puncak atau dari luas permukaan antara kurve dan absis. Kemudian kurve distribusi pemancar berenergi tinggi ini dikurangkan titik demi titik dari kurve resapan total menghasilkan kurve seperti tertera pada Gambar 6.9B. Setelah energi tinggi berikutnya dapat ditentukan lagi secara langsung seperti cara yang diuraikan di atas. Proses pengulitan diteruskan sampai semua kelimpahan telah ditentukan (Gambar 6.9C dan 6.9D).

Cara pengulitan ini kurang teliti terutama untuk energi terendah karena proses pengurangan pada pengulitan berturut-turut setiap kali akan memasukkan kesalahan. Lagi pula diperlukan katalog distribusi tinggi denyut yang sudah dikalibrasi untuk setiap pemancar gamma yang ditemukan dalam campuran. Selain itu penentuan unsur energi rendah baru dapat dilakukan setelah energi yang lebih tinggi selesai ditentukan.

Cara lain yang dapat menghindari kesulitan tersebut di atas ialah cara pengukuran sebagian luas puncak resapan total yang telah dikalibrasi. Suatu garis a-b, yang panjangnya tertentu, digerakkan turun naik sejajar dengan absis (lihat Gambar 6.10) sehingga ujungnya terletak pada kurve resapan, misalnya pada titik A dan B. Luas permukaan di atas garis AB, N, selalu menunjukkan perbandingan yang tetap terhadap luas puncak resapan total, S. Jadi luas N selalu sebanding dengan kelimpahan pemancar gamma.



Gambar 6.10. Cara penentuan kelimpahan gamma

Cara ini mempunyai beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan cara pengulitan. Antara lain cara ini lebih cepat, tidak memerlukan katalog bentuk spektrum standar dan suatu puncak dapat ditentukan langsung tanpa memperdulikan komponen yang lain yang terdapat dalam campuran. Kekurangannya ialah tidak memperhitungkan bentuk lain dan keadaan garis dasar yang mungkin berbentuk tidak teratur.

Dalam beberapa hal kekurangan ini dapat diperbaiki dengan jalan terlebih dahulu mengkalibrasi luas puncak pada campuran yang hendak ditentukan.

Dengan peralatan yang terbaru penentuan spektrum ini telah jauh lebih mudah dengan bantuan perhitungan komputer.

6.6. PENENTUAN ENERGI DAN UMUR PARO

Untuk mengenal dengan pasti suatu radioisotop sumber pemancar maka pada umumnya diperlukan data mengenai energi radiasi yang dipancarkan dan umur paronya. Seperti telah diuraikan terdahulu energi radiasi inti secara mudah dapat

ditentukan dengan menggunakan spektrometer gamma atau spektrometer beta. Selain itu perkembangan pencacah semikonduktor juga memungkinkan penentuan energi radiasi alfa secara spektrometri.

Dalam buku yang pertama telah diuraikan cara kalibrasi suatu spektrometer sehingga memungkinkan penentuan energi dengan menggunakan hubungan tegangan dengan energi.

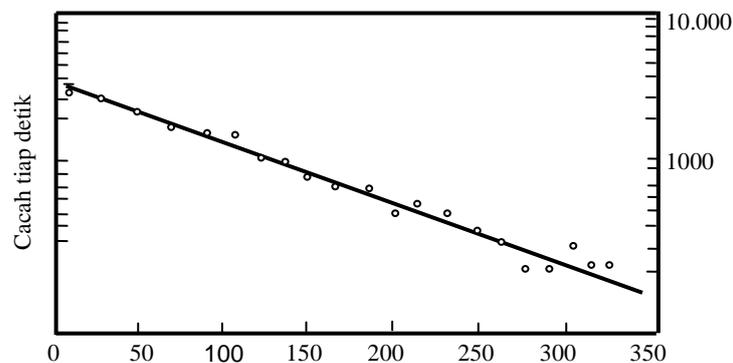
Cara yang sering digunakan ialah pengukuran jarak tempuh, dari hubungan jarak tempuh dengan energi dan dapat dihitung.

6.6.1. Penentuan Umur Paro

Bergantung pada besarnya umur paro penentuannya dapat dibagi dalam tiga golongan.

a. Cara kurve peluruhan

Cara ini digunakan untuk radioisotop dengan umur paro antara beberapa detik sampai beberapa tahun. Aktivitas zat A dicacah berturut-turut pada waktu tertentu yang disesuaikan dengan umur paro yang diharapkan. Kemudian dibuat grafik antara log A terhadap waktu dan jika tidak ada gangguan zat radioaktif lain akan diperoleh garis lurus. Secara perhitungan sederhana dapat dibuktikan bahwa koefisien arah garis yang diperoleh sama dengan $0,693/H$. Jadi umur paro dapat dihitung (lihat Gambar 6.11).



Gambar 6.11. Kurve peluruhan zat radioaktif untuk penentuan umur paro.

6.6.2. Cara Koinsidensi

Jika suatu zat radioaktif dengan umur paro sangat pendek, berasal dari zat radioaktif lain yang umurnya cukup panjang, maka teknik pencacahan secara koinsidensi dapat digunakan. Salah satu contoh koinsidensi dan sering digunakan ialah cara koinsidensi tertunda. Bagan alat koinsidensi tertunda tertera pada Gambar 6.12.

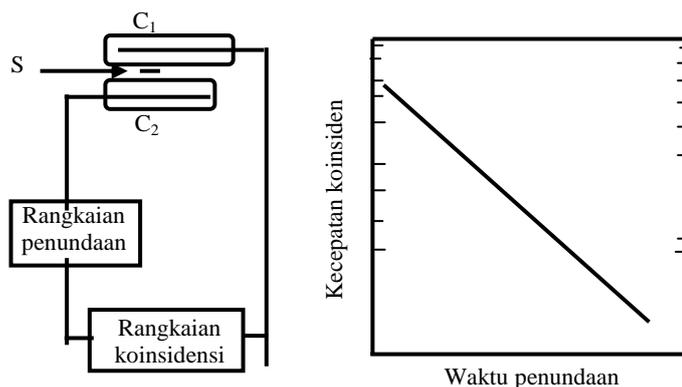
Sumber S ditempatkan antara dua buah detektor misalnya tabung Geiger. Denyut yang berasal dari salah satu tabung ditunda sebelum memasuki rangkaian koinsidensi, sedang denyut dari pencacah yang kedua langsung masuk dalam rangkaian koinsidensi. Rangkaian koinsidensi bekerja sedemikian rupa sehingga hanya jika denyut yang berasal dari rangkaian penunda bersamaan datangnya dengan denyut langsung dari detektor, baru terjadi catatan. Jika tidak maka tidak akan terjadi apa-apa.

Jika dibuat denah waktu penundaan terhadap cacahan koinsidensi akan diperoleh kurve seperti tertera pada Gambar 6.12. Ekstrapolasi ke waktu penundaan sama dengan nol akan memberikan jumlah cacah yang berasal dari aktivitas turunan yang umurnya pendek. Dengan menggunakan rumus yang menghubungkan aktivitas zat radioaktif induk dengan aktivitas turunannya maka umur paro turunan dapat ditentukan.

c. Cara aktivitas jenis

Jika umur paruh sangat panjang, λ sangat pendek, maka aktivitas

$$A = c \lambda N$$



Gambar. 6.12. Rangkaian koinsidensi tertunda untuk penentuan waktu paro.

Mungkin tidak akan banyak berubah dalam batas waktu yang tersedia untuk pencacahan. Dalam hal seperti ini maka λ dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan

$$\lambda N = - \frac{dN}{dt} = \frac{A}{c} \quad (6.43)$$

c ialah koefesien deteksi, N jumlah atom radioaktif, misalnya dari penimbangan atau dari spektrometer massa. Harga dN/dt selain diukur secara pencacahan dapat juga ditentukan secara kalorimeter, dari efek pemanasan yang ditimbulkan.

Dengan menggunakan persamaan (6.43), λ dapat dihitung dan selanjutnya umur paro dapat dihitung dari λ .

BAB 7

CARA PEMISAHAN RADIOKIMIA

7.1. PENGANTAR

Pada umumnya cara yang digunakan dalam pemisahan radiokimia sama saja dengan cara pemisahan konvensional zat yang tidak radioaktif. Kebaikan suatu cara pemisahan dapat dinilai dari hasil pemisahan serta kemurnian zat yang dipisahkan. Secara ideal hasil pemisahan maupun kemurnian diinginkan yang tinggi tetapi dalam praktek biasanya kemurnian tinggi hanya dapat dicapai dengan menurunkan hasil dan sebaliknya hasil tinggi hanya dapat diperoleh dengan jalan mengurangi kemurnian.

Pengertian kemurnian radiokimia perlu dibedakan dari pengertian kemurnian kimia. Sebagai dijelaskan dalam bab yang terdahulu zat radioaktif umumnya dapat dideteksi dalam jumlah yang sangat kecil, oleh karena itu mungkin suatu zat menurut ukuran kimia sudah termasuk sangat murni, tetapi secara radiokimia masih sangat tidak murni. Sebaliknya karena zat radioaktif hanya diketahui dari antaraksi radiasi yang dipancarkannya dalam peluruhan, maka pada umumnya zat lain yang tidak aktif tidak akan mengganggu pada pencacahan radiasi atau partikel yang dipancarkan, asal jumlahnya tidak sedemikian besar sehingga dapat menimbulkan kesalahan dalam penimbangan atau menimbulkan pengaruh lain yang mengganggu. Jika hanya terdapat fosfor aktif saja, dalam natrium klorida, maka ini berarti bahwa cuplikan mengandung fosfor sebanyak 3×10^{-3} bagian tiap juta, tiap mililiter. Secara kimia natrium klorida tadi termasuk sangat murni. Tetapi secara radiokimia radiasi yang dipancarkan oleh fosfor yang sedikit ini merupakan ketakmurnian yang sangat besar. Demikian pula sebaliknya 1 gram cuplikan natrium klorida yang mengandung $1 \mu\text{Ci Na}^{24}$ dan 5-10 mg fosfor tidak aktif secara radiokimia dianggap murni tetapi secara kimia mungkin dianggap tidak murni.

Pada umumnya semua cara pemisahan berdasarkan pada azas bahwa komponen yang terdapat dalam campuran dipisahkan karena adanya suatu gaya dorong, misalnya gradien konsentrasi, gaya gerak listrik, perbedaan tekanan, aliran pelarut, yang semuanya menyebabkan pemindahan sebagian atom, molekul atau ion dari suatu daerah dengan susunan tertentu ke daerah lain dengan susunan yang berbeda. Kedua daerah ini mungkin dipisahkan oleh perbatasan fase, misalnya antarmuka cair-padat atau mungkin berupa penghalang, misalnya potensial atau sifat fisika yang lain. Karena perbedaan gaya dorong yang bekerja pada ion, atom atau molekul

yang berlainan, tidak sama, maka ada kemungkinan bahwa molekul, ion atau atom tertentu dapat dipisahkan dari yang lain.

Efisiensi suatu cara pemisahan biasanya dinyatakan dengan faktor pemisahan (E.P) yang didefinisikan sebagai

$$E.P. = \frac{(x)_1(Y)_1}{(X)_2(Y)_2} \quad (7.1.)$$

X_1 dan Y_1 ialah konsentrasi zat X dan zat Y sebelum pemisahan dalam campuran mula-mula, sedang X_2 dan Y_2 konsentrasi sesudah pemisahan. Zat X dapat merupakan matrix utama dan Y pengotor atau sebaliknya. Dalam radiokimia derajat kemurnian seringkali dinyatakan dengan faktor kontaminasi (D.F.) yang didefinisikan sebagai

$$D.F. = \frac{(a_x / a_y)_1}{(a_x / a_y)_2}$$

a_x dan a_y ialah aktivitas zat X dan zat Y, sedang angka 1 menunjukkan sebelum pemisahan dan 2 sesudah pemisahan. Aktivitas seringkali juga diganti dengan berat.

Faktor pemisahan dan faktor dekontaminasi dapat digunakan untuk menyatakan hasil suatu proses tunggal, hanya satu langkah saja ataupun untuk proses bertingkat, yakni proses yang dijalankan dalam beberapa langkah. Pembicaraan lebih lanjut mengenai hal ini akan diuraikan kemudian dalam bab ekstraksi pelarut.

Dari semua cara yang sering digunakan, dalam buku ini hanya akan dibahas empat cara saja, cara pengendapan, ekstraksi pelarut, penukaran dan khromatografi. Cara yang lain seperti cara destilasi dan elektrolisis, walaupun merupakan cara yang juga cukup sering digunakan, umumnya sudah cukup dibicarakan dalam buku kimia organik atau kimia fisika, dan tidak akan dibahas di sini.

Keempat cara yang akan dibahas di bawah ini masing-masing berguna dalam lapangan tertentu dan dapat saling mengisi. Hal ini penting sekali untuk diperhatikan dalam menghadapi pemecahan bermacam-macam soal. Sebagai contoh misalnya ialah pemisahan microgram plutonium dari beberapa kilogram uranium. Pemisahan tidak mungkin dilakukan dengan cara khromatografi kertas atau cara khromatografi lain kecuali barangkali secara khromatografi penukar ion, tetapi inipun tidak efisien mengingat sifat serap kedua unsur tadi terhadap penukar ion. Cara ekstraksi pelarut dan cara pengendapan, kopresipitasi dapat dipilih. Tetapi karena persoalan teknik

pelaksanaan ekstraksi pelarut agak rumit, seperti yang akan diuraikan dalam bab kemudian, maka biasanya untuk pekerjaan laboratorium dipilih cara kopresipitasi plutonium pada lantanum fluorida. Cara ini lebih sederhana dan sekali pengendapan dapat membawa sampai 90% atau lebih plutonium yang ada dalam larutan.

7.2. CARA PENGENDAPAN DAN KOPRESIPITASI

Pemisahan secara pengendapan umumnya sama saja dengan cara yang digunakan dalam analisis kimia biasa. Faktor yang mempengaruhi kemurnian serta kesempurnaan pengendapan pada analisis biasa misalnya jenis pereaksi, suhu, konsentrasi, kecepatan pengendapan juga semuanya merupakan faktor yang harus diperhatikan pada pengendapan zat radioaktif.

Perbedaan penting yang sering terjadi ialah konsentrasi zat radioaktif yang dihadapi dalam pekerjaan laboratorium pada umumnya sangat rendah. Hal ini menimbulkan persoalan yakni kalau tidak dilakukan penjagaan tertentu, maka ada kemungkinan bahwa sebagian zat radioaktif akan hilang, mungkin melekat pada dinding wadah atau alat lain yang bersentuhan dengan zat radioaktif tersebut. Untungnya seperti akan diuraikan, biasanya tidak diperlukan pemisahan secara kuantitatif karena dengan mengukur aktivitas sebelum dan sesudah pemisahan, banyaknya zat yang hilang dapat dihitung.

Persoalan lain yang ditimbulkan oleh konsentrasi kecil ini ialah hasil kali kelarutan endapan yang mungkin terbentuk tidak pernah dilampaui. Oleh karena itu endapan tidak pernah terjadi sehingga pemisahan secara penambahan pereaksi pengendapan tidak dapat digunakan. Pemisahan zat yang sedikit ini dapat dilakukan dengan jalan menambahkan zat yang jika diendapkan dapat mengikutsertakan zat radioaktif yang ada dalam larutan, zat tambahan demikian dinamakan *pengemban*. Dalam beberapa hal tidak perlu penambahan dari luar karena mungkin dalam campuran telah ada zat yang dapat digunakan sebagai pengemban.

Zat pengemban dapat merupakan isotop radioaktif sendiri ataupun isotop lain. Pengembanan cara terakhir yang dinamakan kopresipitasi, sedang pengembanan seisisotop tidak dimasukkan dalam pengertian kopresipitasi. Prosedur dan cara pengembanan isotop ini sama saja dengan cara pengendapan biasa.

Seringkali untuk menghindari atau mengurangi kopresipitasi isotop suatu unsur oleh suatu endapan, maka ke dalam larutan ditambahkan isotop tidak aktif unsur tersebut yang dinamakan *pengemban penahan*. Dengan jalan ini

persentase isotop aktif yang teremban berkurang dan kontaminasi endapan juga dapat dikurangi.

7.2.1. Kopresipitasi

Seperti telah diuraikan kopresipitasi ialah pengambilan suatu zat yang jumlahnya sedikit dari suatu larutan dengan jalan mengikutsertakannya pada endapan lain. Cara ini penting jika diinginkan pemisahan zat dengan aktivitas jenis yang tinggi. Radioisotop bebas pengemban mendekati aktivitas jenis tertinggi yang mungkin diperoleh.

Dari penelitian mengenai kopresipitasi ini **Hahn** menyimpulkan mekanisme kopresipitasi sebagai berikut.

a. Penggantian isomorf

Pada jenis ini ion unsur yang teremban menggantikan ion unsur pengemban dalam suatu senyawa yang isomorf sehingga terbentuk kristal campuran. Syarat penting terjadinya penggantian isomorf ini ialah garam ion pengemban dan ion teremban harus mempunyai rumus sama, satuan struktur yang besarnya hampir sama serta sifat polarisasi sama. Dengan demikian ion yang satu dapat menggantikan ion yang lain dalam satu kristal.

Pengotor dapat terbagi secara serbasama dalam kristal endapan yang terbentuk menurut distribusi **Berthelot – Nernst**, atau secara tidak serbasama menurut distribusi **Doerner – Hoskin**. Pada cara distribusi terakhir ini perbandingan perunut terhadap pengemban pada permukaan kristal yang sedang tumbuh pada setiap waktu sebanding dengan perbandingan perunut terhadap pengemban yang terdapat dalam larutan yang bersentuhan. Bergantung pada tetapan distribusi maka konsentrasi perunut lebih besar pada bagian dalam kristal atau pada bagian luarnya.

b. Pembentukan kristal campuran anomali

Pada jenis ini walaupun syarat pembentukan kristal isomorf tidak dipenuhi namun komponen pengotor masih teremban secara serbasama serupa dengan pada penggantian isomorf. Pengembanan cara ini ternyata tidak dipengaruhi oleh adanya ion asing yang telah diresap dan koefisien distribusi tidak dipengaruhi oleh keadaan percobaan.

c. Penyerapan dalam

Pada jenis ini pengembanan terjadi sebagai akibat penyerapan sewaktu kristal sedang tumbuh dan ion yang terserap seolah-olah terkurung dalam kristal. Ion teremban terbagi secara tidak sama dalam kristal, distribusinya bergantung pada keadaan percobaan.

d. Penyerapan permukaan

Pada jenis ini pengembanan terjadi karena penyerapan pada permukaan endapan dan merupakan proses yang selalu mengikuti jenis kopresipitasi yang lain.

Pengembanan jenis a dan b pada umumnya dapat-ulang untuk suatu daerah keadaan percobaan. Proses jenis c dan d karena kepekaannya terhadap kondisi percobaan pada umumnya memberikan hasil yang tidak dapat diulangi.

Pengendapan cara pengembanan dalam laboratorium biasanya tidak termasuk dalam salah satu cara di atas, seringkali mekanismenya sama sekali sukar diterangkan.

Pada umumnya suatu unsur dapat diemban oleh setiap senyawa unsur lain yang sukar larut. Namun pemilihan senyawa sukar larut untuk pengembanan bergantung pada hal seperti kelarutan, daya seleksi terhadap perunut dan faktor laboratorium lain. Selain itu yang lebih penting lagi ialah daya emban senyawa tidak larut tersebut terhadap unsur yang hendak dipisahkan. Daya seleksi merupakan faktor penting pada pemisahan beberapa ion yang dapat bersaing pada cara penggantian isomorf. Endapan gelatin atau endapan yang sangat halus biasanya mengemban dengan cara penyerapan permukaan oleh karena itu daya seleksinya sangat rendah. Pengembanan cara ini seringkali dinamakan penangkapan (*scavenging*).

Untuk menemukan kembali zat teremban biasanya dilakukan pengendapulan dalam suasana yang memungkinkan zat teremban tidak lagi ikut serta. Keadaan ini biasanya dapat dicapai dengan jalan mengubah jenis endapan atau dengan jalan mengubah valensi zat teremban. Sebagai contoh ialah plutonium, dalam valensi +4 plutonium terkopresipitasi kuantitatif oleh larutan fluorida, sedang dalam valensi +6 tidak. Dengan jalan melarutkan endapan lantanum trifluorida dan mengoksidasi plutonium ke tingkat +6, lantanum kemudian dapat diendapkan kembali tanpa mengikutsertakan plutonium.

Cara pengubahan tingkat oksidasi ini umum dalam pemisahan seperti akan dibicarakan kemudian dalam ekstraksi pelarut dan penukar ion. Cara lain seperti pemisahan dengan menggunakan penukar ion, ekstraksi pelarut atau cara pemisahan lain dapat juga digunakan untuk memisahkan ion teremban dari pengembannya.

Pembicaraan ini secara mendalam mengenai kopresipitasi dapat ditemukan dalam buku-buku kimia analitik.

7.3. EKSTRAKSI CAIR-CAIR

Walaupun ekstraksi pelarut meliputi ekstraksi cair-cair dan padat-cair namun kalau tidak dijelaskan maka istilah ekstraksi pelarut berarti ekstraksi cair-cair.

Jika suatu zat cair yang mengandung zat X dikocok dengan zat cair lain yang tidak campur dengan zat cair pertama, maka zat terlarut X akan terdistribusi ke dalam kedua zat cair tersebut. Pada keseimbangan konsentrasi zat X dalam masing-masing fase dinyatakan oleh hukum distribusi **Nernst** :

$$K_D = \frac{C_0}{C_a} \quad (7.3.)$$

K_D ialah koefisien distribusi, C_0 konsentrasi X dalam fase ringan (organik), C_a konsentrasi X dalam fase lebih berat (air).

Hukum Nernst hanya berlaku untuk keadaan ideal yang dalam keadaan sebenarnya sukar dicapai. Pertama, karena pasangan zat cair yang saling tidak campur sukar ditemukan, kedua, fase cair yang digunakan umumnya mengandung selain zat A dan pelarut sendiri, juga zat lain. Sebagai contoh misalnya dalam pemisahan logam aktinida, fase air dapat mengandung asam nitrat, garam nitrat atau senyawa pereduksi, sedang fase organik jika digunakan tributil fosfat biasanya merupakan campuran tributil fosfat dengan senyawa hidrokarbon lain, ketiga, zat terlarut A mungkin mempunyai wujud yang berbeda dalam setiap zat cair, malahan dalam satu pelarut mungkin mempunyai beberapa wujud yang berbeda.

Namun demikian teori ideal dapat digunakan sebagai dasar dan disesuaikan dengan keadaan nyata dengan menggunakan koreksi yang diperlukan. Dengan cara ini pembicaraan akan lebih sederhana dan tidak perlu menggunakan persamaan matematika yang rumit.

7.3.1. Ekstraksi Tunggal

Misalkan sejumlah Q dan X dalam keadaan seimbang terdistribusi ke dalam fase cair A (organik) dan fase cair B (larutan air) yang masing-masing bervolume sebesar R_v dan v .

Menurut hukum distribusi :

$$K = \frac{C_0}{C_a} \quad (7.3)$$

Jumlah zat dalam masing-masing fase ialah :

$$Q_o = RvC_o \quad \text{dan} \quad Q_a = v C_a \quad (7.4)$$

Oleh karena itu fraksi X dalam fase organik dan fase air masing-masing dinyatakan oleh :

$$F_o = \frac{(RvC_o)}{RvC_o} + vC_a \quad (7.5)$$

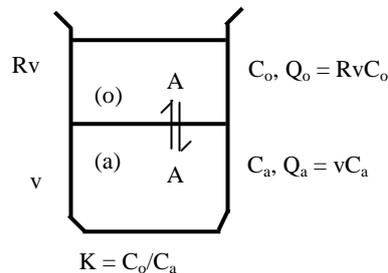
dan

$$F_a = \frac{(vC_a)}{RvC_o} + vC_a \quad (7.6)$$

Jika v dalam ruas kanan setiap persamaan dicoret kemudian pembilang dan penyebut dibagi dengan C_a diperoleh

$$F_o = \frac{RK}{(1 + RK)} \quad (7.7)$$

dan $F_a = \frac{1}{(1 + RK)} \quad (7.8)$



Gambar 7.1. Ekstraksi tunggal

Jadi fraksi X dalam tiap fase bukan saja bergantung pada tetapan distribusi K tetapi juga pada R yakni perbandingan volume kedua fase cair yang digunakan sebagai pelarut. Karena variasi K ini maka dalam suatu sistem mungkin ditemukan bahwa untuk dua zat misalnya K dan Y, harga K cukup berbeda. Dengan menyesuaikan harga R untuk mempertinggi pemisahan maka zat X dan zat Y pada azasnya dapat dipisahkan.

Dalam praktek, K_D harus ditentukan secara empiris. Untuk suatu sistem ekstraksi dengan zat terekstraksi dalam tingkat oksidasi, pelarut dan pereaksi yang mudah tertentu, nilai koefisien distribusi sangat bergantung pada :

- 1). Konsentrasi pelarut organik jika digunakan pengencer, misalnya persen tri-n-butyl fosfat dalam karbonditriklorida,
- 2). Konsentrasi pereaksi yang berpartisipasi misalnya tenoyltrifluoroaseton (TTA) dalam fase organik, hidroklorida, asam nitrat dan aluminium nitrat dalam air,
- 3). Konsentrasi zat pengganggu misalnya zat yang dapat membentuk senyawa yang sukar diekstraksi dengan zat yang diinginkan misalnya gangguan fosfat pada ekstraksi uranil nitrat,
- 4). Perbandingan volum zat cair R yang bersentuhan umumnya digunakan perbandingan 1 : 1,
- 5). Ada tidak adanya zat padat.

Dalam praktek untuk memperoleh hasil besar ekstraksi tidak dilakukan sekali saja tetapi berulang-ulang. Sejumlah larutan dalam fase air misalnya dipersinggungkan secara berturut-turut dengan pelarut organik baru. Sesuai dengan persamaan (7.8) maka jika jumlah X mula-mula ialah satu maka jumlah X yang tinggal dalam larutan air setelah ekstraksi pertama ialah :

$$(F_a)_1 = \frac{1}{1 + RK}$$

Jika jumlah yang tinggal dalam fase air ini dipersinggungkan kembali dengan pelarut organik baru yang jumlahnya sama dengan yang digunakan sebelumnya, maka diperoleh bahwa jumlah yang tinggal dalam larutan air ialah :

$$(F_a)_2 = \frac{1}{1 + RK} \times \frac{1}{1 + RK} = \frac{1}{(1 + RK)^2}$$

Demikian seterusnya maka setelah persinggungan ke r diperoleh bahwa yang tinggal dalam larutan air ialah

$$(F_a)_r = \frac{1}{(1 + RK)^r} \quad (7.9)$$

Jika semua fase organik yang telah digunakan disatukan maka ditemukan bahwa jumlah X yang terekstraksi setelah persinggungan yang ke- r, ialah

$$(F_0)_1 + (F_0)_2 + (F_0)_3 + \dots + (F_0)_r = \frac{RK}{1 + RK} \left\{ 1 + \frac{1}{1 + RK} + \frac{1}{(1 + RK)^2} \right\} = \frac{\{(1 + RK)^r - 1\}}{(1 + RK)^r} \quad (7.10)$$

7.3.2. Distribusi Alir-balik

Pada cara ini pelarut organik yang telah digunakan dengan larutan air zat, kemudian dicuci kembali dengan jalan persinggungan berturut-turut dengan pelarut air. Tiap porsi pelarut air baru setelah dipersinggungkan dengan porsi pelarut organik yang sebelumnya telah dipersinggungkan dengan larutan air zat, kemudian dipersinggungkan berturut-turut dengan porsi pelarut organik berikutnya. Porsi ini secara bagan ditunjukkan dalam Gambar 7.2.

Dalam contoh ini digunakan koefisien distribusi = 1 yang berarti bahwa dalam keadaan seimbang, zat terlarut terbagi sama dalam kedua pelarut.

Pada permulaan ekstraksi semua zat terlarut berada dalam satu pelarut sebarang, yang dimisalkan mengandung 1000 satuan dan yang terdapat dalam corong 0. Sejumlah pelarut yang sama ditambahkan ke dalam corong 0 dan ekstraksi dilangsungkan. Ekstrak dari corong No. 0 dipindahkan ke corong berikutnya, corong No. 1. Corong No. 0 dan No. 1 masing-masing mengandung 500 satuan dan keduanya diekstraksi lagi dengan jumlah pelarut yang sama.

Ekstrak dari corong No. 0 dipindahkan lagi ke corong No. 1 tetapi setelah ekstrak dari No. 1 telah dipindahkan ke corong No. 2. Pekerjaan yang sama dilakukan terus dan setelah ekstraksi pada corong No. 5 kebanyakan zat terlarut berada dalam corong 2 dan 3 (lihat Gambar 7.2.).

Dengan menggunakan persamaan (7.7) dan (7.8) untuk $R = 1$ dapat dibuktikan bahwa distribusi zat dalam tiap tabung setelah operasi ke n dinyatakan oleh suatu penguraian binomial ,

$$\left\{ \frac{1}{K+1} + \frac{K}{K+1} \right\}^n$$

dan setiap yang sesuai dengan hasil pada Gambar 7.2. tertera pada Tabel 7.1. Setiap suku pada Tabel 7.1. $T(n, r)$ dapat diturunkan dari rumus

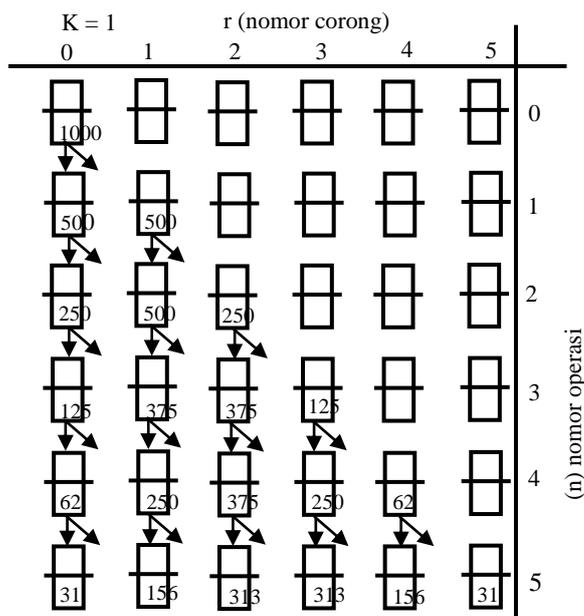
$$T(n, r) = \binom{n}{r} \left(\frac{1}{K+1} \right)^r \left(\frac{K}{K+1} \right)^{n-r} \quad (7.11)$$

R ialah nomor tabung, n nomor operasi, K koefisien distribusi, $n!$ menyatakan $1 \times 2 \times 3 \times \dots \times n$.

7.3.3. Mekanisme Ekstraksi Pelarut

Seperti telah diketahui dari kimia fisika, senyawa ion mudah larut dalam pelarut polar, sedang senyawa kovalen lebih mudah larut dalam pelarut yang tidak polar. Oleh karena itu penggunaan ekstraksi pelarut dengan menggunakan pelarut organik untuk memisahkan ion memerlukan syarat bahwa pelarut organik yang digunakan sanggup membentuk senyawa koordinasi dengan ion logam yang hendak dipisahkan. Kalau pelarut tidak dapat membentuk senyawa kompleks maka ke dalam sistem harus ditambahkan pereaksi yang sanggup membentuk kompleks dengan ion tersebut dan yang kelarutannya dalam senyawa organik lebih tinggi dari pada dalam air.

Kompleks koordinasi terbentuk oleh karena antaraksi suatu logam penerima elektron dengan suatu gugus donor elektron yang dinamakan ligand. Kecenderungan beberapa ligand untuk membentuk kompleks tertera dalam Tabel 7.2.

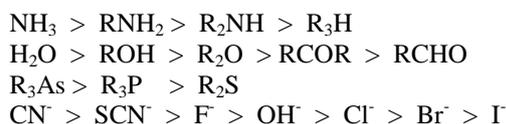


Gambar 7.2. Bagan ekstraksi alir balik

Tabel 7.1. Suku ekspansi binomial

Nomor per-pindahan n	T (n,n)					
	0	1	2	3	4	5
0	1	...	...	...	...	...
1	$\frac{1}{K+1}$	$\frac{K}{K+1}$	....	....	....	....
2	$\frac{1}{(K+1)^2}$	$\frac{2K}{(K+1)^2}$	$\frac{K^2}{(K+1)^2}$	....	....	....
3	$\frac{1}{(K+1)^3}$	$\frac{3K}{(K+1)^3}$	$\frac{3K^2}{(K+1)^3}$	$\frac{K^3}{(K+1)^3}$	....	....
4	$\frac{1}{(K+1)^4}$	$\frac{4K}{(K+1)^4}$	$\frac{6K^2}{(K+1)^4}$	$\frac{4K^3}{(K+1)^4}$	$\frac{K^4}{(K+1)^4}$	---
5	$\frac{1}{(K+1)^5}$	$\frac{5K}{(K+1)^5}$	$\frac{10K^2}{(K+1)^5}$	$\frac{10K^3}{(K+1)^5}$	$\frac{5K^4}{(K+1)^5}$	$\frac{K^5}{(K+1)^5}$

Tabel 7.2. Kecenderungan pembentukan kompleks beberapa ligand sederhana



Untuk suatu jenis ligand kecenderungan membentuk senyawa koordinasi bergantung pada konfigurasi elektron kation logam. Senyawa kompleks jenis koordinasi lain yang penting dalam ekstraksi pelarut ialah senyawa seplit yang dibentuk oleh reaksi logam dengan pereaksi seplit, misalnya dengan EDTA, etilen diamin tetraasetat, TTA, tenoyl trifluoro asetat.

Senyawa seplit umumnya besar dan netral, dengan kelarutan yang khas dalam pelarut organik yang ditentukan oleh pereaksi seplitnya. Tetapi pembentukan kompleks saja belum menjamin kelarutan dalam senyawa organik, ion kompleks harus dapat membentuk kompleks gabungan dengan pelarut organik yang mudah larut.

Zat bukan logam, misalnya halogen, disebabkan oleh sifat kovalen ikatannya, biasanya mudah larut dalam pelarut tidak polar.

7.3.4. Faktor Penting yang Harus Diperhatikan pada Proses Ekstraksi

Jika terdapat pilihan antara beberapa ligand dan pelarut untuk suatu pemisahan tertentu, maka selain faktor yang telah disebutkan di atas juga masih perlu diperhatikan faktor yang berikut :

a. Ligand

Kestabilan dan reaktivitas beberapa ligand termasuk kepekaannya terhadap oksidasi dan reduksi oleh udara atau zat lain yang ada dalam sistem. Pengaruh ligand terhadap wadah dan pelarut. Selain itu harus pula diperhatikan ada tidaknya persediaan serta harga ligand yang diperlukan.

b. Pelarut

Rapat massa pelarut yang digunakan sedapat mungkin mempunyai perbedaan yang cukup karena makin besar perbedaan rapat massa antara kedua fasa pelarut makin cepat terjadi pemisahan.

Demikian juga viskositas yang kecil mempercepat pemisahan. Pada penggunaan tributil fosfat dapat digunakan karbon tetrakhlorida untuk menambah rapat massa lapisan organik atau hidrokarbon pengencer untuk mengurangi rapat massa, pengencer ini dapat pula bertindak menurunkan viskositas.

Faktor lain yang perlu diperhatikan ialah saling melarut antara pelarut yang digunakan. Biasanya tidak diinginkan bahwa kelarutan timbal balik meliwati 5% volume karena akan mengurangi faktor pemisahan dan kesempurnaan ekstraksi. Kelarutan pelarut organik dalam fase air dapat pula menyebabkan kehilangan pelarut yang seringkali merupakan kehilangan yang cukup mahal.

Kestabilan pelarut, terutama pelarut organik terhadap radiasi, terhadap oksidasi reduksi dan reaksi lain, pada umumnya menimbulkan pengaruh tidak menguntungkan pada faktor pemisahan. Terutama pada sistem oksidator kuat, misalnya nitrat atau perkhlorat dalam air, yang dikombinasikan dengan pelarut organik yang mudah tereduksi, misalnya eter, perlu sekali diambil langkah pencegahan agar oksidator tidak terkumpul dalam jumlah yang mungkin dapat menimbulkan ledakan.

Demikian pula sangat penting, dari segi ekonomi, bahwa pelarut organik dapat dipisahkan dengan menggunakan cara yang sederhana. Selain itu perlu pula diperhatikan faktor mudah menyala dan keracunan yang mungkin dapat disebabkan oleh pelarut.

c. Faktor lain

Beberapa faktor lain yang perlu ialah :

- 1). Preaksi penggaraman, untuk menambah konsentrasi ion yang sama misalnya ion klorida, ion nitrat dari aluminium nitrat dan sebagainya.
- 2). Keasaman, penting untuk sistem yang menyangkut pembentukan senyawa sepipt yang kemantapannya bergantung pada pH, juga mungkin penting untuk mencegah terbentuknya endapan atau hidrolisis.
- 3). Tingkat oksidasi zat terlarut. Perbedaan tingkat oksidasi menimbulkan perbedaan kompleks yang terbentuk dan sering digunakan untuk menambah efisiensi pemisahan. Misalnya uranium dan plutonium keduanya tereksitasi dari larutan yang mengandung nitrat jika valensinya +6, tetapi plutonium dalam valensi +3 tidak terekstraksi ke dalam larutan organik. Demikian pula besi dalam valensi +3 terekstraksi dari larutan asam hidroklorida ke dalam eter tetapi tidak terekstraksi jika valensinya +2.
- 4). Zat pelindung. Pembentukan kompleks dapat digunakan untuk mencegah ekstraksi konstituen yang tidak diinginkan dari suatu campuran. Misalnya secercah sulfat, fosfat atau ion fluorida dapat melindungi ion uranil terhadap ekstraksi ke dalam eter.
- 5). Pembentukan emulsi. Merupakan sifat khas campuran pelarut dan preaksi yang digunakan dalam sistem ataupun dapat juga dihubungkan dengan sifat zat yang hendak dipisahkan. Emulsi biasanya dapat dicegah dengan penambahan pengencer yang lamban, penambahan zat aktif permukaan, penyaringan zat padat atau dengan sentrifuga.

7.3.5. Teknik Bekerja dengan Ekstraksi Pelarut

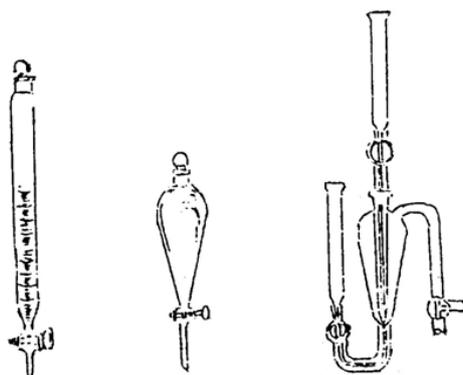
Pemilihan alat untuk ekstraksi pelarut bergantung pada faktor seperti misalnya volume fasa pelarut, teknik yang akan digunakan, rapat massa relatif lapisan air dan organik, dan bahaya radiasi dari cuplikan. Dalam pekerjaan laboratorium untuk ekstraksi tunggal dapat digunakan macam-macam corong pemisah seperti tertera dalam Gambar 7.3.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada penggunaan alat untuk ekstraksi ialah sebagai berikut.

- 1). Kebocoran pada penutup dan keran yang dapat mengakibatkan kontaminasi pada tangan atau pada meja.
Jika aktivitas masih dalam tingkat milicurie maka ekstraksi dapat dilakukan dengan tangan asal menggunakan sarung tangan dan kertas peresap untuk menampung kalau terjadi kebocoran. Kalau aktivitas agak tinggi sehingga

diperlukan memegang corong pemisah dengan tang, maka penutup dan kran harus diikat dengan kawat.

- 2). Pelarut yang atsiri, seperti misalnya dietileter, penutupnya harus sering dibuka setiap selesai dikocok untuk memungkinkan tekanan uap yang berlebih mengalir keluar. Harus dijaga jangan sampai percikan membawa kontaminasi. Pada beberapa sistem ekstraksi mungkin akan terbentuk kalor yang mengakibatkan timbulnya tekanan.
- 3). Waktu penyeimbangan harus diperiksa untuk memperoleh hasil yang baik. Biasanya pengocokan kuat, yang lamanya kurang dari lima menit, sudah cukup. Selain dengan jalan mengocok, agitasi dapat pula dilakukan dengan jalan mengaduk. Pada ekstraksi kontinu dapat digunakan alat seperti tertera dalam Gambar 7.4. Cara ini lebih baik kalau beberapa ekstraksi berturut-turut akan dilakukan, juga kalau zat yang hendak diekstraksi jumlahnya besar.



Gambar 7.3. Beberapa bentuk corong pemisah untuk ekstraksi tunggal.

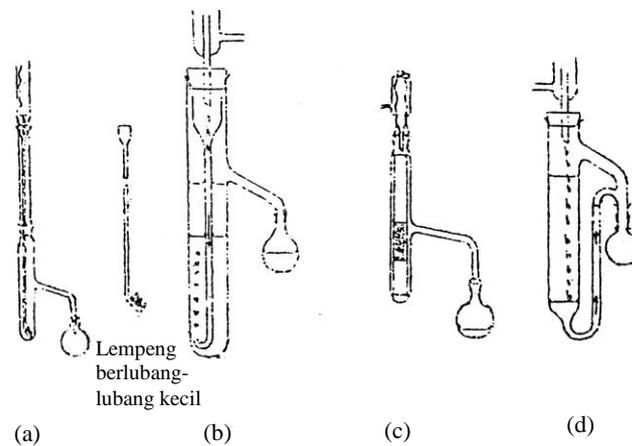
7.4. PENUKAR ION

Penukar ion terdiri atas gugus yang mudah diionisasi yang melekat pada suatu kerangka polimer hidrokarbon yang sukar larut. Gugus fungsional ini dapat dipertukarkan dengan ion lain yang terdapat dalam larutan,



R ialah kerangka polimer yang sukar larut. Penukar ion digolongkan ke dalam p e n u k a r k a t i o n dan p e n u k a r a n i o n, bergantung pada jenis gugus yang dapat dipertukarkan. Selanjutnya kedua golongan besar ini dapat dibagi lagi ke

dalam golongan kuat dan golongan lemah, bergantung pada sifat basa dan sifat asam ion yang dipertukarkan. Resin dengan gugus fungsional kuat sesuai untuk digunakan dalam pemisahan senyawa anorganik sedang yang lemah untuk pemisahan senyawa organik.



Gambar 7.4. Alat ekstraksi kontinu (a) dan (b) digunakan ekstraksi dengan pelarut yang lebih ringan dari pada air, (c) dan (d) untuk pelarut yang lebih berat dari air.

Penukar kation mungkin mengandung gugus fungsional lemah, misalnya gugus hidroksil (-OH) dan karbonil (-COOH), atau gugus kuat misalnya asam sulfonat (-SO₃H). Demikian pula penukar anion dapat mengandung gugus fungsional lemah misalnya amino primer, sekunder atau tersier (-NH₂, -NHR, -NR₂) atau gugus fungsional basa kuat misalnya amino kuarterner (-NR₃OH).

Kapasitas tukar suatu resin bergantung pada macam polimer dan jenis gugus fungsional. Kapasitas tukar resin jenis asam lemah atau basa lemah bergantung pada pH larutan yang bersentuhan, sedang untuk gugus fungsional kuat tidak bergantung pada pH. Kapasitas penukar ion dapat dinyatakan dengan berbagai cara misalnya dengan miliekivalen tiap gram resin kering atau miliekivalen tiap mililiter resin basah. Kapasitas penukaran ini perlu diperhatikan dalam menentukan efisiensi kolom.

7.4.1. Mekanisme Penukaran Ion

Penukar kation jenis asam sulfonat seperti diuraikan di atas, dapat dimisalkan sebagai jaringan rangka polimer yang membungkus suatu larutan yang mengandung

ion hidrogen bebas konsentrasi tinggi yang dihasilkan oleh ionisasi asam kuat gugus fungsional. Baik ion hidrogen dalam resin maupun ion hidrogen yang ada pada permukaan resin tidak dapat bergerak jauh sebagai akibat tarikan muatan berlawanan ion sulfonat. Dekat permukaan resin konsentrasi ion hidrogen besar sebagai terlihat dari percobaan berikut. Jika suatu larutan resin halus dikocok, pH larutan akan turun dan pH ini akan kembali lagi keasalnya jika resin telah mengemp. Demikian pula resin yang dikocok akan bereaksi dengan besi yang tersuspensi dalam larutan membentuk hidrogen dan reaksi kimia ini akan berhenti jika resin telah mengemp.

Sistem resin dalam larutan yang mengandung kation yang dapat dipertukarkan dapat dibahas sebagai sistem dua fase yakni larutan yang terdapat di bagian dalam sistem dan larutan yang berada di bagian luar sistem, yang keduanya dipisahkan oleh permukaan resin. Jadi sistem resin dan larutan menyerupai suatu keseimbangan membran Donnan, atau distribusi antara dua pelarut tidak campur, atau distribusi antara zat padat dan fase cair pada pembentukan kristal campur isomorf. Pertukaran antara ion dalam dan ion luar berlangsung terus sampai terjadi keseimbangan.

Misalnya dalam larutan luar terdapat ion A^+ , oleh karena adanya perbedaan konsentrasi ion A^+ di dalam dan di luar resin maka terjadi difusi ion A^+ ke dalam resin dan sejumlah ion H^+ , yang ekuivalen dengan A^+ , yang masuk, akan berdifusi keluar. Proses difusi ini berlangsung terus sampai terjadi keseimbangan :



Penting untuk dijelaskan kembali bahwa untuk resin jenis asam sulfonat dengan gugus asam sulfonat yang bersifat asam kuat, ion hidrogen yang dipertukarkan, demikian pula ion logam, tidak terikat pada suatu posisi tertentu tetapi dapat bergerak bebas dalam larutan di bagian resin. Untuk gugus fungsional asam lemah, masih terdapat ikatan ion hidrogen terhadap gugus fungsional yang sesuai dengan kekuatan asamnya, tetapi ion logam bebas bergerak di dalam resin.

Jadi untuk resin dengan gugus fungsional kuat tetapan keseimbangan dapat didefinisikan sebagai :

$$\frac{(R^-A^+)_{resin}}{(A^+)_{larutan}} \times \frac{(M^+)_{larutan}}{(R^-H^+)_{resin}} \quad (7.12)$$

Karena (R^-) dapat dianggap tetap, tidak berubah, maka (R^-A^+) dan (R^-H^+) masing-masing dapat diganti dengan A^+_{resin} dan H^+_{resin} , sehingga persamaan (7.12) dapat ditulis sebagai

$$K_1 = \frac{(A^+_{resin}) (H^+_{larutan})}{(A^+_{larutan}) (H^+_{resin})} \quad (7.13)$$

Jika $K_1 < 1$ maka ion A^+ diresap dari larutan.

Jika jumlah ion A^+ lebih sedikit terhadap resin dan ion hidrogen maka hasil bagi menjadi :

$$\frac{m(H^+_{larutan})}{v(H^+_{resin})} = tetap = k \quad (7.14)$$

v ialah volume larutan dan m massa resin.

Penggabungan persamaan (7.13) dan (7.14) menghasilkan

$$K_1 = \frac{(A^+_{resin})}{(A^+_{larutan})} \times k \frac{v}{m}$$

atau

$$\frac{(A^+_{resin})}{(A^+_{larutan})} \times \frac{v}{m} = \frac{1}{k} K_1 = D_A \quad (7.15)$$

Persamaan (7.15) seringkali ditemukan dalam bentuk :

$$D_A = \frac{(\% A^+)_{resin}}{(\% A^+)_{larutan}} = \frac{v}{m} \quad (7.16)$$

D_A ialah koefisien distribusi yang dihubungkan dengan tetapan keseimbangan K_1 oleh tetapan k. Sebagai suatu besaran termodinamika nilai D_A tidak bergantung pada mekanisme proses pertukaran.

7.4.2 Faktor yang Mempengaruhi Koefisien Distribusi

a. Sifat ion yang teresap

Pada umumnya untuk larutan dengan konsentrasi di bawah 0,1N afinitas penukaran kation bertambah dengan bertambah besarnya muatan kation dan untuk kation yang muatannya sama, berkurang dengan bertambahnya jari-jari ion terhidrat. Jika ion tidak terhidrat, makin besar ion makin besar afinitas terhadap resin.

Berdasarkan kedua sifat ini maka untuk larutan encer dapat disusun urutan afinitas terhadap resin sebagai berikut :

- 1). Untuk penukar kation dengan gugus fungsional kuat misalnya $-\text{SO}_3\text{H}$.
(valensi tinggi) : La Ce Pr Nd Pm Eu Gd Tb Dy Y Ho Er Tm Yb
Au Y Sc Al

2). Penukar anion dengan gugus fungsional kuat misalnya basa ammonium kuaterner.

(valensi banyak) : sitrat, sulfat, oksalat, khromat (valensi satu) : I^- SO_4H^-
 NO_3^- Br^- CN^- SO_3H^- NO_2^- BrO_3^- Cl^- HCO_3^- $H_2PO_4^-$ $HCOO^-$ CH_3COO^- OH^- F^-

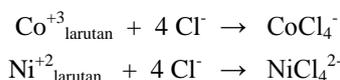
Penting disebutkan di sini bahwa urutan ini mungkin berubah jika faktor lain diubah misalnya jenis resin berubah, ada tidaknya ion pembentuk kompleks, suhu dan lain-lain.

b. Zat terlarut lain

Zat terlarut lain tidak mempunyai pengaruh penting pada daya seleksi suatu penukar ion dalam bentuk tertentu, kecuali jika zat terlarut tersebut dapat membentuk kompleks ion atau molekul dalam larutan air. Pembentukan kompleks mungkin memperbesar atau mengurangi koefisien distribusi ion tertentu.

Tanpa zat terlarut pembentuk kompleks koefisien distribusi kedua ion mungkin serupa, sehingga pemisahannya tidak baik. Tetapi karena perubahan kestabilan kompleks yang terjadi maka pemisahan mungkin diperbaiki.

Misalkan kobalt (III) dan nikel (II) berada bersama-sama dalam larutan yang mengandung ion klorida. Kedua ion logam tersebut akan membentuk kompleks sebagai berikut :



dengan tetapan keseimbangan masing-masing :

$$K_2 = \frac{CoCl_4^-}{(Co^{+3})(Cl^{-4})} \quad (7.17)$$

dan

$$K_3 = \frac{NiCl_4^{2-}}{(Ni^{+2})(Cl^{-4})} \quad (7.18)$$

Seperti akan diuraikan kemudian pembentukan kompleks bermuatan negatif banyak digunakan pada pemisahan dengan penukar anion. Jaringan kerangka resin yang bermuatan positif akan meresap dan menukar kompleks yang terbentuk, dan daya tukar masing-masing ion ditentukan oleh harga tetapan kestabilan, K, kompleks yang terbentuk. Penggabungan persamaan (7.16) dengan persamaan (7.18), dan dengan persamaan (7.17) masing-masing menghasilkan :

$$D_{\text{kompleks(Ni)}} = \frac{(\text{NiCl}_4^-)_{\text{resin}}}{(\text{NiCl}_4^-)_{\text{larutan}}} \times \frac{v}{m} = \frac{(\text{NiCl}_4^-)_{\text{resin}}}{(\text{Ni}^{+2})(\text{Cl}^-)^4} \frac{1}{K_3} \frac{v}{m} \quad (7.19)$$

dan

$$D_{\text{kompleks(Co)}} = \frac{(\text{CoCl}_4^-)}{(\text{Co}^{+3})(\text{Cl}^-)^4} \frac{1}{K_2} \frac{v}{m} \quad (7.20)$$

Kalau faktor pemisahan didefinisikan sebagai :

$$F.P. = \frac{(\text{CoCl}_4^-)_{\text{resin}} (\text{NiCl}_4^-)_{\text{resin}}}{(\text{Co}^{+3})_{\text{larutan}} (\text{Ni}^{+3})_{\text{larutan}}} \quad (7.21)$$

maka penggabungan persamaan (7.19), (7.20) dan (7.21) menghasilkan :

$$F.P. = \frac{D_{\text{kompleksCo}}}{D_{\text{kompleksNi}}} \times \frac{K_2}{K_3} \quad (7.22)$$

Jadi persamaan (7.22) menunjukkan bahwa faktor pemisahan bergantung pada hasil bagi koefisien distribusi kali hasil bagi tetapan ketidakstabilan.

Pada pemisahan dengan penukar kation, ion pembentuk kompleks yang sering digunakan ialah asam sitrat atau etilen diamino tetraasetat. Asam sitrat digunakan pada pemisahan logam tanah jarang dengan menggunakan penukar kation.

c. Sifat gugus fungsional

Gugus fungsional berbagai jenis resin mungkin mempunyai afinitas yang berbeda terhadap ion yang sama sehingga pemisahan juga tidak sama.

d. Konsentrasi elektrolit dalam larutan

Koefisien distribusi suatu ion (kation atau anion) berkurang dengan penambahan konsentrasi elektrolit induk. Kepekaan terhadap perubahan konsentrasi ini bergantung pada valensi ion dan konsentrasi total ion. Pada umumnya makin encer larutan makin baik pemisahan asal tidak ada pengaruh lain yang ditimbulkan oleh hidrolisis atau pembentukan koloid pada konsentrasi yang rendah.

7.4.3. Faktor yang Mempengaruhi Pemilihan Penukar Ion.

Pemilihan antara penukar kation dan penukar anion ditentukan oleh corak pemisahan yang dihadapi. Beberapa unsur dapat diserap baik dalam keadaan kation maupun anion.

Untuk setiap golongan maka faktor yang perlu dipikirkan ialah : daya seleksi, kapasitas penukaran, kelarutan, kestabilan kimia, pengembangan, kekuatan mekanik, besar partikel dan bentuk partikel. Untuk skala laboratorium biasanya kekuatan mekanik tidak penting. Untuk suatu resin jenis tertentu, misalnya dengan gugus fungsional tertentu, maka pemilihan biasanya berdasarkan pada derajat sambungan silang dan ukuran partikel.

Makin banyak jumlah s a m b u n g a n s i l a n g makin ketat struktur suatu resin. Banyaknya sambungan silang biasanya dinyatakan dengan jumlah persentase salah satu zat yang terpolimerisasi. Pada umumnya makin rendah persentase sambungan silang makin besar pengembangan (atau pengerutan) karena penyerapan air, makin rendah kekuatan mekanik makin tinggi kapasitas penukaran ion yang berat molekulnya tinggi, makin tinggi kecepatan difusi dalam resin makin rendah daya seleksi, makin rendah kapasitas penukaran tiap satuan volume, makin tinggi kelarutan dan makin tinggi pengaruh kecepatan mengalir terhadap proses penukaran.

U k u r a n p a r t i k e l menentukan kecepatan berdifusi ion ke dalam resin, pada resin dengan ukuran kecil kecepatan pertukaran secara keseluruhannya lebih cepat, pemisahan lebih jelas dan dibutuhkan lebih sedikit zat elutrien. Tetapi perbaikan ini diperoleh dengan memperlambat aliran dalam kolom resin, karena makin kecil ukuran resin makin lambat aliran. Untuk penelitian dianjurkan menggunakan resin dengan ukuran partikel sebesar 200 mesh (0,074 mm) atau lebih.

Walaupun seperti diuraikan di atas pemilihan antara penukar kation dan penukar anion hanya bergantung pada sistem yang hendak dipisahkan, namun karena jasa **Krauss** dan kawan-kawan, sifat penukar anion bertambah banyak digunakan. Dalam suatu deretan penerbitan, Krauss dan kawan-kawan menyelidiki secara sistematis sifat penukar anion, pada berbagai konsentrasi hidroklorida dan campuran hidroklorida dan hidrofluorida, terdapat hampir semua unsur dalam sistem berkala.

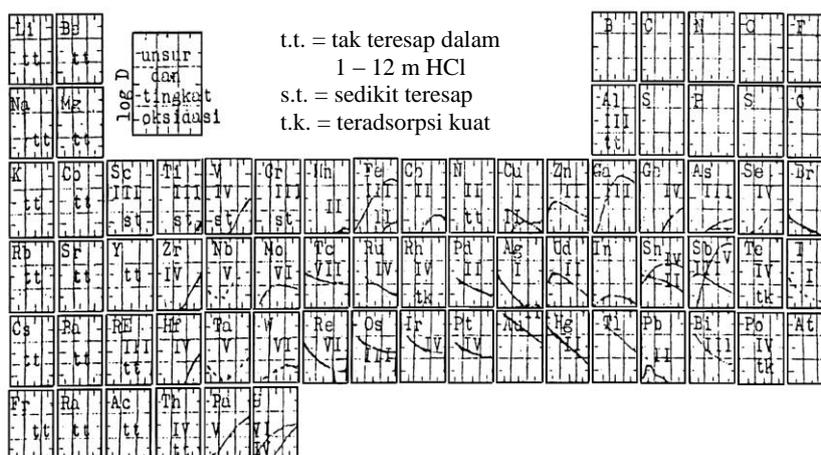
Denah koefisien distribusi setiap unsur terhadap konsentrasi asam pembentuk kompleks, HCl, menurut **Krauss** dan **Nelson** tertera pada Gambar 7.5. Dengan menggunakan Gambar 7.5. pemisahan beberapa unsur dari suatu campuran dapat direncanakan. Pada Gambar 7.6 tertera denah koefisien unsur dalam campuran 1 M HF dengan bermacam-macam konsentrasi HCl.

Terangsang oleh hasil yang diperoleh oleh Krauss dan kawan-kawan, **J.P. Faris** meneliti sifat resin terhadap ion dalam suasana hidrofluorida yang hasilnya tertera pada Gambar 7.7, **R. F. Buchanan** dan **J.P. Faris** meneliti sifat ion dalam suasana asam nitrat yang hasilnya tertera pada Gambar 7.8.

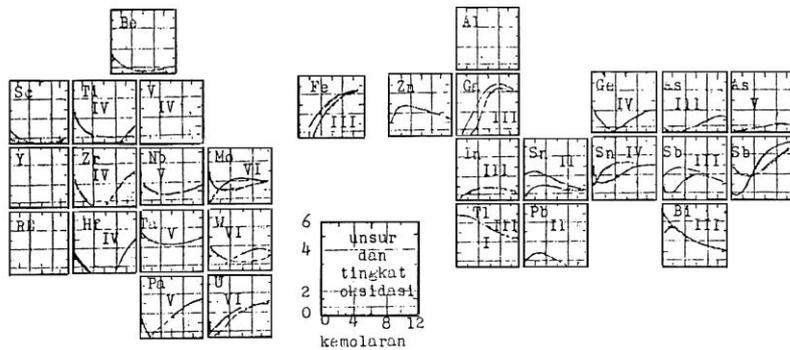
7.4.4. Teknik Penggunaan Penukar Ion

Pemisahan secara penukaran ion dapat dilakukan dengan pencampuran secara *batch* atau dengan jalan mengalirkan larutan melalui kolom resin. Cara pertama digunakan untuk mempelajari distribusi keseimbangan sedang yang kedua untuk pemisahan.

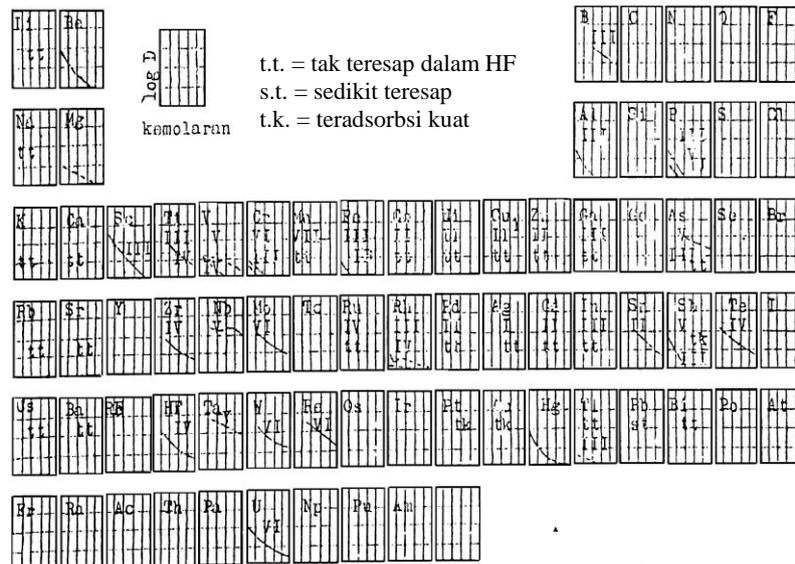
Pemisahan dengan kolom dapat dibagi dalam dua cara. Pertama yang berdasarkan perbedaan afinitas penukaran. Bergantung pada afinitas penukarannya maka ion mengalir melalui kolom dengan kecepatan berbeda. Ion yang paling sukar diserap akan keluar lebih dahulu kemudian disusul oleh ion yang diserap makin kuat. Jika dibuat denah antara konsentrasi terhadap volum efluen, diperoleh kurve sebagai tertera dalam Gambar 7.9. Kedua, secara elusi atau khromatografi kolom. Ion mula-mula diserap pada resin sebagai lapisan pita sempit pada bagian atas kolom. Kemudian penambahan zat elusi atau elutrien menyebabkan pita ion terserap ini selagi bergerak ke bawah, terpisah ke dalam beberapa pita sesuai dengan jumlah jenis ion yang akan dipisahkan. Terap pemisahan bergantung pada jenis elutrien dan resin. Untuk radiokimia, khromatografi kolom merupakan cara pemisahan yang penting.



Gambar 7.5. Peresapan unsur dari larutan asam hidroklorida pada penukar anion Dowex-1 (x10, 200 mesh).

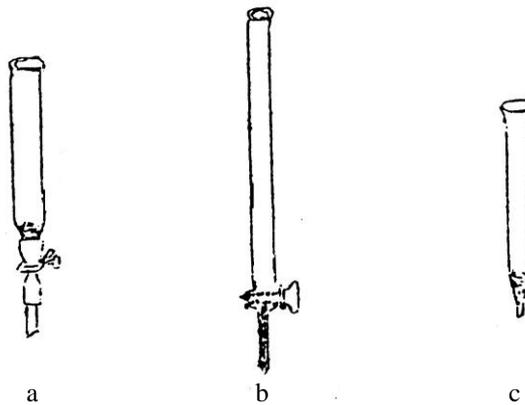


Gambar 7.6. Peresapan unsur dari larutan HCl dan HCl-HF pada penukar anion, distribusi tanpa HF. Distribusi dalam campuran HCl-HF (biasanya 1 ml HF, tetapi untuk unsur Zr (IV), Hf (IV), Hb (V), Ta (V), dan Pa (V) digunakan 0,5 ml HF) ditunjukkan oleh kurva tebal.



Gambar 7.7. Peresapan unsur dari larutan hidrofluorida pada penukar anion Dowex-1 (x-10, 200 mesh).

tahanan terhadap aliran karena viskositas larutan bertambah kecil, waktu yang diperlukan untuk penyerapan, pencucian dan langkah elusi dapat diperpendek. Tetapi kenaikan suhu makin menimbulkan penguraian resin.



Gambar 7.9. Kolom dengan penyekat kaca wol.

b. Khromatografi pemukaran ion

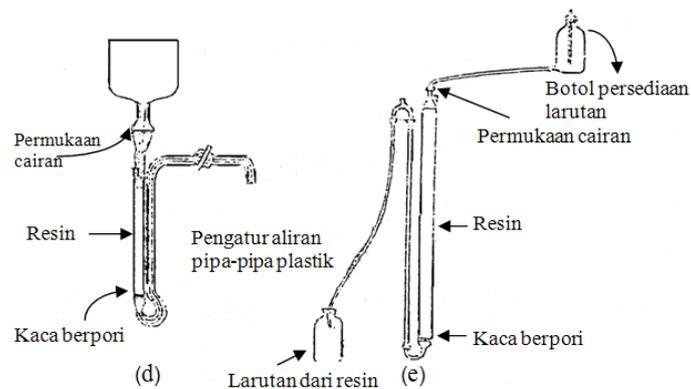
Pada cara elusi yakni pemisahan secara khromatografi penukaran ion, resolusi antara dua jenis ion ditentukan oleh faktor:

1. Koefisien distribusi yang pada umumnya bergantung pada tetapan keseimbangan reaksi penukaran, sifat dan konsentrasi ion molekul pembentuk kompleks dan pH larutan.
2. Panjang kolom, makin kecil perbedaan koefisien distribusi makin panjang kolom yang harus digunakan.
3. Sifat resin, seperti misalnya kapasitas penukaran, derajat sambungan lintang, pengembangan, dan sifat gugus fungsional.
4. Faktor lain yang mempengaruhi kecepatan terjadinya keseimbangan yang ditentukan oleh kecepatan berdifusi larutan ke dalam resin, resolusi tinggi, jika suku kolom tinggi, partikel resin berukuran kecil atau aliran melalui resin lambat.

7.5 CARA KHROMATOGRAFI

Secara definisi khromatografi ialah suatu proses yang memungkinkan resolusi campuran, oleh karena pemisahan komponen ke dalam daerah konsentrasi, pada

atau dalam fase yang berbeda daripada fase tempat ion mula-mula, tanpa mempedulikan tabiat gaya yang menyebabkan perpindahan zat antara fase. Selain khromatografi penukaran ion yang diuraikan dalam bab 7.4. dikenal dua macam khromatografi lain yakni khromatografi penyerapan dan partisi. Pada khromatografi penyerapan, zat yang hendak dipisahkan terserap pada suatu zat padat, sedang pada khromatografi partisi zat dilarutkan dalam suatu cairan yang tidak bergerak karena diserap pada suatu zat padat. Pada keduanya zat dipisahkan dengan jalan aliran zat cair yang sesuai untuk melepaskan ion atau molekul dari penyerap.



Gambar 7.10. Beberapa jenis alat untuk penukaran ion.

Cara khromatografi penyerap biasanya digunakan untuk pekerjaan semimikro atau jika jumlah zat yang dipersoalkan lebih sedikit, sedang khromatografi penukaran ion untuk zat yang lebih banyak jumlahnya.

Teknik yang digunakan pada penukaran ion dapat juga digunakan pada khromatografi penyerap, khromatografi partisi, baik dalam kolom dengan zat penyerap yang lamban untuk pemisahan secara besar-besaran atau yang memakai kertas saring untuk pemisahan secara kecil yang saat ini bertambah populer.

7.5.1 Khromatografi Penyerapan

Pemisahan suatu zat secara khromatografi serapan meliputi partisi berulang zat antara penyerap padat dan suatu pelarut. Derajat pemisahan bergantung pada perbedaan kecepatan migrasi zat dalam kolom. Untuk penyerap dan pelarut tertentu kecepatan migrasi suatu zat yang berkelakuan baik dinyatakan dengan :

$$R_f = \frac{\text{jarak pindah zat terlarut}}{\text{jarak pindah pelarut}} \quad (7.23)$$

Pada khromatografi kolom zat penyerap terdiri dari zat seperti alumina, kalsium karbonat, silika gel, arang aktif dan sebagainya.

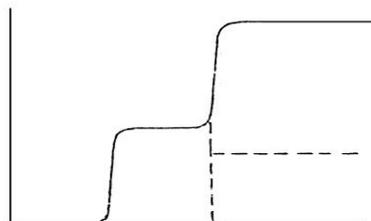
Sebagai pelarut dapat digunakan hidrokarbon, alkohol, bergantung pada zat terlarut. Afinitas serap biasanya berasal dari pembentukan ikatan hidrogen dapat berbeda untuk zat yang berlainan. Baik pelarut maupun penyerap bersaing terhadap zat terlarut dan posisi relatif masing-masing zat terlarut dalam kolom mencerminkan kekuatan kompleks-serap. Khromatografi serapan dapat dibagi dalam :

a. Analisis elusi

Suatu volum kecil larutan ditempatkan dan terserap pada bagian atas kolom peresap, kemudian dicuci dengan pelarut murni. Elusi terjadi karena perpindahan pelarut. Bentuk pita resapan zat terlarut bergantung pada isoterm resapan, yakni hubungan antara banyaknya zat terlarut yang diserap pada berbagai konsentrasi. Seringkali susunan elutan diubah secara kontinu.

b. Analisis frontal

Pada analisis ini larutan yang mengandung zat terlarut yang afinitas peresapannya berbeda-beda dialirkan melalui kolom secara kontinu dan eluat ditentukan secara kontinu dengan menggunakan cara kimia fisika, misalnya indeks bias, spektrum resapan dan sebagainya.



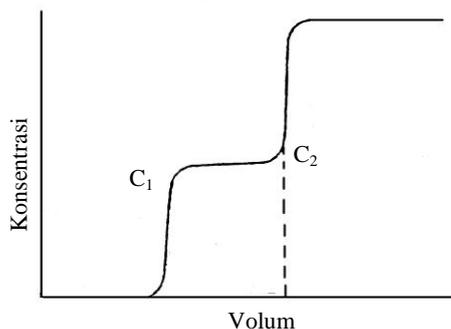
Gambar 7.11. Kurva elusi analisis frontal.

Denah konsentrasi setiap fraksi terhadap volum eluat berbentuk seperti Gambar 7.11. Konsentrasi zat sebanding dengan luas permukaan yang di bawah kurve.

c. Pencuci pindahan

Analog dengan analisis frontal hanya dalam hal ini digunakan larutan pemindah yang mengandung zat dengan afinitas serap yang lebih kuat daripada zat yang terserap paling kuat.

Denah konsentrasi terhadap volum eluat untuk sistem pencuci pindahan tertera pada Gambar 7.12.



Gambar 7.12. Kurva elusi pencuci pindahan

Pada prosedur ini tidak terjadi *tailing* tetapi ada kemungkinan bahwa pita keluar berdekatan. Dengan jalan menambahkan zat dengan afinitas resapan antara dua zat yang hendak dipisahkan ke dalam larutan maka pita yang hendak dipisahkan menjadi terpisah lebih jauh.

7.5.2. Khromatografi Partisi

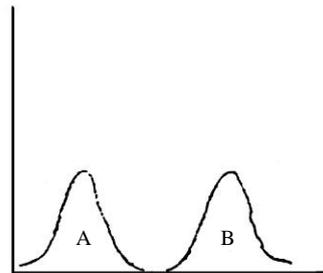
Khromatografi partisi dapat dibagi ke dalam khromatografi berdimensi satu, - dua dan - tiga. Khromatogram dimensi satu dan dua umumnya diperoleh dengan kertas saring, sedang khromatogram dimensi tiga dengan kolom berisi zat peresap, misalnya selulosa atau silika gel.

Pemisahan secara khromatografi partisi meliputi partisi zat antara pelarut organik yang mobil dengan fase air yang terikat pada zat penahan, yakni zat peresap. Pada dasarnya khromatografi merupakan perkembangan lebih lanjut partisi pada ekstraksi pelarut dalam corong pemisah. Misalkan, suatu corong pemisah berisi dua zat terlarut A dan B dalam fase air, koefisien partisi zat A lebih besar dalam khloroform daripada zat B. Jika ke dalam corong pemisah dialirkan khloroform yang telah dijenuhi dengan air, dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan aliran khloroform keluar corong (lihat Gambar 7.13), maka denah jumlah zat terlarut terhadap volum khloroform akan menunjukkan bentuk seperti tertera pada Gambar 7.14.

Pada khromatografi partisi tidak digunakan corong pemisah tetapi fase air didukung oleh zat yang dapat bergabung atau mempunyai daya resap besar terhadap air, misalnya lembaran atau bubuk selulosa atau silika dan yang dinamakan fasa tidak bergerak.



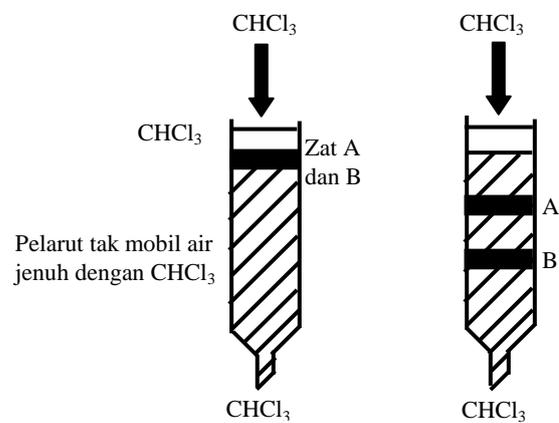
Gambar 7.13



Gambar 7.14

Pelarut lain misalnya khloroform, butanol atau fenol, yang mengandung air dalam jumlah bermacam-macam, seringkali jenuh, digunakan sebagai fase yang mobil. Dasar prosedur khromatografi tertera pada Gambar 7.15.

Zat A dan B diresap pada lapisan atas peresap yang mengandung fase air yang tidak mobil. Pada pengaliran pelarut mobil, khloroform jenuh dengan air, pada zat A dan zat B bergerak ke bawah dengan kecepatan yang berbeda sehingga dapat dipisahkan.



Gambar 7.15. Khromatografi Partisi.

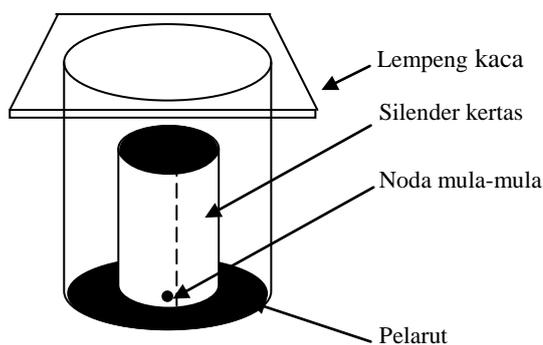
a. Khromatografi kertas

Terdapat dua jenis prosedur dalam khromatografi kertas, yakni cara mendaki dan menurun. Pada cara mendaki kertas biasanya dibuat dalam bentuk silinder, lihat Gambar 7.16.

Noda mula-mula ditempatkan 2,5 cm dari tiap ujung pada salah satu sudut kertas, garis menengahnya tidak boleh melebihi 1 cm. Noda basah ini tidak boleh disentuh dengan zat lain, untuk mempercepat pengeringan, noda ini dapat dialiri udara, misalnya dengan bantuan pengering rambut.

Pada dasar botol ditempatkan 100 ml pelarut dan khromatogram dimasukkan ke dalam botol. Pinggir kertas tidak boleh saling bersentuhan demikian pula kertas dan dinding wadah. Botol harus ditutup rapat (lihat Gambar 7.16) agar tidak terjadi penguapan pelarut maupun aliran udara yang mungkin mengubah bentuk khromatogram.

Seringkali ditemukan zat dengan harga R_f yang sangat berdekatan. Jika harga R_f ini sangat rendah dan zat tidak dapat dipisahkan dengan menggunakan bermacam-macam pelarut, maka mungkin pemisahan dapat dilaksanakan dengan cara pengaliran berganda. Prosedur ini pada dasarnya sama dengan *recycling* dalam distribusi alir balik



Gambar 7.16. Khromatografi mendaki.

Pada khromatografi kertas cara ini dikerjakan dengan mengambil kertas setelah sekali pencucian kemudian dikeringkan dan dicuci kembali dengan menggunakan pelarut yang sama. Banyaknya pengaliran berganda yang diperlukan bergantung pada harga R_f zat yang hendak dipisahkan. Secara matematik dapat diturunkan hubungan :

$$n_{maks} = \frac{\log R_{f_2} - \log R_{f_1}}{\log (1 - R_{f_2}) - \log (1 - R_{f_1})} \quad (7.24)$$

Jika R_{f1} mendekati R_{f2} persamaan (7.24) menjadi :

$$n_{maks} = \frac{1}{R_f} - 1 \quad (7.25)$$

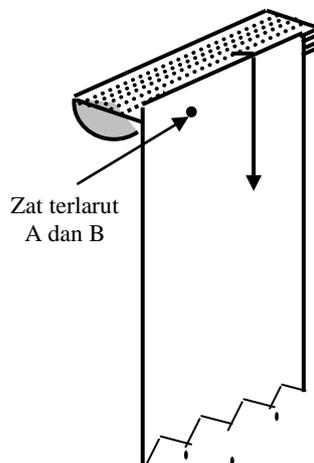
Jadi untuk dua buah zat dengan $R_f > 0,33$ tidak ada gunanya mencuci lebih daripada dua kali.

Khromatografi menurun mempunyai keuntungan jika dibandingkan dengan teknik mendaki, yakni pelarut mobil dapat dibiarkan menetes melalui pinggir kertas seperti tertera pada Gambar 7.17. Ukuran guntingan ujung kertas harus ditentukan secara empirik.

b. Faktor yang mempengaruhi harga R_f

Harga R_f bergantung pada faktor seperti kertas yang dipilih, konsentrasi zat terlarut, kecepatan mengalir pelarut, jarak antara noda dengan wadah pelarut, jarak total yang ditempuh pencuci dan penyetimbangan dan pencuci pendahuluan kertas. Selain daripada yang disebutkan ini juga pengaruh zat terlarut lain perlu diperhatikan.

- 1). Pemilihan kertas. Dasar pemilihan ialah kelakuan yang bergantung pada jenis pemisahan yang dikehendaki. Kebanyakan digunakan kertas saring Whatman nomor 1.



Gambar 7.17 Khromatografi menurun

2). Hubungan antara kecepatan bergerak pencuci dengan R_f zat terlarut. Dari fisika diketahui bahwa tinggi maksimum kenaikan suatu cairan dalam kapiler ialah :

$$h_{maks} = \frac{2 \gamma \cos \theta}{r \cdot g \cdot d} \quad (7.26)$$

γ ialah tegangan permukaan, θ sudut antara permukaan zat cair dan zat padat, θ sama dengan 0 jika zat cair membasahi zat padat, d jari-jari kapiler, r rapat massa zat cair, g tetapan gravitasi.

Jika kecepatan mendaki dianggap sebanding dengan perbedaan antara tinggi cairan, L , dan tinggi maksimum yang dapat dicapai. L_{maks} , dan selanjutnya dianggap bahwa kecepatan mendaki berbanding terbalik dengan viskositas η , maka

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{\eta} (h_{maks} - h) \quad (7.27)$$

Integrasi persamaan (7.27) menghasilkan :

$$\ln(c - h) = \frac{kt}{\eta} \ln a \quad (7.28)$$

c dan a masing-masing tetapan.

Untuk keperluan biasa dapat digunakan rumus yang lebih sederhana :

$$h^2 = Dt - b \quad (7.29)$$

D ialah tetapan difusi, b tetapan sama dengan h_0^2 .

- 3). Pengaruh suhu, tetapan distribusi D dalam persamaan (7.29) merupakan fungsi besaran γ , η dan $r \cdot m$. Oleh karena semua besaran ini bergantung pada suhu, maka D dan selanjutnya R_f juga akan dipengaruhi oleh suhu. Oleh karena itu dalam penggunaan khromatografi kertas harus diusahakan agar suhu tetap.
- 4). Faktor lain, selain yang disebutkan di atas maka perlu pula diperhatikan pencucian pendahuluan kertas.

Kertas saring yang digunakan kemungkinan mengandung pengotor yang dapat menimbulkan warna menyolok pada pencucian. Kalau dapat ini dihilangkan lebih dahulu.

Kemurnian pelarut penting karena keserbanekaan pelarut dapat mengakibatkan pengaruh pada R_f .

BAB 8

PENGUNAAN RADIOISOTOP DALAM KIMIA

Di negara maju, penggunaan dan penerapan isotop radioaktif ditemukan di hampir segala bidang aktivitas umat manusia, sehingga pengaruhnya dapat dirasakan oleh setiap lapisan masyarakat. Hal ini disebabkan karena bertambah banyaknya pusat reaktor yang mengakibatkan bertambah pesatnya produksi radioisotop. Faktor lain ialah sifat radioisotop sendiri yang merupakan suatu alat ampuh dalam menyelesaikan banyak persoalan yang rumit. Malahan dalam beberapa hal radioisotop seringkali merupakan satu-satunya jalan penyelesaian.

Secara kasar penggunaan radioisotop dalam kimia dapat dibagi ke dalam :

- a). Penggunaan sebagai perunut, dan
- b). Penggunaan sebagai sumber radiasi.

Sebagai p e r u n u t maka radioisotop digunakan untuk mengikuti dan meneliti sifat suatu unsur, senyawa atau kelompok senyawa dalam suatu proses. Sedang sebagai s u m b e r r a d i a s i yang dipentingkan ialah jenis radiasi dan energi yang dipancarkan karena radiasi tersebut dapat digunakan sebagai pengganti lebih baik radiasi mengion yang berasal dari sumber konvensional, seperti sinar-X.

8.1. PENGGUNAAN RADIOISOTOP SEBAGAI PERUNUT DALAM KIMIA ANALITIK

Radioisotop ialah isotop suatu unsur yang radioaktif jaitu yang memancarkan radiasi. Jenis serta energi radiasi yang dipancarkan umumnya merupakan sifat khas isotop pemancar. Setiap zat radioaktif meluruh dengan umur paro tertentu yang juga khas untuk isotop radioaktif. Jadi pengukuran umur paro serta energi radiasi yang dipancarkan dapat digunakan sebagai alat pengenalan suatu radioisotop. Selain itu radioisotop suatu unsur dapat dianggap mempunyai sifat kimia yang sama dengan isotop yang tidak aktif. Sifat ini beserta kepekaan inti radioaktif terhadap deteksi merupakan faktor yang menyebabkan radioisotop banyak digunakan sebagai perunut, baik secara kualitatif maupun kuantitatif.

Secara analitik penggunaan perunut radioaktif dapat dibagi ke dalam dua golongan, yaitu analisis aktivasi dan analisis radiometrik. Pada a n a l i s i s r a d i o a k t i f yang ditentukan ialah aktivitas yang terdapat dalam suatu cuplikan. Aktivitas ini dapat berasal dari penambahan sebelumnya atau dibentuk secara buatan maupun

mungkin sudah dalam cuplikan sebagai radioaktivitas alam atau hasil peluruhan nuklida lain. Pada analisis radiometrik zat tidak radioaktif ditentukan dengan jalan menambahkan zat pereaksi yang radioaktif. Sebagai contoh suatu analisis radiometrik ialah penentuan kadar perak dalam larutan dengan menambahkan klorida aktif untuk mengendapkan AgCl. Pada umumnya analisis radioaktif lebih banyak digunakan daripada analisis radiometrik.

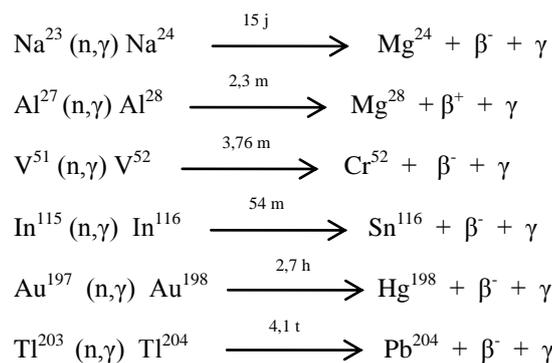
Dalam kimia analitik ditemukan dua buah teknik yang berdasarkan pada analisis aktivitas ini yaitu analisis aktivasi dan analisis pengenceran isotop.

8.1.1. Analisis Aktivasi

Cara analisis aktivasi pada hakekatnya tidak berbeda dari cara yang digunakan pada pembuatan radioisotop. Zat yang mengandung unsur yang hendak ditentukan diradiasi dengan partikel inti, misalnya dengan neutron, dan terjadi reaksi inti antara partikel penembak dengan unsur yang terdapat dalam zat yang hendak diselidiki, termasuk unsur yang hendak ditentukan. Aktivitas radioisotop yang terbentuk dari unsur yang hendak ditentukan dicacah dengan alat pencacah dan dari hasil pencacahan ini kadar unsur mula-mula dapat dihitung.

Pada umumnya semua macam reaksi inti dapat digunakan untuk analisis aktivasi. Namun yang sering ditemukan ialah analisis dengan menggunakan reaksi antara neutron termal dengan inti unsur yang hendak ditentukan. Seperti tertera dalam contoh di bawah, reaksi ini membentuk isotop radioaktif dari unsur-unsur yang hendak ditentukan yang memancarkan radiasi γ dan β .

Contoh reaksi (n, γ) :



Pada contoh ini hasil reaksi merupakan inti yang radioaktif dengan umur paro seperti tertera pada masing-masing reaksi. Seperti terlihat pada persamaan reaksi sebenarnya ada dua macam radiasi γ yang dipancarkan kemudian pada peluruhan hasil reaksi (n, γ) .

Selain reaksi dengan neutron termal maka perkembangan akhir-akhir ini banyak menggunakan reaksi dengan neutron cepat. Bergantung pada jenis inti dan energi neutron cepat maka mungkin terjadi reaksi (n,p) , (n, γ) , $(n,2n)$ dan lain-lain. Seperti tertera pada contoh reaksi Tabel 8.1, pada umumnya umur paro nuklida, yang terbentuk pada reaksi dengan neutron cepat, pendek. Oleh karena itu cara analisis yang menggunakan reaksi tersebut seringkali dinamakan analisis aktivasi cepat. Tabel 8.1. menunjukkan beberapa contoh reaksi dengan neutron cepat.

a. Perhitungan analisis aktivasi

Misalkan suatu zat yang mengandung N inti dalam tiap cm^3 yang hendak ditentukan, ditembak dengan sejumlah N' partikel inti/cm²/detik.

Jumlah partikel inti yang diresap, yang juga menyatakan jumlah reaksi yang terjadi dalam tiap lapisan setebal dl , dinyatakan oleh

$$-dN' = N \sigma Ndl \quad (8.1)$$

Persamaan (8.1) jika diintegrasikan menghasilkan :

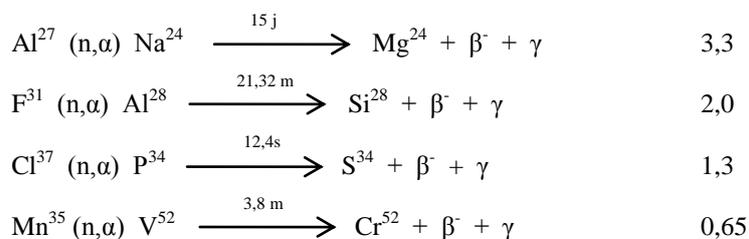
$$N_1' = N_0' e^{-N\sigma l} \quad (8.2)$$

N_1' ialah intensitas radiasi setelah melalui tebal l cm, N_0' intensitas mula-mula, N jumlah inti tiap cm^3 isotop yang hendak ditentukan, σ tampang lintang penangkapan partikel inti.

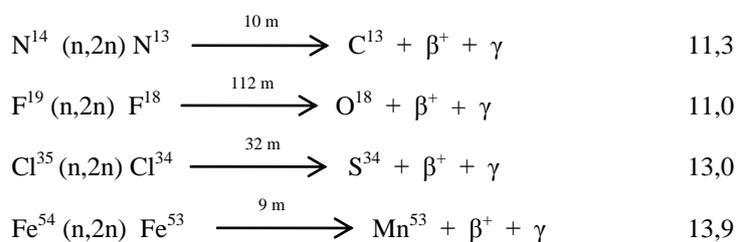
Tabel 8.1. Reaksi dengan neutron cepat

Contoh reaksi (n,p) :	Energi ambang (MeV)
$\text{O}^{16} (n,p) \text{N}^{16} \xrightarrow{7,3 \text{ m}} \text{O}^{16} + \beta^- + \gamma$	10,2
$\text{F}^{19} (n,p) \text{O}^{19} \xrightarrow{29 \text{ m}} \text{F}^{19} + \beta^- + \gamma$	4,0
$\text{Al}^{27} (n,p) \text{Mg}^{27} \xrightarrow{9,6 \text{ m}} \text{Al}^{27} + \beta^- + \gamma$	1,9
$\text{Si}^{28} (n,p) \text{Al}^{28} \xrightarrow{2,3 \text{ m}} \text{Si}^{28} + \beta^- + \gamma$	4,2

Contoh reaksi (n,α) :



Contoh reaksi (n,2n) :



Dalam praktek zat yang hendak ditentukan dimasukkan ke jalan yang dilalui oleh radiasi partikel inti selama waktu yang telah ditentukan sedemikian rupa agar dapat diperoleh cukup aktivitas yang dapat diukur. Dalam hal ini persamaan (8.1) dapat ditulis dalam bentuk :

$$-dN = \alpha N f dt$$

f ialah fluks partikel inti dinyatakan dalam partikel/cm²/detik, t waktu iradiasi, N jumlah inti zat yang disinari dan N* jumlah inti radioaktif yang terbentuk. Karena inti radioaktif segera setelah terbentuk mulai lagi meluruh kembali dengan kecepatan sebesar

$$\frac{dN^*}{dt} = -\lambda N^*$$

maka pada setiap waktu jumlah inti radioaktif yang tinggal :

$$\frac{dN^*}{dt} = f \alpha N - \lambda N^* \quad (8.3)$$

ialah tetapan peluruhan inti radioaktif yang terbentuk.
Integrasi persamaan (8.3) menghasilkan :

$$N^* = \frac{fN_0 e^{-\lambda t}}{\lambda} \quad (8.4)$$

Dalam keadaan sebenarnya jumlah atom radioaktif tidak dapat ditentukan, tetapi yang diukur ialah suatu besaran yang sebanding dengan jumlah atom radioaktif yang ada. Besaran ini dinamakan *a k t i v i t a s*, *A* dan didefinisikan sebagai

$$A = \frac{dN^*}{dt} = \lambda N^* \quad (8.5)$$

Penggabungan persamaan (8.4) dengan persamaan (8.5) menghasilkan :

$$A = \lambda f N_0 e^{-\lambda t} \quad (8.6)$$

atau mensubstitusikan

$$\lambda = \frac{0,693}{t_{1/2}}$$

diperoleh

$$A = f N_0 \left(\frac{0,693}{t_{1/2}} \right) e^{-\lambda t} \quad (8.7)$$

Dalam perhitungan sehari-hari jumlah *N* biasanya dinyatakan dengan besaran yang bisa diukur langsung misalnya berat molekul dan berat zat *w*. Dari kimia fisik dengan mudah dapat diturunkan hubungan berikut :

$$N = \frac{w}{M} \times 6,023 \times 10^{23} \quad (8.8)$$

Karena hanya isotop tertentu suatu unsur saja yang mengalami reaksi maka persamaan (8.8) harus dikoreksi dengan kelimpahan isotop θ yang betul-betul mengalami reaksi, sehingga persamaan (8.8) harus ditulis sebagai

$$N = \frac{w \theta}{M} \times 6,023 \times 10^{23} \quad (8.9)$$

Substitusi persamaan (8.9) ke dalam persamaan (8.7) menghasilkan

$$A = A_0 e^{-\lambda t} + \frac{A_0 \lambda}{\lambda - M} (e^{-\lambda t} - e^{-Mt}) \quad (8.10)$$

Persamaan (8.10) menyatakan aktivitas zat radioaktif yang ada pada saat iradiasi dihentikan. Mulai saat tersebut zat radioaktif akan meluruh menurut persamaan :

$$A_d = A_0 e^{-\lambda t} \quad (8.11)$$

A_d ialah aktivitas yang tinggal setelah waktu t . Substitusi persamaan (8.10) sebagai A_0 dalam persamaan (8.11) menghasilkan :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} + \frac{A_0 \lambda}{\lambda - M} (e^{-\lambda t} - e^{-Mt}) \quad (8.12)$$

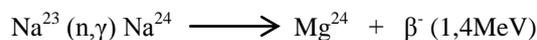
Faktor $(e^{-\lambda t})$ dinamakan faktor kejenuhan S . Jika t cukup besar dibandingkan dengan umur paro $t_{1/2}$, misalnya $t \sim 10 t_{1/2}$, maka S mendekati satu. Jadi ternyata tidak ada gunanya mengiradiasi lebih lama dari sepuluh umur paro, karena aktivitas tidak akan bertambah lagi walaupun waktu iradiasi ditambah. Dalam praktek iradiasi hanya dilakukan sekitar lima umur paro.

Menurut persamaan (8.12) berat zat, w , dapat dihitung asal saja faktor lain diketahui atau dapat diukur.

Faktor seperti M dan θ merupakan tetapan, sedang f , t , dan d merupakan variabel yang dapat diubah-ubah untuk memperoleh harga A yang diinginkan dan yang dapat diukur dengan teliti.

Persamaan (8.12) juga menunjukkan bahwa untuk suatu unsur tertentu kepekaan hanya bergantung pada harga fluks partikel inti dan kepekaan alat deteksi yang digunakan untuk mengukur aktivitas. Sebagai contoh perhitungan, misalkan suatu cuplikan yang mengandung secerach natrium diiradiasi dengan fluks neutron yang terdiri atas 10^{12} n/cm²/det, selama seminggu.

Dari berbagai sumber dapat diketahui data untuk reaksi,



sebagai berikut $t_{1/2} = 15$ jam, $\theta = 1$, $M = 23$ dan $\sigma = 0,4$ b.

Misalkan bahwa alat penghitung yang digunakan dapat mengukur dengan baik, hanya kalau aktivitas >30 cacah per menit. Selanjutnya misalkan efisiensi pengukuran 20% dan dibutuhkan waktu selama 3 jam untuk menyelesaikan pemisahan radiokimia, maka kepekaan, yakni berat minimum Na yang masih dapat dideteksi, dapat dihitung sebagai berikut :

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (8.7)$$

t = 1 minggu ~ 11 t_{1/2}, jadi

$$(e^{-0.693 \cdot 11 / 2}) \approx 1$$

Jadi

$$A = \lambda N_0$$

Tiga jam setelah iradiasi dihentikan aktivitas yang tinggal menjadi :

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Aktivitas ini seharusnya sama dengan aktivitas minimum yang masih dapat dideteksi alat. Jadi :

$$\lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N_0$$

Atau $w = 3 \times 10^{-10}$ gram = 3×10^{-4} ug

Jadi kepekaan terhadap barium ialah 3×10^{-4} bagian per juta (ppm).

Meinke telah menyusun suatu perbandingan antara kepekaan bermacam-macam cara dengan kepekaan analisis aktivitas pada berbagai fluks.

b. Teknik dan prosedur analisis aktivasi

Walaupun secara teoretis, seperti diuraikan sebelum ini, berat zat yang hendak ditentukan dapat dihitung langsung dengan menggunakan persamaan (8.12), namun cara ini jarang digunakan. Hal ini disebabkan karena tetapan pada persamaan (8.12) umumnya belum pasti betul dan karena harga fluks partikel inti tidak selalu tetap. Oleh karena itu dalam praktek umumnya digunakan cara lain yakni cara perbandingan.

Pada cara ini zat yang mengandung unsur yang hendak ditentukan diiradiasi bersama-sama dengan suatu zat pembanding yang mengandung sejumlah tertentu (diketahui) unsur yang hendak ditentukan. Dengan mengukur aktivitas dalam kedua

zat yang diiradiasi dan dari berat zat pembanding maka berat X unsur atau senyawa yang hendak ditentukan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :



Pengukuran aktivitas zat X dapat dilakukan dengan jalan pemisahan lebih dahulu secara kimia, tetapi juga dapat dilakukan langsung setelah iradiasi. Yang terakhir ini mungkin jika zat yang ditentukan ialah pemancar radiasi γ . Dalam persoalan yang hanya memungkinkan pengukuran radiasi β , maka terpaksa dilakukan pemisahan terlebih dahulu.

Secara singkat prosedur analisis aktivasi ialah sebagai berikut :

- 1). **Sebelum iradiasi.** Memilih nuklida yang akan diaktivasi, menentukan bentuk kimia serta menyiapkan cuplikan. Pada analisis cara membandingkan disiapkan dua cuplikan yakni zat yang hendak diselidiki dan zat pembanding yang mengandung jumlah tertentu unsur yang hendak ditentukan.
- 2). **Iradiasi.** Kondisi iradiasi dipilih yang seefisien mungkin. Besar fluks dan lama iradiasi disesuaikan agar diperoleh aktivitas yang cukup optimum untuk pengukuran.
- 3). **Sesudah iradiasi.** Bergantung pada jenis persoalan yang dihadapi dapat dilakukan analisis merusak atau analisis tanpa merusak. Pada analisis merusak zat yang telah diiradiasi dilarutkan dan ditambahi pengemban. Aktivitas yang diinginkan dipisahkan, diendapkan dan dicacah. Dari hasil pencacahan diadakan perhitungan. Pada analisis tak-merusak zat yang telah diiradiasi langsung disiapkan sebagian atau seluruhnya untuk dicacah. Dari hasil pencacahan diadakan perhitungan. Pada analisis tidak merusak zat yang telah diiradiasi langsung disiapkan sebagian atau seluruhnya untuk dicacah. Dari hasil pencacahan dan data lain dihitung kadar yang hendak ditentukan.

Gambar 8.1. memperlihatkan secara skematik urutan langkah prosedur analisis aktivasi.

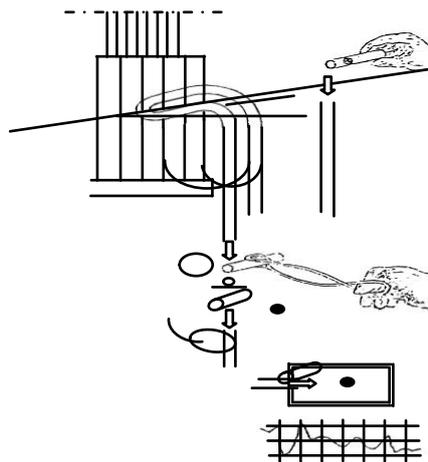
c. Kelebihan dan kekurangan analisis aktivasi

Seperti diuraikan di atas salah satu kelebihan analisis aktivasi ialah kepekaannya yang tinggi serta batas deteksinya yang sangat rendah, seperti tertera dalam daftar lampiran.

Untuk kebanyakan unsur cara analisis aktivasi merupakan satu-satunya cara yang dapat digunakan pada konsentrasi yang sangat rendah. Batas pengukuran dapat diturunkan lebih rendah lagi dengan menggunakan fluks yang lebih tinggi, misalnya dalam reaktor dengan daya yang lebih tinggi.

Analisis aktivasi merupakan cara analisis yang sangat spesifik karena radionuklida unsur yang terbentuk pada reaksi inti meluruh dengan cara yang sangat spesifik yang sangat khas bergantung pada jenis inti pemancar. Kombinasi jenis dan energi radiasi yang dipancarkan serta umur paruh suatu radionuklida umumnya sukar ditentukan pada radionuklida lain. Hal ini memungkinkan untuk mengenal dan mengukur radioaktivitas yang diinginkan tanpa suatu kesukaran.

Analisis aktivasi juga menonjol dari segi lain yaitu kebebasan terhadap kontaminasi laboratorium. Pada analisis kimia terutama analisis kadar yang sangat rendah, pengaruh kontaminasi zat yang terdapat pada zat pereaksi, pada bejana wadah, ataupun yang berasal dari udara, merupakan persoalan yang sangat sukar diatasi. Pada analisis aktivasi asal saja kontaminasi ini tidak ditambahkan sebelum iradiasi maka kontaminasi yang relatif agak besar tidak akan mengganggu. Oleh karena itu penyiapan cuplikan yang hendak diiradiasi perlu dilakukan dengan cermat.



Gambar 8.1. Bagan analisis pengaktifan.

Selain kelebihan ini yang masih perlu disebutkan ialah kecepatan analisis aktivasi. Dengan spektrometer yang sederhana analisis rutin kebanyakan dapat dilakukan dalam waktu yang relatif sangat pendek jika dibandingkan dengan cara lain. Selain itu analisis simultan beberapa unsur dalam satu cuplikan juga mungkin, dengan menggunakan pencacah diferensial. Seperti telah diuraikan salah satu keuntungan penggunaan pencacahan radiasi gamma ialah kemungkinan membedakan radiasi yang energinya berbeda. Terutama menggunakan pencacah saluran-ganda, pengukuran banyak unsur dapat dilakukan secara simultan.

Dalam hal dua radioisotop mempunyai spektrum yang saling menutup maka dengan melakukan pengukuran pada berbagai waktu, jadi menggunakan perbedaan umur paro, spektrum kedua radioisotop dapat diuraikan dan perhitungan selanjutnya dapat dilakukan. Akhir-akhir ini digunakan spektrometer yang digabungkan dengan suatu komputer untuk menganalisis spektrum yang rumit.

Cara ini dikenal dengan analisis aktivasi otomatis.

Kekurangan analisis aktivasi dapat digolongkan sebagai persoalan fisik, kimia dan nuklir. Dalam persoalan fisik dapat digolongkan pembatasan ukuran tempat iradiasi dan suhunya. Tiap reaktor mempunyai fasilitas yang ukurannya telah tertentu.

Demikian pula suhu tempat iradiasi umumnya sudah ditentukan. Mengenai persoalan kimia maka dapat disebutkan antara lain kemungkinan kerusakan struktur karena iradiasi, persoalan pemisahan jika diperlukan, terutama jika harus mengukur pemancar β .

Persoalan ini pada umumnya dapat diatasi dengan memilih jenis reaksi yang menghasilkan pemancar γ . Perkembangan analisis aktivasi-cepat akhir-akhir ini hampir tidak menggunakan pemisahan kimia ataupun kalau perlu perkembangan cara pemisahan cepat telah memungkinkan melakukan pemisahan dalam waktu yang tersedia.

Pembatasan nuklir harus selalu ditinjau sebelum percobaan dilakukan. Pertama, ialah kemungkinan adanya zat dalam campuran cuplikan yang mempunyai daya resap besar, sehingga fluks neutron yang melalui cuplikan berubah-ubah. Ini dapat mengakibatkan bahwa radioaktivitas yang terbentuk lebih sedikit daripada yang diharapkan karena atom bagian sebelah dalam, sebagai akibat peresapan yang disebutkan di atas, menerima lebih sedikit iradiasi penembak. Dalam beberapa hal atom zat yang hendak ditentukan sendiri, kalau tampang lintang aktivitasnya besar, dapat bertindak sebagai pelindung terhadap atom yang terletak sebelah dalam. Oleh karena itu sedapat mungkin digunakan cuplikan yang tipis. Selain dari peresapan ini, juga ada kemungkinan bahwa inti yang hendak diukur bukan hanya dibentuk oleh reaksi utama, misalnya oleh reaksi (n,γ) , tetapi mungkin juga terbentuk melalui reaksi lain, misalnya reaksi (n,p) dengan nuklida lain yang ada dalam campuran.

Tabel 8.2
Sumber kesalahan pada iradiasi suatu inti

Reaksi utama :	${}^M A_Z (n, \gamma) {}^{M+1} A_Z$
Gangguan primer :	${}^{M+1} A_{Z+1} (n, p) {}^{M+1} A_Z$ ${}^{M+4} A_{Z+2} (n, \alpha) {}^{M+1} A_Z$
Gangguan tingkat dua :	${}^{M+1} A_Z (n, \gamma) {}^M A_Z (n, \gamma) {}^{M+1} A_Z$ ${}^M A_{Z-1} (n, \gamma) {}^{M+1} A_{Z-1} \xrightarrow{-\beta^-} {}^{M+1} A_Z$ ${}^{M-1} A_{Z-1} (n, \gamma) {}^M A_{Z-1} \xrightarrow{-\beta^-} {}^M A_Z (n, \gamma) {}^{M+1} A_Z$ ${}^{M+1} A_{Z+2} (n, p) {}^{M+1} A_{Z+1} \xrightarrow{-\beta^+} {}^{M+1} A_Z$ ${}^{M+4} A_{Z+1} (n, \alpha) {}^{M+1} A_{Z+1} \xrightarrow{-\beta^-} {}^{M+1} A_Z$ ${}^{M+2} A_Z (\gamma, n) {}^{M+1} A_Z$

Tabel 8.2 menunjukkan beberapa kemungkinan sumber kesalahan yang disebabkan karena reaksi lain selain reaksi utama, juga membentuk inti yang sama.

Gangguan semacam ini dapat dihindari dengan jalan memisahkan unsur yang mengganggu sebelum iradiasi, jalan lain ialah menggunakan cara pencacahan diferensial. Sebagai contoh ialah gangguan reaksi ${}^{76}\text{Ge} (n, \gamma) {}^{77}\text{Ge} \xrightarrow{-12 \text{ jam}} {}^{77}\text{As}$ pada penentuan arsen dengan reaksi ${}^{75}\text{As} (n, \gamma) {}^{76}\text{As}$. Dengan jalan mencacah isotop arsen dapat ditentukan dan koreksi radiasi yang berasal dari reaksi ${}^{76}\text{Ge}$ dapat dilakukan.

Gangguan reaksi dengan neutron cepat, misalnya reaksi (n,p), (n,α) dan (n,2n), dapat dihindari dengan menempatkan cuplikan dalam reaktor di tempat yang telah diketahui bebas neutron cepat, atau sekurang-kurangnya di tempat dengan perbandingan neutron termal terhadap neutron cepat yang besar.

Pada analisis cepat yang menggunakan reaksi dengan neutron cepat gangguan neutron termal dapat dihindari dengan membungkus cuplikan dengan lembaran kadmium. Neutron lambat yang tercampur pada neutron cepat terserap oleh lembaran kadmium sehingga reaksi yang terjadi hanya reaksi dengan neutron cepat saja.

Pada umumnya dengan mempelajari secara teliti sebelumnya, kemungkinan gangguan nuklir ini dapat dihindari atau dapat dikoreksi.

d. Penggunaan analisis aktivasi

Analisis aktivasi radioaktif telah digunakan dalam berbagai penentuan, terutama dalam konsentrasi pengotor yang sangat rendah yang tidak dapat atau sukar ditentukan dengan cara lain.

Dalam bidang medik cara analisis ini telah digunakan untuk menentukan kadar unsur pengotor misalnya magnesium, mangan, tembaga dan seng dalam sel darah, dalam plasma darah, serta dalam butir darah putih penderita penyakit leukemia. Seperti diketahui keempat unsur tersebut di atas penting sebagai katalis atau ko-faktor dalam reaksi biokimia. Magnesium terutama penting sebagai katalis pada metabolisme glukosa. Unsur pengotor lain yang juga penting dalam sistem biologi dan yang sering ditentukan dengan menggunakan analisis aktivasi ialah unsur natrium, klor, kalium, kalsium, kobal, iodium, brom dan fosfor.

Dalam bidang semikonduktor, analisis aktivasi digunakan untuk memeriksa unsur pengotor dalam semikonduktor germanium dan silikon. Demikian pula analisis aktivasi banyak digunakan untuk menentukan kemurnian suatu zat terhadap unsur pengotor yang kadarnya sangat rendah.

Dalam bidang kosmokimia misalnya penelitian meteorit, dan dalam bidang geokimia misalnya analisis unsur dalam konsentrasi rendah yang terdapat dalam bermacam-macam batu-batuan, cara analisis aktivasi sangat banyak digunakan. Analisis unsur tanah jarang akhirnya dapat dilakukan dengan baik sebagai akibat penggunaan teknik penukar ion dan analisis aktivasi.

Analisis logam seperti vanadium, nikel dan tembaga dalam petroleum juga banyak dikerjakan. Dalam hubungan ini dapat disebutkan penentuan oksigen dalam berbagai cuplikan yang menggunakan reaksi $^{16}\text{O} (n,p) ^{16}\text{N}$ dengan neutron berenergi 14 MeV.

Dalam bidang kriminologi analisis aktivasi selain digunakan untuk penentuan keracunan, misalnya raksa dan arsen, juga digunakan untuk pemeriksaan tangan seorang yang dicurigai telah membunuh dengan pistol.

Dalam hal ini konsentrasi kecil bekas logam yang menguap dan yang melekat di tangan terdakwa dapat ditentukan. Cara ini juga pernah digunakan untuk membuktikan seseorang pernah berada dalam suatu daerah tempat pembunuhan yaitu dengan menganalisis lumpur yang ada di celana terdakwa dan mencocokkan dengan susunan lumpur yang terdapat sekitar tempat peristiwa terjadi.

Tidaklah mungkin untuk memberikan semua macam penggunaan analisis aktivasi. Ulasan mengenai penggunaan analisis aktivasi dapat ditemukan dalam penerbitan April tiap tahun genap majalah *Analytical Chemistry* dalam judul *Nucleonics*.

e. Sumber neutron

Sebagai sumber neutron umumnya digunakan reaktor atau reaksi inti. Sudah jelas bahwa reaktor merupakan sumber paling baik mengingat kemungkinan fluks yang tinggi, tetapi harus disadari bahwa tidak selalu seorang pekerja berada di daerah dekat reaktor. Jika suatu tempat yang demikian yang memerlukan banyak analisis aktivasi maka dapat digunakan salah satu sumber berikut.

f. Sumber radioaktif.

Beberapa unsur, misalnya berilium dan bor, mudah menangkap partikel alfa atau radiasi gamma dan memancarkan neutron. Oleh karena itu jika suatu pemancar gamma didekatkan atau dicampur dengan unsur demikian akan diperoleh suatu sumber neutron. Dalam Tabel 8.3 tertera beberapa kombinasi demikian dan reaksi yang terbentuk.

Tabel 8.3 Sumber neutron

Sumber	Reaksi utama
Ra + Be (campuran)	${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$
Po + Be (campuran)	${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$
Ra + B (campuran)	${}^{11}\text{B} (\alpha, n) {}^{14}\text{N}$
${}^{239}\text{Pu} + \text{Be}$ (campuran)	${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$
Ra + Be (terpisah)	${}^9\text{Be} (\gamma, n) {}^8\text{Be} \longrightarrow 2 {}^4\text{He}$
${}^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	${}^9\text{Be} (\gamma, n) {}^8\text{Be} \longrightarrow 2 {}^4\text{He}$
${}^{24}\text{Na} + \text{D}_2\text{O}$	${}^2\text{H} (\gamma, n) {}^1\text{H}$

Sumber seperti ini umumnya memancarkan energi yang bermacam ragam walaupun kedua reaksi yang terakhir menghasilkan neutron berenergi tunggal. Kesulitan penggunaan sumber demikian untuk analisis aktivasi ialah rendahnya fluks neutron yang dipancarkan.

Lebih penting ialah neutron yang ditimbulkan oleh reaksi ion yang dipercepat. Salah satu contoh reaksi demikian ialah reaksi antara deuterium yang dipercepat dengan tritium : ${}^3\text{H} (d, n) {}^4\text{He}$. Tritium sasaran ini biasanya diserap dalam logam titan atau zirkon. Pembangkit semacam ini dapat mencapai fluks termal sebesar 2×10^8 n/cm²/det atau fluks neutron cepat sebesar 8×10^8 n/cm²/det dan cukup besar untuk kebanyakan analisis rutin.

8.1.2. Analisis Pengenceran Isotop

Cara ini terutama penting jika campuran senyawa anorganik atau senyawa organik demikian rumit hingga sukar untuk mengadakan pemisahan zat yang hendak ditentukan secara kuantitatif atau walaupun dapat dipisahkan memerlukan waktu yang lama. Dalam hal seperti ini komponen murni zat yang hendak ditentukan, yang jumlahnya diketahui dengan teliti, ditambahkan ke dalam sistem yang hendak dianalisis.

Komponen murni ini dapat berupa isotop radioaktif unsur yang hendak ditentukan atau senyawa bertanda yang sama dengan senyawa yang hendak diselidiki, ataupun isotop stabil unsur yang hendak ditentukan. Yang terakhir ini dikenal sebagai pengenceran isotop stabil dan memerlukan pemisahan yang menggunakan spektrometer massa dan tidak akan dibicarakan dalam buku ini.

Pada pengenceran dengan zat radioaktif setelah dicampur dengan baik agar terjadi keseimbangan antara isotop aktif dan tidak aktif, maka sebagian zat yang hendak ditentukan dipisahkan, dalam keadaan murni dan kemudian dicacah. Dengan jalan membandingkan aktivitas mula-mula yang ditambahkan terhadap aktivitas yang ditemukan kembali, jumlah zat mula-mula yang ada dalam campuran dapat dihitung. Pada dasarnya zat radioaktif yang ditambahkan digunakan untuk menentukan efisiensi hasil prosedur pemisahan.

Analisis pengenceran isotop merupakan suatu cara yang sangat ampuh. Pertama dalam cara ini tidak perlu dilakukan pemisahan kuantitatif, syaratnya hanyalah zat yang dipisahkan harus murni dan tidak boleh ada reaksi pertukaran yang mungkin dapat mengurangi aktivitas jenis senyawa bertanda.

Kedua, kepekaan zat radioaktif terhadap deteksi seperti telah diuraikan dalam pasal mengenai analisis aktivasi. Dengan adanya reaktor dan adanya produksi isotop dan senyawa bertanda maka cara analisis ini dengan mudah dapat dijadikan suatu analisis rutin.

a. Metode pengenceran isotop.

Metode analisis pengenceran isotop dapat dibagi dalam pengenceran langsung, pengenceran balik, pengenceran rangkap, pengenceran turunan dan pengenceran berganda.

1). Pengenceran isotop langsung. Cara ini banyak digunakan dalam penentuan kuantitatif senyawa organik dan anorganik. Didasarkan pada perubahan aktivitas-jenis zat perunut yang ditambahkan yang disebabkan karena pengenceran oleh zat yang mula-mula terdapat dalam zat.

Misalkan zat mula-mula yang hendak ditentukan mengandung m gram zat yang hendak ditentukan dan isotop radioaktif yang ditambahkan beratnya m^* gram dan aktivitas jenisnya ialah S^* . Setelah dicampur, sebagian dari zat murni dipisahkan dan misalkan aktivitas jenisnya setelah ditentukan ialah S_a . Karena jumlah aktivitas sebelum dan sesudah pemisahan dapat dianggap tidak berubah, diperoleh hubungan berikut.

Aktivitas sebelum pemisahan ialah $m \cdot S^*$, yaitu aktivitas yang ditambahkan. Setelah pencampuran aktivitas menjadi $(m + m^*) S_a$. Jadi dapat dituliskan :

$$m \cdot S^* = (m + m^*) S_a \quad (8.13)$$

$$m \cdot S^* = (m + m^*) S_a \quad (8.14)$$

Jika berat zat aktif m^* yang ditambahkan dapat diabaikan terhadap berat m yang hendak ditentukan, maka $(m + m^*) \sim m$, dan persamaan (8.14) menjadi :

$$\frac{m}{m^*} = \frac{S^*}{S_a} \quad (8.15)$$

Aktivitas jenis dapat ditentukan dengan jalan menimbang zat, mengukur aktivitasnya dan membagi aktivitas yang diukur dengan berat yang ditimbang. Karena konsentrasi zat radioaktif yang ditambahkan umumnya sangat kecil, maka pengaruhnya terhadap berat zat yang ditentukan dapat diabaikan. Pada pengenceran dengan isotop stabil, oleh karena jumlah yang ditambahkan umumnya besar, maka biasanya pengenceran isotop yang ditambahkan terhadap berat molekul zat dapat diabaikan.

Dalam beberapa hal konsentrasi zat yang terdapat dalam cuplikan kurang besar untuk memungkinkan penimbangan yang teliti, atau zat yang dipisahkan tidak dapat diperoleh dalam keadaan murni untuk memungkinkan penentuan secara gravimetri.

Pada keadaan seperti itu maka setelah pemisahan dapat digunakan cara penentuan konsentrasi seperti spektrofotometer. Aktivitas zat radioaktif yang hilang pada proses pemisahan digunakan untuk menghitung jumlah zat mula-mula dalam cuplikan yang tidak ikut pada pemisahan. Misalkan aktivitas mula-mula ialah 1000 cpm dan aktivitas pada zat yang telah dimurnikan ialah 200 cpm maka efisiensi pemisahan ialah $200/1000 = 0,2$.

Jika secara kalorimetri ditemukan bahwa kadar zat dalam cuplikan yang telah dimurnikan ialah 0,050 mg maka jumlah zat dalam cuplikan mula-mula ialah :
 $0,050/0,2 \text{ mg} = 0,25 \text{ mg}$.

Cara terakhir seringkali tidak dimasukkan ke dalam analisis pengenceran tetapi dinamakan penentuan hasil dengan radioisotop.

2). Pengenceran isotop balik. Seringkali ditemukan persoalan bahwa jumlah unsur atau senyawa yang hendak ditentukan dalam suatu cuplikan terlalu sedikit sehingga tidak dapat dipisahkan dari campuran. Hal ini terutama terdapat pada pemisahan unsur radioaktif yang dibentuk dalam suatu reaksi inti.

Dalam hal seperti ini ditambahkan pengencer tidak aktif yang pada dasarnya mempunyai fungsi yang sama dengan pengemban seisisotop. Jumlah pengemban tidak aktif yang ditambahkan umumnya jauh lebih banyak dari zat aktif yang hendak ditentukan.

Setelah keseimbangan, unsur atau senyawa yang hendak ditentukan dipisahkan dan banyaknya zat yang ditemukan kembali merupakan ukuran mengenai banyaknya zat aktif yang ikut terpisahkan.

Misalkan mula-mula terdapat M^* gram zat radioaktif dengan aktivitas jenis S^* dan diencerkan dengan sejumlah M_1 zat tidak aktif, maka aktivitas jenis S_a setelah diencerkan ialah jumlah aktivitas mula-mula m^*S_a dibagi dengan jumlah zat campuran, jadi :

$$S_a = \frac{m^*S^*}{m+m^*} \quad (8.16)$$

$$mS^* - m^*S_a = m S_a$$

$$m^* = \frac{m S_a}{S^* - S_a} \quad (8.17)$$

Jika $m > m^*$, maka $m + m^* \sim m$ dan persamaan (8.16) menjadi :

$$m^* = \frac{S_a}{S^*} m \quad (8.18)$$

Tidak selalu perlu bahwa senyawa yang ditambahkan tidak aktif. Yang perlu ialah bahwa zat yang ditambahkan aktivitas jenisnya berbeda daripada aktivitas jenis zat yang hendak ditentukan.

Jika aktivitas jenis yang ditambahkan ialah S_1 dan beratnya ialah m_1 , maka setelah pencampuran diperoleh aktivitas jenis S_a yang dapat dihitung dari persamaan :

$$(m^* + m) S_a = S^*m^* + S_1m_1$$

karena aktivitas total sebelum dan sesudah pencampuran harus sama. Jika ditulis secara lain diperoleh :

$$S_a = \frac{S^*m^* + S_1m_1}{(m^* + m)} \quad (8.19)$$

Cara pengenceran isotop balik tidak banyak digunakan karena memerlukan dua besaran yang tidak diketahui yaitu S^* dan m^* . Kesulitan ini dapat diatasi dengan menggunakan cara berikut .

3). Metode pengenceran rangkap. Menurut metode ini ke dalam dua buah cuplikan cair yang sama yang mengandung sama banyak zat yang hendak ditentukan, ditambahkan pengencer tidak aktif yang jumlahnya tidak sama, misalnya m_1 dan m_2 , ditambahkan persamaan (8.16) menghasilkan :

$$m^*S^* = S_1(m^* + m_1)$$

$$S_2(m^* + m_2)$$

atau
$$m^* = \frac{S_1m_1 - S_2m_2}{S_1 - S_2} \quad (8.20)$$

dan
$$S^* = \frac{S_1S_2(S_1m_1 - S_2m_2)}{S_1m_1 - S_2m_2} \quad (8.21)$$

4). Metode pengenceran berganda. Digunakan untuk menentukan pengotor dalam jumlah kecil. Cara ini didasarkan pada perubahan aktivitas jenis perunut disebabkan oleh pengenceran cuplikan cair yang jumlahnya berbeda. Jika m_1 mg perunut yang sesuai dengan aktivitas jenis S_0 ditambahkan ke dalam larutan yang mengandung X mg zat yang hendak ditentukan, maka aktivitas jenis campuran ialah :

$$S_1 = \frac{S_0m_1}{m_1 + X}$$

Jika perunut yang ditambahkan ialah m_2 mg, maka aktivitas jenis menjadi :

$$S_2 = \frac{S m_2}{m_2 + X}$$

Kalau dari kedua campuran dipisahkan masing-masing sejumlah Y mg zat yang hendak ditentukan maka mungkin untuk menghitung jumlah zat X yang mula-mula terdapat dalam larutan.

Aktivitas zat yang dipisahkan dari campuran pertama dapat ditulis sebagai :

$$A_1 S_1 = \frac{S m_1}{m_1 + X}$$

dan dari larutan kedua ialah

$$A_2 S_2 = \frac{S m_2}{m_2 + X}$$

Dari kedua persamaan terakhir dengan mudah dapat diturunkan :

$$\frac{A_1 S_1 (m_2 + X)}{A_2 S_2 (m_1 + X)} = \frac{m_2}{m_1}$$

B ialah m_2/m_1 .

Karena pada keadaan tertentu aktivitas zat sebanding dengan kecepatan cacahan maka persamaan terakhir dapat juga ditulis sebagai berikut :

$$X = \frac{m_2(I_2 - I_1)}{B_1 - I_2} \quad (8.22)$$

I_1 dan I_2 masing-masing ialah kecepatan cacahan larutan 1 dan 2. Jadi untuk menentukan kadar zat, diperlukan mengetahui jumlah m_1 dan m_2 perunut yang ditambahkan dan kecepatan cacahan I_1 dan I_2 .

Cara ini menghilangkan kesulitan utama pengenceran isotop yaitu penentuan aktivitas jenis, tetapi masih dapat digunakan untuk menentukan kadar dalam jumlah $10^{-5} - 10^{-7}$ persen. Kesulitan cara ini ialah menentukan suatu cara untuk memisahkan zat yang hendak ditentukan dalam jumlah yang sama.

5). Cara turunan radioisotop. Dalam beberapa hal diperlukan mengukur aktivitas suatu zat dalam campuran tetapi cara analisis biasa tidak dapat digunakan karena kadar zat terlalu sedikit atau karena campuran mengandung zat pengganggu dalam konsentrasi yang sangat besar. Cara pengenceran isotop yang telah disatukan di atas tidak dapat digunakan karena sukarnya untuk memperoleh senyawa bertanda yang diperlukan atau mungkin juga metode isolasi senyawa yang hendak ditentukan terlalu sukar.

Dalam hal seperti ini maka ada kemungkinan bahwa persoalan di atas masih dapat diselesaikan asal saja senyawa tadi dengan penembakan pereaksi bertanda dapat diubah ke dalam turunan bertanda yang lebih mudah diisolasi. Syarat pereaksi bertanda ialah harus bereaksi dengan semua atau hampir semua senyawa yang hendak ditentukan dan turunan yang terjadi harus cukup stabil selama proses selanjutnya.

Asam organik misalnya dapat direaksikan dengan diasometan bertanda C-14 untuk membentuk ester atau dapat juga diubah menjadi garam dengan mereaksikannya dengan logam radioaktif atau dapat direaksikan dengan asam anhidrid atau klorida radioaktif.

Jika turunan bertanda yang terbentuk tidak dapat dipisahkan dalam bentuk murni, maka dapat ditentukan pengemban yang secara kimia sama dengan turunan yang terbentuk. Sebagian turunan yang diinginkan kemudian dipisahkan dalam keadaan murni, kontaminasi aktifnya dicuci dan dicacah aktivitasnya. Jadi tepat sama dengan pengenceran balik yang diuraikan di atas.

Cara pengenceran derivat ini sangat peka dan biasanya hanya ditentukan oleh aktivitas jenis pereaksi bertanda dan banyaknya aktivitas yang hilang pada pemurnian. Reaksi antara pereaksi dengan zat yang hendak ditentukan tidak perlu kuantitatif asal persentase hasil baik dan dapat diulang. Karena dapat digunakan jumlah pengemban yang banyak maka isolasi senyawa yang hendak ditentukan dapat dilakukan dengan cara konvensional.

Walaupun cara ini memperlihatkan kemungkinan besar namun belum banyak dikembangkan dan penggunaannya terbatas pada sistem biologi.

b. Persoalan analisis pengenceran isotop.

Beberapa persoalan penting yang harus diketahui pada cara analisis ini ialah pemilihan isotop, kemurnian zat yang dipisahkan serta ketelitiannya.

1). Seleksi perunut. Syarat utama ialah perunut harus berada dalam kemurnian kimia dan radiokimia yang tinggi. Umur paro isotop radioaktif harus cukup besar

agar tidak timbul gangguan perubahan aktivitas selama analisis berlangsung disebabkan karena peluruhan. Energi yang dipancarkan harus dapat diukur dengan mudah. Kalau terpaksa memakai radioisotop dengan umur paro pendek maka koreksi karena peluruhan harus dilakukan. Koreksi ini dapat dilakukan dengan menyiapkan dua cuplikan radioaktif sebelum percobaan, satu digunakan sebagai pengemban, yang lain sebagai pembanding. Dengan jalan mencacah secara simultan zat yang dipisahkan bersama zat pembanding, koreksi karena peluruhan dapat dilakukan.

Koreksi juga dapat dikerjakan dengan perhitungan yang menggunakan rumus :

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Keadaan tingkat oksidasi unsur juga perlu diketahui. Jika terdapat lebih dari satu keadaan valensi, maka analisis harus dilakukan sedemikian agar valensi perunut dan zat yang hendak ditentukan berada dalam keadaan yang sama.

Untuk memudahkan dan memastikan terjadinya keseimbangan isotop antara perunut dan zat yang hendak ditentukan maka sebaiknya digunakan perunut dalam bentuk senyawa yang identik dengan senyawa yang hendak ditentukan.

Selain senyawa harus stabil terhadap oksidasi dan penguraian dan radioisotop pengenalnya tidak mengadakan reaksi pertukaran dengan senyawa lain selama percobaan. Demikian pula perunut radioaktif harus stabil selama penyimpanan.

Terutama dalam larutan, radioaktivitas tinggi mungkin menimbulkan reaksi imbas. Untuk menghindari kesulitan ini maka larutan harus diencerkan dan sedapat mungkin disimpan dalam tempat yang dingin.

2). Kemurnian zat yang dipisahkan. Hal lain yang penting sekali untuk diperhatikan ialah kemurnian senyawa yang dipisahkan, kemurnian mempengaruhi ketelitian penimbangan endapan atau cara penentuan lain yang digunakan untuk menentukan hasil pemisahan. Pada umumnya pemisahan dan pemurnian harus dilakukan sedemikian rupa sehingga diperoleh endapan atau larutan dengan aktivitas jenis yang tetap. Aktivitas jenis yang tidak berubah lagi pada pemurnian selanjutnya dapat digunakan sebagai ukuran kemurnian zat.

Persoalan kemurnian ini tidak penting pada metode pengenceran berganda karena pada cara ini yang dipentingkan ialah bagaimana memisahkan sejumlah zat yang banyaknya sama.

3). Ketelitian cara pengenceran isotop. Ketelitian cara ini bergantung pada beberapa faktor, antara lain persentase zat yang dipisahkan, konsentrasi zat dalam

campuran mula-mula, perbandingan antara jumlah perunut dalam larutan yang diselidiki.

Kebanyakan faktor ini harus ditentukan secara eksperimen. Selain itu ketelitian juga bergantung pada aktivitas jenis perunut yang ditambahkan dan campuran yang dipisahkan. Faktor lain ialah ketelitian konsentrasi misalnya pada penimbangan atau penentuan lain.

8.1.3. Analisis Radiometrik

Analisis radiometrik merupakan suatu cara analisis kuantitatif yang berdasarkan pada pembentukan senyawa radioaktif dalam kelarutan yang cukup berbeda daripada kelarutan zat radioaktif mula-mula. Cara ini dapat digunakan untuk menentukan tiap senyawa maupun unsur asalkan dipenuhi syarat berikut.

Pertama ialah harus adanya pereaksi radioaktif yang sesuai dan yang dapat membentuk turunan dengan zat yang hendak ditentukan. Kedua ialah reaksi yang terjadi harus berlangsung sempurna atau hampir sempurna ke satu arah, dan ketiga ialah senyawa turunan yang terbentuk dapat dipisahkan dari pereaksi berlebih.

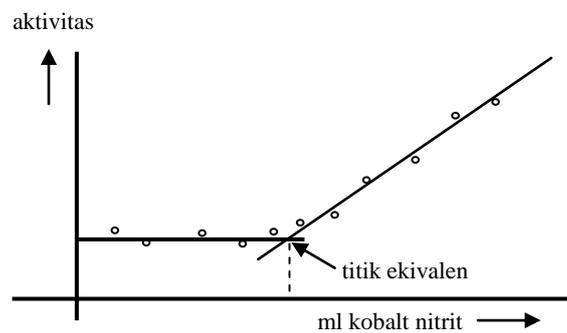
Suatu kation radioaktif dapat digunakan menentukan anion tidak aktif dan sebaliknya anion radioaktif untuk menentukan kation tidak aktif. Senyawa pembentuk kompleks yang radioaktif, seperti misalnya pembentukan senyawa sepipt, juga dapat digunakan. Demikian pula pereaksi organik bertanda- ^{14}C dapat digunakan untuk membentuk senyawa turunan misalnya amin sekunder dapat direaksikan dengan anhidrid asam cuka bertanda- ^{14}C untuk membentuk amida yang aktivitas jenisnya pada tiap gugus asetil sama dengan aktivitas jenis pereaksi. Beberapa contoh analisis radiometrik ialah sebagai berikut.

a. Titrasi pembentukan endapan.

Sebagai contoh dapat diambil titrasi penentuan kalium dengan menggunakan kobaltinitrit yang ditandai dengan Co-60 yang membentuk endapan radioaktif. Aktivitas larutan yang berada di atas endapan ditentukan setiap kali selesai menambahkan larutan pereaksi dengan jalan setiap kali mengambil 1 ml atau lebih larutan dan mengukur aktivitasnya dengan alat pencacah Geiger atau sintilasi. Sebelum titik ekuivalen tercapai aktivitas dalam larutan hanya disebabkan ion kobaltinitrit yang berasal dari kelarutan endapan. Segera setelah titik ekuivalen dilampaui maka larutan akan mengandung ion kobaltinitrit berlebih dan oleh karena itu aktivitas bertambah. Kalau dibuat denah aktivitas larutan terhadap mililiter pereaksi yang ditambahkan diperoleh kurva yang menyerupai kurva titrasi konduktometri (lihat Gambar 8.2). Titik akhir titrasi ditentukan sebagai titik potong kedua garis yang menghubungkan titik-titik eksperimen.

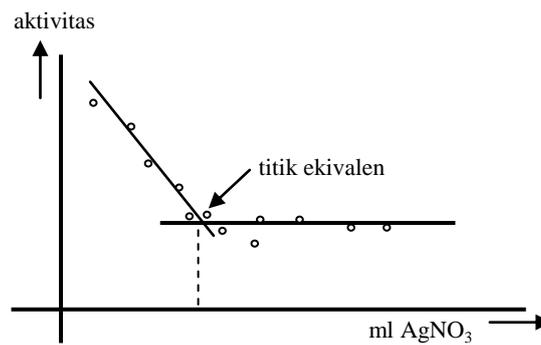
Pengukuran aktivitas larutan dapat dilakukan dengan pengukur Geiger atau dengan pengukur sintilasi.

Variasi lain ialah penambahan ion perunut radioaktif yang sama dengan zat yang hendak ditentukan dan perubahan aktivitas larutan dengan penambahan pereaksi ditentukan.



Gambar 8.2. Titrasi konduktometri.

Pada akhir titrasi semua ion aktif mengendap kecuali yang berasal dari kelarutan endapan oleh karena itu penambahan pereaksi berlebih tidak mengubah aktivitas larutan. Sebagai contoh misalnya ialah penentuan khlorida dalam larutan secara titrasi dengan perak nitrat. Sebelum titrasi dimulai ditambahkan perunut Cl^{-35} dan perubahan aktivitas perunut dengan penambahan perak nitrat diikuti. Hasilnya seperti tertera pada Gambar 8.3.



Gambar 8.3. Titrasi konduktometri.

b. Penambahan pereaksi pengendap berlebih

Cara ini merupakan modifikasi cara a yang diuraikan di atas. Pada cara ini pereaksi ditambahkan sekaligus ke dalam larutan yang hendak ditentukan, kemudian aktivitas filtrat dicacah untuk mengetahui jumlah pereaksi radioaktif yang bereaksi.

Selisih yang ditambahkan dengan yang ditemukan dalam filtrat menyatakan jumlah yang bereaksi sehingga zat yang mula-mula terdapat dalam larutan dapat dihitung.

Kemungkinan lain ialah mencacah aktivitas endapan. Perlu dikemukakan di sini bahwa dalam hal ini tidak diperlukan menimbang endapan yang terjadi karena jika aktivitas jenis zat pereaksi yang ditambahkan diketahui maka aktivitas yang terdapat pada endapan dapat digunakan untuk menghitung Mol zat pereaksi yang bereaksi. Dari jumlah ini dan stoikiometri reaksi jumlah zat yang mula-mula terdapat dalam larutan dapat ditentukan. Penimbangan hanya dilakukan jika diinginkan untuk mengadakan koreksi peresapan sinar dalam endapan misalnya pada pengukuran β . Keuntungan cara ini ialah air pelarut dan mungkin pengotor yang ikut pada endapan tidak akan mengganggu penentuan. Keuntungan lain ialah konsentrasi kecil dapat ditentukan dengan baik karena seperti diuraikan di atas endapan yang terjadi tidak perlu ditimbang dan dalam konsentrasi kecil peresapan sendiri oleh endapan dapat diabaikan.

Cara terakhir ini seringkali dilakukan sebagai berikut. Zat radioaktif yang diketahui jumlahnya ditetaskan pada secarik kertas saring kemudian zat yang hendak ditentukan ditetaskan pada noda pereaksi tadi, endapan yang terjadi dicuci dengan jalan membiarkan air melewati endapan seperti pada khromatografi kertas. Aktivitas endapan kemudian dicacah dan jumlah zat mula-mula yang ada dalam zat dihitung.

c. Cara lain

Kemungkinan lain yang perlu disebutkan ialah penggunaan endapan radioaktif sebagai indikator. Menurut metode ini larutan yang hendak ditentukan dititrasi bersama-sama dengan indikator dalam bentuk endapan radioaktif. Segera setelah titik ekuivalen tercapai kelebihan pereaksi menyebabkan larutan zat radioaktif menjadi indikator dan aktivitas larutan bertambah.

8.1.4. Evaluasi Cara Analitik

Selain penggunaan kuantitatif yang telah diuraikan maka masih ditemukan beberapa lagi penggunaan perunut dalam kimia analitik.

Seorang ahli kimia analitik misalnya dalam saat-saat tertentu mungkin perlu sekali untuk menilai cara-cara analitik untuk menentukan apakah metode yang digunakannya memberikan hasil yang betul. Misalnya pada saat suatu cara analitik baru

hendak diterapkan pada suatu campuran yang belum diketahui. Dalam hal seperti ini umumnya dapat digunakan campuran buatan yang telah diketahui susunannya kemudian dianalisis dengan cara yang hendak dinilai. Tetapi kesulitannya ialah seringkali diperlukan menyiapkan banyak contoh cuplikan yang disesuaikan dengan bermacam-macam faktor yang mungkin mengganggu sehingga waktu serta tenaga yang diperlukan sangat banyak. Selain itu susunan dan sifat sebenarnya zat yang hendak ditentukan mungkin terlalu rumit sehingga tidak mungkin untuk menyiapkan suatu contoh.

Jika persoalan analitik dapat dikembalikan pada persoalan kesempurnaan suatu pemindahan atau pemisahan massa, maka kemungkinan besar bahwa penggunaan perunut radioaktif dapat menghasilkan jawaban yang cepat, teliti lagi pula lebih murah.

Ke dalam campuran ditambahkan perunut radioaktif dan analisis dilaksanakan menurut prosedur yang hendak dinilai. Jalan yang tidak diinginkan diikuti dengan jalan mengikuti arah jalan yang dilalui oleh perunut.

Oleh karena massa suatu zat radioaktif berbanding langsung dengan aktivitasnya, dan umumnya tidak dipengaruhi oleh adanya zat lain dan juga tidak dipengaruhi oleh sifat fisik zat, misalnya cair atau padat, bening atau suram, berwarna atau tidak, dan lain-lain, maka konsentrasi zat dalam setiap larutan analisis dapat diperiksa. Dengan demikian kesulitan yang mungkin ditemukan dapat ditentukan, demikian pula efisiensi keseluruhan analisis dapat diukur. Karena kepekaan pengukuran zat radioaktif maka jumlah perunut yang digunakan tidak perlu besar sehingga sistem tidak berubah. Selain dari itu konsentrasi kecil suatu zat yang ketinggalan pada setiap langkah, yang dengan cara-cara biasa sudah sukar untuk ditentukan, dengan cara ini masih bisa diukur.

Demikian misalnya radioisotop dapat digunakan untuk menilai kesempurnaan pada pengendapan, pada penentuan koefisien distribusi suatu ekstraksi pelarut, kehilangan zat pada pemanasan, penentuan persentase logam pengganggu yang ikut melekat pada penyepuhan secara elektrolisis, semuanya dapat ditentukan dengan menggunakan perunut radioisotop.

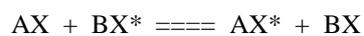
8.2. PENGGUNAAN PERUNUT DALAM CABANG KIMIA YANG LAIN

Cara analitik yang diuraikan dalam bab sebelum ini sudah jelas dapat pula digunakan dalam cabang ilmu kimia yang lain. Selanjutnya dalam berbagai bidang kimia radioisotop dapat digunakan untuk menentukan mekanisme reaksi, kecepatan

reaksi, kecepatan pertukaran, penentuan bangun molekul, penentuan kecepatan berdifusi dan bermacam-macam penggunaan yang lain.

8.2.1. Reaksi Pertukaran

Misalkan reaksi pertukaran dapat dinyatakan dengan persamaan reaksi :



X* ialah isotop radioaktif unsur X. Dalam penurunan rumus di bawah ini dianggap bahwa perubahan karena peluruhan dapat diabaikan. Kecepatan reaksi antara AX + BX* dalam keadaan seimbang ialah R dan dinyatakan dalam satuan Mol tiap liter tiap detik. R tidak bergantung pada konsentrasi zat aktif X*, tetapi hanya bergantung pada jumlah jenis AX + AX* dan BX + BX*. Selanjutnya dimisalkan bahwa :

$$\begin{aligned} (AX + AX^*) &= a \\ (BX + BX^*) &= b \\ (AX^*) &= x \\ (BX^*) &= y. \end{aligned}$$

Kecepatan pertambahan (AX*) ialah kecepatan pembentukan dikurangi dengan kecepatan penguraiannya kembali membentuk zat yang bereaksi.

Kecepatan pembentukannya tiap satuan waktu dinyatakan oleh kecepatan perpindahan atom radioaktif dari BX* ke molekul AX dan sebanding dengan fraksi zat BX yang radioaktif, tidak aktif (a-x)/a. Kecepatan penguraiannya kembali tiap satuan waktu sebanding dengan fraksi AX yang radioaktif, x/a, dikalikan dengan fraksi BX yang tidak aktif (b-y)/b.

Dinyatakan dalam persamaan diferensial maka kecepatan pertambahan (AX*) ialah :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= R \left(\frac{y}{b} - \frac{x}{a} \right) \\ &= R \left(\frac{y}{b} - \frac{x}{a} \right) \end{aligned} \quad (8.23)$$

R ialah kecepatan pertukaran yang disebutkan di atas.

Untuk suatu waktu yang cukup lama $t \rightarrow \infty$, maka $x = x_{\infty}$ dan $y = y_{\infty}$. Syarat kekekalan atom radioaktif (setelah dikoreksi dengan kehilangan karena umur paruh) mengharuskan bahwa :

$$x + y = x_{\infty} + y_{\infty} \quad (8.24)$$

Selanjutnya pada $t \rightarrow \infty$ reaksi pertukaran menjadi sempurna, yang berarti bahwa $dx/dt = 0$ sehingga persamaan (8.23) menjadi :

$$R \left(\frac{y_{\infty}}{b} - \frac{x_{\infty}}{a} \right) = 0$$

atau

$$\frac{x_{\infty}}{a} = \frac{y_{\infty}}{b} \quad (8.25)$$

Persamaan (8.25) menyatakan bahwa pada keseimbangan aktivitas jenis, yaitu aktivitas tiap Mol atau tiap gram dalam kedua jenis zat kimia yang mengadakan pertukaran sama besar.

Jika persamaan (8.24) dan (8.25) disubstitusikan ke dalam persamaan (8.23) :

$$\frac{dx}{dt} = -R \left(\frac{a+b}{ab} \right) (x - x_{\infty}) \quad (8.26)$$

yang setelah diintegrasikan menghasilkan :

$$\ln \frac{x - x_{\infty}}{x_0 - x_{\infty}} = -R \left(\frac{a+b}{ab} \right) t \quad (8.27)$$

x_0 ialah harga x pada titik $t = 0$. Jika $x_0 = 0$ yaitu permulaan reaksi hanya terdapat BX^* saja yang radioaktif, dan jika $x_{\infty}/x_0 = F$, yaitu fraksi kesempurnaan pertukaran, diperoleh :

$$x = x_{\infty} \left(1 - e^{-R \left(\frac{a+b}{ab} \right) t} \right) \quad (8.28)$$

atau

$$F = \frac{x}{x_{\infty}} = 1 - e^{-R \left(\frac{a+b}{ab} \right) t} \quad (8.28b)$$

Persamaan (8.28) menyatakan bahwa R dapat diperoleh dari kurve antara $(1-F)$ dalam kertas semilog, terhadap t .

Koefisien arah kurve yang diperoleh sama dengan $\frac{(ab)^x R}{ab^{23C}}$. Jalan lain untuk memperoleh harga R ialah dengan jalan membaca $T_{1/2}$ yaitu waktu yang diperlukan agar $F = 1/2$ dan mensubstitusikan harga $T_{1/2}$ ini ke dalam persamaan (8.28b), menghasilkan :

$$\frac{1}{2} = \exp\left(\frac{-abR}{ab}\right)$$

atau

$$R = \frac{ab \ln 2}{ab T_{1/2}}$$

Perlu dijelaskan di sini bahwa dalam praktek mungkin ditemukan reaksi pertukaran molekul yang rumusnya bukan lagi AX atau BX melainkan AX_n dan BX_n . Dalam hal seperti ini asal saja atom X dalam molekul ekuivalen maka persamaan yang telah diturunkan masih dapat digunakan asal saja cara menyatakan konsentrasi disesuaikan, yaitu dinyatakan dengan jumlah gram atom X dalam Mol AX dan AX_2 dan sebagainya.

8.2.2. Kinetika dan Mekanisme Reaksi

Dalam bab ini akan dibahas beberapa contoh penggunaan perunut dalam penelitian mengenai kinetika dan mekanisme reaksi. Sebagai contoh pertama akan ditinjau reaksi :



Dalam kimia fisika tetapan keseimbangan K didefinisikan sebagai

$$K = \frac{k_1}{k_2} \quad (8.29)$$

k_1 dan k_2 masing-masing ialah kecepatan reaksi ke kanan dan kecepatan ke kiri menurut persamaan reaksi di atas. K biasanya ditentukan pada keadaan keseimbangan sedang baik k_1 maupun k_2 selalu ditentukan pada suatu keadaan yang jauh dari titik keseimbangan.

Dengan menggunakan isotop arsen yang radioaktif untuk mengukur kecepatan pertukaran antara ion arsenit dan arsenat hukum kecepatan dan tetapan keseimbangan dapat ditentukan. **J.M. Wilson** dan **R.G. Dickinson** menemukan hubungan :

~~WALDEN~~

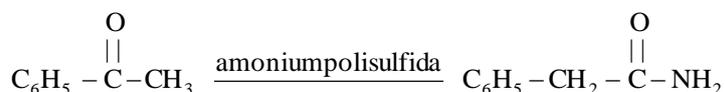
Dengan k_2 sebesar $0,057 \text{ liter}^{-2} \text{ Mol}^{-2} \text{ men}^{-1}$, yang sesuai dengan hasil yang diperoleh dari pengukuran biasa yang jauh dari keseimbangan.

Contoh berikut ialah mekanisme inversi **Walden** atau yang seringkali juga disebut mekanisme penggantian bimolekular :



Penggantian dilakukan oleh gugus yang sama tetapi ditemukan bahwa jika molekul mula-mula aktif-optik maka hasil reaksi penggantian merupakan suatu campuran rasemik. Dengan menggunakan iodium radioaktif dapat ditunjukkan bahwa kecepatan pertukaran sama dengan kecepatan rasemisasi yang menunjukkan bahwa mekanisme memang melalui pertukaran.

Pada penyusunan **Wilgerodt** :



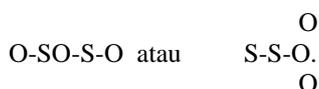
Pertanyaan yang mungkin timbul ialah apakah lingkaran benzena berpindah ke karbon metil ataukah karbon rantai samping mengubah tingkat oksidasinya dan kemudian mengadakan substitusi? Dengan menggunakan asetofenon dengan atom C karbonil bertanda C-14 dan kemudian mereaksikannya menurut persamaan reaksi di atas dan hasil reaksi yang terjadi dihidrolisis membentuk asam fenil asetat, yang kemudian didekarboksilasi, dapat ditunjukkan bahwa hampir semua aktivitas tetap tinggal dalam ikatan dengan benzena.

Hal ini menunjukkan bahwa benzena tidak berpindah tempat, karena kalau demikian halnya maka sebagian besar aktivitas akan ditemukan dalam karbon dioksida yang terbentuk pada dekarboksilasi.

Pada reaksi organik tertentu dapat terjadi bahwa suatu reaksi membentuk lebih dahulu zat antara dan baru zat antara ini yang kemudian membentuk hasil terakhir. Adanya zat antara ini biasanya disokong oleh kenyataan bahwa zat antara dapat bereaksi membentuk zat akhir. Untuk memeriksa apakah misalnya suatu zat B merupakan zat antara dalam pembentukan zat C dari zat A, maka dapat dilakukan percobaan berikut. Buat zat A yang ditandai dengan zat radioaktif. Campurkan zat A yang radioaktif ini dengan zat B yang tidak aktif, kemudian lakukan reaksi untuk

membentuk zat C. Pisahkan sedikit zat B sebelum semuanya habis bereaksi membentuk zat C. Jika zat B radioaktif, maka ini membuktikan bahwa zat B memang merupakan zat antara.

Contoh klasik yang lain tentang penggunaan radioisotop untuk penentuan struktur suatu molekul ialah penentuan struktur ion tiosulfat $S_2O_3^{2-}$. Pertanyaan ialah apakah kedua atom S dalam ion tersebut terikat secara simetrik atau tidak,



Pertanyaan ini dapat dijawab dengan memanaskan unsur S-35 dengan Na_2SO_3 membentuk tiosulfat :



Kemudian tiosulfat yang terjadi diuraikan dengan menggunakan asam :



Ternyata bahwa semua atom S-35 terdapat dalam belerang yang dipisahkan. Hal ini membuktikan bahwa kedua atom belerang dalam molekul tiosulfat, tidak setara.

8.3. RADIOISOTOP SEBAGAI SUMBER RADIASI

Seperti telah diuraikan dalam permulaan bab ini radioisotop dapat digunakan sebagai pengganti mesin sinar X. Dalam hal ini dapat digunakan sinar gamma yang dipancarkan ataupun dengan menggunakan sinar beta yang selanjutnya dapat mengeksitasi sinar X-K khas unsur yang ditembaki. Beberapa contoh penggunaan radioisotop sebagai sumber radiasi akan diuraikan dalam fasal berikut.

8.3.1. Peresapan dan Penghamburan Balik Radiasi Beta

Walaupun cara peresapan dan penghamburan balik ini kebanyakan digunakan untuk mengukur tebal lembaran atau lapisan, namun cara ini dapat pula digunakan sebagai alat analitik, terutama pada penentuan campuran biner, misalnya logam paduan, larutan, perbandingan C terhadap H, dan beberapa penggunaan lain. Penggunaan bersama cara penghamburan dengan peresapan telah digunakan untuk penentuan

secara kuantitatif unsur hidrogen, karbon, nitrogen, oksigen dan fluor dalam senyawa biner dan terner.

Dari eksperimen ditemukan bahwa baik penghamburan maupun peresapan radiasi beta bergantung pada nomor atom zat peresap. Untuk tebal peresap yang tidak seberapa dapat digunakan rumus :

$$I = f(A) \quad (8.30)$$

dengan

$$A = \frac{\sum w_i S_i}{A} \quad (8.31)$$

I ialah intensitas radiasi beta yang diteruskan, A penampang total, rapat massa zat, w_i , S_i dan A_i masing-masing ialah fraksi berat, tampang resapan atom dan berat atom unsur i. Dengan menggunakan zat yang telah diketahui harga tampang resapan atomnya, maka dapat dibuat denah I terhadap A yang diukur.

P.R. Gray, D.H. Clary dan W.H. Beamer menurunkan persamaan yang menyatakan hubungan antara jumlah radiasi beta, yang dihamburkan pada sudut θ sebagai fungsi nomor atom penghambur, jumlah inti penghambur dan beberapa besaran yang lain :

$$n(\theta) = \sum AN_i Z_i f(\theta) + BZ_i + \sum_i CN_i Z_i f(\theta) \quad (8.32)$$

$n(\theta)$ ialah jumlah elektron yang dihamburkan melalui sudut sebesar θ , N jumlah inti penghambur, Z nomor atom, $f(\theta)$, B dan C masing-masing tetapan.

Persamaan (8.32) dapat ditulis dalam bentuk yang lain :

$$n(\theta) = \sum_i \{ AZ_i [f(\theta) + BZ_i] + Cf'(\theta) \} N_i Z_i \quad (8.33)$$

suku $\{ AZ_i [f(\theta) + BZ_i] + Cf'(\theta) \} = K_i$ merupakan tetapan untuk tiap unsur dan dinamakan tetapan penghambur balik unsur K_i . Oleh karena itu persamaan (8.33) menjadi :

$$n(\theta) = \sum K_i N_i Z_i \quad (8.34)$$

Jadi menurut persamaan (8.34) jumlah elektron yang dihamburkan melalui sudut θ , akan bergantung pada tetapan unsur K_i dan $N_i Z_i$, yaitu jumlah muatan inti tiap cm^3 . Yang terakhir ini bergantung pada rapat massa cuplikan menurut persamaan :

$$\rho = \frac{\sum N_i Z_i A_i}{V} \quad (8.35)$$

Sehingga persamaan (8.35) harus diubah sebelum dapat digunakan langsung.

Untuk menghindari kesulitan penggunaan rapat massa maka besaran $N_i Z_i$, jumlah muatan inti tiap cm^3 , dapat diganti dengan rapat muatan yang didefinisikan sebagai :

$$\rho_i = \frac{N_i Z_i}{V} \quad (8.36)$$

w_i , Z_i dan A_i masing-masing ialah fraksi berat, nomor atom dan berat atom unsur i . Ternyata bahwa elektron lintasan mempengaruhi harga Z_i menyebabkan bahwa besar muatan inti seolah-olah berkurang menjadi Z_i yang disebut nomor atom efektif.

Akhirnya diperoleh persamaan untuk hambungran dalam bentuk :

$$\rho = \frac{\sum w_i Z_i A_i}{\sum w_i A_i} \quad (8.37)$$

Persamaan (8.37) dan persamaan (8.30) serta (8.31) dapat digunakan untuk menentukan senyawa terner dan biner secara kuantitatif. Pembicaraan secara mendalam dapat ditemukan dalam artikel Gray dan kawan-kawan.

Perlu ditunjukkan di sini bahwa untuk suatu sistem berlaku : $\sum w_i = 1$ yaitu jumlah fraksi berat komponen cuplikan harus sama dengan satu.

8.3.2. Radiografi dan Autoradiografi

Radiografi ialah pemotretan bagian dalam suatu benda dengan menggunakan radiasi menembus seperti misalnya radiasi X, radiasi gamma atau radiasi neutron. Dengan cara ini tempat lowong atau ketidaksempurnaan pada suatu kristal atau suatu benda, yang dari luar sukar dilihat, dengan jalan ini dapat ditentukan.

Dalam penggunaannya untuk radiografi, radioisotop atau radiasi X saling isi mengisi. Radiasi X lebih cepat karena intensitasnya lebih tinggi dibandingkan dengan radioisotop.

Selain dari itu pada mesin radiasi X tidak ada bahaya kontaminasi, lagi pula energinya dapat diatur. Di lain pihak radioisotop lebih murah dan tidak memerlukan

sumber tegangan tinggi serta tidak memerlukan pendinginan, sehingga memungkinkan penggunaannya di tempat yang terpencil. Demikian pula ukuran radioisotop jauh lebih kecil, sehingga dapat digunakan di tempat yang tidak memungkinkan penggunaan radiasi X.

Selain pemancar gamma dapat pula digunakan isotop pemancar beta untuk menghasilkan radiasi X. Partikel beta berenergi tinggi yang dipancarkan jika mengenai unsur berat akan menghasilkan radiasi X. Radiasi beta sendiri dapat juga digunakan untuk radiografi benda tipis, tetapi cara ini jarang digunakan karena radiasi X lebih baik.

Neutron menunjukkan suatu kemungkinan besar untuk digunakan dalam radiografi. Pada penggunaan radiasi X atau radiasi gamma, dua unsur yang berdekatan tempatnya dalam sistem berkala mempunyai koefisien resapan linear yang hampir sama sehingga sukar untuk ditentukan.

Pada penggunaan neutron, tidak demikian halnya, koefisien resapan linear dua buah unsur yang berdekatan letaknya mungkin tidak memperlihatkan kesamaan. Selain itu koefisien linear neutron pada unsur yang lebih ringan umumnya lebih besar daripada koefisien resapan radiasi gamma atau radiasi X, sehingga radiografi neutron lebih mungkin untuk dilakukan.

Pada a u t o r a d i o g r a f i penyinaran tidak dilakukan dari luar tetapi berasal dari zat radioaktif yang berada dalam benda atau senyawa. Cara ini yang banyak dalam kimia terutama dalam biokimia untuk menentukan distribusi serta posisi unsur radioaktif, baik dalam jaringan hewan maupun dalam percobaan seperti khromatografi kertas dan penelitian mengenai pengambilan unsur ke dalam daun tumbuh-tumbuhan.

Pelaksanaan cara autoradiografi ialah mempersinggungkan permukaan rata cuplikan yang hendak dipotret dengan emulsi film. Daerah serta tempat yang mengandung radioisotop akan menyinari emulsi sehingga film setelah dicuci akan memperlihatkan tempat yang bekas diradiasi.

Resolusi autoradiografi bergantung pada banyak faktor antara lain pada kehalusan butir emulsi, makin halus butir-butir ini makin tinggi waktu radiasi dan makin jelas penghitaman yang terjadi pada emulsi.

8.3.3. Eksitasi Radiasi X dengan Partikel Beta

Dalam bab yang lalu telah dikemukakan bahwa partikel beta dapat pula digunakan untuk mengeksitasi radiasi X- K_{α} unsur sasaran. **R.H. Muller** menemukan bahwa

radiasi X ini selain dapat digunakan untuk keperluan lain, dapat pula digunakan langsung menentukan tebal sasaran (pada sasaran tipis).

Muller menunjukkan bahwa radiasi X yang keluar dari belakang (transmisi), intensitasnya dinyatakan oleh persamaan :

$$I = a t e^{-bt} \quad (8.38)$$

I ialah intensitas dalam cacahan tiap detik atau tiap menit, t ialah tebal dalam satuan panjang atau miligram tiap cm^2 . dan a serta b merupakan tetapan yang bergantung pada I dan t, dan dapat ditentukan secara eksperimen.

Jika persamaan (8.38) didiferensiasi dan kemudian disamakan dengan nol diperoleh:

$$t_{\text{optimum}} = \frac{1}{b} \quad \text{dan} \quad I_{\text{optimum}} = \frac{a}{e}$$

Untuk radiasi X yang dipantulkan kembali ke arah datangnya radiasi beta penembak, Muller memberikan hubungan :

$$I = \frac{at}{1+bt} \quad (8.39)$$

Harga tetapan a dan b diperoleh secara eksperimen dengan membuat denah t/I terhadap t.

R.E. Pegg dan **J.S. Pollack** menggunakan pembentukan radiasi X oleh radiasi beta untuk menentukan belerang secara kontinu dalam pemurnian minyak bumi. Karena besarnya perbedaan peresapan radiasi X lemah pada belerang jika dibandingkan dengan pada unsur karbon dan hidrogen, maka intensitas radiasi yang diteruskan akan sangat bergantung pada kadar belerang dalam minyak. Dalam hal ini radiasi beta yang berasal dari tritium digunakan untuk mengeksitasi radiasi X, dan radiasi X ini yang dilakukan pada cuplikan yang hendak ditentukan. Intensitas radiasi X yang keluar dari cuplikan diukur. Dengan menggunakan kurve kalibrasi intensitas terhadap kadar belerang, maka kadar belerang dalam cuplikan dapat ditentukan dengan cepat, mudah dan murah.

8.4. CARA PENANDAAN

Walaupun cara penandaan ini seharusnya dimasukkan ke dalam bab yang terdahulu namun karena penggunaannya serta perkembangannya lebih banyak dimulai dari kimia maka dalam bab ini akan dibahas beberapa metode untuk menandai atom atau molekul.

a. Penandaan dengan cara aktivasi

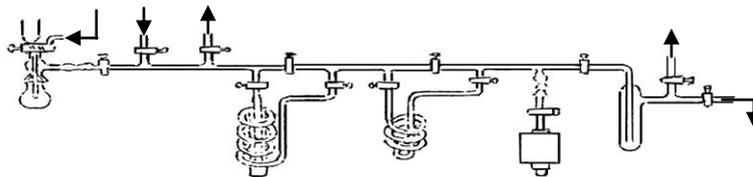
Selain menggunakan neutron dapat pula digunakan partikel bermuatan yang berasal dari alat pemercepat partikel, seperti misalnya pemercepat linear, siklotron, sinkro-siklotron dan lain-lain.

Jika diinginkan hanya menjadikan suatu cuplikan radioaktif tanpa memperhatikan unsur yang sama yang radioaktif maka iradiasi dalam reaktor dapat dilakukan. Tetapi kalau ingin aktivasi bagian luar saja atau kalau diinginkan reaksi yang khas, maka iradiasi lebih baik dilakukan dengan partikel bermuatan.

b. Cara sintesis kimia

Pada umumnya cara sintesis kimia biasa dapat digunakan untuk menandai molekul. Hanyalah harus diperhatikan bahwa penggunaan zat radioaktif memerlukan beberapa cara khusus.

- 1). Radioisotop biasanya dijual atau dapat dipesan dalam bentuk senyawa sederhana dan seringkali sintesis melalui cara yang biasanya jarang digunakan. Sebagai contoh ialah sintesis senyawa bertanda C-14, hampir seluruhnya harus dimulai dari $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$.
- 2). Radioisotop biasanya sangat mahal sehingga cara biasa seringkali harus diperbaiki lebih dahulu untuk memperoleh hasil yang tinggi. Penggunaan zat radioaktif berlebih sukar untuk dipertanggungjawabkan baik dari segi bahaya radiasi maupun dari segi ongkos. Pada pembuatan asam karboksilat, misalnya, jika digunakan reaksi Grignard biasanya memerlukan CO_2 berlebih. Hal ini sudah jelas tidak dapat dilakukan dengan $^{14}\text{CO}_2$. Malahan semua reaksi harus dilakukan dalam skala mikro untuk menghindari pemaparan para pekerja terhadap radiasi.
- 3). Pada umumnya jika mungkin maka sebaiknya bekerja dengan teknik rangkaian vakum (lihat Gambar 8.4). Hal ini sangat penting karena pada umumnya jumlah zat radioaktif yang digunakan sangat kecil sehingga kalau hendak digunakan cara reaksi biasa dengan bejana kimia dengan jalan menuangkan dan memipet, dan lain-lainnya, maka besar kemungkinan sebelum langkah terakhir dicapai, zat radioaktif yang digunakan telah habis tercecer dalam tahap-tahap sebelumnya. Pada penggunaan teknik vakum, zat sebelum direaksikan semuanya dijadikan bentuk gas yang menyebabkan volume bertambah besar (18 gram air pada 0°C dan 1 atmosfer, volumenya 22,5 liter), dan kalau sebagian gas ini hilang di tengah jalan maka persentase zat yang hilang lebih sedikit.



Gambar 8.4 Bagan suatu rangkaian teknik vakum untuk sintesis dan penandaan

Selain itu gas ini dapat dengan mudah dipindahkan dari satu tempat ke tempat yang lain dengan hanya mengatur sistem vakum yang digunakan serta dengan jalan membekukan zat yang hendak ditampung.

- 4). Untuk menghindari kehilangan zat radioaktif maka perlu digunakan reaksi sintesis yang memungkinkan penemuan kembali zat radioaktif dari hasil reaksi samping. Demi penghematan zat radioaktif maka sebaiknya reaksi dengan atom radioaktif dilakukan baru pada tahap akhir sintesis.

c. Reaksi pertukaran

Pada cara ini atom radioaktif dipertukarkan dengan atom tidak aktif yang terdapat dalam molekul senyawa yang hendak ditandai (lihat bab 8.2), Cara ini digunakan terutama pada penandaan hidrogen dan halogen.

Pertukaran hidrogen yang terikat pada atom karbon dapat dilakukan dengan menggunakan asam sulfat bertanda (T_2SO_4). Dalam beberapa hal dapat pula digunakan gas tritium dengan logam sebagai katalis untuk melangsungkan pertukaran.

Cara pertukaran mempunyai kekurangan yaitu sukarnya mengendalikan posisi yang dipertukarkan. Atom hidrogen yang dipertukarkan, misalnya, dapat berasal dari berbagai tempat dalam molekul dan hasil yang diperoleh dapat beraneka ragam. Dalam beberapa penggunaan, hal ini mungkin tidak merupakan persoalan kalau molekul yang ditandai hanya dimaksudkan untuk mengikuti proses dan tidak diperlukan mengetahui tempat atom bertanda dalam molekul.

Selain itu cara pertukaran ini mungkin menempatkan atom bertanda dalam posisi yang labil yang mudah dipertukarkan kembali, misalnya jika dilarutkan dalam air.

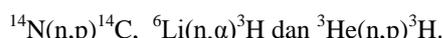
Hal ini perlu diperiksa dengan jalan melarutkan berulang-ulang dan menguapkan kembali, dengan jalan ini atom penanda yang tidak terkait dengan baik akan dikeluarkan dari molekul dan yang tinggal hanyalah yang terikat kuat.

d. Cara penandaan lain

Cara recoil untuk membentuk unsur radioaktif yang bebas pengemban telah dibicarakan dalam bab 5.5.6. dalam buku ke satu. Seperti telah diuraikan dalam fasal

tersebut atom panas yang terbentuk dapat membentuk radikal bebas, yang selanjutnya dapat lagi melakukan reaksi membentuk senyawa bertanda.

Pada umumnya cara rekoil ini hanya digunakan untuk membentuk senyawa yang ditandai dengan C-14 dan tritium. Reaksi yang digunakan ialah :

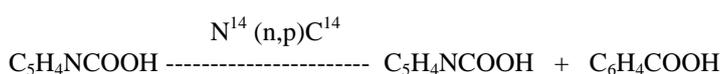


Sebagai sumber nitrogen dapat digunakan senyawa yang molekulnya mengandung N, misalnya piridin, akridin atau derivatnya, misalnya hidrazida atau amida. Syarat untuk sumber N ini ialah perbandingan N/C harus tinggi dan stabil terhadap reaksi. Untuk penandaan dengan T dapat digunakan sumber Li seperti misalnya LiCO_3 , LiCl dan LiSO_4 . Sumber N atau Li dicampurkan dengan zat organik yang hendak ditandai, kemudian diradiasi dengan sumber neutron, misalnya dalam reaktor. Hasil yang diperoleh dapat beraneka ragam dan persoalan penting dalam penandaan secara rekoil ialah bagaimana cara untuk memisahkan senyawa yang telah ditandai.

Adapun hasil yang diperoleh pada penandaan secara rekoil ini dapat dibagi dalam tiga golongan.

- 1). Hasil penggabungan kembali ("reentry product") yaitu hasil penggantian atom C atau atom N oleh atom yang terpelanting dalam molekul zat asal.
- 2). Hasil sintesis, yakni hasil yang diperoleh dengan penambahan satu atau lebih atom C pada molekul zat asal.
- 3). Hasil fragmentasi yaitu degradasi zat asal yang biasanya disertai oleh oksidasi ataupun reduksi. Untuk memisahkan senyawa yang terjadi dapat digunakan cara khromatografi gas atau khromatografi kertas.

Hasil penggabungan kembali :



Hasil sintesa :



Hasil fragmentasi :



e. Penandaan metode Wilzbach

Dalam tahun 1958 Wilzbach menemukan bahwa jika campuran tritium dengan zat organik (padat, cair maupun gas) dibiarkan lama ternyata terbentuk senyawa bertanda dengan tritium. Kemungkinan mekanisme reaksi yang terjadi ialah :

- 1). Radiasi beta yang dipancarkan oleh tritium mungkin mengaktifkan molekul tritium dan molekul organik sehingga dapat bereaksi, atau
- 2). Molekul T₂ mengadakan pertukaran dengan atom H dari senyawa organik.

Hasil yang diperoleh dengan cara Wilzbach ini sama dengan hasil pada recoil, yaitu terdapat macam-macam senyawa dan penandaan secara spesifik belum mungkin dilakukan. Beberapa cara untuk memperbaiki metode Wilzbach ini antara lain ialah mengiradiasi campuran dengan krypton ataupun dengan menggunakan loncatan listrik.

f. Penandaan secara biologi

Jika senyawa yang berasal dari makhluk hidup sangat sukar untuk disintesis dalam laboratorium, maka dapat digunakan cara penandaan biologi. Menurut cara ini jasad renik yang menghasilkan senyawa tersebut atau tumbuh-tumbuhan yang dapat membentuk senyawa yang diinginkan diberi makanan dengan senyawa yang diberi tanda. Pembuatan vitamin B-12 yang ditandai dengan kobal-60 misalnya dilakukan dengan memberikan senyawa Co-60 pada jasad renik tertentu.

Demikian pula dapat dibentuk banyak senyawa yang ditandai dengan S-35 dengan jalan memberikan S-35 kepada jasad renik tertentu. Demikian pula dapat dibentuk banyak senyawa yang ditandai dengan S-35 dengan memberikan S-35 kepada jasad renik yang dapat menggunakan belerang.

Cara ini biasanya boros sekali karena jasad renik ini biasanya membentuk banyak senyawa dari zat radioaktif yang diberikan.

Salah satu cara untuk menghindari pemborosan ini ialah dengan jalan menambahkan senyawa bertanda yang merupakan pereaksi dalam tahap terakhir sintesis yang hendak dilakukan. Sebagai contoh misalnya ialah kalau hendak membuat hemoglobin yang bertanda, maka sebaiknya menambahkan glisin bertanda dari pada menambahkan natrium format bertanda, karena glisin dapat digunakan langsung untuk membentuk bagian-bagian hemoglobin, sedang asam format masih harus melalui beberapa reaksi lagi sebelum dapat digunakan untuk membentuk hemoglobin.

BAB 9

RADIOISOTOP DALAM PERTANIAN, BIOLOGI DAN KEDOKTERAN

9.1. PENGANTAR

Seperti halnya dengan penggunaan dalam bidang kimia, penggunaan radioisotop dalam bidang lainpun dapat dibagi dalam penggunaan sebagai perunut dan sebagai sumber radiasi. Dalam beberapa bab yang terdahulu telah dibahas mengenai kebaikan serta batas-batas kemampuan radioisotop sebagai perunut. Sekedar untuk mengi-ngatkan kembali maka di bawah ini diberikan ikhtisar sifat yang menyebabkan radioisotop demikian ampuh dalam penyelesaian bermacam-macam persoalan.

Sebelum radioisotop dikenal maka sebagai perunut seringkali digunakan zat warna atau gugus atom tertentu yang dapat digabungkan dengan molekul senyawa yang hendak diikuti sifat-sifatnya. Walaupun perunut semacam ini dapat mengikuti proses yang bergerak namun terdapat beberapa kekurangan yaitu :

- 1). Zat perunut berbeda dari materi yang diikutinya sehingga tidak ada jaminan bahwa zat tersebut betul-betul mengikuti jalan yang sama dengan jalan yang ditempuh oleh zat yang diikuti,
- 2). Kemungkinan besar diperlukan banyak zat perunut (yang harus diingat sifatnya tidak sama dengan zat yang diikuti), sehingga pengaruhnya terhadap proses yang sedang diikuti tidak mungkin lagi diabaikan.

Kedua kekurangan ini justru yang tidak ditemukan dalam radioisotop, karena seperti telah diuraikan dalam Bab 8, sifat kimia isotop radioaktif sama saja dengan isotop yang tidak aktif. Malahan bukan sifat kimianya saja tetapi juga sifat biologinya pun terbukti sama. Perbedaannya hanyalah bahwa radioisotop memancarkan radiasi dan justru hal ini yang dapat digunakan untuk mengikutinya.

Dengan telah dimulainya produksi radioisotop oleh Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri di Bandung dan Pusat Reaktor Serba Guna di Serpong, maka kemungkinan memperoleh radioisotop dan senyawa bertanda sudah ada. Penggunaan radioisotop dan senyawa bertanda merupakan suatu metode kerja sehari-hari yang dapat diharapkan ikut mengatasi dan menyelesaikan persoalan yang akan ada di tanah air.

Dengan harapan ini maka dalam bab ini dan bab berikutnya akan diuraikan beberapa contoh penggunaan radioisotop sebagai perunut. Sudah jelas bahwa contoh yang akan diberikan tidak lengkap dan tidak meliputi semua bidang kemungkinan penggunaan radioisotop, namun diharapkan bahwa contoh tersebut dapat memberikan gambaran bagaimana besar potensi radioisotop sebagai suatu alat kalau digunakan semestinya.

9.2. PENGGUNAAN RADIOISOTOP DALAM PERTANIAN

Penggunaan radioisotop dalam pertanian dapat sebagai perunut untuk mengikuti proses, maupun untuk digunakan sebagai sumber radiasi guna memperoleh pengaruh genetik, sebagai dan pembasmi hama.

Sebagai perunut, radioisotop dapat digunakan dalam penelitian mengenai pemupukan, untuk menerangkan persoalan translokasi unsur yang diserap dari tanah, dalam persoalan fotosintesis dan beberapa persoalan yang lain.

9.2.1. Radioisotop dalam Pemupukan

Persoalan berapa jauh ion fosfat yang berasal dari pupuk superfosfat yang diletakkan pada permukaan tanah, dapat menembus ke dalam tubuh tanah, merupakan suatu persoalan yang penting dalam pemupukan.

Dalam tahun 1941 **Henderson** dan **Jumes** melakukan percobaan sebagai berikut. Ke dalam tabung berbentuk silinder dimasukkan jenis tanah yang hendak diselidiki. Kemudian larutan superfosfat yang mengandung ion fosfat bertanda P-32 dituangkan ke permukaan tanah dalam silinder yang disusulnya dengan penuangan air suling yang sesuai dengan jumlah air yang akan diterima tanah setelah hujan lebat. Silinder tanah kemudian dibelahnya dan aktivitas fosfat pada jarak tertentu dari permukaan diukurnya. Hasil dari percobaan ini ialah ion fosfat tidak dapat menembus lebih dari 5 cm dari permukaan. Jadi jelas bahwa penggunaan pupuk fosfat sebagai *top dressing* tidak bermanfaat.

Percobaan yang serupa dengan menggunakan bermacam-macam ion lain memperlihatkan bahwa daya penetrasi fosfat dapat bertambah sebesar $\pm 30\%$ jika dalam larutan terdapat KCl.

Barber dan **Spink** dalam tahun 1946 dengan menggunakan amonium fosfat yang ditandai dengan P-32, menemukan bahwa tumbuh-tumbuhan lebih banyak mengambil fosfat alam daripada fosfat dari pupuk, selanjutnya ditemukannya bahwa makin tua tumbuh-tumbuhan makin besar perbandingan fosfat alam yang diambil

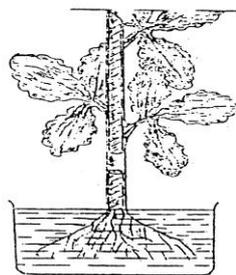
terhadap fosfat pupuk, walaupun jumlah fosfat seluruhnya yang diambil tidak berubah.

9.2.2. Translokasi

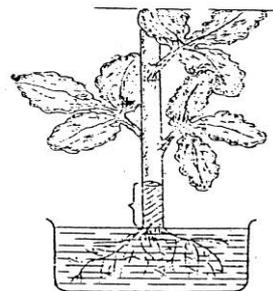
Salah satu persoalan dalam pertanian dan botani sebelum radioisotop ditemukan, yang merupakan suatu hal yang sukar ditentukan, ialah bagaimana jalan yang ditempuh oleh unsur yang diserap oleh akar untuk sampai ke bagian tumbuh-tumbuhan yang memerlukannya. Ada dua kemungkinan, yang pertama ialah melalui teras kayu atau yang kedua melalui kulit kayu. Beberapa percobaan menunjukkan bahwa kebanyakan zat yang dibutuhkan untuk hidup diangkut melalui kulit, tetapi beberapa percobaan yang lain menunjukkan bahwa mungkin fosfor dan kalium diangkut naik melalui kayu dan kembali lagi ke bawah melalui kulit.

Untuk mendapatkan jawaban yang memuaskan, **Gustafon** dan **Darken** dalam tahun 1937 melakukan percobaan berikut. Mereka mengeluarkan isi kayu semacam tumbuh-tumbuhan yang disebut *Bryophyllum* kecuali bagian tanah yang dekat akar (lihat Gambar 9.1). Setelah isi dikeluarkan, akar tumbuhan dicelupkan ke dalam larutan yang mengandung fosfor yang bertanda dan setelah beberapa waktu berselang, daunnya diperiksa secara autoradiografi (lihat Bab 8), ataupun kulit kayu yang lain diperiksa secara pencacahan secara biasa. Terbukti bahwa fosfor dapat naik melalui kulit kayu.

Percobaan berikutnya ialah memotong dan mengeluarkan sebagian saja dari isi kayu tumbuhan yang sama (lihat Gambar 9.2.). Percobaan yang sama diulangi dan hasilnya, fosfor bukan saja ditemukan pada kulit dan daun tetapi juga ditemukan dalam isi kayu bagian atas yang telah dipotong. Percobaan ini menunjukkan bahwa fosfat bukan saja dapat naik melalui kulit tetapi juga dapat dipindahkan dari kulit kayu, jadi dapat terjadi translokasi.



Gambar 9.1.



Gambar 9.2.

9.2.3. Fotosintesis

Percobaan lain yang dapat menunjukkan kemampuan radioisotop sebagai perunut ialah penentuan mekanisme fotosintesis. Seperti diketahui dari botani, kanji dapat dibentuk dalam tumbuhan melalui glukosa yang terbentuk menurut reaksi :



Pada reaksi ini diresap energi sebanyak 37 kilokalori tiap gram glukosa yang terbentuk. Selanjutnya ditemukan bahwa tumbuh-tumbuhan menunjukkan sifat seolah-olah ada dua macam reaksi yang berjalan secara beruntun. Yang pertama ialah reaksi fotokimia, yang tidak bergantung pada suhu tetapi memerlukan syarat adanya cahaya dan klorofil. Yang kedua tidak bergantung pada intensitas cahaya malahan dapat berlangsung dalam keadaan gelap. Hal yang terakhir ini ditemukan oleh **Blackman**.

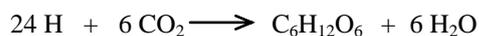
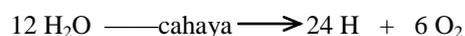
Persoalan pertama pada fotosintesis ialah darimana asal oksigen yang terbentuk pada reaksi pembentukan gula, dari air ataupun dari karbondioksida. **Ruben** menggunakan ganggang *chlorella* yang diapungkan dalam air yang mengandung 0,85% atom O-18, yang di samping itu juga mengandung kalium karbonat dan kalium bikarbonat sebagai sumber karbondioksida. Dari percobaan ini Ruben membuktikan bahwa oksigen yang terbentuk berasal dari air.

Setelah perang dunia kedua, percobaan Ruben kemudian dilanjutkan oleh teman sekerjanya. Dalam hal ini digunakan dua cara. Pada percobaan yang pertama cuplikan disimpan dalam gelap dan dalam atmosfer biasa yang tidak mengandung $^{14}\text{CO}_2$, sedang cuplikan yang kedua disimpan dalam atmosfer yang bebas karbondioksida dan disinari. Setelah kurang lebih satu jam kedua cuplikan dimasukkan ke dalam atmosfer yang mengandung karbon radioaktif $^{14}\text{CO}_2$, dan dalam suatu tempat yang gelap. Setelah beberapa lama keduanya diambil dan *chlorella*-nya langsung dimatikan dengan jalan menambahkan asam cuka yang dicampur dengan asam klorida, kemudian diadakan pemisahan kimia untuk mengisolasi asam organik, macam-macam gula dan lain-lain, dan setiap zat yang terisolasi ditentukan aktivitasnya dengan cara pencacahan.

Hasil yang diperoleh ialah radioaktivitas pada cuplikan yang disinari sebelum dimasukkan ke dalam atmosfer yang radioaktif, mengandung radioaktivitas yang besarnya sepuluh kali lebih besar daripada cuplikan yang lain. Selanjutnya ditemukan bahwa dari semua radioaktivitas yang terdapat, 2% berada dalam bentuk gula, yang membuktikan bahwa deretan reaksi dari karbondioksida menjadi gula dapat terjadi dalam gelap. Pada cuplikan yang lain, yang tidak disinari lebih dahulu

sebelum dimasukkan ke dalam atmosfer, ditemukan bukan saja aktivitas lebih kecil, tetapi jumlah yang mencapai bentuk gula hanya kurang lebih 0,1%.

Berdasarkan hasil percobaan ini dapat dirumuskan hal berikut. Pertama, oksigen yang dikeluarkan berasal dari air. Kedua, pengaruh cahaya dapat tersimpan jika tidak ada karbondioksida. Jadi besar kemungkinan bahwa cahaya dan khlorofil dengan suatu cara mempengaruhi air sehingga selanjutnya dapat bereaksi dengan karbondioksida dalam gelap. Sebelum percobaan ini dilakukan seorang sarjana lain telah mengemukakan kemungkinan cahaya dan khlorofil menguraikan air menjadi hidrogen aktif dan oksigen sehingga dapat terjadi reaksi berikut :



Walaupun percobaan ini belum dapat menjawab banyak persoalan mengenai fotosintesis, sedikit banyak menunjukkan bagaimana cara perunut ampuh dalam penyelesaian beberapa persoalan yang mungkin dengan cara lain tidak dapat diselesaikan.

9.2.4. Mutasi jenis Tumbuh-tumbuhan

Untuk mengetahui pengaruh radiasi terhadap sel turunan maka terlebih dahulu akan diuraikan secara singkat proses yang mungkin menyebabkan terjadinya mutasi.

Dalam Bab 4 (buku pertama) telah dibahas mengenai antaraksi radiasi pengion dengan materi. Seperti diuraikan dalam bab tersebut pengaruh antaraksi, bagaimanapun bentuknya selalu menghasilkan eksitasi dan ionisasi. Selain itu dalam Bab 8 telah diuraikan bahwa selain terjadi ionisasi dan eksitasi, antaraksi radiasi juga mungkin menimbulkan radikal bebas. Mekanisme pembentukan radikal bebas ini dari ion tereksitasi sangat rumit, tetapi tidak dapat disangsikan bahwa dalam iradiasi sistem biologi selalu terjadi radikal bebas.

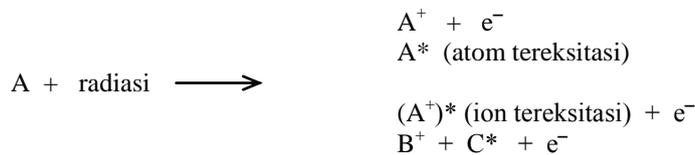
Bukti yang diperoleh hingga saat ini cukup menunjukkan bahwa pengaruh radiasi terhadap sistem biologi besar kemungkinan melalui radikal bebas ini dan bukannya disebabkan oleh eksitasi primer.

a. Pengaruh radiasi pada molekul organik. Pengaruh radiasi pada molekul organik dapat dibagi dalam dua golongan, yaitu pengaruh langsung dan pengaruh tidak langsung. Pada pengaruh langsung radiasi bereaksi langsung dengan molekul

organik mengakibatkan eksitasi dan ionisasi dan mungkin juga radikal bebas. Jenis ini terutama penting pada zat yang murni.

Jika di larutan, misalnya dalam air atau pelarut yang lain, dapat terjadi pengaruh tidak langsung yaitu radiasi bereaksi dengan pelarut menghasilkan jenis aktif misalnya radikal bebas, yang kemudian baru bereaksi dengan zat terlarut. Sudah jelas bahwa kedua proses, pengaruh langsung dan pengaruh tidak langsung, dapat terjadi bersama-sama tetapi dalam larutan encer maka secara statistik kemungkinan terjadi pengaruh langsung menjadi kecil.

Proses primer yang mungkin terjadi, jika suatu molekul ditembak dengan radiasi, dapat disimpulkan sebagai berikut :



Molekul dan ion yang terbentuk semuanya berenergi tinggi, yang selanjutnya dapat berubah menjadi radikal bebas atau menyebabkan terbentuknya radikal bebas dari molekul lain yang ada dalam sistem.

Radikal yang terbentuk ini kemudian dapat melakukan bermacam-macam reaksi, antara lain dapat membentuk polimerisasi, dapat terurai lebih lanjut, dan kalau ada oksigen dapat teroksidasi.

Selain itu radikal organik yang terbentuk pada proses primer pada pelarut, dapat pula menimbulkan radikal bebas baru pada zat terlarut. Dalam air misalnya radikal $\cdot\text{OH}$ yang terbentuk dapat bereaksi dengan senyawa organik RH sebagai berikut :



dan radikal R \cdot yang terbentuk dapat selanjutnya mengadakan polimerisasi, oksidasi dan mungkin pula penguraian.

b. Pengaruh radiasi pada jasad hidup. Di atas telah ditunjukkan kemungkinan terjadi perubahan merusak pada senyawa organik karena pengaruh radiasi. Pengaruh jenis demikianlah yang mungkin menyebabkan perubahan yang terjadi pada jasad hidup kalau diiradiasi. Besar kemungkinan bahwa inti sel mengalami perubahan dalam struktur disebabkan adanya reaksi setelah iradiasi yang mengakibatkan terjadinya mutasi pada gen dan khromosom.

Untuk menerangkan pengaruh radiasi yang diamati pada jasad hidup, ditemukan dua buah teori, yaitu teori tumbukan langsung dan teori pengaruh tidak langsung. Pada teori tumbukan langsung dianggap bahwa perubahan disebabkan karena terbentuknya ionisasi dalam volume tertentu sekitar inti, sedang pada teori pengaruh tidak langsung, pengaruh radiasi diterangkan sebagai akibat peracunan yang disebabkan oleh radikal bebas yang terbentuk.

Perlu disebutkan di sini bahwa pengetahuan mengenai pengaruh radiasi masih terus berkembang untuk dapat menjelaskan proses apa yang sebenarnya terjadi.

c. Penggunaan radiasi dalam pertanian. Berdasarkan keterangan tersebut maka dapat dimengerti bahwa penggunaan radiasi untuk mendapatkan jenis tumbuhan yang baik lebih banyak bersifat mencoba-coba, yaitu meradiasi bijih pada berbagai kondisi percobaan kemudian ditanam untuk mengetahui hasilnya. Tetapi walaupun demikian pada saat ini telah ditemukan beberapa jenis kacang-kacangan, jagung, gandum dengan sifat lebih baik sebagai hasil dari iradiasi. Perbaikan sifat tumbuh-tumbuhan, seperti misalnya ketahanan terhadap penyakit, batang yang lebih kuat, hasil yang lebih banyak tiap satuan luas tanah, merupakan hasil yang diperoleh dari iradasi.

9.2.5. Iradiasi Pembasmi Serangga

Jika pupa lalat hama tanaman diiradiasi dengan dosis sebesar 5000 rad, ternyata lalatnya tidak mati tetapi tidak dapat lagi memberikan turunan. Betina lalat hanya berhubungan kelamin sekali saja selama hidupnya dan kalau hubungan kebetulan terjadi dengan jantan yang sudah steril, maka tidak akan terjadi turunan. Dalam salah satu percobaan di Curaçao, sebuah pulau dengan luas kurang lebih 230 km², telur semacam lalat yang dinamakan *screw worm* diiradiasi dan lalat jantan yang ditetaskan yang telah steril, dilepaskan untuk mengawini betina dalam musim perkawinan. Hasilnya ialah pembasmian seluruh lalat jenis tersebut.

9.2.6. Penggunaan yang Lain dalam Pertanian

Selain yang telah disebutkan, maka iradiasi juga telah digunakan dalam pertanian untuk membasmi hama yang masih tertinggal dalam tanah setelah penuaian, yang kemungkinan besar akan menulari kembali tanaman yang baru.

Beberapa penelitian menunjukkan kemungkinan menstimulasi pertumbuhan dengan jalan iradiasi. Iradiasi kecambah kacang, misalnya, menunjukkan bahwa tumbuhan yang kecambahnya diiradiasi, menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik daripada kacang yang tidak diiradiasi.

9.3. PENGGUNAAN RADIOISOTOP DALAM KEDOKTERAN DAN BIOLOGI

Penggunaan radioisotop dalam kedua bidang ini sangat luas dan tidak mungkin dibahas secara cukup dalam buku ini. Oleh karena itu akan diberikan beberapa contoh penggunaan saja dan arah penelitian akhir-akhir ini. Sangat diharapkan bahwa contoh-contoh yang diberikan ini dapat memberikan gambaran dan stimulasi kepada pekerja dalam penelitian biologi dan kedokteran untuk memulai penggunaan alat yang baru ini dalam penelitian masing-masing.

9.3.1. Penggunaan Sebagai Perunut

Dalam bagian ini hanya akan dibicarakan penggunaan radioisotop dalam penelitian metabolisme kolesterol, penelitian darah, penelitian tulang, fungsi kelenjar gondok, penelitian penyakit kanker dan beberapa contoh penggunaan diagnosis dan terapi.

a. Penelitian darah. Seperti diketahui dari anatomi tubuh manusia maka tempat pembentukan darah sebagian besar dipusatkan dalam sumsum tulang belakang. Sel tertentu sumsum cenderung untuk menangkap atau *pagotize* partikel yang agak besar. Walaupun sel ini tidak langsung berhubungan dengan pembentukan darah tetapi secara autoradiografi ditemukan bahwa sel peresap mempunyai hubungan yang sangat erat dengan sel pembentuk darah, keduanya jarang ditemukan dalam sumsum berlemak. Jadi dengan demikian *scanning* aktivitas yang disebabkan oleh zat koloid radioaktif yang diserap dapat menunjukkan tempat atau bagian sumsum yang aktif dalam produksi darah.

Salah satu percobaan menggunakan perunut timidin yang ditandai dengan tritium. Timidin terbukti hanya dapat bergabung pada sel yang membelah, misalnya dengan sel muda dalam sumsum tulang belakang. Secara autoradiografi sel ini kemudian diikuti sampai pada sel dewasa yang tidak dapat membelah lagi. Beberapa hasil percobaan tersebut ialah sebagai berikut.

Pada anjing ditemukan dua sampai tiga hari untuk melangsungkan pendewasaan sel darah merah, setelah sel tersebut kehilangan daya belahnya. Pengamatan selanjutnya menunjukkan bahwa neutrofil, jenis sel darah putih yang paling banyak terdapat pada manusia, kebanyakan dikeluarkan dari darah secara tidak beraturan. Demikian pula ditemukan bahwa sel darah merah dewasa pada manusia berumur sekitar 120 hari sedang pada anjing sekitar 100 hari.

Percobaan mengenai pengaruh iradiasi pada produksi sel darah menunjukkan hal berikut. Kerusakan mula-mula setelah suatu iradiasi yang kuat ternyata sama saja pada berbagai jenis hewan, hanya ditemukan bahwa waktu antara iradiasi dan

timbulnya depresi neutrofil darah berbeda pada bermacam-macam jenis. Perbedaan waktu ini mungkin disebabkan oleh perbedaan dalam jumlah sel dewasa yang tidak membagi yang terdapat dalam sumsum tulang belakang. Anjing misalnya, mempunyai lebih banyak persediaan sel demikian daripada tikus, sehingga akibatnya lebih banyak waktu yang diperlukan untuk melumpuhkan persediaan ini dalam anjing jika dibandingkan dengan pada tikus.

Percobaan darah yang lain yang menggunakan radioisotop ialah dalam penelitian mengenai keadaan yang menimbulkan penyakit kekurangan butir darah yang dikenal dengan nama anemia. Simptom umum penyakit ini ialah kelemahan dan letargi, pusing dan muram, sukar bernafas, nafsu makan hilang. Ditemukan dua jenis anemia, yaitu *pernicious anemia* yang disebabkan oleh kerusakan atau defek pada pembentuk darah, dan yang lain ialah yang disebabkan oleh kekurangan besi. Anemia jenis terakhir mungkin disebabkan oleh kekurangan kadar besi dalam diet, tetapi mungkin juga karena kegagalan penggunaan besi yang ada oleh tubuh, sedang anemia jenis pertama disebabkan oleh karena tidak adanya zat penting yang dinamakan haemopoietin.

Berdasarkan keterangan tersebut maka sangat penting untuk dapat mengetahui cara tubuh meresap, menyimpan dan menggunakan persediaan yang tersimpan. Dengan menggunakan Fe-59, yang radioaktif, ditemukan bahwa peresapan besi oleh darah hanya dilakukan seperlunya saja dan bukannya meresap menurut kesanggupannya, dan mengeluarkan yang tidak digunakan.

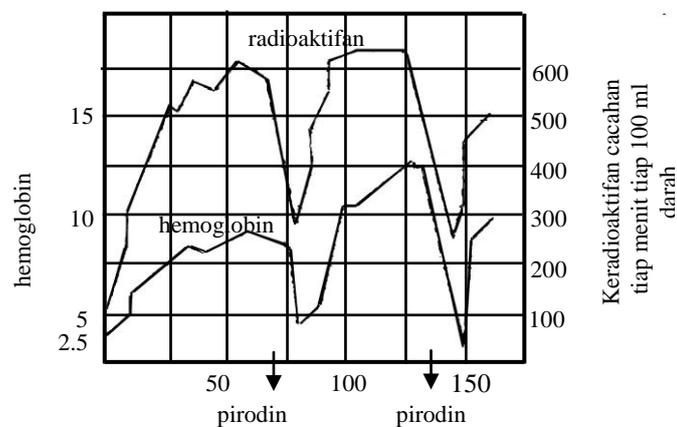
Whipple dalam tahun 1939 menemukan bahwa binatang penderita anemia menahan kurang lebih 12% besi yang diberikan melalui diet, sedang binatang normal hanya menahan kurang lebih 0,08 sampai 0,24%. Pada hewan penderita anemia hampir seluruh besi yang diresap ini diubah menjadi sel darah merah, sedang pada hewan normal yang digunakan hanya sedikit dari besi yang diresap. Pengeluaran besi pada kedua jenis hewan tersebut sama saja dan tidak ditemukan perbedaan.

Untuk mengetahui pengaruh zat lain yang dapat menimbulkan anemia jenis lain, yaitu yang menimbulkan kerusakan pada sel darah, maka **Cruz**, **Hahn** dan **Bale** dalam tahun 1942 melakukan percobaan berikut.

Anjing yang digunakan sebagai hewan percobaan dilukai berkali-kali untuk menimbulkan anemia, sehingga cacahan darahnya turun dari sekitar 5,5 juta sampai 4,4 juta tiap mililiter, serta gejala lain telah menunjukkan bahwa hewan betul-betul telah menderita anemia. Hewan kemudian diberi diet besi bertanda Fe-59 dalam dosis sekitar 30 mg tiap hari selama 20 hari. Dan selanjutnya diambil darah untuk mencacah jumlah hemoglobin dan mengukur aktivitasnya. Penambahan besi

ternyata menyem-buhkan anemia. Pencacahan menghasilkan seperti tertera dalam Gambar 9.3.

Ternyata bahwa aktivitas sejalan dengan cacahan hemoglobin, hal ini membuktikan kebenaran anggapan bahwa tidak ada perbedaan antara perunut radioaktif dengan isotop yang tidak aktif.



Gambar 9.3. Pembentukan darah pada hewan anemi.

Setelah kurang lebih 50 hari penambahan besi bertanda dihentikan. Untuk 5 sampai 10 hari aktivitas dan cacahan hemoglobin terus bertambah (lihat Gambar 9.3.), yang menunjukkan bahwa mekanisme pembentukan darah tidak berlangsung serentak dengan penambahan besi. Setelah kadar maksimum dalam gambar maka ditambahkan pirodin, semacam zat yang dapat menimbulkan anemia, secara suntikan selama kurang lebih 4 hari. Akibatnya ialah penurunan jumlah hemoglobin dan juga aktivitas secara mendadak. Pengurangan aktivitas ini menunjukkan bahwa hasil perusakan darah tidak tinggal tetap dalam peredaran.

Setelah penambahan pirodin dihentikan maka darah mulai sembuh dan jumlah hemoglobin kembali bertambah. Hal ini saja menunjukkan bahwa besi yang tadinya keluar dari peredaran, tidak hilang sama sekali, tetapi kenyataan selanjutnya bahwa aktivitas juga mulai lagi bertambah menunjukkan bahwa besi yang sama digunakan kembali dalam pembentukan hemoglobin.

Percobaan selanjutnya dengan menggunakan kondisi yang berbeda memberikan hasil yang sama, yaitu penggunaan kembali besi yang berasal dari hemoglobin

sangat hemat dengan persediaan besinya, besi yang berasal dari sel yang telah lapuk digunakan kembali pada pembentukan darah merah.

b. Penelitian tulang. Kecuali besi yang seperti diuraikan di atas ternyata digunakan berulang kali maka unsur yang lain biasanya digunakan sekali saja dan kemudian dikeluarkan atau dimetabolisme segera setelah tiba zat baru yang identik. Demikian juga halnya dengan unsur utama tulang. Dengan menggunakan P-32 dan Ca-45 dapat ditunjukkan bahwa kedua unsur ini mengalami penggantian terus menerus. Pada tikus misalnya dapat dibuktikan bahwa kurang lebih 90% zat bertanda yang ditambahkan diresap dalam saluran pencernaan, tetapi dalam waktu hanya kurang lebih 70 jam kemudian hampir 75% dari dosis yang diresap dikeluarkan kembali. Dari 25% yang tinggal hampir 4/5 bagian terdapat dalam tulang.

Pecher dalam tahun 1941 menunjukkan bahwa unsur stronsium mengikuti jalan metabolisme yang sama dengan kalsium, tetapi pengambilannya dalam tubuh lebih kecil, sedang pengambilan fosfor berbeda dari pengambilan kalsium. Hasil percobaan Pecher tertera dalam Tabel 9.1.

Tabel 9.1. Distribusi Ca-45, Sr-89 dan P-32 dalam bagian tubuh tikus, 24 jam setelah pemberian dosis.

Unsur	Persentase dosis tiap gram bagian tubuh					
	tulang	Otot	kulit rambut	usus	hati	lain-lain
Ca-45	22,0	0,33	0,20	0,36	0,12	0,23
Sr-89	12,0	0,17	0,15	0,23	0,07	0,13
P-32	5,2	1,40	0,75	1,30	3,00	2,10

Oleh karena Sr-89 adalah pemancar gama sedang Ca-45 hanya memancarkan beta lunak, maka karena keasaman sifat metabolisme yang disebutkan di atas memungkinkan penggunaan stronsium sebagai perunut untuk mengetahui sifat kalsium. Selain percobaan di atas percobaan sarjana di Universitas Minesota di Amerika Serikat membenarkan kesimpulan mengenai kesamaan sifat kalsium dan stronsium.

Copp, Axelrod dan Hamilton dalam tahun 1947 melaporkan bahwa pada diet yang kekurangan fosfor, stronsium hanya melekat pada tempat yang telah mengandung kalsium fosfat, sedang pada bagian yang tidak mengandung garam-garam tersebut, stronsium tidak ditemukan. Keadaan sebaliknya terjadi pada unsur plutonium, yaitu pengendapan hanya terjadi pada daerah yang tidak mengandung kalsium fosfat. Hal ini menimbulkan persoalan pada keracunan plutonium, yaitu plutonium yang melekat pada tulang tidak dapat diganti dengan pertukaran oleh kalsium, misalnya

dengan jalan menambahkan kalsium dalam diet, seperti yang sering digunakan pada keracunan dengan radium.

Oleh karena sumsum tulang belakang, tempat pembentukan sel darah, sangat peka terhadap radiasi alfa, maka kerusakan yang disebabkan oleh unsur plutonium dapat berlangsung terus menerus dan mengakibatkan suatu bahaya besar.

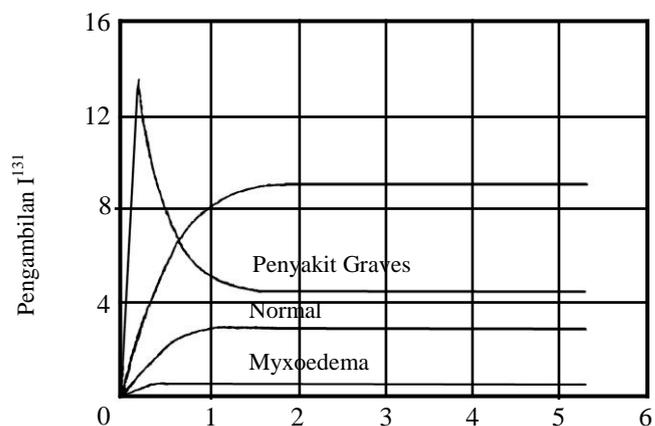
c. Fungsi kelenjar gondok. Yodium merupakan unsur penyusun penting tiroxin yaitu getah yang dikeluarkan oleh kelenjar gondok. Tiroxin ini yang mengatur kecepatan metabolisme beberapa proses yang sangat vital. Pengetahuan tiroxin yang berlebihan seperti terjadi pada penyakit **Grave**, menimbulkan kecepatan metabolisme yang tinggi yang dapat mengakibatkan kelemahan, nervous, denyut jantung yang tinggi dan mata yang menjulang. Pengetahuan yang kurang dari semestinya, misalnya dalam penyakit yang dinamai *myxoedema* menunjukkan gejala sebaliknya, yaitu kelambanan, lemah mental, buruk ingatan dan macam-macam simpton yang lain. Pada daerah yang dikenal kurang mengandung yodium, ditemukan penyakit anak kerdil dengan kelambanan mental yang dinamakan *non-toxic goitre*.

Walaupun dalam tahun 1896 **Bauman** telah melaporkan getah gondok yang mengandung yodium namun baru dua puluh tahun kemudian **Kendall** dapat mengisolasi senyawa yodium bentuk kristal dari getah gondok.

Hertz, Roberts dan **Evans** menemukan bahwa penambahan I-131 ke dalam diet menimbulkan konsentrasi tinggi yodium aktif pada gondok dalam waktu yang sangat singkat. Penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa yodium tersebut terikat secara kimia. Aktivitas selebihnya ditemukan dalam darah dan dalam air seni. Selain itu ditemukan juga bahwa penambahan sekaligus satu dosis besar dapat mengembalikan kadar yodium, yang tadinya kekurangan dalam gondok, ke dalam keadaan yang normal.

Penelitian lebih terinci dari **Hamilton** dan **Soley** pada penderita ketiga macam penyakit yang telah disebutkan di atas, menunjukkan hasil seperti tertera dalam Gambar 9.4.

Gambar 9.4. dapat pula digunakan untuk suatu cara diagnosis. Jadi dengan menentukan pengambilan I-131 dalam berbagai waktu dapat ditentukan jenis penyakit yang diderita dan dengan demikian pengobatannya dapat ditentukan.



Gambar 9.4. Pengambilan I^{131} pada berbagai penderita penyakit.

Percobaan dengan I-131 juga menunjukkan bahwa tiroxin dibentuk oleh suatu prekursor yang dinamakan diiodotiroxin, disingkat dengan DIT. Selain itu dibuktikan bahwa hormon gondok yang beredar dalam darah ternyata adalah tiroxin sendiri.

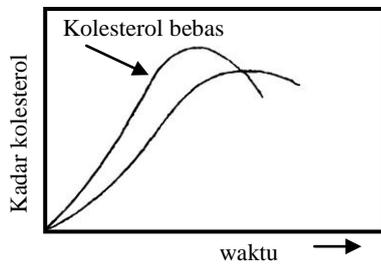
d. Metabolisme kolesterol. Peran kolesterol pada penyakit arteriosklerosis, yakni suatu penyakit dengan simtom hilangnya kekenyalan dan pembesaran arteri serta pembuluh kapiler darah, mungkin disebabkan karena pengendapannya sebagai akumulasi lemak pada permukaan bagian dalam pembuluh darah.

Kolesterol kadang-kadang berbentuk lilin dan kadang-kadang berbentuk kristal, dan terdapat dalam setiap sel tubuh, zat ini juga merupakan bahan baku untuk beberapa jenis hormon dan senyawa penting yang lain. Pemberian asetat bertanda C-14 kepada tikus menghasilkan kolesterol bertanda C-14 yang kebanyakan ditemukan dalam hati dan darah. Hal ini menunjukkan bahwa hati merupakan pusat pembentukan kolesterol darah.

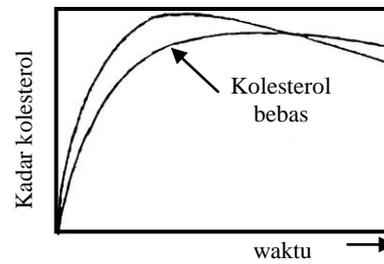
Dalam beberapa jenis penyakit, kadar kolesterol sangat tinggi dan tentunya hal ini dapat dianggap sebagai akibat pembentukan kolesterol yang terlalu banyak. Tetapi ternyata bahwa penambahan asetat bertanda C-14 tidak menunjukkan penambahan aktivitas dalam darah, yang berarti bahwa sebenarnya pembentukan tidak bertambah tetapi besar kemungkinan pembuangannya dan perusakannya yang tidak benar.

Jika kolesterol ditambahkan dalam diet ternyata tubuh tidak berusaha membentuk kolesterol baru tetapi hanya menggunakan yang sudah ada dalam makanan. Jika kolesterol bertanda tritium diberikan kepada orang normal dan kepada penderita arteriosklerosis aktivitas tritium dalam darah berbeda.

Konsentrasi kolesterol bebas dalam manusia normal lebih tinggi dari pada fraksi lain yang membentuk keseluruhan kolesterol dalam tubuh. Pada penderita arteriosklerosis terjadi sebaliknya (lihat Gambar 9.5 dan 9.6).



Gbr. 9.5. Normal.



Gbr. 9.6. Penderita.

9.3.2. Penelitian Penyakit Kanker

Penelitian mengenai metabolisme protein dan asam nukleat mungkin dapat digunakan dalam pengobatan penyakit kanker. Jika misalnya ditemukan bahwa sel kanker sangat membutuhkan suatu macam zat untuk pembiakannya, maka mungkin dengan jalan menahan zat tersebut, sel kanker akan dirusak atau mungkin pula dengan menambahkan zat tersebut dalam keadaan radioaktif, maka jika sel kanker meresapnya dalam jumlah yang banyak, akan ada kemungkinan bahwa sel tersebut akan dirusak oleh radiasi yang timbul dari zat yang diresap. Kemungkinan yang lain lagi jika langkah metabolisme diketahui, yaitu mengganggu salah satu langkah dalam urutan metabolisme sehingga sel kanker dihindarkan dari memperoleh kebutuhannya dan akibatnya juga merusak sel tersebut.

Dari ketiga kemungkinan tersebut di atas yang memperlihatkan kemungkinan besar baru yang terakhir saja. Suatu contoh misalnya ialah sebagai berikut. Seperti telah diketahui, proses pembiakan pada sel kanker berjalan jauh lebih cepat dari pada proses pembiakan sel normal. Hal ini menunjukkan suatu kemungkinan ialah jika dapat diatur sedemikian rupa sehingga sintesis asam nukleat yang sangat dibutuhkan pada pembiakan, tidak terpenuhi maka akan terjadi kerusakan yang lebih besar pada sel kanker dibandingkan dengan kerusakan pada sel biasa. Oleh karena reaksi kimia

metabolisme umumnya berlangsung dengan bantuan enzim dan terjadi dalam beberapa tahap, maka ada kemungkinan bahwa salah satu langkah atau tahap dapat dihalangi dengan jalan mengganggu kerja enzim. Obat amethopterin misalnya mempunyai pengaruh anti enzim dan ditemukan bahwa penggunaan obat tersebut dapat menyembuhkan leukemia tertentu. Rupanya cara kerja obat ini ialah menghalangi konversi asam folik menjadi enzim yang dibutuhkan pada reaksi zat antara tertentu.

Dari penelitian lebih lanjut ditemukan bahwa penggunaan dua atau lebih obat secara simultan, lebih efektif, terutama jika obat tersebut menghalangi enzim dalam berbagai langkah dalam metabolisme. Obat yang hendak diikuti dapat diberi tanda dan kemudian diikuti untuk mengetahui pengaruhnya.

9.4. PENGGUNAAN RADIOISOTOP DALAM DIAGNOSIS

Penggunaan radioisotop dalam diagnosis dapat dibagi dalam dua golongan, yaitu :

- 1). Penentuan aliran dan volume cairan tubuh
- 2). Penggunaan yang berdasarkan pada peresapan pilihan jaringan tertentu.

Sebagai contoh penggunaan jenis pertama dapat disebutkan penggunaan Na-24 untuk mengikuti sirkulasi darah dalam tubuh. Radioisotop ini memancarkan radiasi gama sehingga dapat diikuti dari luar sampai ke aliran darah pada pembuluh periferi. Cara ini dapat digunakan untuk menentukan gangguan dalam sistem sirkulasi darah. Kecepatan pengangkutan zat radioaktif oleh darah dari pantat atau dari lutut sampai ke ujung kaki pada kedua kaki harus sama. Perbedaan kecepatan menunjukkan adanya gangguan pada kaki dengan peredaran lambat. Juga tempat terjadinya gangguan dapat ditentukan dengan baik dengan menggunakan radioisotop ini.

Demikian pula Na-24 dapat digunakan untuk menentukan kerja jantung. Na-24 dimasukkan ke dalam tubuh dengan jalan menyuntikkan pada lengan penderita dan atom radioaktif ini kemudian akan mengalir melalui jantung. Dengan meletakkan detektor pada salah satu bagian jantung, misalnya sebelah kanan, maka pada saat darah yang mengandung Na-24 masuk ke jantung melalui saluran masuk sebelah kanan, detektor akan mengeluarkan denyut yang dapat dicatat pada pencatat. Setelah beberapa waktu denyut dari detektor ini akan hilang lagi, menunjukkan bahwa darah telah keluar lagi menuju paru-paru. Beberapa detik kemudian detektor akan mulai lagi menunjukkan datangnya aktivitas, yang berarti darah kembali lagi dari paru-paru dan masuk ke bilik kiri, dan setelah darah keluar kembali menuju bagian tubuh, penunjukan detektor akan turun kembali. Dengan cara ini daya pompa jantung

dapat dibandingkan dengan daya pompa jantung normal. Kalau terdapat perbedaan, hal ini menunjukkan adanya gangguan dalam kerja jantung.

Penggunaan jenis kedua, yaitu peresapan selektif lebih banyak digunakan. Salah satu contoh penggunaan jenis ini ialah pengambilan I-131 oleh kelenjar gondok yang diuraikan dalam bab yang lalu. Contoh lain ialah penggunaan I-131 untuk menentukan tempat tumor otak. Pada penggunaan ini yodium digabungkan pada semacam zat warna yang dinamakan diiodofluoresen. Zat terakhir ini sudah lama diketahui sifatnya yang mudah diresap secara selektif oleh jaringan tumor dalam otak. Malahan sebelum radioisotop dikenal zat warna tersebut telah digunakan, karena sifatnya yang berpendar cahaya, walaupun penggunaannya tentu sangat terbatas sekali, yaitu tempatnya baru dilihat setelah tengkorak dilubangi. Dengan menggunakan yodium radioaktif sebagai penanda dari zat warna tersebut maka tempatnya dalam otak dapat ditentukan dari luar tanpa melubangi tengkorak.

Demikian pula P-32 ternyata dapat pula diresap oleh jaringan tumor otak, tetapi karena radiasi yang dipancarkannya hanya beta lemah maka penggunaannya hanya terbatas selama pembedahan. Namun demikian fosfor banyak digunakan karena dapat menentukan dengan pasti tempat sel yang sakit, sedang cara diiodofluoresin hanya menunjukkan kira-kira tempatnya.

9.5. PENGGUNAAN DALAM TERAPI

Penggunaan radioisotop dalam terapi pada umumnya dapat dibagi dalam tiga golongan, yaitu :

- 1). Penyinaran dari jauh
- 2). Penusukan atau peletakan pada permukaan untuk iradiasi setempat, dan
- 3). Pemasukan ke dalam tubuh melalui mulut atau cara suntikan.

Iradiasi dari jauh sebenarnya tidak ada bedanya dengan iradiasi yang menggunakan mesin sinar-X. Hanya dalam hal ini digunakan radiasi dari zat radioaktif. Yang sering digunakan ialah iradiasi dengan ialah iradiasi dengan menggunakan Co-60 dan Cs-137. Tetapi didasarkan bahwa jaringan sakit perusakannya lebih besar dari pada jaringan yang normal.

Pada cara 3) syarat yang harus dipenuhi ialah zat radioisotop harus diresap dalam jumlah yang besar dalam jaringan yang sakit., agar perusakan benar-benar hanya terjadi pada jaringan yang sakit, dan bukan pada jaringan yang lain. Seperti telah diuraikan dalam fasal yang lalu, I-131 memenuhi syarat ini.

Ada tiga kemungkinan untuk menyebabkan radioisotop terkumpul pada jaringan yang sakit yaitu :

- a). Penempatan secara biokimia
- b). Penempatan fisik,
- c). Teleterapi.

9.5.1. Penempatan Secara Biokimia

Penempatan cara ini dapat berlangsung dengan dua jalan. Pertama dengan peresapan selektif dan kedua dengan jalan yang dinamakan *differential turn-over*.

a. Peresapan selektif, contoh baik untuk jenis ini ialah penggunaan I-131 pada pengobatan penyakit gondok, seperti telah diterangkan dalam fasal yang terdahulu. Untuk pengobatan kanker terdapat banyak kesulitan karena kanker gondok tidak mengambil I-131 dalam jumlah yang cukup untuk dapat merusaknya.

Penambahan pengambilan oleh sel kanker ini dapat ditambah dengan jalan : pertama membinasakan gondok, sehingga karena tidak adanya hormon thyroid maka semacam kelenjar dalam tubuh merangsang, yaitu kelenjar *pituitary* terangsang untuk membentuk lebih banyak lagi hormon perangsang thyroid. Hormon ini selanjutnya merangsang kanker untuk mengambil yodium lebih banyak. Kedua, penyuntikan hormon perangsang thyroid, yang juga dapat mengakibatkan hal yang sama dengan hal pertama.

Ketiga, ialah penambahan thiourasil, semacam obat yang dapat menghalangi pengumpulan yodium, yang menyebabkan sel kanker seolah-olah kelaparan terhadap yodium sehingga dosis yang ditambahkan kemudian akan dikumpulkan secara aktif.

b. Differential turn-over, unsur fosfor diperlukan di semua sel hidup, sehingga suatu dosis P-32 akan terbagi ke seluruh tubuh. Beberapa jenis jaringan, seperti misalnya tulang, jaringan pembentuk sel dan jaringan yang tumbuh cepat, cenderung untuk mengumpulkan fosfor ini. Arti dari pengaruh P-32 pada penyembuhan penyakit sistem pembentuk darah belum dapat ditentukan dengan pasti, tetapi jenis tertentu penyakit ini sangat peka terhadap radiasi seluruh tubuh, tanpa peduli bagaimana cara pemberiannya.

Pada penyakit yang dinamakan *polycythemia vera*, pembentukan sel darah merah berlebih, merupakan sistem darah yang paling berhasil untuk disembuhkan dengan radiasi beta dari fosfor. Sebenarnya P-32 tidak menyembuhkan tetapi hanya menekan sehingga terjadi pembentukan normal, dan mengusahakan mempertahankan kadar normal tersebut, setelah pemberian suatu dosis besar atau beberapa dosis yang kecil.

Walaupun penyembuhan dengan sinar-X atau cara-cara yang lain mungkin memberikan hasil yang sama baik, tetapi terapi dengan radioisotop ternyata sudah cukup meluas.

Leukemia, yang membentuk sel darah putih berlebih, tidak memberikan respons yang cukup baik pada terapi dengan P-32. Pada umumnya hasil yang diperoleh sama dengan hasil secara sinar-X, namun penggunaan radioisotop lebih disukai karena tidak ada efek samping, seperti misalnya mabuk karena radiasi dan pengaruh lain.

9.5.2. Penempatan Fisik

Dalam hal ini aktivitas dimasukkan ke dalam tubuh secara “dengan tangan”. Umumnya digunakan emas, platina, baja tahan karat, sebagai sumber radiasi dan pembungkus, untuk mencegah terjadinya reaksi kimia dengan jaringan atau cairan tubuh yang dapat melarutkannya.

Sebagai zat padat, zat radioaktif diselipkan ke dalam rongga tubuh atau di tanam dalam suatu jaringan. Sebagai zat cair, maka radioisotop dapat disuntikkan ke dalam

rongga dan bercampur dengan cairan tubuh untuk diangkut ke bagian tubuh yang sukar dicapai. Suntikan dapat juga dilakukan ke dalam jaringan sebagai sumber tersebar dalam ruang ekstra-selular.

a.Penyuntikan. Untuk memperbesar efisiensi peresapan biasanya cairan yang disuntikkan mengandung suspensi partikel kecil, misalnya koloid. Dengan demikian radioisotop dalam bentuk partikel renik tidak tersebar kemana-mana melainkan tinggal dalam daerah sekitar tempat penyuntikan sedang pengembannya mungkin diresap oleh jaringan tubuh. Jika disuntikkan ke dalam peredaran darah maka partikel ini akan terbawa ke dalam jaringan yang sakit dan teresap di sana. Demikian juga jika disuntikkan ke dalam rongga badan, maka zat radioaktif akan mengendap secara serba sama pada dinding rongga dan tinggal pada permukaan.

Koloid Au-198 memenuhi banyak syarat yang diinginkan. Radiasi beta yang dipancarkannya mempunyai jarak tempuh pendek sehingga hanya mempengaruhi jaringan yang langsung berdekatan dengan partikel. Umur paro Au-198 hanya 2,7 hari memungkinkan hilangnya aktivitas dalam tempo beberapa hari setelah tugasnya diselesaikan, dan tubuh dapat mentoleransi emas inert yang tinggal selama hidup manusia.

Kekurangan Au-198 ialah radioisotop ini juga memancarkan radiasi gamma yang dapat merusak jaringan sekitarnya. Akhir-akhir ini penggunaan koloid khromik sulfat menjadi lebih disukai karena yang dipancarkan hanya partikel beta. Demikian pula Y-90 dalam bentuk YCl_3 membentuk kristal setelah disuntikkan, umur paronya hanya 2,6 hari dan radiasi yang dipancarkannya hanya radiasi beta. Injeksi langsung ke dalam jaringan ganas dapat pula digunakan kalau misalnya radiasi dengan sinar-X dikhawatirkan akan membahayakan jaringan sekitarnya, ataupun kalau operasi sulit dilaksanakan.

b. Penanaman interstisi. Jarum radium, biji radon dan kawat kobalt dapat diselipkan ke dalam jaringan kanker. Kawat kobalt misalnya dapat dipotong, dibungkus dengan baja tidak berkarat yang menahan radiasi beta dan meneruskan radiasi gamma. Kawat dapat dibengkokkan untuk menyesuaikan dengan jaringan yang disinari.

Iridium-192, umur paro 73,83 hari, dan tantalun-182, umur paro 114,43 hari, dapat pula digunakan dengan cara yang sama. Aktivitas kedua radioisotop ini dapat lebih besar dari kobalt, tetapi umur paronya lebih pendek, oleh karena itu memerlukan aktivasi kembali setelah beberapa waktu.

Demikian pula dapat digunakan emas radioaktif dalam bungkus emas tidak radioaktif. Karena umur dari emas pendek, 2,694 hari, maka emas dapat dimasukkan secara penanaman ke dalam jaringan sebagai pengganti cara radon.

9.5.3. Teleterapi

Selain penggunaan Co-60 dan Cs-137 serta mungkin pula Ra, akhir-akhir ini digunakan pula cara lain yang berdasarkan pada pembentukan unsur radioaktif dalam jaringan sakit dengan jalan mengiradiasi dengan neutron. Demikian misalnya pada pengobatan tumor otak, diketahui bahwa jaringan tertentu otak dapat mengonsentrasi unsur boron-10. Dengan jalan mengiradiasi boron, yang telah dikonsentrasikan ini, dengan neutron akan terjadi reaksi (n,γ) membentuk boron-11. Radioisotop ini adalah pemancar alfa dengan daya mengion kuat sehingga dapat merusak jaringan sakit disekitarnya.

BAB 10

RADIOISOTOP DALAM PENGETAHUAN BUMI DAN ANGKASA LUAR

10.1. PENGANTAR

Zat radioaktif memegang peran cukup penting dalam pengetahuan bumi dan angkasa luar. Untuk memberikan sekedar contoh dapat disebut penggunaan analisis aktivasi dalam penentuan kadar mineral, penentuan unsur batu-batuan, bumi, malah unsur alam semesta, hanya mungkin dengan bantuan jam radioaktif, asal usul unsur dengan menggunakan dasar distribusi unsur dalam bumi dan angkasa luar, juga dapat berkembang dengan baik dengan bantuan radioisotop. Demikian pula penelitian angkasa luar, misalnya untuk mengetahui intensitas radiasi mengion di angkasa luar, menggunakan reaksi inti. Dalam hidrologi, penggunaan radioisotop untuk mengetahui aliran sungai serta gerakan dalam dasar sungai dan pelabuhan juga dapat dikembangkan dengan menggunakan radioisotop. Demikian pula gerakan air dalam tanah dapat diselidiki dengan menggunakan radioisotop. Dan tentunya banyak lagi yang dapat disebutkan.

10.2. JAM RADIOAKTIF

Sampai dengan permulaan abad ke 20, sarjana geologi tidak mempunyai suatu cara untuk menentukan umur mutlak sistem geologi, walaupun mereka dengan cara lain dapat menentukan urutan peristiwa yang mungkin terjadi. Penemuan zat radioaktif dengan cara peluruhannya, serta penemuan adanya deret radioaktif dalam alam ini memungkinkan penentuan umur secara lebih terinci.

Demikian misalnya dengan jumlah helium yang terdapat dalam pelikan uranium dan thorium, unsur pelikan dapat ditaksir. Dengan pengetahuan bahwa timbal merupakan unsur terakhir dari kebanyakan deret radioaktif, memungkinkan penentuan umur dari pengukuran perbandingan kadar timbal dan kadar uranium dalam suatu pelikan. Demikian pula umur dapat ditentukan dengan mengukur perbandingan kadar stronsium terhadap kadar rubidium, dan kadar argon terhadap kadar kalium. Cara penentuan umur dengan penentuan C-14 juga banyak digunakan.

Semua cara ini akan diuraikan dalam fasal berikut. Tetapi sebelum membicarakan semua cara ini satu per satu, perlu ditunjukkan adanya kemungkinan bahwa masing-masing cara memberikan hasil yang berbeda. Hal ini disebabkan anggapan yang

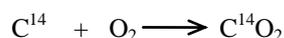
harus dimasukkan pada masing-masing cara kadang-kadang berbeda. Sebagai contoh misalnya, pada penentuan umur dengan menggunakan kadar helium. Dalam penentuan ini dianggap bahwa setelah suatu waktu tertentu pelikan sudah membeku sedemikian rupa sehingga helium yang terbentuk tidak lagi dapat keluar dari pelikan. Anggapan atau titik pangkal ini sudah terang tidak sama dengan anggapan pada penentuan secara rubidium-stronsium yang hanya mengajukan syarat bahwa pelikan telah membeku, ataupun titik pangkal pada penentuan secara C-14 yang menggunakan titik pangkal setelah kayu berhenti melakukan asimilasi dengan udara.

Selain hal tersebut perlu pula diingat bahwa semua cara mempunyai kelemahan dan kesulitan sehingga pada umumnya harus dilakukan beberapa jenis penentuan kalau ingin mendapatkan hasil yang dapat dipertanggungjawabkan.

10.2.1. Penentuan Umur Secara Karbon-14

Cara ini dikemukakan pertama kali oleh **V.F. Libby** dalam tahun 1946, dalam salah satu karyanya yang menyebabkan terpilihnya sebagai pemenang hadiah Nobel tahun 1960. Dasar dari cara ini ialah adanya reaksi $N^{14}(n,p)C^{14}$ dalam lapisan atas dari atmosfer bumi yang disebabkan oleh antaraksi radiasi kosmik dengan nitrogen dalam atmosfer. Dengan anggapan bahwa intensitas radiasi kosmik tidak berubah selama 30 000 tahun yang terakhir ini maka antara pembentukan dan kecepatan peluruhan C-14 yang terbentuk akan mencapai suatu keseimbangan sekular, dan konsentrasi C-14 dalam atmosfer dapat dianggap tidak berubah. Sampai saat ini sebenarnya tidak ada bukti bahwa intensitas ini tidak berubah, dan hal ini merupakan salah satu anggapan pada cara ini yang selalu harus diingat. Bahwa ada fluktuasi dalam intensitas ini dapat dibuktikan dari pengukuran aktivitas C-14 pada lingkaran dalam tumbuh-tumbuhan yang sudah tua.

Karbon-14 yang terbentuk ini dapat diharapkan mengalami proses kimia selanjutnya dengan zat lain, misalnya dengan benda hidup. Salah satu kemungkinan proses ini ialah asimilasi dalam tumbuh-tumbuhan setelah C-14 yang terbentuk tereksitasi dalam udara membentuk $C^{14}O_2$.



dan $C^{14}O_2$ — asimilasi → jaringan tumbuh-tumbuhan

Proses asimilasi ini berjalan terus selama tumbuh-tumbuhan masih hidup, tetapi segera tumbuh-tumbuhan ditebang atau benda hidup lain yang juga mengadakan pertukaran semacam asimilasi ini mati, maka pengambilan C-14 akan berhenti dan

keseimbangan antara C-14 yang ada di udara dengan yang ada dalam jaringan juga akan berhenti. Karbon-14 ini kemudian akan meluruh dengan kecepatan yang sesuai dengan umur paronya. Sehingga dengan mengukur aktivitas C-14 yang masih tinggal dalam kayu dapat ditentukan sudah berapa lama kayu tersebut mati.

Dari pengukuran dalam lingkaran tahunan pohon atau benda yang telah diketahui umurnya dengan pasti, dapat diketahui bahwa kadar C-14 dalam udara dapat dianggap sama dengan 15 cacah/menit/gram C. Jadi selama suatu tumbuhan hidup maka kadar C-14-nya juga sama dengan 15 cacah/menit/gram C.

Kalau misalnya ditemukan bahwa aktivitas C-14 dalam suatu benda kuno besarnya hanya 7,5 cacah/menit/gram C, maka ini berarti bahwa umur benda tersebut, atau lebih tepat lagi jangka waktu antara matinya kayu atau hewan yang digunakan untuk membuat alat tersebut, ialah sebesar satu umur paruh C-14, yaitu 5600 tahun.

Cara penentuan umur secara radiokarbon ini dapat digunakan untuk umur sampai 30000 tahun. Tetapi pada suatu saat cara ini menghadapi banyak kesulitan mengingat bahwa konsentrasi C-14 dalam udara makin hari makin bertambah, baik disebabkan oleh peledakan bom nuklir maupun yang disebabkan oleh C-14 yang dibuat dan digunakan dalam laboratorium. Hal ini akan menyebabkan bahwa penentuan secara karbon-14 dalam waktu yang akan datang tidak akan memberikan hasil yang baik.

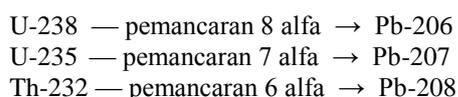
Cara kerja, mula-mula senyawa organik yang hendak ditentukan ditambahi asam encer untuk menghilangkan karbonat, kemudian senyawa yang telah dibersihkan dari karbonat ini dibakar menjadi karbondioksida. Zat ini kemudian dibersihkan dari radon dan senyawa pengotor yang lain dengan suatu siklus pemurnian. CO_2 yang sudah dimurnikan dapat direduksi menjadi C-14 atau diubah menjadi $\text{BaC}^{14}\text{O}_3$ untuk dicacah dengan Geiger.

Cara lain ialah langsung memasukkan gas C^{14}O_2 yang terbentuk ke dalam tabung pencacah dan C^{14}O_2 yang diperoleh dicacah dalam bentuk gas. Cara lain lagi ialah pencacahan dalam bentuk cairan dengan sintilator cairan. Pada cara ini C^{14}O_2 yang terbentuk diubah menjadi metanol atau senyawa organik cair yang lain yang dapat dilarutkan bersama dengan sintilator cairan.

Pengukuran aktivitas selama 18 jam biasanya cukup untuk memberikan kesalahan statistik sebesar 1,5%, yang sesuai dengan kira-kira kesalahan 120 tahun.

10.2.2. Cara Uranium-Timbal

Seperti diuraikan dalam deret radioaktivitas alam tiga dari empat deret radioaktivitas alam berakhir pada isotop timbal.



Dari perhitungan dengan menggunakan hukum peluruhan dapat dibuktikan bahwa hubungan antara induk dan turunan dalam keadaan keseimbangan ialah :

$$(\text{turunan})_{\text{sekarang}} = (\text{induk})_{\text{sekarang}}(e^{-\lambda t} - 1) \quad (10.1)$$

a. **Cara perbandingan uranium terhadap timbal dan perbandingan thorium terhadap timbal.** Seperti dilihat dalam persamaan di atas Pb-206 dan Pb-208 merupakan hasil terakhir yang stabil dari peluruhan uranium dan thorium. Jika dapat dianggap bahwa selama proses peluruhan berlangsung tidak terdapat tambahan timbal ataupun tidak terjadi pengeluaran timbal dari sistem maka jumlah isotop timbal yang ada dalam sistem dapat digunakan untuk menghitung jumlah uranium dan thorium yang telah meluruh. Tetapi ternyata bahwa semua pelikan lain yang mengandung timbal, yang tidak radioaktif, mengandung semua isotop timbal yang telah disebutkan, ditambah lagi dengan isotop yang tidak berasal dari peluruhan zat radioaktif, yaitu Pb-204. Oleh karena itu perlu untuk mengadakan koreksi jumlah Pb-206, Pb-208 yang mula-mula ada dalam pelikan uranium, dan selisih antara timbal yang tidak berasal dari peluruhan dengan timbal yang diukur, menghasilkan timbal yang berasal dari peluruhan.

Untuk koreksi ini biasanya digunakan perbandingan Pb-206/Pb-204 yang diperoleh dari meteorit besi yang diketahui tidak mengandung uranium dan thorium. Dengan menentukan kadar Pb-204 dalam cuplikan yang hendak ditentukan umurnya dan perbandingan Pb-204/Pb-208 yang diperoleh dari meteorit, maka jumlah Pb-206 yang berasal dari peluruhan U-238 dapat ditentukan. Demikian pula dengan menggunakan perbandingan Pb-204/Pb-208 yang terdapat dalam meteorit besi, koreksi Pb-208 yang tidak berasal dari peluruhan thorium dapat dilakukan.

Jadi urutan kerja dalam penentuan secara perbandingan isotop uranium terhadap timbal dan juga untuk penentuan yang berdasarkan perbandingan isotop thorium terhadap timbal dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1). Tentukan kadar U-238 tiap gram pelikan
- 2). Tentukan kadar total timbal tiap gram pelikan

- 3). Tentukan kadar total isotop Pb-206 secara spektrometri massa
- 4). Koreksi jumlah Pb-206 yang tidak berasal dari peluruhan zat radioaktif, dengan menggunakan perbandingan Pb-206/Pb-204 dalam meteorit
- 5). Hitung jumlah Pb-206 yang berasal dari peluruhan dan dengan menggunakan persamaan yang diturunkan sebagai berikut.

Dengan menggunakan persamaan mengenai peluruhan zat radioaktif dapat diadakan perhitungan berikut :

$$N(U^{238}) = N_0(U^{238})e^{-\lambda_{238} t} \quad (10.2)$$

N jumlah atom yang ada sekarang dan N_0 jumlah atom yang mula-mula ada. Jika persamaan (10.2) dikalikan dengan -1, dan kemudian ditambah dengan N_0 , diperoleh

$$N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda_{238} t}) \quad (10.3)$$

$N_0 - N$ ialah jumlah Pb-206 yang tidak berasal dari peluruhan misalkan sama dengan X, jadi :

$$N_0 = (U^{238})_{\text{sekarang}} + X(\text{Pb}^{206})$$

Dan persamaan (10.3) menjadi :

$$X(\text{Pb}^{206}) = (U^{238})_{\text{sekarang}} + X(\text{Pb}^{206})(1 - e^{-\lambda_{238} t}) \quad (10.4)$$

Dengan menggunakan persamaan (10.4), t, umur pelikan, dapat dihitung.

Dengan cara yang sama dapat diturunkan persamaan untuk menghitung umur pelikan dengan menggunakan hasil penentuan jumlah thorium dan Pb-208 yang tidak berasal dari peluruhan torium, Y(Pb^{208}) yaitu :

$$Y(\text{Pb}^{208}) = (\text{Th}^{232})_{\text{sekarang}} + Y(\text{Pb}^{208})(1 - e^{-\lambda_{232} t}) \quad (10.5)$$

λ_{232} tetapan peluruhan thorium-232.

10.2.3. Cara Timbal-Timbal

Peluruhan deret U-235 seperti telah diterangkan berakhir pada Pb-207. Secara perhitungan yang sama dengan perhitungan yang dilakukan dalam fasal yang lalu,

dapat diturunkan persamaan yang menghubungkan umur dengan jumlah Pb-207 yang tidak berasal dari peluruhan dan terhadap jumlah U-235, yaitu

$$Z(\text{Pb}^{207}) = (\text{U}^{235})_{\text{sekarang}} + Z(\text{Pb}^{207})(1 - e^{-\lambda_{235}t}) \quad (10.6)$$

λ_{235} ialah tetapan peluruhan U-235.

Jika persamaan (10.4) dibagi dengan persamaan (10.6) diperoleh

$$(\text{Pb}^{206}) / (\text{Pb}^{207}) = (\text{U}^{238} / \text{U}^{235}) \{ (1 - e^{-\lambda_{235}t}) / (1 - e^{-\lambda_{238}t}) \times (1 - e^{-\lambda_{238}t}) / (1 - e^{-\lambda_{235}t}) \} \quad (10.7)$$

Perbandingan $(\text{Pb}^{206}) / (\text{Pb}^{207})$ dapat diperoleh dari pengukuran secara spektrometri massa, sedang $(\text{U}^{238} / \text{U}^{235})$ dapat diperoleh dari tabel massa isotop. Demikian pula dengan harga tetapan peluruhan. Jadi dengan menggunakan persamaan (10.7) harga t , umur cuplikan dapat ditentukan.

Berdasarkan penentuan semacam ini dan penentuan yang lain, diperoleh bahwa umur bumi sekitar $4,5 \times 10^9$ tahun.

10.2.4. Perbandingan Kadar Uranium terhadap Helium

Seperti telah ditunjukkan dalam pasal terdahulu, maka setiap peluruhan deret radioaktivitas alam menghasilkan sejumlah helium. Pada peluruhan deret U-238 setiap rantai peluruhan menghasilkan delapan partikel alfa. Oleh karena jarak tempuh partikel alfa sangat pendek, maka dapat diharapkan bahwa helium ini tidak akan keluar dari batuan yang telah membeku, melainkan sebagian terbesar akan terkandung dalam batuan. Dalam beberapa jenis batuan, dengan konsentrasi uranium rendah, helium yang terbentuk sangat sedikit, sehingga tekanannya juga sangat rendah, dapat dibuktikan bahwa sebagian terbesar helium tetap berada dalam bagian dalam batuan, sehingga jumlah helium yang ada dalam batuan tersebut dapat digunakan untuk mengetahui jumlah uranium yang telah meluruh.

Demikian pula halnya dengan deret thorium, pada setiap rantai reaksi dari thorium menjadi Pb-208, dipancarkan enam partikel alfa. Dengan mengukur perbandingan jumlah uranium yang ada dan jumlah helium yang terdapat dalam suatu pelikan, umur dapat ditentukan. Demikian pula umur dapat ditentukan dengan mengukur perbandingan jumlah thorium terhadap helium pada batuan yang mengandung thorium.

Cara helium ini merupakan cara penentuan umur pertama, tetapi karena adanya beberapa kesulitan, seperti misalnya kemungkinan bocornya sebagian dari helium keluar dari batuan dan kemungkinan terjadi kontaminasi dari helium-3 atau helium-4 yang berasal dari atmosfer.

Adanya reaksi terakhir ini terutama sangat penting pada benda yang berasal dari ruang angkasa luar, seperti misalnya meteorit, yang sebelumnya sampai ke bumi ini harus terlebih dahulu melalui daerah radiasi sinar kosmik.

Berdasarkan hal yang disebutkan ini, maka harus diperhatikan arti dari pengukuran umur berdasarkan cara perbandingan helium terhadap uranium, atau perbandingan helium terhadap thorium ini, yaitu umur yang ditunjukkan ialah waktu yang telah berlangsung sejak batuan yang mengandung helium sudah membeku sedemikian rupa sehingga helium mudah dapat tertangkap dalam batuan.

10.2.5. Cara Kalium-40 dan Argon-40

Dari bagan peluruhan K-40 ditemukan bahwa radioisotop ini dapat meluruh menurut dua jalan, yaitu melalui pemancaran radiasi beta menjadi Ca-40 dan melalui jalan penangkapan elektron membentuk Ar-40. Umur paro peluruhan K-40 ialah sebesar $1,3 \times 10^9$ tahun.

Seperti halnya dengan pada cara uranium-timbal maka pada cara kalium-argon ini prosedur yang dilakukan ialah sebagai berikut.

- 1). Jumlah kalium yang ada dalam batuan ditentukan dan dengan menggunakan perbandingan isotop dalam kalium, jumlah K-40 dapat ditentukan.
- 2). Jumlah Ar-40 yang ada dalam batuan, misalnya meteorit, ditentukan biasanya dengan jalan peleburan untuk mengeluarkan argon yang tertangkap di dalam batuan. Penentuan dapat dilakukan dengan cara pengenceran isotop, misalnya menggunakan perunut Ar-38 atau dengan jalan mengukur menggunakan spektrometer massa.
- 3). Kemudian dengan menggunakan persamaan yang analog dengan persamaan yang telah diturunkan pada penentuan secara uranium-timbal, maka t yaitu umur batuan dapat dihitung,

$$\begin{aligned} N_0 - N_{\text{sekarang}} &= N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \\ \text{atau} \quad (\text{Ar}^{40}) &= (\text{K}^{40} + \text{Ar}^{40}) (1 - e^{-\lambda t}) \end{aligned} \quad (10.8)$$

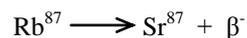
Seperti halnya catatan yang dibuat pada penentuan secara pengukuran helium, maka pada cara ini juga harus diperhatikan titik pangkal pengukuran, ialah waktu sejak pemanasan sudah turun cukup rendah, untuk memungkinkan penangkapan argon dalam batuan. Pengukuran meteorit menghasilkan harga sekitar $(4,5 - 10) \times 10^9$ tahun.

Beberapa persoalan yang dihadapi pada penggunaan cara ini ialah sebagai berikut. Pertama, berasal dari kemungkinan terjadinya kontaminasi yang berasal dari pembentukan K-40 dan Ar-40 oleh radiasi kosmik, dan kedua, ialah kemungkinan kebocoran yang disebabkan adanya difusi argon keluar dari batuan. Ketiga, besar kemungkinan dapat terjadi kontaminasi dari udara. Seperti diketahui udara juga mengandung tiga isotop argon yaitu Ar-38, Ar-39 dan Ar-40. Persoalan ini sangat penting karena merupakan sumber kesalahan yang paling mungkin.

Dan akhirnya perlu disebutkan di sini bahwa pada proses pemanasan pada batuan besar kemungkinan akan terjadi penetrasi atmosfer, yang menimbulkan kontaminasi yang disebutkan di atas.

10.2.6. Cara Rubidium-Stronsium

Juga dalam cara ini dasarnya ialah adanya radioisotop induk, yaitu Rb-87 yang meluruh membentuk turunan yang tetap tinggal dalam sistem, dalam hal ini Sr.



dengan umur paro $4,3 \times 10^{10}$ tahun.

Cara ini merupakan salah satu cara yang terbaik. Dalam hal ini tidak ditemukan kemungkinan hilangnya zat turunan, karena turunan dalam hal ini berbentuk padat, demikian pula penentuan secara kimia tidak ada persoalan.

Prosedur yang ditempuh ialah menentukan kadar Rb-87 dan Sr-87 secara spektrometri massa kemudian menggunakan rumus umum

$$(\text{Rb}^{87}) = (\text{Sr}^{87} + \text{Rb}^{87}) (e^{-\lambda t}) \quad (10.9)$$

10.3. RADIOISOTOP DALAM PENELITIAN ANGKASA LUAR

Pengetahuan mengenai angkasa luar melalui penelitian kimia dimungkinkan oleh adanya cuplikan yang berasal dari luar bumi yang dinamai meteorit. Benda ini sewaktu-waktu jatuh dari luar bumi dan dapat ditemukan dalam tiga bentuk, yaitu yang dinamakan meteorit besi karena seluruhnya tersusun dari hampir 100% besi, yang kedua meteorit silikat, yang lebih dikenal dengan nama khondrit, dan jenis ketiga ialah meteorit yang seolah-olah campuran dari dua jenis yang pertama.

10.3.1. Meteorit

Menurut beberapa sarjana terkemuka, diantaranya **H.C. Urey**, meteorit dapat dianggap sebagai salah satu benda yang mempunyai susunan kimia yang hampir sama dengan susunan kimia bumi, dan malah mungkin dapat dianggap sebagai suatu cuplikan yang representatif untuk sistem matahari. Sehingga dengan demikian, penentuan kadar unsur dalam meteorit dapat memberikan gambaran mengenai kelimpahan unsur dalam sistem matahari umumnya, dan khususnya komposisi bumi. Demikian pula kalau teori bahwa pembentukan unsur mulai dari neutron dan proton sebagai bata penyusun, sedikit banyak harus dapat menerangkan distribusi semua unsur dalam alam ini, maka kelimpahan unsur dalam meteorit sangat penting.

Tetapi terlepas dari persoalan benar atau salahnya teori tersebut, maka meteorit dapat secara langsung memberikan beberapa keterangan mengenai angkasa luar.

Adanya sinar kosmik yang setiap saat menembaki lapisan atas atmosfer bumi, telah pernah ditunjukkan dalam waktu menguraikan mengenai penentuan unsur secara radiokarbon. Oleh karena meteorit sebelum dapat memasuki atmosfer bumi harus melalui terlebih dahulu daerah yang mengandung banyak radiasi kosmik, maka sudah lumrah kalau penelitian hasil reaksi inti antara radiasi kosmik dengan unsur dalam meteorit, banyak diselidiki. Radioisotop yang terbentuk secara reaksi demikian dinamakan radioaktivitas imbas radiasi kosmik. Jauh sebelum sarjana dapat mengi-rimkan cuplikan keluar, dengan menggunakan bermacam-macam roket angkasa luar, orang telah mulai meneliti keadaan intensitas radiasi kosmik dengan menggunakan cara penentuan radioaktivitas yang diimbaskan dalam meteorit. Demikian misalnya, dengan membandingkan aktivitas yang diperoleh pada kurang lebih dua belas macam radionuklida dalam meteorit yang baru jatuh, dengan besarnya aktivitas pada unsur yang sama yang diperoleh dalam penembakan di laboratorium dengan menggunakan pemercepat, dapat dibuktikan bahwa intensitas radiasi kosmik tidak mengalami perubahan dalam puluhan ribu tahun yang terakhir.

Demikian pula berapa lama sudah sebuah meteorit mengalami penembakan oleh radiasi kosmik, dapat ditentukan dari intensitas radioaktivitas yang terimbas. Pengetahuan mengenai lamanya penyinaran oleh radiasi kosmik ini menunjukkan bahwa dalam perjalanan meteorit dalam angkasa luar, rupanya mereka terpapar radiasi kosmik hanya dalam waktu yang sangat pendek dibandingkan dengan umurnya, dan sebagian besar dari hidup meteorit dalam suatu tempat yang terlindung dari radiasi kosmik. Hal ini menunjukkan kemungkinan bahwa meteorit berasal dari suatu benda yang lebih besar, yang menurut beberapa teori ialah sebuah planet yang telah hancur antara Mars dan Jupiter.

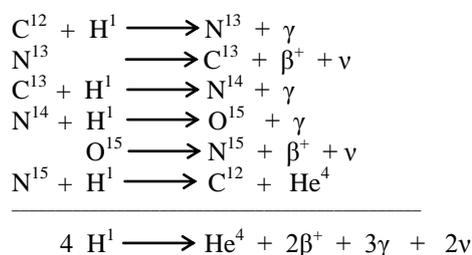
Akhir-akhir ini pecahan dari roket angkasa luar juga digunakan untuk meneliti keadaan radiasi kosmik, yaitu dengan mengukur reaksi inti yang diimbis pada pecahan sputnik dan macam roket yang lain.

10.3.2. Reaksi Inti dalam Bintang

Dalam uraian mengenai reaksi peleburan telah dikemukakan bahwa energi dalam matahari berasal dari hasil peleburan. Dari sudut astronomi, matahari sebenarnya tidak lain dari sebuah bintang biasa dalam suatu pertumbuhan tertentu. Jadi matahari dapat dianggap representatif untuk golongan bintang tertentu karena secara astronomi masih dikenal jenis bintang lain yang mempunyai sifat yang berbeda dari bintang sejenis dengan matahari.

Terdapat dua teori mengenai reaksi yang menimbulkan energi dalam matahari, yang pertama dinamakan *lingkar karbon-nitrogen*, yang menurut anggapan merupakan sumber energi yang berasal dari reaksi di bagian pusat matahari, dan yang kedua reaksi yang disebut *rantai proton-proton* dan dianggap merupakan reaksi utama di bagian terbesar matahari.

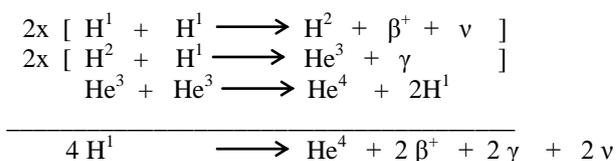
a. Lingkar nitrogen-karbon. Dalam tahun 1938 **H. Bethe** mengemukakan teori bahwa sebagian besar energi yang dipancarkan matahari berasal dari reaksi berikut :



Jadi hasil lingkaran reaksi ialah perubahan empat atom H menjadi satu He. Dalam lingkaran ini C-12 dibentuk kembali dan dapat dianggap merupakan katalis saja.

b. Rantai proton-proton. Rantai reaksi ini yang merupakan sumber energi penting dalam matahari dan bintang lain yang seumur dengan matahari. Ditinjau dari segi energetik maka suhu pada matahari, yaitu $1,5 \times 10^7$ °C, hanya menghasilkan energi kinetik rata-rata sebesar 1,91 keV, sedang peleburan proton-proton memerlukan energi ambang yang kurang lebih 20 kali lebih besar daripada energi kinetik rata-rata ini.

Untuk menerangkan keganjilan ini maka dapat digunakan teori Maxwell mengenai distribusi energi. Walaupun energi rata-rata atom atau molekul dalam matahari hanya sekitar 2,0 keV, ada kemungkinan bahwa beberapa molekul cukup besar energinya untuk memulai reaksi peleburan. Reaksi pertama ini menimbulkan energi yang selanjutnya dapat digunakan mengaktifkan molekul-molekul lain sehingga dapat terjadi rantai reaksi berikut :



10.4. RADIOISOTOP DALAM GEOLOGI

Selain penggunaan analisis aktivasi untuk menentukan kadar cuplikan geologi dan penentuan umur batuan yang disebutkan dalam bab 10.2. radioisotop masih juga memegang peran dalam beberapa segi yang lain.

Persoalan mengenai pendinginan bumi misalnya hanya dapat diterangkan dengan anggapan bahwa sebagian besar kalor yang diperlukan untuk mempertahankan panas bumi berasal dari peluruhan zat radioaktif. Isotop yang mungkin memegang peran penting pada pemanasan bumi ini ialah U-238, U-235, Th-232 dan K-40. Isotop yang lain tidak begitu penting, baik karena kelimpahannya terlalu kecil atau karena umur paronya terlalu pendek.

U.L. Whitehead dalam salah satu simposia mengenai gejala nuklir dalam pengetahuan bumi, memberikan suatu ulasan mengenai pembentukan hidrokarbon secara radiasi oleh zat radioaktif, dan kemungkinan peran radioaktivitas dalam pembentukan minyak bumi. Dikemukakannya kemungkinan bahwa radiasi alfa yang berasal dari uranium atau thorium mungkin menyebabkan reaksi yang mengubah zat organik menjadi senyawa hidrokarbon.

Demikian pula dalam beberapa penerbitan dikemukakan adanya hubungan antara radioaktivitas yang anomal dengan adanya sumber minyak bumi. Serpih misalnya yang ada hubungan dengan tempat minyak bumi, ternyata lebih radioaktif daripada sedimentasi yang lain, sehingga dari pengukuran aktivitas dapat ditentukan daerah tempat serpih. Seringkali ditemukan bahwa daerah produksi berbatasan dengan deposit zat radioaktif.

10.5. RADIOISOTOP DALAM HIDROLOGI

Penggunaan radioisotop untuk meneliti aliran sungai serta untuk mengetahui gerakan dasar sungai serta pinggir laut, sudah sangat meluas. Hal ini ternyata dari banyaknya prasaran yang dikemukakan dalam simposia mengenai radioisotop dalam hidrologi yang diadakan komisi tenaga atom internasional di Wina tahun 1963.

G.H. Lean dan **M.J. Grickmore** misalnya mengemukakan cara penggunaan perunut radioaktif untuk mengetahui pengangkutan pasir dalam dasar sungai dengan menggunakan kaca sintetik yang dibuat sedemikian rupa sehingga sifatnya menyerupai pasir, tetapi yang diberi tanda dengan Na-24. Ditunjukkannya bahwa cara ini selain kuantitatif juga dapat digunakan untuk menentukan arah dan kecepatan gerak.

C.G. Clayton dan **D.B. Smith** mengemukakan beberapa persoalan yang harus diperhatikan pada penggunaan radioisotop untuk menentukan aliran dalam sungai, antara lain ialah jarak tempat penyuntikan radioisotop dengan tempat diadakannya pengukuran harus tidak terlalu dekat, sehingga pencampuran belum sempurna, tetapi tidak terlalu jauh sehingga dispersi yang terjadi menimbulkan interpretasi yang tidak tepat. Demikian pula dikemukakan hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan perunut, antara lain hendaknya perunut yang digunakan tidak banyak teresap dalam sungai, selain itu harus stabil dalam air, umur paro harus cukup panjang untuk memungkinkan pengukuran, tetapi tidak terlalu panjang sehingga merupakan persoalan kontaminasi. Demikian pula sebaiknya digunakan pemancar gamma dan kalau dapat dengan aktivitas jenis yang cukup tinggi, walaupun tentunya dari segi mudahnya pengangkutan dan mudahnya melayani akan lebih dikehendaki pemancar beta. Berdasarkan syarat tersebut maka masih dipilih Na-24 dan H-3 sebagai perunut yang baik.

Y. Harpas dan kawan-kawan mengemukakan peran cara radioisotop dalam penelitian air bumi dan memberikan kesimpulan bahwa walaupun cara radioisotop penggu-naannya terbatas, namun beberapa sifat khas yang berhubungan dengan gerakan air umumnya dapat diukur dengan langsung dengan menggunakan isotop.

Sifat khas yang berhubungan dengan jalan yang betul-betul ditempuh oleh partikel individual air hanya dapat dinilai dengan bantuan isotop unsur yang ada dalam air. Demikian pula umur air dalam tanah di tempat yang berlainan, yang tidak tercampur, dapat ditentukan hanya dengan menggunakan cara pengukuran umur dengan tritium. Cara ini prinsipnya tidak berbeda dari cara pengukuran umur dengan C-14. Tritium selalu terbentuk dalam lapisan atas atmosfer bumi karena reaksi sinar kosmik dan kemudian jatuh ke bumi bersama air hujan. Jika air yang mengandung

tritium ini masuk ke dalam tanah dan tersimpan di sana tanpa adanya penambahan air tritium baru, maka dari aktivitas yang ada pada tritium dapat diukur berapa lama sudah air tersebut jatuh dari atmosfer dalam bentuk hujan.

**BEBERAPA ISTILAH PENTING
INDONESIA – INGGRIS**

Indonesia

absorpsi diri
analisis
analisis tinggi pulsa
analisis aktivasi
andarah
angka gelombang
antaraksi
bahan bakar
bahan bakar nuklir
batang kompensasi
bilangan mujizat
buatan
cuplikan
jarak tempuh
jasad, organisme
energi
energi ambang
energi diam
energi pengikat
fisi
fraksi paduan
fusi
gamma serentak
gamma tertunda
gondok
hamburan
hamburan balik
hamburan kenyal
hamburan inelastik
imbas
kelimpahan
lamban
nois
pancung
partikel dasar
peluruhan

Inggris

selfabsorption
analysis
pulse height analysis
activation analysis
anemic
wave number
interaction
fuel
nuclear fuel
shim rod
magic number
artificial
sample
range
organism
energy
threshold energy
zeropoint energy
binding energy
fission
packing fraction
fusion
spontaneous gamma
delayed gamma
tyroid
scattering
back scattering
elastic scattering
inelastik scattering
induce
abundance
inert
noice
scram
elementary particles
decay

pemaparan	exposure
pembelahan inti	nuclear fission
pembentukan pasangan	pair production
pmbiak	breeder
pembentukan pasangan	pair production
pemercepat, akselerator	accelerator
penangkapan neutron	neutron capture
pencacah	counter
pencatat	recorder
pendar fluor	fluorescence
pendar cahaya	luminescence
pendar fosfor	phosphorescence
penentuan umur	dating
penganalisis tinggi denyut	pulse height analyzer
pengaktifan, aktivasi	activation
pengaruh isotop	isotope effect
pengemban	carrier
pengemban penahan	hold back carrier
pengemban seisotop	isotopic carrier
penghamburan, hamburan	scattering
penghamburan balik	back scattering
penghamburan kenyal, elastik	elastic scattering
penguat, amplifier	amplifier
penukar ion	ion exchanger
penyusunanlangan	rearrangement
pereaksi	reagent
perisai	shielding
perunut	tracer
potensial penghalang	barrier potential
pulsa	pulse
reaksi peleburan, fusi	fusion reaction
reaksi pembelahan, fisi	fission reaction
reaksi perobekan	stripping reaction
reaksi pemukulan	knock-on reaction
reaksi pertukaran	exchange reaction
reaktor	reactor
serpih	shale
sistem perahan	milking system
tabung	tube
tudung sentral	central thimble
waktu penguraian	resolving time

Inggris

absorption
abundance
accelerator
adsorption
amplifier
analysis
 activation -
 pulse height -
anemic
artificial
breeder
capture
carrier
counter current
dating
decay
diffusion
energy
 exchange energy
 binding energy
 threshold energy
 zero point energy
exchange
fission
fluorescence
fuel
fusion
half life
interaction
induce
inert
infrared
ion exchange
luminescence
magic number
noise
organism
microorganism
packing fraction

Indonesia

absorpsi, resapan
kelimpahan
akselerator
adsorpsi, serapan
penguat, amplifier
analisis
 - aktivasi
 - tinggi pulsa
anemi, andarah
artifisial, buatan
pemiak
penangkapan
pengembangan
alir balik
penentuan umur
peluruhan
difusi
energi
 energi pengikat
 energi pengikat
 energi ambang
 energi diam
pertukaran
fisi, pembelahan
fluoresensi, pendar fluor
bahan bakar
fusi, peleburan
umur paro
antaraksi
imbas
lamban, inert
inframerah
pertukaran ion
luminesensi, pendar cahaya
bilangan mujizat
noise
organisme, jasad
mikroorganisme, jasad renik
fraksi paduan

posphorescence	fosforesens, pendar fosfor
probality	kebolehjadian, probabilitas
pulse	pulsa
pulse height analyzer	penganalisis tinggi pulsa
range	jarak tempuh
resolving time	waktu penguraian
sample	cuplikan
scattering	penghamburan, hamburan
shale	serpih
signal	sinyal, isyarat
spontaneous	serentak

INDEX

- A**
aktivitas, 71
analisis aktivasi otomatis, 76
analisis radioaktif, 67
analisis radiometrik, 68
autoradiografi, 98
- B**
Barber dan Spink, 105
Bauman, 115
Berthelot - Nernst, 39
Berthe, H., 132
Blackman, 107
Buchnan, R.F. dan J.P.Faris, 55
- C**
Clayton, C.G. dan D.B. Smith, 134
Copp, Axelrod, Hamilton, 114
Cruz, Hahn, Bale, 112
- D**
deviasi standar, 27
diskriminasi ruang, 11
Doerner, H., dan Hoskins, W., 39
- E**
efek Ogston, 11
- F**
faktor kontaminasi, 37
faktor pemisahan, 37
Faris, J.P., 55
- G**
Gray, P.R., Clary, D.H., dan Beamer, W.H., 96
Grave, 115
Gustafon dan Darken, 106
- H**
Hahn, O., 39
Hamilton dan Soley, 115
Harpas, 134
Henderson dan James, 105
Hertz, Roberts dan Evans, 115
- K**
Kendall, 115
kesalahan rata-rata, 28
kesalahan statistik, 27
koinsidensi tertunda, 34
Kraus, K.A., 55
Kraus, K.A. dan F.Nelson, 55
- L**
Lean, G.H. dan M.J. Griackmore, 134
Libby, W.F., 124
- M**
Meinke, W.W., 73
Muller, R.H., 98
- N**
Nernst, 41
- P**
Pechner, 114
Pegg, R.E., dan J.S.Pollack, 99
pengaliran berganda, 64
pengemban, 38
pengemban penahan, 38
penghamburan sendiri, 25
penukar anion, 49
penukar kation, 49
peresapan sendiri, 25
persentase kesalahan boleh-jadi, 28
perunut, 67

S
sambungan silang, 55
sumber berpasangan, 25
sumber radiasi, 67

U
ukuran partikel, 55
Urey, H.C., 131

R
Ruben, S., 107

W
waktu mati, 24
waktu penguraian, 24
waktu tidak peka, 24
Walden, 94
Whipple, C., 112
Whitehead, U.L., 133
Wilgerodt, 94
Wilson, J.N. dan R.G.Dickinson, 93
Wilzbach, 103

LAMPIRAN 1

DAFTAR ISOTOP

Keterangan :

Kolom 1

Nuklida disusun menurut nomor atom Z , dan nomor massa A . Isomer dinyatakan dengan huruf m di belakang nomor massa.

Kolom 2

Spin dan paritas, angka dalam tanda kurung masih belum dapat dipastikan ketelitiannya.

Kolom 3

Selisih massa dinyatakan dalam satuan MeV relatif terhadap $\Delta^{12}\text{C} = 0$.

Kolom 4

Umur paro radionuklida atau kelimpahan (% atom) nuklida stabil, th = tahun, h = hari, j = jam, m = menit, d = detik. Huruf di depan satuan waktu m = mili, md = mili detik.

Kolom 5

Jenis peluruhan, angka dalam % menunjukkan persentase cabang peluruhan. Simbol ϵ menyatakan penangkapan elektron, peluruhan β^- , atau keduanya.

$2\beta^-$ = peluruhan negatron ganda,

$\beta - n$ = peluruhan negatron disusul oleh emisi neutron,

ϵp = peluruhan β^+ atau peluruhan ϵ disusul oleh emisi proton tertunda, notasi serupa untuk peluruhan partikel tertunda).

Tabel daftar isotop ini dikutip, dan disesuaikan dengan istilah dalam bahasa Indonesia, dari pustaka Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis, karangan William.D. Ehmann dan Diane.E. Vance, terbitan John Wiley & Sons, Inc. New York, 1991

DAFTAR ISOTOP

Z	I s o t o p		J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
	Unsur	A				
0	n	1	1/2+	8,071	10,4 m	β^-
1	H	2	1/2 +	7,289	99,985 %	
		3	1+	13,136	0,015 %	
		3	1/2+	14,950	12,33 th	β^-
2	He	4	1/2+	14,931	0,000137 %	
		5	0+	2,424	99,999863 %	
		6	3/2-	11,390	0,60 MeV	α , n
		7	0+	17,592	806,7 md	β^-
		8	(3/2)-	26,110	160 keV	N
		9	0+	31,598	119,0 md	β^- , β -n 16 %
3	Li	4		40,810	Sangat pendek	N
		5	2-	25,120		
		6	3/2-	11,680	\approx 1,5 MeV	α , p
		7	1+	14,085	7,5 %	
		8	3/2-	14,907	92,5 %	
		9	2+	20,945	838 md	β^- , β -2 α
		9	3/2-	24,954	178,3 md	β^- , β -n 49,5 %
		10				β -n2 α
		11		33,840	1,2 MeV	N
		11	(1/2-)	40,900	8,7 md	β^- , β -n
4	Be	6				β -n α 0,027 %
		7	0+	18,374	92 keV	α , 2p
		7	3/2-	15,768	53,29 h	E
		8	0+	4,941	6,8 eV	2 α
		9	3/2-	11,347	100%	
		10	0+	12,607	1,51x10 ⁶ th	β^-
		11	1/2+	20,174	13,81 d	β^- , β - α 3,1%
		12	0+	25,077	24,4 md	β^- , β - α < 1%
5	B	13	(1/2, 5/2)+	35,000		N
		14	0+	40,100	4,2 md	β^-
		7	(3/2-)	27,870	1,4 MeV	p, α
		8	2+	22,920	770 md	ϵ , $\epsilon\alpha$, ϵ 2 α
		9	3/2-	12,415	0,54 keV	p, 2 α
		10	3+	12,050	19,9%	
		11	3/2-	8,668	80,1%	
		12	1+	13,369	20,20 md	β^- , β -3 α 1,58%
		13	3/2-	16,562	17,36 md	β^- , β -n 0,28%
		14	2-	23,664	16,1 md	β^-
6	C	15		28,970	8,8 md	β^- , β -n
		16	(0-)	37,140		N
		17	(3/2-)	43,310		β^-
		18		52,280		
		19		59,360		
		8	0+	35,094	230 keV	α , p
		9	(3/2-)	28,913	126,5 md	ϵ , ϵ p, ϵ 2 α
		10	0+	15,699	19,255 d	E

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

I s o t o p			J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan	
Z	Unsur	A					
6	C	11	3/2-	10,650	20,385 m	E	
		12	0+		98,90%		
		13	1/2-	3,125		1,10%	
		14	0+	3,020		5730 th	β^-
		15	1/2-	9,873		2,449 d	β^-
		16	0+	13,694		0,747 d	β^- , β -n \geq 98,8%
		17		21,035		202 md	β^-
		18	0+	24,920		66 md	β^- , β -n
		19		32,630			
		20	0+	37,070			β^-
7	N	10		39,700			
		11	1/2-	24,890	0,74 MeV		p
		12	1+	17,338		11.000 md	ϵ , ϵ 3, α 3,44%
		13	1/2-	5,345		9,965 m	ϵ
		14	1+	2,863		99,63%	
		15	1/2-	0,101		0,37%	
		26	2-	5,682		7,13 d	β^- , β - α 0,0012%
		17	1/2-	7,871		4,173 d	β^- , β -n 95%
		28	1-	13,117		624 md	β^- , β -n, β - α
		19		15,871		290 md	β^- , β -n
		20		21,880		100 md	β^- , β -n
		21		25,150		95 md	β^- , β -n 84%
8	O	22		31,990	24 md	β^- , β -n 35%	
		12	0+	32,060	400 keV	P	
		13	(3/2-)	23,113		8,90 md	ϵ , ϵ p
		14	0+	8,006		70,606 d	ϵ
		15	1/2-	2,855		122,24 d	ϵ
		16	0+	-4,737		99,76%	β^-
		17	5/2+	-0,809		0,038%	β^-
		18	0+	-0,782		0,20%	β^-
		19	5/2+	3,332		26,91 d	β^-
		20	0+	3,796		13,57 d	β^- , β -n 31%
		21	(5/2+)	8,066		3,42 d	β^- , β -n 58%
		22	0+	9,440		2,25 d	
23		14,540		82 md	p		
24	0+	18,790		61 md	p		
9	F	14	(2-)	33,610		p	
		15	(1/2+)	16,770	1,0 MeV		ϵ
		16	0-	10,680		40 keV	
		17	5/2+	1,951		64,49 d	β^-
		18	1+	0,873		109,77 m	β^-
		19	1/2+	-1,487		100%	β^-
		20	2+	-0,017		11,00 d	β^-
		21	5/2+	-0,047		4,158 d	β^-
		22	(3,4)+	2,789		4,23 d	β^-
		23	(3/2,5/2)+	3,350		2,23 d	β^-
		25		11,330			
		26		18,460			
27		25,600					

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	Isotop Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
10	Ne	16	0+	23,989	122 keV	2p
		17	1/2-	16,480	109,0 md	ϵ , ϵp
		18	0+	5,319	1,672 d	E
		19	1/2+	1,751	17,22 d	E
		20	0+	-7,047	90,48%	
		21	3/2+	-5,737	0,27%	
		22	0+	-8,027	9,25%	
		23	5/2+	-5,156	37,24 d	β^-
		24	0+	-5,950	3,38 m	β^-
		25	(1/2, 3/2)+	-2,060	602 md	β^-
		26	0+	0,440	230 md	β^-
		27		6,960		
28	0+	11,000				
11	Na	18		25,320		p
		19		12,928		p
		20	2+	6,839	447,9 md	ϵ , $\epsilon\alpha$ 21%
		21	3/2+	-2,189	22,48 d	ϵ
		22	3+	-5,185	2,6088 th	ϵ
		23	3/2+	-9,532	100%	
		24	4+	-8,420	14,9590 j	β^-
		24m	1+	-7,948	20,20 md	IT, $\beta^- \approx 0,05\%$
		25	5/2+	-9,360	59,1 d	β^-
		26	3+	-6,904	1,072 d	β^-
		27	5/2+	-5,650	301 md	β^- , $\beta\text{-n}$ 0,13%
		28	1+	-1,140	30,5 md	β^- , $\beta\text{-n}$ 0,58%
		29	3/2	2,650	44,9 md	β^- , $\beta\text{-n}$ 22%
		30	2+	8,330	48 md	β^- , $\beta\text{-n}$ 30% $\beta\text{-2n}$ 1,17% $\beta\text{-}\alpha$ 0,0055%
		31	(3/2)	12,010	17,0 md	β^- , $\beta\text{-n}$ 37% $\beta\text{-2n}$ 0,9%
		32		16,550	13,2 md	β^- , $\beta\text{-n}$ 39% $\beta\text{-2n}$ 1,2%
33		21,470	8,2 md	β^- , $\beta\text{-n}$ 52% $\beta\text{-2n}$ 12%		
34		26,650	5,5 md	β^- , $\beta\text{-n}$, $\beta\text{-2n}$		
35			1,5 md	β^- , $\beta\text{-n}$		
12	Mg	20	0+	17,570	0,1 d	ϵ , ϵp
		21	(3/2, 5/2)+	10,913	122 md	ϵ , ϵp 32%
		22	0+	-0,397	3,857 d	ϵ
		23	3/2+	-5,473	11,317 d	ϵ
		24	0+	-13,933	78,99%	ϵ , ϵp
25	5/2+	-13,192	10,00%			

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

I s o t o p			J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
Z	Unsur	A				
12	Mg	26	0+	-16,214	11,015	
		27	1/2+	-14,586	9,462 m	β^-
		28	0+	-15,019	20,91 j	β^-
		29	3/2+	-10,728	1,30 d	β^-
		30	0+	-9,070	335 md	β^-
		31		-3,400	0,23 d	β^-
		32	0+	-0,790	120 md	β^- , β -n 2,4 %
		33		5,090	90 md	β^- , β -n 17 %
		34	0+	8,440	20 md	β^- , β -n
		35		14,680		
13	Al	22		18,040	70 md	ϵ , ep , ϵ 2p
		23		6,767	0,47 d	ϵ , ep
		24	4+	-0,055	2,053 d	ϵ , $\epsilon\alpha$ 0,035%
		24m	1+	0,371	131,3 md	IT 82%, ϵ 18%
		25	5/2+	-8,915	7,183 d	$\epsilon\alpha$ 0,028%
		26	5+	-12,210	7,4x10 ⁵ th	ϵ
		26m	0+	-11,982	6,3452 d	ϵ
		27	5/2+	-17,197	100%	
		28	3+	-16,851	2,2414 m	β^-
		29	5/2+	-18,215	6,56 m	β^-
		30	3+	-15,890	3,60 d	β^-
		31	(3/2, 5/2)+	-14,967	0,644	β^-
		32	1+	-11,190	33 md	β^-
		33		-8,610		
		34		-3,250	60 md	β^- , β -n 27 %
		35		-0,320	0,15 d	β^- , β -n 40 %
36	0+	5,050				
14	Si	22	0+		6 md	ϵ , ep
		23		23,530		
		24	0+	10,755	102 md	ϵ , ep
		25	5/2+	3,827	220 md	ϵ , ep
		26	0+	-7,145	2,234 d	ϵ
		27	5/2+	-12,385	4,16 d	ϵ
		28	0+	-21,492	92,23%	
		29	1/2+	-21,895	4,67%	
		30	0+	-24,433	3,10%	
		31	3/2+	-22,950	157,3 m	
		32	0+	-24,081	172 th	β^-
		33		-20,556	6,18 d	β^-
		34	0+	-19,992	2,77 d	β^-
		35		-14,390	0,78 d	β^-
36	0+	-12,640	0,45 d	β^-		
37		-7,000		β^- , β -n < 10 %		
38	0+	-5,360		β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

I s o t o p		N	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
Z	Unsur					
15	P	32	0+	-24,081	172 th	β^-
		33		-20,556	6,18 d	β^-
		34	0+	-19,992	2,77 d	β^-
		35		-14,390	0,78 d	β^-
		36	0+	-12,640	0,45 d	β^- , β -n < 10 %
		37		-7,000		
		38	0+	-5,360		
		25		22,080		
		26		11,260	\approx 20 md	ϵ , ϵ p, ϵ 2p
		27	1/2+	-0,715	0,26 d	ϵ , ϵ p
		28	3+	-7,161	270,3 md	ϵ ,
		29	1/2+	-16,951	1,140 d	ϵ
		30	1+	-20,207	2,498 m	ϵ
		31	1/2+	-24,441	100%	
		32	1+	-24,305	14,262 h	β^-
		33	1/2+	-26,338	25,34 h	β^-
		34	1+	-24,557	12,43 d	β^-
		35	1/2+	-24,857	47,3 d	β^-
		36		-20,251	5,6 d	β^-
		37		-18,930	2,31 d	β^-
		38		-13,430	0,64 d	β^-
		39		-12,500	\approx 160 md	β^- , β -n 41 %
40		-7,020	0,26 d	β^- , β -n 30 %		
41			0,12 d	β^- , β -n 30%		
42			0,11 d	β^- , β -n 50 %		
16	S	27		18,220		
		28	0+	2,199	125 md	ϵ , ϵ p
		29	5/2+	-3,115	0,187 d	ϵ , ϵ p 47%
		30	0+	-14,063	1,178 d	ϵ
		31	1/2+	-19,045	2,572 d	ϵ
		32	0+	-26,016	95,02%	
		33	3/2+	-26,586	0,75%	
		34	0+	-29,932	4,21%	
		35	3/2+	-28,846	87,51 h	β^-
		36	0+	-30,664	0,02%	
		37	7/2-	-26,896	5,05 d	β^-
		38	0+	-26,861	170,3 m	β^-
		39	(7/2)-	-23,160	11,5 d	β^-
		40	0+	-22,520	8,8 d	β^-
17	Cl	35	3/2+	-28,846	87,51 h	β^-
		36	0+	-30,664	0,02%	
		37	7/2-	-26,896	5,05 d	β^-
		38	0+	-26,861	170,3 m	β^-
		39	(7/2)-	-23,160	11,5 d	β^-
		40	0+	-22,520	8,8 d	β^-
		41		-17,870		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	N	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
17	Cl	42	0+	-16,420		
		29		-15,050		
		30		-4,840		
		31		-7,060	150 md	ϵ , ep
		32	1+	-13,330	298 md	ϵ , $\epsilon\alpha$ 0,09% ϵp 0,026%
		33	3/2+	-21,003	2,511 d	ϵ
		34	0+	-24,440	1,5264 d	ϵ
		34m	3+	-24,294	32,00 m	ϵ 53,4% IT 46,6%
		35	3/2+	-29,013	75,77%	
		36	2+	-29,522	3,01x10 ⁵ th	β^- 98,2% ϵ 1,8%
		37	3/2-	-31,761	24,23%	
		38	2-	-29,798	37,24 d	β^-
		38m	5-	-29,127	715 md	IT
		39	3/2+	-29,802	55,6 m	β^-
		40	2-	-27,530	1,35 m	β^-
		41	(1/2, 3/2)+	-27,400	38,4 d	β^-
		42		-24,660	6,8 d	β^-
		43		-23,130	3,3 d	β^-
		44		-20,010		
18	Ar	32	0+	-2,172	98 md	ϵ , ep 43%
		33	1/2+	-9,398	173 md	ϵ , ep 31%
		34	0+	-18,379	844,5 md	ϵ
		35	3/2+	-23,048	1,775 d	ϵ
		36	0+	-30,230	0,337%	
		37	3/2+	-30,948	35,04 h	ϵ
		38	0+	-34,715	0,063%	
		39	7/2+	-33,241	269 th	β^-
		40	0+	-35,039	99,600%	
		41	7/2+	-33,066	1,822 j	β^-
		42	0+	-34,420	32,9 th	β^-
		43	(3/2,5/2)	-31,980	5,37 m	β^-
		44	0+	-32,260	11,87 m	β^-
		45	(7/2-)	-29,720	21,48 d	β^-
		46	0+	-29,720	8,4 d	β^-
		47		-25,910		
		50	0+			
19	K	33		8,00		
		34		-1,480		
		35	3/2+	-11,196	190 md	ϵ , ep 0,37%
		36	2+	-17,425	342 md	ϵ , ep 0,05% $\epsilon\alpha$ 0,003%
		37	3/2+	-24,798	1,226 d	ϵ
		38	3+	-28,802	7,636 m	ϵ
		38m	0+	-28,806	923,9 md	ϵ
		39	3/2+	-33,806	93,2581%	

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
19	K	40	4-	-33,534	0,0117% 6,7302%	ϵ 10,67%
		41	3/2+	-35,558	12,360 j	β^-
		42	2-	-35,020	22,3 j	β^-
		43	3/2+	-36,593	22,13 m	β^-
		44	2-	-35,810	17,3 m	β^-
		45	3/2+	-36,614	105 d	β^-
		46	(2-)	-35,418	17,5 d	β^-
		47	1/2+	-35,696	6,8 d	β^-
		48	(2-)	-32,122	1,26 d	β^- , β -n 86 %
		49	(1/2+,3/2+)	-30,770	1,277x10 ⁹ th	β^- 89,33%
21	Sc	46	4+	-41,758	83,810 h	β^-
		46m	1-	-41,615	18,75 d	IT
		47	7/2-	-44,330	3,345 h	β^-
		48	6+	-44,492	43,7 j	β^-
		49	7/2-	-46,558	57,2 m	β^-
		50	5+	-44,537	102,5 d	β^-
		50m	2+, 3+	-44,280	0,35 d	IT > 97,5% β^- < 2,5%
		51	(7/2)-	-43,218	12,4 d	β^-
		52	3+	-40,060	8,2 d	β^-
		53		-38,230		
22	Ti	40	0+	-9,063	50 md	ϵ
		41	3/2+	-15,690	80 md	ϵ
		42	0+	-25,121	199 md	ϵ
		43	7/2-	-29,320	509 md	ϵ
		44	0+	-37,548	49 th	ϵ
		45	7/2-	-39,006	3,08 j	ϵ
		46	0+	-44,125	8,0%	
		47	3/2-	-44,931	7,3%	
		48	0+	-48,487	73,8%	
		49	7/2-	-48,558	5,5%	
		50	0+	-51,426	5,4%	
		51	3/2-	-49,726	5,76 m	β^-
		52	0+	-49,464	1,7 m	β^-
		53	(3/2)-	-46,830	32,7 d	β^-
54	0+	-45,530				
23	V	42		-8,220		
		43		-17,920		
		44		-23,800	90 md	ϵ , $\epsilon\alpha$
		45	7/2-	-31,875	539 md	ϵ
		46	0+	-37,075	422,37 md	ϵ
		47	3/2-	-42,004	32,6 m	ϵ
		48	4+	-44,474	15,974 h	ϵ
		49	7/2-	-47,956	338 h	ϵ
		50	6+	-49,219	1,5x10 ¹⁷ th	ϵ 83% β^- 17%
		51	7/2-	-52,199	99,750%	
		52	3+	-51,438	3,75 m	β^-

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p		J π	Δ (MeV)	Umur paro / Kelimpahan	Peluruhan
	Unsur	A				
23	V	53	7/2-	-51,846	1,61 m	β^-
		54	3+	-49,889	49,8 d	β^-
		55	(7/2-)	-49,150	6,54 d	β^-
		56		-46,110		
24	Cr	44	0+	-13,450		
		45	(7/2-)	-19,410	50 md	ϵ , $\epsilon p \approx 25\%$
		46	0+	-29,472	0,26 d	ϵ
		47	3/2-	-34,553	508 md	ϵ
		48	0+	-42,818	21,56 j	ϵ
		49	5/2-	-45,328	42,3 m	ϵ
		50	0+	-50,257	$>1,8 \times 10^{17}$ th	2 ϵ
					4,345%	
		51	7/2-	-51,447	27,702 h	ϵ
		52	0+	-55,414	83,79%	
		53	3/2-	-55,282	9,50%	
		54	0+	-56,930	2,365%	
		55	3/2-	-55,105	3,487 m	β^-
		56	0+	-55,290	5,94 m	β^-
		57	3/2- - 7/2-	-52,690	21,1 d	β^-
		58	0+	-52,050	7,0 d	β^-
		59			1,0 d	β^-
60	0+		0,57 d	β^-		
25	Mn	46		-12,470 d		ϵ , ϵp
		47		-22,650		ϵ , ϵp
		48	4+	-29,211	0,15 d	ϵ , ϵp
		49	5/2-	-37,611	384 md	ϵ
		50	0+	-42,625	283,07 md	ϵ
		50m	5+	-42,396	1,75 m	$\epsilon > 92,6\%$ IT, 7,4%
		51	5/2-	-48,238	46,2 m	ϵ
		52	6+	-50,702	5,591 h	ϵ
		52m	2+	-50,324	21,1 m	ϵ 98,25% IT 1,75%
		53	7/2-	-54,686	$3,7 \times 10^6$ th	ϵ
		54	3+	-55,553	312,12 h	$\epsilon \beta^- < 0,001\%$
		55	5/2-	-57,708	100%	
		56	3+	-56,907	2,5785 j	β^-
		57	5/2-	-57,487	87,2 d	β^-
		58	3+	-55,830	65,3 d	β^-
		58m	(0)+	-55,830	3,0 d	β^-
		59	3/2-, 5/2-	-55,476	4,6 d	β^-
60	0+	-52,900	51 d	β^-		
60m	3+	-52,900	1,77 d	β^- , IT		
61	(5/2)-		0,71 d	β^-		
62			0,88 d	β^-		
63			2,25 d	β^-		
26	Fe	48		-18,130		ϵ , ϵp
		49	(7/2-)	-24,580	75 md	ϵ , $\epsilon p \leq 60\%$
		50	0+	-34,470		ϵ , ϵp
		51	(5/2-)	-40,217	310 md	ϵ

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
26	Fe	52	0+	-48,331	8,275 j	ε
		52m	(12+)	-41,511	45,9 d	ε > 92,6%
		53	7/2-	-50,943	8,51 m	ε
		53m	19/2-	-47,903	2,58 m	IT
		54	0+	-56,250	5,9%	
		55	3/2-	-57,476	2,73 th	ε
		56	0+	-60,603	91,72%	
		57	½-	-60,178	2,1%	
		58	0+	-62,151	0,28%	
		59	3/2-	-60,661	44,496 h	β ⁻
		60	0+	-61,406	1,5x10 ⁶ th	β ⁻
		61	3/2-, 5/2-	-58,919	5,98 m	β ⁻
		62	0+	-58,896	68 d	β ⁻
		63	5/2-	-55,190	6,1 d	β ⁻
		64			2,0 d	β ⁻
27	Co	50		-17,980		ε, ep
		51		-27,420		ε, ep
		52		-34,287		ε, ep
		53	(7/2-)	-42,639	240 md	ε
		53m	(19/2-)	-39,449	247 md	ε ≈ 98,5%, p≈1,5%
		54	0+	-48,007	193,24 md	ε
		54m	(7)+	-47,808	1,48 m	ε
		55	7/2-	-54,025	17,53 j	ε
		56	4+	-56,037	77,12 h	ε
		57	7/2-	-59,342	271,8 h	ε
		58	2+	-59,844	70,82 h	ε
		58m	5+	-59,819	9,15 j	IT
		59	7/2-	-62,226	100%	
		60	5+	-61,646	5,2714 th	β ⁻
		60m	2+	-61,587	10,47 m	IT 99,76%
						β ⁻ 0,24%
		61	7/2-	-62,897	1,650 j	β ⁻
		62	2+	-61,423	1,50 m	β ⁻
		62m	5+	-61,401	13,91 m	β ⁻ > 99%, IT < 1%
		63	(7/2)-	-61,839	27,4 d	β ⁻
64	1+	-59,791	0,30 d	β ⁻		
65	(7/2)-	-59,160	1,25 d	β ⁻		
66			0,23 d	β ⁻		
67			0,42 d	β ⁻		
28	Ni	51				ε, ep
		52		-22,640		ε, ep
		53	(7/2-)	-29,380	45 md	ε, ep
		54	0+	-39,210		ε
		55	7/2-	-45,330	189 md	ε
		56	0+	-53,901	6,10 h	ε
		57	3/2-	-56,077	35,65 j	ε
		58	0+	-60,225	68,077%	
		59	3/2-	-61,153	7,5x10 ⁴ th	ε
		60	0+	-64,470	26,223%	

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
28	Ni	61	3/2-	-64,219	1,140%	
		62	0+	-66,745	3,634%	
		63	1/2-	-65,512	100,1 th	β^-
		64	0+	-67,098	0,926%	
		65	5/2-	-65,124	2,520 j	β^-
		66	0+	-66,029	54,6 j	β^-
		67	1/2-	-63,743	21 d	β^-
		68	0+	-63,483	19 d	β^-
		69		-60,460	11,4 d	β^-
		29	Cu	55		-31,630		$\epsilon, \epsilon p$
56				-38,584		$\epsilon, \epsilon p$
57	3/2-			-47,350	233 md	ϵ
58	1+			-51,662	3,204 d	ϵ
59	3/2-			-56,353	81,5 d	E
60	2+			-58,344	23,7 m	E
61	3/2-			-61,982	3,347 j	ϵ
62	1+			-62,797	9,74 m	E
63	3/2-			-65,578	69,17%	
64	1+			-65,423	12,701 j	ϵ 62,95% β^- 37,1%
65	3/2-			-67,262	30,83%	
66	1+			-66,256	5,10 m	β^-
67	3/2-			-67,303	61,92 j	β^-
68	1+			-65,540	31,1 d	β^-
68m	(6-)			-64,818	3,75 m	IT 84% β^- 16%
69	3/2-			-65,741	2,85 m	β^-
70	(1+)			-63,390	4,5 d	β^-
70m	(4-)			-63,250	47 d	β^-
71	(3/2-)			-62,920	19,5 d	β^-
72					6,6 d	β^-
73			3,9 d	β^-		
75			1,3 d	β^- , β^-n 3,5%		
76			0,61 d	β^- , β^-n		
30	Zn	56		-26,130		
		57	(7/2-)	-32,700	40 md	$\epsilon, \epsilon p \geq 65%$
		58	0+	-42,210		E
		59	3/2-	-47,260	183,7 md	$\epsilon, \epsilon p$
		60	0+	-54,185	2,38 m	E
		61	3/2-	-56,343	89,1 d	E
		62	0+	-61,170	9,186 j	E
		63	3/2-	-62,211	38,50 m	E
		64	0+	-66,002	48,6%	
		65	5/2-	-65,910	243,9 h	E
		66	0+	-68,898	27,9%	
		67	5/2-	-67,879	4,1%	
		68	0+	-70,006	18,8%	
		69	1/2-	-68,417	56,4 m	β^-
		69m	9/2+	-67,978	13,76 j	IT 99,97% β^- 0,03%

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p		J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
	Unsur	A						
30	Zn	70	0+	-69,561	$>5 \times 10^{14}$ th, 0,6%	$2 \beta^-$		
		71	1/2-	-67,323	2,45 m	β^-		
		71m	9/2+	-67,165	3,96 j	β^- IT \leq 0,05%		
		72	0+	-68,131	46,5 j	β^-		
		73	(1/2)-	-65,410	23,5 d	β^-		
		73m	(7/2+)	-65,215	5,8 d	β^- , IT		
		74	0+	-65,708	96 d	β^-		
		75	(7/2+)	-65,530	10,2 d	β^-		
		76	0+	-62,290	5,7 d	β^-		
		77	(7/2+)	-58,820	2,08 d	β^-		
		77m	(1/2)-	-58,048	1,05 d	β^- , 50%, IT $>$ 50%		
		78	0+	-57,660	1,47 d	β^-		
		79		-53,820	1,0 d	β^-		
		80	0+	-51,890	0,55 d	β^-		
		31	Ga	61		-47,540		
				62	0+	-51,999	116,12 md	ϵ
				63	3/2-, 5/2-	-56,690	32,4 d	ϵ
				64	0+	-58,837	2,630 m	ϵ
				65	3/2-	-62,654	15,2 m	ϵ
66	0+			-63,724	9,49 j	ϵ		
67	3/2-			-66,878	3,261 h	ϵ		
68	1+			-67,085	67,629 m	ϵ		
69	3/2-			-69,322	60,108%			
70	1+			-68,905	21,14 m	β^- 99,59% ϵ 0,41%		
71	3/2-			-70,139	39,892%			
72	3-			-68,589	14,10 j	β^-		
73	3/2-			-69,705	4,86 j	β^-		
74	(3-)			-68,060	8,12 m	β^-		
74m	(0)			-68,000	9,5 d	IT 75%, β^- < 50%		
75	3/2-			-68,466	126d	β^-		
76	(3-)			-66,440	29,1 d	β^-		
77	(3/2-)			-66,320	13,2 d	β^-		
78	(3)			-63,560	5,09 d	β^-		
79	(3/2-)			-62,720	3,00 d	β^- , β -n 0,1%		
80		-59,380	1,66 d	β^- , β -n 0,84%				
81	(5/2-)	-57,990	1,23 d	β^- , β -n 12%				
82	(1, 2, 3)	-53,380	0,602 d	β^- , β -n 19,8%				
83			0,31 d	β^- , β -n 43%				
32	Ge	61		-47,310	40 md	ϵ , ϵp		
		63		-54,430				
		64	0+	-56,410	63,7 d	ϵ		
		65	3/2-, 5/2-	-61,620	30,9 d	ϵ , ϵp 0,013%		
		66	0+	-62,656	2,26 j	ϵ		
		67	(1/2-)	-66,978	18,7 m	ϵ		
		68	0+	-67,097	270,83 h	ϵ		
		69	5/2-	-70,561	39,05 j	ϵ		
		70	0+	-69,906	21,23%			
		71	1/2-	-69,708	11,43 h	ϵ		
		71m	9/2+	-47,310	20,40 md	IT		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
32	Ge	72	0+	-72,583	27,66%	
		73	9/2+	-71,295	7,73%	
		73m	1/2-	-71,228	0,499 d	IT
		74	0+	-73,423	35,94%	
		75	1/2-	-71,858	82,78 m	
		75m	7/2+	-71,718	47,7 d	IT 99,97% β^- 0,03%
		76	0+	-73,214	7,44%	
		77	7/2+	-71,216	11,30 j	β^-
		77m	1/2-	-71,056	52,9 d	β^- 79%, IT 21%
		78	0+	-71,863	88 m	β^-
		79	(1/2-)	-69,490	19,1 d	β^-
		79m		-69,304	39,0 d	β^- 96%, IT 4%
		80	0+	-69,380	29,5 d	β^-
		81		-66,310	7,6 d	β^-
		81m	(1/2+)	-65,631	7,6 d	β^-
		82	0+	-65,380	4,60 d	β^-
		83		-61,140	1,9 d	β^-
		84	0+	-58,150	1,2 d	β^-
		33	As	65		-47,510		$\epsilon$
66				-52,070	95,8 md	ϵ
67	(3/2, 5/2)			-56,650	42,5 d	ϵ
68	3			-58,880	151,6 d	ϵ
69	5/2-			-63,080	15,2 m	ϵ
70	4(+)			-64,340	52,6 m	ϵ
71	5/2-			-67,894	65,28 j	ϵ
72	2-			-68,228	26,0 j	ϵ
73	3/2-			-70,955	80,30 h	ϵ
74	2-			-70,861	17,77 h	ϵ 66%, β^- 34%
75	3/2-			-73,035	100%	
76	2-			-72,290	26,32 j	β^- , ϵ <0,02%
77	3/2-			-73,918	38,83 j	β^-
78	(2-)			-72,819	90,7 m	β^-
79	3/2-			-73,639	9,01 m	β^-
80	1+			-72,165	15,2 d	β^-
81	3/2-			-72,536	33,3 d	β^-
82	(1+)			-70,078	19,1 d	β^-
82m	(5-)			-70,078	13,6 d	β^-
83	(3/2-)	-69,880	13,4 d	β^-		
84	0(-), 1(-), 2	-66,080	5,5 d	β^- , β -n 0,08%		
84m		-66,080	0,65 d	β^-		
85	(3/2-)	-63,510	2,028 d	β^- , β -n 23%		
86		-59,340	0,9 d	β^- , β -n 12%		
87	(3/2-)		0,73 d	β^- , β -n 44%		
34	Se	67		-46,860		
		68	0+	-54,080	1,6 m	ϵ
		69	(3/2-)	-56,300	27,4 m	ϵ , ϵ p 0,05%
		70	0+	-61,540	41,1 m	ϵ
		71	3/2-, 5/2-	-63,090	4,74 m	ϵ
		72	0+	-67,897	8,40 h	ϵ
		73	9/2+	-68,215	7,15 j	ϵ
		73m	3/2-	-68,189	39,8 m	IT 72,6%, ϵ 27,4%

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

I s o t o p			J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan	
Z	Unsur	A					
34	Se	74	0+	-72,215	0,89%		
		75	5/2+	-72,171	119,779 h	ϵ	
		76	0+	-75,254	9,36%		
		77	1/2-	-74,601	7,63%		
		77m	7/2+	-74,439	17,36 d	IT	
		78	0+	-77,028	23,78%		
		79	7/2+	-75,920	$\leq 6,5 \times 10^4$ th	β^-	
		79m	1/2-	-75,824	3,91 m	IT	
		80	0+	-77,762	49,61%		
		81	1/2-	-76,392	18,45 m	β^-	
		81m	7/2+	-76,289	57,28 m	IT 99,95% β^- 0,05%	
			82	0+	-77,596	$1,4 \times 10^{20}$ th 8,73%	$2 \beta^-$
			83	9/2+	-75,343	22,3 m	β^-
			83m	1/2-	-75,114	70,1 d	β^-
			84	0+	-75,952	3,1 m	β^-
			85	(5/2+)	-72,420	31,7 d	β^-
			86	0+	-70,540	15,3 d	β^-
			87	(5/2+)	-66,710	5,85 d	β^- , β -n 0,18%
			88	0+	-63,820	1,52 d	β^- , β -n 0,94%
			89			0,41 d	β^- , β -n 5%
			91			0,27 d	β^- , β -n 21%
35	Br	69		-46,800			
		70		-51,140	80,2 md	ϵ	
		70m		-51,140	2,2 d	ϵ	
		71	1/2- - 7/2-	-56,590	21,4 d	ϵ	
35	Br	72	3+	-59,000	78,6 d	ϵ	
		73	(3/2)-	-63,600	3,4 m	ϵ	
		74	(0-, 1)	-65,301	25,4 m	ϵ	
		74m	4(-)	-65,301	46 m	ϵ	
		75	3/2-	-69,142	96,7 m	ϵ	
		76	1-	-70,291	16,2 j	ϵ	
		76m	(4)+	-70,188	1,31 d	IT > 99,4% $\epsilon < 0,6%$	
			77	3/2-	-73,237	57,036 j	ϵ
			77m	9/2+	-73,131	4,28 m	IT
			78	1+	-73,455	6,46 m	$\epsilon \geq 99,99%$ $\beta^- \leq 1 \times 10^{-2} \%$
			79	3/2-	-70,291	50,69%	IT
			79m	9/2+	-75,863	4,86 d	β^- 91,7%, ϵ 8,3%
			80	1+	-75,891	17,68 m	IT
			80m	5-	-75,805	4,42 j	
			81	3/2-	-77,978	49,31%	β^-
				5-	-77,499	35,30 j	IT 97,6%, β^- 2,4%
				2-	-77,453	6,13 m	β^-
		(3/2)-	-79,010	2,40 j	β^-		
		2-	-77,776	31,80 m	β^-		
		(5-, 6-)	-77,456	6,0 m	β^-		
		3/2-	-78,607	2,90 m	β^-		
		(2-)	-75,640	55,1 d	β^- , β -n 2,57%		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
35	Br	88	(1,2-)	-70,720	16,5 d	β^- , β -n 6,4%		
		89	(3/2-, 5/2-)	-68,420	4,40 d	β^- , β -n 13%		
		90	(2-)	-64,650	1,71 d	β^- , β -n 23%		
		91			0,541 d	β^- , β -n 18,3%		
		92			0,365 d	β^- , β -n 21%		
		93	(5/2-)			β^- , β -n		
		94				β^- , β -n		
		36	Kr	71		-46,490	97 md	ϵ
				72	0+	-53,940	17,2 d	ϵ
				73		-56,890	27,0 d	ϵ ep 0,68%
74	0+			-62,130	11,50 m	ϵ		
75	(5/2+)			-64,214	4,3 m	ϵ		
76	0+			-68,965	14,8 j	ϵ		
77	5/2+			-70,194	74,4 m	ϵ		
78	0+			-74,147	0,35%			
79	1/2-			-74,445	35,04 j	ϵ		
79m	7/2+			-74,315	50 d	IT		
80	0+			-77,894	2,25%			
81	7/2+			-77,697	2,13x10 ⁵ th	ϵ		
81m	1/2-			-77,506	13 d	IT 99,99% ϵ 0,01%		
82	0+			-80,592	11,6%			
83	9/2+			-79,982	11,5%			
83m	1/2-			-79,940	1,83 j	IT		
84	0+			-82,430	57,0%			
85	9/2+			-81,477	10,756 th	β^-		
85m	1/2-			-81,172	4,480 j	β^- 78,6% IT 21,4%		
86	0+			-83,262	17,3 %			
87	5/2+			-80,706	76,3 m	β^-		
88	0+			-79,688	2,84 j	β^-		
89	3/2+, 5/2+			-76,720	3,15 m	β^-		
90	0+			-74,947	32,32 d	β^-		
91	(5/2+)			-71,370	8,57 d	β^-		
92	0+	-68,650	1,85 d	β^- , β -n 0,03 %				
93	(7/2+)	-64,160	1,29 d	β^- , β -n 3,2 %				
94	0+		0,20 d	β^- , β -n 5,7 %				
95				β^- , β -n				
37	Rb	73		-46,590				
		74	(0+)	-51,670	64,9 md	ϵ		
		75	(3/2-, 5/2-)	-57,210	19,0 d	ϵ		
		76	1	-60,530	39,1 d	ϵ		
		77	3/2-	-64,917	3,75 m	ϵ		
		78	0(+)	-66,980	17,66 m	ϵ		
		78m	4(-)	-66,877	5,74 m	ϵ 90% IT 10%		
		79	5/2+	-70,839	22,9 m	ϵ		
		80	1+	-72,176	34 d	ϵ		
		81	3/2-	-75,459	4,576 j	ϵ		
		81m	9/2+	-75,373	30,49 m	IT 97,7%, ϵ 2,3%		
		82	1+	-76,203	1,273 m	ϵ		
		82m	5-	-76,123	6,472 j	ϵ IT<0,33%		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro /kelimpahan	Peluruhan	
37	Rb	73		-46,590			
		74	(0+)	-51,670	64,9 md	ϵ	
		75	(3/2-, 5/2-)	-57,210	19,0 d	E	
		76	1	-60,530	39,1 d	E	
		77	3/2-	-64,917	3,75 m	E	
		78	0(+)	-66,980	17,66 m	E	
		78m	4(-)	-66,877	5,74 m	ϵ 90% IT 10%	
		79	5/2+	-70,839	22,9 m	ϵ	
		80	1+	-72,176	34 d	ϵ	
		81	3/2-	-75,459	4,576 j	ϵ	
		81m	9/2+	-75,373	30,49 m	IT 97,7%, ϵ 2,3%	
		82	1+	-76,203	1,273 m	ϵ	
		82m	5-	-76,123	6,472 j	ϵ IT<0,33%	
		83	5/2-	-79,049	86,2 h	ϵ	
		84	2-	-79,748	32,77 h	ϵ 96,2%, β^- 3,8%	
		84m	6-	-79,284	20,26 m	IT	
		85	5/2-	-82,164	72,17%		
		86	2-	-82,744	18,631 h	β^- 99,99% ϵ 0,0052%	
			86m	6-	-82,288	1,017 m	IT
			87	3/2-	-84,593	4,75x10 ¹⁰ th 27,83%	β^-
			88	2-	-82,601	17,78 m	β^-
			89	3/2-	-81,709	15,15 m	β^-
			90	(1-)	-79,350	153 d	β^-
			90m	(4-)	-79,243	258 d	β^- 95,7%, IT 4,3%
			91	3/2(-)	-77,786	58,4 d	β^-
			92	0(-)	-74,811	4,50 d	β^- , β -n 0,012%
	93	5/2-	-72,688	5,7 d	β^- , β -n 2,5%		
	94	3(-)	-68,518	2,702 d	β^- , β -n 10,4%		
	95	5/2	-65,813	384 md	β^- , β -n 9,1%		
37	Rb	96	2+	-61,150	0,199 d	β^- , β -n 13%	
		97	3/2	-58,290	171,8 md	β^- , β -n 24,6%	
		98	(0)	-54,090	0,114 d	β^- , β -n 15,9% β -2n	
		99	(5/2+)	-50,860	59 md	β^- , β -n 15%	
		100			51 md	β^- , β -n 6%	
				90 md	β^- , β -n		
38	Sr	77	(5/2+, 7/2+)	-57,880	9,0 d	ϵ , ϵ p<0,25%	
		78	0+	-63,450	2,5 m	ϵ	
		79	(3/2-)	-65,340	2,25 m	ϵ	
		80	0+	-70,190	106,3 m	ϵ	
		81	(1/2-)	-71,470	22,3 m	ϵ	
		82	0+	-75,998	25,55 h	ϵ	
		83	(7/2+)	-76,781	32,41 j	ϵ	
		83m	(1/2-)	-76,522	4,95 d	IT	
		84	0+	-80,641	0,56%		
		85	9/2+	-81,099	64,84 h	ϵ	
		85m	1/2-	-80,860	67,63 m	IT 84,5% ϵ 15,5%	
86	0+	-84,518	9,86%				

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro /kelimpahan	Peluruhan		
38	Sr	87	9/2+	-84,875	7,00%			
		87m	1/2-	84,486	2,804 j	IT 99,7% ϵ 0,3%		
		88	0+	-87,916	82,58%			
		89	5/2+	-86,211	50,53 h	β^-		
		90	0+	-85,942	29,1 th	β^-		
		91	5/2+	-83,652	9,63 j	β^-		
		92	0+	-82,923	2,71 j	β^-		
		93	5/2(+)	-80,160	7,423 m	β^-		
		94	0+	-78,836	75,1 d	β^-		
		95	(1/2+)	-75,050	25,1 d	β^-		
		96	0+	-72,880	1,06 d	β^- , β -n 13%		
		97	(1/2+)	-68,810	420 md	β^- , β -n 0,27%		
		98	0+	-66,380	0,65 d	β^- , β -n 0,8%		
		99	(3/2+)	62,150	0,271 d	β^- , β -n 0,32%		
		100	0+	60,200	202 md	β^- , β -n 0,73%		
		101			115 md	β^- , β -n		
		102		0+	68 md	β^- , β -n		
		39	Y	79		-58,140		
				80	(4)	-61,190	33,8 d	ϵ
81	(1/2-)			-65,950	72,4 d	ϵ		
82	1+			-68,180	9,5 d	ϵ		
83	(9/2+)			-72,370	7,08 m	ϵ		
83m	(1/2-)			-72,160	2,85 m	ϵ		
84	1+			-74,230	4,6 d	ϵ		
84m	(5-)			-73,730	40 m	ϵ		
85	(1/2-)			-77,845	2,68 j	ϵ		
85m	(9/2+)			-77,825	4,86 j	ϵ , IT		
86	4-			-79,279	14,74 j	E		
86m	(8+)			-79,061	48 m	IT 99,31% ϵ 0,69%		
87	1/2-			-83,014	79,8 j	E		
87m	9/2+			-82,633	13,37 j	it 98,43% ϵ 0,02		
88	4-			-84,294	106,65 d	E		
89	1/2-			-87,703	100%			
89m	9/2+			-86,794	16,06 d	IT		
90	2-			-86,488	64,1 j	β^-		
90m	7+			-85,806	3,19 j	IT, β^- 0,002%		
91	1/2-			-86,349	58,51 h	β^-		
91m	9/2+			-85,793	49,71 m	IT, β^- < 1,5%		
92	2-			-84,833	3,54 j	β^-		
93	1/2-			-84,245	10,10 j	β^-		
93m	(7/2)+			-83,486	0,82 d	IT		
94	2-			-82,348	18,7 m	β^-		
95	1/2-			-81,214	10,3 m	β^-		
96	0-			-78,300	6,2 d	β^-		
96m	(3+)			-78,200	9,6 d	β^-		
96m				-78,200	2,3 m	β^-		
97	(1/2-)			-76,270	3,76 d	β^- , β -n 0,06%		
97m	(9/2+)			-75,602	1,21 d	β^- , IT < 0,7%		
98	1+	-72,520	0,59 d	β^- , β -n 0,3%				
98m	(4-)	-72,520	2,13 d	β^-				
99	(5/2+)	-70,170	1,47 d	β^- , β -n 0,96%				
100	1-, 2-	-67,290	735 md	β^- , β -n 0,81%				
100m	(3, 4, 5)	-67,290	0,94 d	β^-				

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro /kelimpahan	Peluruhan
39	Y	101	(5/2)	-64,650	431 md	β^- , β -n
		102		-64,450	0,36 d	β^- , β -n
40	Zr	81		-58,790	15 d	ϵ , ϵ p
		82	0+	-64,180	32 d	ϵ
		83	(1/2-)	-66,350	44 d	ϵ
		83m	(7/2+)	-66,350	7 d	ϵ
		84	0+	-71,430	25,9 m	ϵ
		85	(7/2+)	-73,150	7,86 m	ϵ
		85m	(1/2-)	-72,858	10,9 d	IT 93,77%
		86	0+	-77,980	16,5 j	ϵ
		87	(9/2+)	-79,348	1,68 j	ϵ
		87m	(1/2-)	-79,012	14,0 d	
		88	0+	-83,626	83,4 h	ϵ
		89	9/2+	-84,871	78,41 j	ϵ
		89m	(1/2-)	-84,283	4,18 m	IT 93,77% ϵ 6,23%
		90	0+	-88,770	51,4%	
		90m	5-	-86,451	809,2 md	IT
		91	5/2+	-87,893	11,22%	
		92	0+	-88,457	17,15%	
		93	5/2+	-87,120	1,53x10 ⁶ th	β^-
		94	0+	-87,268	17,38%	
		95	5/2+	-85,659	64,02 h	β^-
96	0+	-85,442	>3,56x10 ¹⁷ th 2,80%			
97	1/2+	-82,950	16,90 j	β^-		
98	0+	-81,283	30,7 d	β^-		
99	(1/2+)	-77,790	2,1 d	β^-		
100	0+	-76,590	7,1 d	β^-		
101	(3/2)	-73,380	2,1 d	β^-		
102	0+	-71,770	2,9 d	β^-		
103		-68,290	1,3 d	β^-		
104	0+	-66,260	1,2 d	β^-		
41	Nb	84	(3+)	-61,530	12 d	ϵ
		85	(9/2+)	-66,940	20,9 d	ϵ
		86	(5+)	-69,580	88 d	ϵ
		87	(9/2+)	-74,180	2,6 m	ϵ
		87m	(1/2-)	-74,180	3,7 m	ϵ
		88	(8+)	-76,430	14,5 m	ϵ
		88m	(4-)	-76,430	7,8 m	ϵ
		89	(1/2-)	-80,500	1,18 j	ϵ
		89m	(9/2+)	-80,580	1,9 j	ϵ
		90	8+	-82,659	14,60 j	ϵ
		90m	4-	-82,534	18,8 d	IT
		91	9/2+	-86,640	6,6x10 ² th	ϵ
		91m	1/2-	-86,536	6,88 h	IT 95%, ϵ 5%
		92	(7+)	-86,410	3,5x10 ⁷ th	ϵ
		92m	(2+)	-86,315	10,15 h	ϵ
		93	9/2+	-8,210	100%	
93m	1/2-	-87,179	16,1 th	IT		
94	(6+)	-86,368	2,03x10 ⁴ th	β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
41	Nb	95	9/2+	-86,783	34,97 h	β^-		
		95m	1/2-	-86,547	3,61 h	IT 94,4%, β^- 5,6%		
		96	6+	-85,606	23,35 j	β^-		
		97	9/2+	-85,608	1,227 j	β^-		
		97m	1/2-	-84,865	58,1 d	IT		
		98	1+	-83,528	2,86 d	β^-		
		98m	(5)+	-83,444	51,3 m	β^-		
		99	9/2+	-82,328	15,0 d	β^-		
		99m	1/2-	-81,983	2,6 m	β^- , IT, 2,5%		
		100	1+	-79,929	1,5 d	β^-		
		100m	(4+, 5+)	-79,449	2,99 d	β^-		
		191		-78,950	7,1 d	β^-		
		102	Rendah	-76,350	1,3 d	β^-		
		102	Tinggi	-76,350	4,3 d	β^-		
		103	(5/2+)	-75,240	1,5 d	β^-		
		104		-72,260	0,91 d	β^-		
		104		-72,260	4,8 d	β^-		
		105		-70,940	2,95 d	β^-		
		106		-67,290	1,02 d	β^-		
		42	Mo	86		-64,680		
				87	(7/2+)	-67,440	13,4 d	ϵ ep
88	0+			-72,830	8,0 m	ϵ		
89	(9/2+)			-75,005	2,04 m	ϵ		
89m	(1/2-)			-74,618	190 md	IT		
90	0+			-80,170	5,67 j	ϵ		
91	9/2+			-82,208	15,49 m	ϵ		
91m	1/2-			-81,555	65,0 d	IT 50,1%, ϵ 49,9%		
92	0+			-86,809	14,84%			
93	5/2+			-86,805	$3,5 \times 10^3$ th	ϵ		
93m	21/2+			-84,380	6,85 j	IT 99,88 ϵ 0,12% %		
94	0+			-88,413	9,25%			
95	5/2+			-87,709	15,92%			
96	0+			-88,792	16,68%			
97	5/2+			-87,542	9,55%			
98	0+			-88,113	24,13%			
99	(3/2+0)			-85,967	65,94 j	β^-		
100	0+			-86,186	9,63%			
101	(3/2+)			-83,513	14,6 m	β^-		
102	0+			-83,559	11,3 m	β^-		
103	(3/2+)			-80,760	67,5 d	β^-		
104	0+	-80,370	60 d	β^-				
105	(3/2+)	-77,360	35,6 d	β^-				
106	0+	-76,270	8,4 d	β^-				
107		-72,910	3,5 d	β^-				
108	0+	-71,460	1,5 d	β^-				
43	Tc	88		-62,330				
		89		-68,000				
		90	1+	-70,970	8,3 d	ϵ		
		90	Tinggi	-70,970	49,2 d	ϵ		
		91	(9/2+)	-75,990	3,14 m	ϵ		
		91m	(1/2)-	-75,640	3,3 m	ϵ , IT < 1%		
		92	(8+)	-78,939	4,4 m	ϵ		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
43	Tc	93	9/2+	-83,607	2,75 j	ϵ
		93m	1/2-	-83,216	43,5 m	IT 77,8%, ϵ 22,2%
		94	7+	-84,158	293 m	ϵ
		94m	(2)+	-84,082	52,0 m	ϵ , IT < 0,1%
		95	9/2+	-86,018	20,0 j	ϵ
		95m	1/2-	-85,979	61 h	ϵ 96%, IT 4%
		96	7+	-85,819	4,28 h	ϵ
		96m	4+	-85,785	51,5 m	IT 98%, ϵ 2%
		97	9/2+	-87,222	2,6x10 ⁶ th	ϵ
		97m	1/2-	-87,125	90,5 h	IT
		98	(6)+	-86,429	4,2x10 ⁶ th	β^-
		99	9/2+	-87,324	2,11x10 ⁵ th	β^-
		99m	1/2-	-87,181	6,01 j	IT, β^- 0,004%
		100	1+	-86,017	15,8 d	β^-
		101	(9/2)+	-86,337	14,2 m	β^-
		102	1+	-84,569	5,28 d	β^-
		102m	(4,5)	-84,269	4,35 m	$\beta^- \approx 98\%$, IT $\approx 2\%$
		103	5/2+	-84,601	54,2 d	β^-
		104	(3+)	-82,490	18,3 m	β^-
		105	(5/2+)	-82,350	7,6 m	β^-
		106	(1,2)	-79,790	36 d	β^-
107m		-79,160	21,2 d	β^-		
108	(3)	-76,280	5,17 d	β^-		
109		-74,920	1,4 d	β^-		
110		-71,640	0,83 d	β^-		
111			0,30 d	β^-		
44	Ru	90		-65,470		
		91	(9/2+)	-68,410	9 d	ϵ
		91m	(1/2-)	-68,410	7,6 d	ϵ , $\epsilon\beta$
		92	0+	-74,410	3,65 m	ϵ
		93	(9/2+)	-77,270	59,7 d	ϵ
		93m	(1/2-)	-76,536	10,8 d	ϵ 77,8% IT 22,2% $\epsilon\beta$ 0,03%
		94	0+	-82,569	51,8 m	ϵ
44	Ru	95	5/2+	-83,451	1,64 j	ϵ
		96	0+	-86,073	5,54%	
		97	5/2+	-86,113	2,9 h	ϵ
		98	0+	-88,225	1,86%	
		99	5/2+	-87,617	12,7%	
		100	0+	-89,219	12,6%	
		101	5/2+	-87,950	17,1%	
		102	0+	-89,099	31,6%	
		103	(32)+	-87,260	39,26 h	β^-
		104	0+	-88,093	18,6%	
		105	3/2+	-85,932	4,44 j	β^-
		106	0+	-86,326	373,59 h	β^-
		107	(5/2+)	-83,710	3,75 m	β^-
		108	0+	-83,760	4,55 m	β^-
109	(5/2+)	-80,720	34,5 d	β^-		
110	0+	-80,240	14,6 d	β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan	
44	Ru	111		-77,030	2,12 d	β^-	
		112	0+	-76,030	1,75 d	β^-	
		113			0,80 d	β^-	
		114	0+		0,5 d	β^-	
45	Rh	92		-63,140			
		93		-69,110			
		94m	(8+)	-72,940	25,8 d	ϵ	
		94m	(3+)	-72,940	70,6 d	ϵ	
		95	(9/2)+	-78,340	5,02 m	ϵ	
		95m	(1/2)-	-77,797	1,96 m	IT 88%, ϵ 12%	
		96	5(+)	-79,626	9,6 m	ϵ	
		96m	2(+)	-79,574	1,51m	IT 60%, ϵ 40%	
		97	(9/2)+	-82,590	31,1 m	ϵ	
		97m	(1/2)-	-82,331	44,3 m	ϵ 95,1% IT 4,9%	
		98	(2)+	-83,168	8,7 m	ϵ	
		98m	(5+)	-83,118	3,5 m	ϵ	
		99	(1/2)-	-85,519	16,1 h	ϵ	
		99m	9/2+	-85,455	4,7 j	ϵ IT < 0,16%	
		100	1-	-85,590	20,8 j	ϵ	
		100m	(5+)	-85,590	4,6 m	IT \approx 98,3% $\epsilon \approx$ 1,7%	
		101	1/2-	-87,410	3,3 th	ϵ	
		101m	9/2+	-87,253	4,34 h	ϵ 92,3% IT 7,7%	
		102	6(+)	-86,821	\approx 2,9 th	ϵ	
		102m	(1-, 2-)	-86,751	207 h	ϵ 75% β^- 20% IT 5%	
			103	1/2-	-88,024	100%	
			103m	7/2+	-87,984	56,12 m	IT
			104	1+	-86,952	42,3 d	β^- 99,55% ϵ 0,45%
			104m	5+	-86,823	4,34 m	IT 99,87% β^- 0,13%
			105	7/2+	-87,849	35,36 j	β^-
			105m	1/2-	-87,719	\approx 40 d	IT
			106	1+	-86,365	29,80 d	β^-
			106m	(6)+	-86,228	130 m	β^-
			107	(7/2+)	-86,862	21,7 m	β^-
			108m	1+	-85,080	16,8 d	β^-
			108m	$\geq 3+$, $\leq 6+$	-85,080	6,0 m	β^-
			109	7/2+	-85,021	80 d	β^-
			110	1+	-82,940	3,2 d	β^-
	110	(≥ 2)	-82,940	28,5 d	β^-		
	111		-82,330	11 d	β^-		
	112m	1+	-79,730	3,8d	β^-		
	112m	≥ 4	-79,730	6,8 d	β^-		
	113		-78,740	2,72 d	β^-		
	114	(1+)	-75,960	1,85 d	β^-		
	114m	(≥ 4)	-75,960	1,85 d	β^-		
	115		-79,730	0,99 d	β^-		
	116	1+		0,68 d	β^-		
	116	5, 6, 7		0,9 d	β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
46	Pd	94	0+	-66,270	9,0 d	ϵ
		95m	(21/2)+	-68,150	13,3 d	ϵ , $\epsilon p > 0,93\%$
		96	0+	-76,180	2,03 m	ϵ
		97	(5/2+)	-77,800	3,1m	ϵ
		98	0+	-81,301	17,7m	ϵ
		99	(5/2)+	-82,193	21,4 m	ϵ
		100	0+	-85,221	3,63 h	ϵ
		101	(5/2+)	-85,430	8,47 j	ϵ
		102	0+	-87,918	1,02%	
		103	5/2+	-87,471	16,991 h	ϵ
		104	0+	-89,393	11,14%	
		105	5/2+	-88,416	22,33%	
		106	0+	-89,907	27,33%	
		107	5/2+	-88,374	6,5x10 ⁶ th	β^-
		107m	11/2-	-88,159	21,3 d	IT
		108	0+	-89,523	26,46%	
		109	5/2+	-87,605	13,7 j	β^-
		47	Ag	109m	11/2-	-87,416	4,69 m	IT
110	0+			-88,345	11,72%	
111	5/2+			-86,030	23,4 m	β^-
111m	11/2-			-85,858	5,5 j	IT 73%, β^- 27%
112	0+			-86,333	21,03 j	β^-
113	(5/2)+			-83,680	93 d	β^-
113m				-83,680	≥ 100 d	β^-
114	0+			-83,460	2,42 m	β^-
115				-80,590	47 d	β^-
116	0+			-80,140	12,4 d	β^-
117					5,0 d	β^-
118	0+				2,4 d	β^-
96	(8+, 9+)			-64,430	5,1 d	ϵ ϵp 8%
97				-70,790	21 d	ϵ
98	(7+)			-73,000	47 d	ϵ $\epsilon p > 0\%$
99	(9/2)+			-76,760	124 d	ϵ
99m	(1/2-)			-76,254	10,5 d	IT
100	(5+)			-78,170	2,01 m	ϵ
100m	(2+)	-78,154	2,24 m	ϵ , IT		
101	9/2+	-81,190	11,1 m	ϵ		
101m	1/2-	-80,916	3,10 d	IT		
102	5+	-82,080	12,9 m	ϵ		
102m	2+	-82,071	7,7 m	ϵ 51% IT 33%		
103	7/2+	-84,787	65,7 m	ϵ		
103m	1/2-	-84,653	5,7 d	IT		
104	5+	-85,114	69,2 m	ϵ		
104m	2+	-85,107	33,5 m	ϵ 67%, IT 33%		
105	1/2-	-87,078	41,29 h	ϵ		
105m	7/2+	-87,053	7,23 m	IT 99,66%, ϵ 0,34%		
106	1+	-86,941	23,96 m	ϵ 99,5%, $\beta^- < 1\%$		
106m	6+	-86,851	8,46 h	ϵ		
107	1/2-	-88,407	51,839%			
107m	7/2+	-88,314	44,3 d	IT		
108	1+	-87,605	2,37 m	β^- 97,15%, ϵ 2,85%		
108m	6+	-87,496	127 th	ϵ , 91,3%, IT 8,7%		
109	1/2-	-88,721	48,161%			

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
47	Ag	109	1/2-	-88,721	48,161%	
		109m	7/2+	-88,633	39,6 d	IT
		110	1+	-87,459	24,6 d	β^- 99,7% ϵ 0,3%
		110m	6+	-87,341	249,76 h	β^- 98,64%, IT 1,36%
		111	1/2-	-88,217	7,45 h	β^-
		111m	7/2+	-88,157	64,8 d	β^- 99,3% β^- 0,7%
		112	2(-)	-86,624	3,130 j	β^-
		113	1/2-	-87,040	5,137 j	β^-
		113m	7/2+	-86,997	68,7 d	IT \approx 80%, β^- \approx 20%
		114	1+	-84,960	4,6 d	β^-
		115	1/2-	-84,950	20,0 m	β^-
		115m	(7/2+)	-84,950	18,0 d	β^-
		116	(2-)	-82,760	2,68 m	β^-
		116m	(5+)	-82,679	10,4 d	β^- 98%, IT 2%
		117m	(7/2+)	-82,250	5,34 d	β^-
		117m	(1/2-)	-82,250	72,8 d	β^-
		118	(1)	-79,580	3,76 d	β^-
		118m		-79,452	2,0 d	β^- 59%, IT 41%
		119	(7/2+)	-78,590	2,1 d	β^-
		120		-75,770	1,23 d	β^-
		120m		-75,567	0,32 d	β^- \approx 63%, IT \approx 37%
		121		-74,550	0,78 d	β^- , β -n
		122	(3+0)		0,56 d	β^- , β -n
		122m			1,5 d	β^- , β -n
123			0,31 d	β^- , β -n		
124	(1, 2, 3)+		0,22 d	β^- , β -n		
48	Cd	97			3 d	ϵ , ϵ p
		98	0+	-67,900	\approx 8 d	ϵ , ϵ p?
		99	(5/2+)	-69,890	16 d	ϵ , ϵ p 0,17%
						ϵ , $\alpha < 1 \times 10^{-4}$ %
		100	0+	-74,320	49,1 d	ϵ
		101	(5/2+)	-75,660	1,2 m	ϵ
		102	0+	-79,720	5,5 m	ϵ
		103	(5/2+)	-80,650	7,3 m	ϵ
		104	0+	-83,977	57,7 m	ϵ
		105	5/2+	-84,339	55,5 m	ϵ
		106	0+	-87,135	1,25%	
		107	5/2+	-86,990	6,50 j	ϵ
		108	0+	-89,253	0,89%	
		109	5/2+	-88,507	462,0 h	ϵ
		110	0+	-90,351	12,49%	
		111	1/2+	-89,254	12,80%	
		111m	11/2-	-88,858	48,54 m	IT
		112	0+	-90,581	24,13%	
		113	1/2+	-89,050	9,3x10 ¹⁵ th, 12,22%	β^-
		113m	11/2-	-88,786	14,1 th	β^- 99,86%, IT 0,14%
114	0+	-90,021	28,73%			
115	1/2+	-88,091	53,46 j	β^-		
115m	11/2-	-88,091	44,6 h	β^-		
116	0+	-87,910	7,49%			
117	1/2+	-88,720	2,49 j	β^-		
117m	117m	-86,280	3,36 j	β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
48	Cd	118	0+	-86,709	50,3 m	β^-		
		119	(1/2+)	-83,940	2,69 m	β^-		
		119m	(11/2-)	-83,793	2,20 m	β^-		
		120	0+	-83,973	50,8 d	β^-		
		121		-80,950	13,5 d	β^-		
		121m		-80,950	8 d	β^-		
		122	0+	-80,580	5,3 d	β^-		
		123	(3/2+)	-77,520	2,09 d	β^-		
		123m		-77,520	1,9 d	β^-		
		124	0+		1,24 d	β^-		
		125	(3/2)		0,68 d	β^-		
		125m			0,66 d	β^-		
		126	0+		0,52 d	β^-		
		127	(3/2+)		0,4 d	β^-		
		128	0+		0,28 d	β^-		
		129			0,27 d	β^-		
		130	0+		0,20 d	β^- , β -n \approx 4%		
		49	In	100		-63,870		ϵ
				101		-68,360		ϵ
102	(5)			-70,580	23 d	ϵ		
103	(9/2+)			-74,607	65 d	ϵ		
104	5+			-76,080	1,84 m	ϵ		
104m				-76,080	15,7 m	IT		
105	(9/2+)			-79,493	5,07 m	ϵ		
105m	(1/2-)			-78,819	48 d	IT		
106	7+			-80,617	6,2 m	ϵ		
106m	(3+)			-80,588	5,2 m	ϵ		
107	9/2+			-83,568	32,4m	ϵ		
107m	1/2-			-82,890	50,4 d	IT		
108	7+			-84,112	58,0 m	ϵ		
108m	2+			-84,082	39,6 m	ϵ		
109	9/2+			-86,487	4,2 j	ϵ		
110	2+			-86,410	69,1 m	ϵ		
110	7+			-86,410	4,9 j	ϵ		
111	9/2+			-88,391	2,8049 h	ϵ		
111m	1/2-			-87,854	7,7 m	IT		
112	1+			-87,995	14,97 m	ϵ 56%, β^- 44%		
112m	4+			-87,838	20,56 m	IT		
113	9/2+			-89,368	4,3%			
113m	1/2-			-88,976	1,6582 j	IT		
114	1+			-88,571	71,9 d	β^- 99,5%, ϵ 0,5%		
114m	5+			-88,391	49,51 h	IT 95,6%, ϵ 4,4%		
115	9/2+			-89,539	4,41x10 ¹⁴ th	β^-		
115m	1/2-			-89,203	95,7%	IT 95%, β^- 5%		
116	1+			-88,252	14,10 d	β^- 99,94% ϵ <0,06%		
116m	5+	-88,125	54,41 m	β^-				
116m	8-	-87,962	2,18 d	IT				
117	9/2+	-88,945	43,8 m	β^-				
117m	1/2-	-88,630	116,5 m	β^- 52,9% IT 47,1%				
		118	1+	-87,232	5,0 d	β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
49	In	118m	5+	-87,172	4,45 m	β^-
		118m	8-	-87,032	8,5 d	IT 98,6%, β^- 1,4%
		119	9/2+	-87,733	2,4 m	β^-
		119m	1/2-	-87,422	18,0 m	β^- 97,5%, IT 2,5%
		120	1+	-85,800	3,08 d	β^-
		120	(3, 4, 5)+	-85,800	46,2 d	β^-
		120	(8-)	-85,800	47,3 d	β^-
		121	9/2+	-85,841	23,1 d	β^-
		121m	1/2-	-85,527	3,88 m	β^- 98,8%, IT 1,2%
		122	1+	-83,580	1,5 d	β^-
		122m	(4, 5)+	-83,580	10,3 d	β^-
		122m	8-	-83,360	10,8 d	β^-
		123	(9/2)+	-83,420	5,98 d	β^-
		123m	(1/2)-	-83,100	47,8 d	β^-
		124	3+	-81,060	3,17 d	β^-
		124m	(8-)	-80,870	3,4 d	β^-
		125	(9/2)+	-80,420	2,33 d	β^-
		125m	(1/2-)	-80,240	12,2 d	β^-
		126	(8-)	-77,810	1,63 d	β^-
		126m	3+	-77,660	1,5 d	β^-
		127	(9/2+)	-77,010	1,15 d	β^-
		127m	(1/2-)	-76,850	3,76 d	β^- , β -n
		128	3+	-74,020	0,80 d	β^- , β -n
		128m	8-	-73,940	0,7 d	β^- , β -n
		129	(9/2+)	-73,020	0,63 d	β^- , β -n
		129m	(1/2-)	-72,820	1,23 d	β^- , β -n
		130	1(-)	-70,010	0,32 d	β^- , β -n 0,9%
		130m	(5+)	-70,010	0,55 d	β^- , β -n < 1,67%
		130m	(10-)	-70,010	0,55 d	β^- , β -n < 1,67%
		131	(9/2+)	-68,490	0,27 d	β^- , β -n
		131m	(21/2+)	-68,490	0,32 d	β^-
		131m	1/2-	-68,490	0,35 d	β^-
		132		-63,210	0,203 d	β^- , β -n
133			180 md	β^- , β -n		
50	Sn	102	0+	-65,020		
		103		-67,050	7 d	ϵ , ϵ p
		104	0+	-71,680	21,4 d	ϵ
		105		-73,240	31 d	ϵ , ϵ p
		106	0+	-77,450	2,10 m	ϵ
		107	5/2+	-78,470	2,90 m	ϵ
		108	0+	-82,050	10,30 m	ϵ
		109	7/2(+)	-82,633	18,0 m	ϵ
		110	0+	-85,834	4,11 j	ϵ
		111	7/2+	-85,943	35,3 m	ϵ
		112	0+	-88,658	0,97%	
		113	1/2+	-88,330	115,09 h	ϵ
		113m	7/2+	-88,253	21,4 m	IT 91,1%, ϵ 8,0%
		114	0+	-90,560	0,65%	
		115	1/2+	-90,034	0,36%	
		116	0+	-91,526	14,53%	

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
50	Sn	117	1/2+	-90,399	7,68%	
		117m	11/2-	-90,084	13,60 h	IT
		118	0+	-91,654	24,22%	
		119	1/2+	-90,068	5,58%	
		119m	11/2-	-89,978	293,0 h	IT
		120	0+	-91,103	32,59%	
		121	3/2+	-89,203	27,6 j	β^-
		121m	11/2-	-89,197	55 th	IT 77,6%, β^- 22,4%
		122	0+	-89,946	4,63%	
		123	11/2-	-87,820	129,2 h	β^-
		123m	3/2+	-87,795	40,08 m	β^-
		124	0+	-88,237	5,79%	
		125	11/2-	-85,898	9,64 h	β^-
		125m	3/2+	-85,870	9,52 m	β^-
		126	0+	-86,021	$\approx 1,0 \times 10^5$ th	β^-
		127	(11/2-)	-83,504	2,10 j	β^-
		127m	(3/2+)	-83,499	4,13 m	β^-
		128	0+	-83,330	59,1 m	β^-
		128m	(7-)	-81,239	6,5 d	IT
		129	(3/2+)	-80,620	2,4 m	β^-
		129m	(11/2-)	-80,585	6,9 m	β^- , IT 0,0002%
		130	0+	-80,130	3,72 m	β^-
		130m	(7-)	-78,183	1,7 m	β^-
		131		-77,380	39 d	β^-
131m	(3/2+)	-77,380	61 d	β^-		
132	0+	-76,610	40 d	β^-		
133	(7/2-)	-71,190	1,44 d	β^- , β -n 0,08%		
134	0+	-67,230	1,04 d	β^- , β -n 17%		
51	Sb	104		-59,380		
		105		-63,930		
		106		-66,520		
		107		-70,770		
		108		-72,510	7,0 d	ϵ
		109	(5/2+)	-76,253	17,0 d	ϵ
		110	3+	-77,530	24 d	ϵ
		111	(5/2+)	-80,840	75 d	ϵ
		112	3+	-81,603	51,4 d	ϵ
		113	5/2+	-84,424	6,67 m	ϵ
		114	3+	-84,680	3,49 m	ϵ
		115	5/2+	-87,004	32,1 m	ϵ
		116	3+	-86,819	15,8 m	ϵ
		116m	8-	-86,436	60,3 m	ϵ
		117	5/2+	-88,644	2,80 j	ϵ
		118	1+	-87,998	3,6 m	ϵ
		118m	8-	-87,786	5,00 j	ϵ
		119	5/2+	-89,475	38,1 j	ϵ
		120	1+	-88,423	15,89 m	ϵ
		120m	8-	-88,423	5,76 h	ϵ

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan		
51	Sb	121	5/2+	-89,591	57,36%			
		122	2-	-88,327	2,70 h	β^- 97,6%, ϵ 2,4%		
		122m	8-	-88,163	4,21 m	IT		
		123	7/2+	-89,223	42,64%			
		124	3-	-87,619	60,20 h	β^-		
		124m	5+	-87,608	93 d	IT 75%, β^- 25%		
		124m	8-	-87,582	20,2 m	IT		
		125	7/2+	-88,258	2,73 th	β^-		
		126	(8-)	-86,400	12,4 h	β^-		
		126m	(5+)	-86,382	19,0 m	β^- 86%, IT 14%		
		126m	(3-)	-86,360	\approx 11 d	IT		
		127	7/2+	-86,705	3,85 h	β^-		
		128	8-	-84,610	9,01 j	β^-		
		128m	5+	-84,590	10,4 m	β^- 96,4%, IT 3,6%		
		129		-84,624	17,7 m	β^-		
		129	7/2+	-84,624	4,40 j	β^-		
		130	(8-)	-82,330	39,5 m	β^-		
		130m	(5+)	-82,330	6,3 m	β^-		
		131	(7/2+)	-82,020	23 m	β^-		
		132	(8-)	-79,730	4,2 m	β^-		
		132m	(4+)	-79,730	2,8 m	β^-		
		133	(7/2+)	-79,020	2,5 m	β^-		
		134	(0-)	-74,020	0,85 d	β^-		
		134	(7-)	-74,020	10,43 d	β^- , β^- -n 0,1%		
		135	(7/2+)	-70,320	1,71 d	β^- , β^- -n 16,4%		
		136		-65,050	0,82 d	β^- , β^- -n 24%		
		52	Te	106	0+	-58,270	70 <i>ind</i>	α
				107		-60,640	3,6 md	α 70%, ϵ 30%
108	0+			-65,820	2,1 d	α 68%, ϵ 32%		
109				-67,620	4,6 d	ϵ 96%, α 4%, ep		
110	0+			-72,300	18,6 d	ϵ , α		
111				-73,470	19,3 d	ϵ , α , ep		
112	0+			-77,270	2,0 m	ϵ		
113	(7/2+)			-78,320	1,7 m	ϵ		
114	0+			-81,760	15,2 m	ϵ		
115	7/2+			-82,360	5,8 m	ϵ		
115m	(1/2+)			-82,340	6,7 m	ϵ , IT		
116	0+			-85,290	2,49 j	ϵ		
117	1/2+			-85,110	62 m	ϵ		
118	0+			-87,653	6,00 h	ϵ		
119	1/2+			-87,182	10,05 j	ϵ		
119m	11/2-			-86,882	4,69 h	ϵ		
120	0+			-89,386	0,095%			
121	1/2+			-88,551	16,78 h	ϵ		
121m	11/2-			-88,257	154 h	IT 88,6%, ϵ 11,4%		
122	0+			-90,307	2,59%			
123	1/2+			-89,171	1,3x10 ¹³ th	ϵ		
					0,905%			
123m	11/2-			-88,924	119,7 h	IT		
124	0+			-90,525	4,79%			
125	1/2+			-89,024	7,12%			
125m	11/2-			-88,879	58 h	IT		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
52	Te	126	0+	-90,067	18,93%			
		127	3/2+	-88,286	9,35 j	β^-		
		127m	11/2-	-88,198	109 h	IT 97,6%, β^- 2,4%		
		128	0+	-88,992	$>8 \times 10^{24}$ th	2 β^-		
					31,70%			
		129	3/2+	-87,006	69,6 m	β^-		
		129m	11/2-	-86,901	33,6 h	IT 64% β^- 36%		
		130	0+	-87,348	$\leq 1,25 \times 10^{21}$ th			
					33,87%			
		131	3/2+	-85,206	25,0 m	β^-		
		131m	11/2-	-85,024	30 j	β^- 77,8% IT 22,2%		
		132	0+	-85,222	78,2 j	β^-		
		133	(3/2+)	-82,970	12,5 m	β^-		
		133m	(11/2-)	-82,636	55,4 m	β^- 82,5% IT 17,5%		
		134	0+	-82,430	41,8 m	β^-		
		135	(7/2-)	-77,870	19,0 d	β^-		
		136	0+	-74,460	17,5 d	β^- , β -n 1,1%		
		137	(7/2-)	-69,480	2,49 d	β^- , β -n 2,7%		
		138	0+	-66,110	1,4 d	β^- , β -n 6,3%		
		53	I	108		-52,750		
				109		-57,710	0,11 md	p
				110		-60,520	0,65 d	ϵ 83%, α 17%, $\epsilon\alpha$
								ϵ p
				111		-65,070	2,5 d	ϵ 99,9%, $\alpha \approx 0,1\%$
				112		-67,100	3,42 d	ϵ , $\alpha \approx 0,0012\%$, ϵp , $\epsilon\alpha$
				113		-71,120	6,6 d	ϵ , $\epsilon\alpha$, α $3,3 \times 10^{-7}\%$
114				-72,760	2,1 d	ϵ , ϵp		
115	(5/2+)			-76,400	1,3 m	ϵ		
116	1+			-77,550	2,91 d	ϵ		
117	(5/2+)			-80,600	2,22 m	ϵ		
118	2-			-81,050	13,7 m	ϵ		
118m	(7-)			-81,050	8,5 m	ϵ		
119	(5/2+)			-83,780	19,1 m	ϵ		
120	2-			-83,771	81,0 m	ϵ		
120m	>3			-86,270	53 m	ϵ		
121	5/2+			-86,073	2,12 j	ϵ		
122	1+			-87,937	3,63 m	ϵ		
123	5/2+			-87,368	13,2 j	ϵ		
124	2-			-88,846	4,18 h	ϵ		
125	5/2+			-87,916	60,14 h	ϵ		
126	2-			-88,982	13,02 h	ϵ 56,3%, β^- 43,7%		
127	5/2+			-87,736	100%			
128	1+			-88,507	24,99 m	β^- 93,1%, ϵ 6,9%		
129	7/2+			-86,897	$1,57 \times 10^7$ th	β^-		
130	5+			-86,857	12,36 j	β^-		
130m	2+	-87,457	9,0 m	IT 84%, β^- 16%				
131	7/2+	-85,715	8,04 h	β^-				
132	4+	-85,595	2,30 j	β^-				
132m	(8-)	-85,888	83,6 m	IT 86%, β^- 14%				
133	7/2+	-86,270	20,8 j	β^-				

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
53	I	133m	(19/2-)	-84,254	9 d	IT		
		134	4+	-83,990	52,6 m	β^-		
		134m	8-	-83,674	3,69 m	IT 97,7%, β^- 2,3%		
		135	7/2+	-83,821	6,57 j	β^-		
		136	2-	-79,550	83,4 d	β^-		
		136m	(6-)	-78,910	46,9 d	β^-		
		137	(7/2+)	-76,507	24,5 d	β^- , β -n 7,1%		
		138	(2-)	-72,290	6,49 d	β^- , β -n 5,5%		
		139	(7/2+)	-68,880	2,29 d	β^- , β -n 9,9%		
		140	(3)	-64,250	0,86 d	β^- , β -n 9,4%		
		141			0,43 d	β^- , β -n 21,2%		
		142			\approx 0,2 d	β^-		
		54	Xe	110	0+	-51,970	\approx 0,2 d	ϵ , α
				111		-54,510	0,74 d	ϵ , α
111				-54,510	0,9 d			
112	0+			-60,060	2,7 d	ϵ , α		
113				-62,090	2,74 d	ϵ 99,97%, $\epsilon\beta$ 4,2% α 0,03%, $\epsilon\alpha$		
114	0+			-67,180	10,0 d	ϵ ,		
115	(5/2+)			-68,670	18 d	ϵ , $\epsilon\beta$, $\epsilon\alpha$		
116	0+			-73,050	56 d	ϵ		
117	(5/2+)			-74,200	61 d	ϵ , $\epsilon\beta$ 0,003%		
118	0+			-77,950	3,8 m	ϵ		
119	(7/2+)			-78,750	5,8 m	ϵ		
120	0+			-81,810	40 m	ϵ		
121	(5/2+)			-82,510	39,0 m	ϵ		
122	0+			-85,050	20,1 j	ϵ		
123	(1/2+)			-85,258	2,08 j	ϵ		
124	0+			-87,659	0,10%			
125	(1/2+)			-87,191	16,9 j	ϵ		
125m	(9/2-)			-86,938	57 d	IT		
126	0+			89,174	0,09%			
127	(1/2+)			88,319	36,4 h	ϵ		
127m	(9/2-)			-88,022	69,2 d	IT		
128	0+			-89,860	1,91%			
129	1/2+			-88,68	26,4%			
129m	11/2-			-88,462	8,89 h	IT		
130	0+			-89,881	4,1%			
131	3/2+			-88,428	21,2%			
131m	11/2-			-88,264	11,9 h	IT		
132	0+			-89,292	26,9%			
133	3/2+			-87,659	5,243 h	β^-		
133m	11/2-			-87,426	2,19 h	IT		
134	0+	-88,125	10,4%					
134m	7-	-86,166	290 md	IT				
135	3/2+	-86,506	9,14 j	β^-				
135m	11/2-	-85,979	15,29 m	IT, β^- 0,004%				
136	0+	-86,429	$\geq 2,36 \times 10^{21}$ th 8,9%	$2\beta^-$				
137	(7/2-)	-82,383	3,818 m	β^-				
138	0+	-80,110	14,08 m	β^- , β -n				
139	3/2-	-75,690	39,68 d	β^-				
140	0+	-72,990	13,60 d	β^-				

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan	
54	Xe	141	5/2+	-68,320	1,73 d	β^- , β -n 0,04%	
		142	0+	-65,500	1,22 d	β^-	
55	Cs	143	5/2-		0,30 d	β^-	
		144	0+		1,15 d	β^-	
		145			0,9 d	β^- , β -n	
		146	0+				
		113			-51,810	33 μ d	p
		114	(1+)		-54,740	0,57 d	ϵ , ϵ p 7%, $\epsilon\alpha$ 0,16% α 0,02%
		115			-59,650	1,4 d	ϵ , ϵ p
		116	>4+		-62,290	3,84 d	ϵ , $\epsilon\alpha$, ϵ p
		116	(1+)		-62,290	0,70 d	ϵ , $\epsilon\alpha$, ϵ p
		117m			-66,260	6,5 d	ϵ
		117m			-66,260	8,4 d	ϵ
		118m	2		-68,270	14 d	$\epsilon\alpha$, ϵ , ϵ p
		118m	8, 7, 6		-68,270	17 d	$\epsilon\alpha$, ϵ , ϵ p
		119	9/2(+)		-72,240	37,7 d	ϵ
		119	3/2		-72,240	28 d	
		120	2		-73,820	64 d	ϵ
		120	tinggi		-73,820	57 d	ϵ , ϵ p $\leq 1,0 \times 10^{-5}\%$
		121	3/2+		-77,110	2,27 m	ϵ
		121m	9/2(+)		-77,110	121 d	ϵ , IT
		122	1+		-78,140	21,0 d	ϵ
		122m			-78,140	0,36 d	IT
		122m	8-		-78,140	4,5 m	ϵ
		123	1/2+		-81,070	5,87 m	ϵ
		123m	(11/2-)		-80,911	1,60 d	IT
		124	1+		-81,740	30,8 d	ϵ
		124m	(7)+		-81,277	6,3 d	IT
		125	1/2+		-84,113	45m	ϵ
		126	1+		-84,347	1,64 m	ϵ
		127	1/2+		-86,243	6,25 j	ϵ
		128	1+		-85,928	3,62 m	ϵ
129	1/2+		-87,506	32,06 j	ϵ		
130	1+		-86,853	29,21 m	ϵ 98,4% β^- 1,6%		
130m	5-		-86,690	3,46 m	IT 99,84% ϵ 0,16%		
131	5/2+		-88,076	9,69 d	ϵ		
132	2(-)		-87,171	6,475 d	ϵ 98% β^- 2%		
133	7/2+		-88,086	100%			
134	4+		-86,906	2,062 th	β^- , ϵ 0,0003%		
134m	8-		-86,767	2,91 j	IT		
135	7/2+		-87,662	2,3x10 ⁶ th	β^-		
135m	19/2-		-86,029	53 m	IT		
136	5+		-86,354	13,16 h	β^-		
136m	8-		-86,354	19 d	IT		
137	7/2+		-86,556	30,1 th	β^-		
138	3-		-82,896	32,2 m	β^-		
138m	6-		-82,816	2,91 m	IT 81%, β^- 19%		
139	7/2+		-80,710	9,27 m	β^-		
140	1-		-77,053	63,7 d	β^-		
141	7/2+		-74,472	24,94 d	β^- , β -n 0,03%		
142	0-		-70,538	1,70 d	β^- , β -n 0,28%		
143	3/2(+)		-67,745	1,78 d	β^- , β -n 1,62%		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
55	Cs	144	1	-63,370	1,01 d	β^- , β -n 3,17%
		144m	(≥ 4)	-63,370	<1 d	β^-
		145	3/2+	-60,210	0,594 d	β^- , β -n 13,8%
		146	(2-)	-55,700	0,343 d	β^- , β -n 14%
		147		-52,300	0,225 d	β^- 57%, β -n 43%
		148		-47,580	158 md	β^-
56	Ba	117	(3/2)	-57,160	1,8 d	ϵ , $\epsilon\alpha$, ϵp
		118	0+	-62,350		
		119		-64,460	5,35 d	ϵ , ϵp
		120	0+	-69,020	32 d	ϵ
		121		-70,420	29,7 d	ϵ , ϵp 0,02%
		122	0+	-74,540	1,95 m	ϵ
		123		-75,560	2,7 m	ϵ
		124	0+	-79,140	11,9 m	ϵ
		125	(1/2+)	-79,550	3,5 m	ϵ
		125		-79,550	8 m	ϵ
		126	0+	-82,770	100 m	ϵ
		127	(1/2+)	-82,790	12,7 m	ϵ
		128	0+	-85,470	2,43 h	ϵ
		129	1/2+	-85,080	2,23 j	ϵ
		129m	(7/2+)	-85,072	2,17 j	ϵ
		130	0+	-87,291	0,106%	
		131	1/2+	-86,714	11,8 h	E
		131m	9/2	-86,526	14,6 m	IT
		132	0+	-88,447	0,101%	
		133	1/2+	-87,570	10,52 th	E
		133m	11/2-	-87,282	38,9 j	IT 99,99% ϵ 0,01%
		134	0+	-88,965	2,42 m	
		135	3/2+	-87,867	6,593%	
		135m	11/2-	-87,599	28,7 j	IT
		136	0+	-88,903	7,85 m	
		136m	7-	-86,872	0,3084 d	IT
		137	3/2+	-87,732	11,23%	
		137m	11/2-	-87,070	2,552 m	IT
		138	0+	-88,272	71,70%	
		139	7/2-	-84,924	83,06 m	β^-
		140	0+	-83,273	12,752 h	β^-
141	3/2-	-79,732	18,27 m	β^-		
142	0+	-77,847	10,6 m	β^-		
143	5/2-	-73,979	14,33 d	β^-		
144	0+	-71,840	11,5 d	β^- , β -n 3,6%		
145	5/2-	-68,120	4,31 d	β^-		
146	0+	-65,060	2,20 d	β^-		
147		-61,500	0,893 d	β^- , β -n 0,02%		
148	0+	-58,130	0,607 d	β^- , β -n $\leq 0,02\%$		
149		-54,300	0,356 d	β -n 0,43%		
57	La	120			2,8 d	ϵ , ϵp
		122			8,7 d	ϵ , ϵp
		123			17 d	ϵ
		124	(7/2+)	-70,240	29 d	ϵ
		125	(11/2-)	-73,810	76 d	ϵ

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
57	La	126		-75,050	1,0 m	ϵ		
		127	(3/2+)	-77,990	3,8 m	ϵ		
		127m	(11/2-)	-77,990	5,0 m			
		128	4-, 5-	-78,820	5,0 m	ϵ		
		129	(3/2+)	-81,360	11,6 m	ϵ		
		129m	11/2-	-81,188	0,56d	IT		
		130	3(+)	-81,590	8,7 m	ϵ		
		131	3/2+	-83,750	59 m	ϵ		
		132	2-	-83,740	4,8 j	ϵ		
		132m	6-	-83,551	24,3 m	IT 76%, ϵ 24%		
		133	5/2+	-85,520	3,912 j	ϵ		
		134	1+	-85,252	6,45 m	ϵ		
		135	5/2+	-86,667	19,5 j	ϵ		
		136	1+	-86,030	9,87 m	ϵ		
		137	7/2+	-87,130	6×10^4 th	ϵ		
		138	5+	-86,531	$1,05 \times 10^{11}$ th	ϵ 66,4% β^- 33,6%		
				139	7/2+	-87,238	0,0902% 99,9098%	
				140	3-	-84,327	1,6781 h	β^-
				141	7/2(+)	-82,983	3,92 j	β^-
				142	2-	-80,027	91,1 m	β^-
				143	7/2+	-78,200	14,2 m	β^-
				144	(3-)	-74,940	40,8 d	β^-
				145		-73,020	24,8 d	β^-
				146	(2-)	-69,200	6,27 d	β^-
				146m	(6)	-69,170	10,0 d	β^-
				147	(5/2+)	-67,250	4,015 d	β^- , β -n 0,04%
				148	(2-)	-63,810	1,05 d	β^- , β -n 0,11%
		149		-61,290	1,2 d	β , β -n		
		150		-57,500	3,8 d	ϵ , ep		
58	Ce	123			3,8 d	ϵ , ep		
		124	0+		6 d	ϵ		
		125	(5/2+)		10 d	ϵ		
		126	0+	-71,070	50 d	ϵ		
		127		-72,290	32 d	ϵ		
		128	0+	-75,870	6 m	ϵ		
		129		-76,480	3,5 m	ϵ		
		130	0+	-79,590	25 m	ϵ		
		131		-79,730	10 m	ϵ		
		131		-79,730	5 m	ϵ		
		132	0+	-82,440	3,5 j	ϵ		
		133	9/2-	-82,470	4,9 j	ϵ		
		133m	1/2+	-82,470	97 m	ϵ		
		134	0+	-84,750	75,9 j	ϵ		
		135	1/2(+)	-84,641	17,7 j	ϵ		
		135m	11/2(-)	-84,195	20 d	IT		
		136	0+	-86,500	0,19%			
		137	3/2+	-85,910	9,0 j	ϵ		
		137m	11/2-	-85,656	34,4 j	IT 99,22%, ϵ 0,78%		
		138	0+	-87,574	0,25%			
139	3/2+	-86,973	137,640 h	ϵ				
139m	11/2-	-86,219	54,8 d	IT				
140	0+	-88,088	88,43%					

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
58	Ce	141	7/2-	-85,445	32,501 h	β^-		
		142	0+	-84,542	$>5 \times 10^{16}$ th			
		143	3/2-	-81,616	33,10 j	β^-		
		144	0+	-80,441	284,893 h	β^-		
		145	(3/2-)	-77,110	3,01 m	β^-		
		146	0+	-75,730	13,52 m	β^-		
		147	5/2-	-72,190	56,4 d	β^-		
		148	0+	-70,430	56 d	β^-		
		149		-66,800	5,2 d	β^-		
		150	0+	-64,990	4,0 d	β^-		
		151		-61,660	1,02 d	β^-		
		152	0+	-59,760	3,1 d	β^-		
		59	Pr	124			1,2 d	$\epsilon, \epsilon\text{p}$
				126			3,2 d	$\epsilon, \epsilon\text{p}$
128				-66,320	3,2 d	$\epsilon, \epsilon\text{p}$		
129				-70,060	24 d	ϵ		
130				-71,290	40,0 d	ϵ		
131				-74,450	1,7 m	ϵ		
132				-75,340	1,6 m	ϵ		
133	5/2(+)			-78,020	6,5 m	ϵ		
134	2-			-78,650	17 m	ϵ		
134m	(5-)			-78,650	11 m	ϵ		
135	3/2(+)			-80,920	24 m	ϵ		
136	2+			-81,370	13,1 m	ϵ		
137	5/2+			-83,200	1,28 j	ϵ		
138	1+			-83,137	1,45 m	ϵ		
138m	7-			-82,773	2,1 j	ϵ		
139	5/2+			-84,844	4,41 j	ϵ		
140	1+			-84,700	3,39 m	ϵ		
141	5/2+			-86,026	100%			
142	2-			-83,798	19,12 j	β^- 99,98% ϵ 0,02%		
142m	5-			-83,794	14,6 m	IT		
143	7/2+			-83,078	13,57 h	β^-		
144	0-			-80,760	17,28 m	β^-		
144m	3-			-80,701	7,2 m	IT 99,93% β^- 0,07%		
145	7/2+			-79,636	5,984 j	β^-		
146	(2-)			-76,760	24,15 m	β^-		
147	(3/2+)			-75,470	13,6 m	β^-		
148	1-			-72,490	2,27 m	β^-		
148m	(4)			-72,400	2,0 m	β^-		
149	(5/2+)	-70,988	2,26 m	β^-				
150	1(-)	-68,000	6,19 d	β^-				
151	1/2- - 5/2-	-66,760	18,90 d	β^-				
152		-64,160	3,24 d	β^-				
153		-62,370	4,3 d	β^-				
154		-59,110	2,3 d	β^-				
60	Nd	127	(5/2)		1,8 d	$\epsilon, \epsilon\text{p}$		
		128			4 d	$\epsilon, \epsilon\text{p}$		
		129	(5/2-)	-62,880	4,9 d	$\epsilon, \epsilon\text{p}$		
		130	0+	-66,990	28 d	ϵ		
		131		-68,230	24 d	$\epsilon, \epsilon\text{p}$		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
60	Nd	132	0+	-71,940	1,8 m	ϵ
		133		-72,570	70 d	ϵ
		133m	(9/2-)	-72,570	< 2 m	ϵ
		134	0+	-75,950	8,5 m	ϵ
		135	9/2(-)	-76,220	12,4 m	ϵ
		135m		-76,220	5,5 m	ϵ
		136	0+	-79,160	50,65 m	ϵ
		137	1/2+	-79,700	38,5 m	ϵ
		137m	11/2-	-79,180	1,60 d	IT
		138	0+	-82,040	5,04 j	ϵ
		139	3/2+	-82,060	29,7 m	ϵ
		139m	11/2-	-81,829	5,50 j	ϵ 88,2%, IT 11,8%
		140	0+	-84,471	3,37 h	ϵ
		141	3/2+	-84,203	2,49 j	ϵ
		141m	11/2-	-83,446	62,4 d	IT 99,9%, ϵ 0,03%
		142	0+	-85,960	27,13%	
		143	7/2-	-84,012	12,18%	
		144	0+	-83,758	2,29x10 ¹⁵ th	α
					23,80%	
					8,30%	
					17,19%	
					10,98 d	β^-
					5,76%	
					1,72 j	β^-
					> 1x10 ¹⁸ th	2 β^-
					5,64%	
					12,44 m	β^-
			11,4 m	β^-		
			28,9 d	β^-		
			25,9 d	β^-		
			8,9 d	β^-		
			5,5 d	β^-		
61	Pm	130			2,2 d	ϵ , ϵp
		132		-61,940	5,0 d	ϵ , ϵp
		133		-65,620	12 d	ϵ
		134	(5+)	-67,050	24 d	ϵ
		135	(11/2-)	-70,220	49 d	ϵ
		136	(3+)	-71,300	\approx 107 d	ϵ
		136	5(+),6-	-71,300	107 d	ϵ
		137	(11/2)-	-74,020	2,4 m	ϵ
		138	1+	-75,140	10 d	ϵ
		138m	(3+)	-75,140	3,24 m	ϵ
		138m	(6-)	-75,140	3,24 m	
		139	(5/2)+	-77,540	4,15 m	ϵ
		139m	(11/2)-	-77,351	180 md	IT
		140	1+	-78,380	9,2 d	ϵ
		140m	7-5/2+	-78,380	5,95 m	ϵ
		141	1+	-80,472	20,90 m	ϵ
		142	5/2+	-81,090	40,5 d	ϵ
		143	5-	-82,970	265 h	ϵ
		144	5/2+	-81,425	363 d	ϵ
		145	5/2+	-81,278	17,7 th	ϵ , α 3x10 ⁻⁷ %

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
61	Pm	146	3-	-79,458	5,53 th	ϵ 66,1%, β^- 33,9%		
		147	7/2+	-79,052	2,6234 th	β^-		
		148	1-	-76,874	5,379 h	β^-		
		148m	6-	-76,736	41,29 h	β^- 95%, IT 5%		
		149	7/2+	-76,073	53,08 j	β^-		
		150	(1-)	-73,606	2,68 j	β^-		
		151	5/2+	-73,398	28,40 j	β^-		
		152	1+	-71,270	4,1 m	β^-		
		152m	4-	-71,100	7,52 m	β^-		
		152m	(8)	-71,100	13,8 m	β^- , IT		
		153	5/2-	-70,660	5,4 m	β^-		
		154	(0, 1)	-68,410	1,73 m	β^-		
		154m	(3, 4)	-68,410	2,68 m	β^-		
		155	(5/2-)	-67,100	48 d	β^-		
		156		-64,370	26,7 d	β^-		
		157		-62,370	10,90 d	β^-		
		158		59,410	4,8 d	β^-		
		62	Sm	131			1,2 d	ϵ , ϵp
				133	(5/2+)		2,9 d	ϵ , ϵp
134	0+			-62,050	11 d	ϵ		
135	(7/2+)			-63,520	10 d	ϵ , ϵp		
136	0+			-67,260	43 d	ϵ		
137	(9/2-)			-68,100	45 d	ϵ		
138	0+			-71,540	3,0 m	ϵ		
139	(1/2)+			-72,080	2,57 m	ϵ		
139m	(11/2)-			-71,622	10,7 d	IT 93,7%, ϵ 6,3%		
140	0+			-75,380	14,82 m	ϵ		
141	1/2+			-75,943	10,2 m	ϵ		
141m	11/2-			-75,767	22,6 m	ϵ 99,69% IT 0,31%		
142	0+			-78,986	72,49 m	ϵ		
143	3/2+			-79,526	8,83 m	ϵ		
143m	11/2-			-78,772	66 d	IT 99,66% ϵ 0,34%		
144	0+			-81,975	3,1%			
145	7/2-			-80,660	340 h	ϵ		
146	0+			-81,000	10,31x10 ⁷ th	α		
147	7/2-			-79,276	1,06x10 ¹¹ th	α		
148	0+			-79,346	15,0% 7x10 ¹⁵ th	α		
149	7/2-			-77,146	11,3% >2x10 ¹⁵ th			
150	0+			-77,060	13,8% 7,4%			
151	5/2-			-74,587	90 th	β^-		
152	0+			-74,773	26,7%			
153	3/2+			-72,569	46,27 j	β^-		
154	0+			-72,465	22,7%			
155	3/2-			-70,201	22,3 m	β^-		
156	0+			-69,374	9,4 j	β^-		
157				-66,870	8,07 m	β^-		
158	0+	-65,400	5,51 m	β^-				
159		-62,370	11,2 d	β^-				
160		-60,350	9,6 d	β^-				

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan	
63	Eu	134			0,5 d		
		135			1,5 d	ϵ , ϵp	
		136	(1+)	-57,000	3,9 d	ϵ	
		136m	(7+)	-57,000	$\approx 3,2$ d	ϵ , ϵp	
		137	(11/2-)	-60,720	11 d		
		138	(7+)	-62,340	12,1 d	ϵ	
		139	(11/2)-	-65,630	17,9 d	ϵ	
		140	1(-)	-66,980	1,54 d	ϵ	
		140m		-66,980	0,125 d	ϵ	
		141	5/2+	-69,980	40,0 d	ϵ	
		141m	11/2-	-69,884	2,7 d	ϵ	
		142	1+	-71,580	2,4d	IT 93%, ϵ 7%	
		142m	8-	-71,410	1,22 m	ϵ	
		143	5/2+	-74,380	2,63 m	ϵ	
			152m	0-	-72,853	9,274 j	β^- 27,92%
			152m	8-	-72,751	96 m	β^- 72%, ϵ 28%
			153	5/2+	-73,376	52,2%	IT
			154	3-	-71,748	8,592 th	β^- 99,98%, ϵ 0,02%
			154m	(8-)	-71,591	46,0 m	IT
			155	5/2+	-71,829	4,68 th	β^-
			156	0+	-70,096	15,19 h	β^-
			157	5/2	-69,472	15,18 j	β^-
			158	(1-)	-67,220	45,9 m	β^-
			159	5/2+	-66,058	18,1 m	β^-
			160	(0-)	-63,550	38 d	β^-
			161		-61,770	26 d	β^-
			162		-59,080	10,6 d	β^-
		64	Gd	137			7 d	$\epsilon$, $\epsilon p$
138				-56,640			
139				-58,470	4,9 d	ϵ , ϵp	
140	0+			-62,480	16 d	ϵ	
141	1/2+			-63,540	≈ 20 d	ϵ , ϵp 0,03%	
141m	11/2-			-63,162	24,5 d	ϵ 86% IT 14%	
142	0+			-67,390	70,2 d	ϵ	
143	(1/2)+			-68,470	39 d	ϵ	
143m	(11/2-)			-68,317	112 d	ϵ	
144	0+			-71,950	4,5 m	ϵ	
145	1/2+			-72,950	23,0 m	ϵ	
145m	11/2-			-72,201	85 d	IT 94,3%, ϵ 5,7%	
146	0+			-76,099	48,27 h	ϵ	
147	7/2-			-75,367	38,06 j	ϵ	
148	0+			-76,278	74,6 th	α	
149	7/2(-)			-75,135	9,4 h	ϵ , α	
150	0+			-75,771	1,79x10 ⁶ th	α	
151	7/2-			-74,199	124 h	ϵ , α 1,0x10 ⁻⁶ %	
152	0+			-74,718	1,08x10 ¹⁴ th	α	
					0,20%		
	153			3/2-	-72,893	241,6 h	ϵ
	154			0+	-73,717	2,18%	
	155			3/2-	-72,081	14,80%	
	156			0+	-72,546	20,47%	
	157			3/2-	-70,834	15,65%	
	158			0+	-70,701	24,84%	

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
64	Gd	159	3/2-	-68,572	18,56 j	β^-		
		160	0+	-67,953	21,86%			
		161	(5/2-)	-65,517	3,66 m	β^-		
		162	0+	-64,240	8,4 m	β^-		
		163	(5/2-)	-61,590	68 d	β^-		
		164		-59,280	45 d	β^-		
		65	Tb	140		-51,780	2,4 d	ϵ , ϵp
				141	(11/2-)	-55,580	3,5 d	ϵ
				141m		-55,580	7,9 d	ϵ
				142	1+	-57,390	597 md	ϵ , $\epsilon p \approx 3,0 \times 10^{-7} \%$
				142m	(5-)	-57,390	303 md	IT ? ϵ ?
				143	(11/2-)	-60,970	12 d	ϵ
				143m	(5/2+)	-60,970	<17 d	
				144	(1+)	-62,750	≈ 1 d	ϵ
				144m	(6-)	-62,353	4,25 d	IT 66%, ϵ 34%
145	(1/2+)			-66,200				
145m	(11/2-)			-66,200	29,5 d	ϵ		
146	1+			-67,860	8 d	ϵ		
146m	(5-)			-67,860	23 d	ϵ		
147	1/2+			-70,880	1,7 j	ϵ		
147m	11/2-			-70,829	1,83 m	ϵ		
148	2-			-70,680	60 m	ϵ		
148m	9+			-70,590	2,20 m	ϵ		
149	1/2+			-71,499	4,13 j	ϵ 84,2%, α 15,8%		
149m	11/2-			-71,463	4,16 m	ϵ , α		
150m	(8+, 9+)			-71,113	5,8 m	ϵ		
150m	(2-)			-71,113	3,48 j	ϵ , $\alpha < 0,05 \%$		
151	1/2(+)			-71,633	17,609 j	ϵ , α 0,0095%		
151m	(11/2-)			-71,533	25 d	IT 93,8%, ϵ 6,2%		
152	2-			-70,770	17,5 j	ϵ , $\alpha < 7,0 \times 10^{-7} \%$		
152m	8+			-70,268	4,2 m	IT 78,9%, ϵ 21,1%		
153	5/2+	-71,322	2,34 h	ϵ				
154	0	-70,150	21,5 j	ϵ , $\beta^- < 0,1 \%$				
154m	3-	-70,150	9,0 j	ϵ 78,2% IT 21,8%, $\beta^- < 0,1 \%$				
	154m	7-	-70,150	22,7 j	ϵ 98,2% IT 1,8%,			
	155	3/2+	-71,261	5,32 h	ϵ			
	156	3-	-70,102	5,35 h	ϵ , β^-			
	156m	(7-)	-70,052	24,4 j	IT			
	156m	(0+)	-70,014	5,3 h	ϵ , IT			
	157	3/2+	-70,772	99 th	ϵ			
	158	3-	-69,480	180 th	ϵ 83,4, β^- 16,6%			
	158m	0-	-69,370	10,5 d	IT, $\beta^- < 0,6 \%$ $\epsilon < 0,01 \%$			
	159	3/2+	-69,542	100%				
	160	3-	-67,846	72,3 h	β^-			
	161	3/2+	-67,471	6,88 h	β^-			
	162	1-	-65,680	7,76 m	β^-			
	163	3/2+	-64,700	19,5 m	β^-			
	164	(5+)	-62,090	3,0 m	β^-			
	165	(3/2+)	-60,610	2,11 m	β^-			
66	Dy	141			0,9 d	ϵ , ϵp		
		142	0+	-50,990	2,3 d	ϵ , $\epsilon p \approx 8,0 \times 10^{-5} \%$		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
66	Dy	143		-52,870	3,9 d	ϵ , ep
		144	0+	-57,150	9,1 d	ϵ , ep
		145		-58,750		
		145m	(11/2-)	-58,750	13,6 d	ϵ , ep
		146	0+	-62,860	29 d	ϵ
		146m	(10+)	-62,860	150 md	IT
		147	1/2+	-64,330	40 d	ϵ , ep
		147m	11/2-	-63,579	55,7 d	ϵ , 67%, IT 33%
		148	0+	-68,000	3,1 m	ϵ
		149	(7/2-)	-67,900	4,23 m	ϵ
		150	0+	-69,324	7,17 m	ϵ 64%, α 36%
		151	7/2(-)	-68,764	17,9 m	ϵ 94,4% α 5,6%
		152	0+	-70,127	2,38 j	ϵ 94,9% α 0,1%
		153	7/2(-)	-69,152	6,4 j	ϵ , 99,99% α 0,0094%
		154	0+	-70,399	3,0x10 ⁶ th	α
		155	3/2-	-69,166	10,0 j	ϵ
		156	0+	-70,536	0,06%	
		157	3/2-	-69,434	8,14 j	ϵ
		158	0+	-70,418	0,10%	
		159	3/2-	-69,176	144,4 h	ϵ
		160	0+	-69,682	2,34%	
		161	5/2+	-68,064	18,9%	
		162	0+	-68,189	25,5%	
		163	5/2-	-66,389	24,9%	
		164	0+	-65,976	28,2%	
		165	7/2+	-63,621	2,334 j	β^-
		165m	1/2-	-63,513	1,257 m	IT 97,76% β^- 2,24%
		166	0+		81,6 j	β^-
167	(1/2-)		6,20 m	β^-		
168	0+		8,5 m	ϵ , ep		
67	Ho	144		-45,650	0,7 d	ϵ , ep
		145		-50,000		
		146		-52,160	3,6 d	ϵ , ep
		147		-56,280	5,8 d	ϵ , ep
		148		-58,380	2,2 d	ϵ
		148m		-58,380	9,59 d	ϵ , ep 0,08%
		149		-61,910	>30 d	ϵ
		149m		-61,910	21,4 d	ϵ
		150		-62,210	26 d	ϵ
		150		-62,210	72 d	ϵ
		151		-63,720	35,2 d	ϵ 78% α 22%
		151m		-63,679	47,2 d	α >40%
		152		-63,750	161,8 d	ϵ 88%, α 12%
		152m		-63,590	49,5 d	ϵ 89,2%, α 10,8%
		153		-65,023	2,0 m	ϵ 99,95%, α 0,05%
		153m		64,955	9,3 m	ϵ 99,82%, α 0,18% IT
		154		-64,647	11,8 m	ϵ 99,98%, α 0,02%
154m		-64,647	3,25 m	ϵ , α <0,001%		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
67	Ho	155	5/2+	-66,064	48 m	ϵ, α
		156	5+	-65,600	56 m	E
		157	7/2-	-66,890	12,6 m	E
		158	5+	-66,200	11,3 m	E
		158m	2-	-66,133	27 m	IT > 81%, ϵ < 19%
		158m	(9+)	-66,020	21,3 m	E
		159	7/2-	-67,338	33,05 m	E
		159m	1/2+	-67,132	8,30 d	IT
		160	5+	-66,391	25,6 m	E
		160m	2-	-66,331	5,92 j	IT 65%, ϵ 35%
		160m	(1+)	-66,330	3 d	
		161	7/2-	-67,207	2,48 j	E
		161m	1/2+	-66,996	6,76 d	IT
		162	1+	-66,050	15 m	E
		162m	6-	-66,944	67,0 m	IT 63%, ϵ 37%
		163	7/2-	-66,386	4570 th	E
		163m	1/2+	-66,088	1,09 d	IT
		164	1+	-64,990	29 m	ϵ 60%, β^- 40%
		164m	6-	-64,850	37,5 m	IT
		165	7/2-	-64,907	100%	
		166	0-	-63,079	26,80j	β^-
		166m	(7-)	-63,073	1,2x10 ³ th	β^-
		167	7/2-	-62,291	3,1 j	β^-
		168	3+	-60,260	2,99 m	β^-
		169		-58,805	4,7 m	β^-
		170		-56,250	2,76 m	β^-
		170m		-56,130	43 d	β^-
68	Er	146		-45,060		
		147	(11/2-)	-47,330	5,5 d	$\epsilon, \epsilon p$
		147m	(1/2+)	-47,330	\approx 2,5 d	$\epsilon, \epsilon p$
		148	0+	-52,000	4,6 d	ϵ
		149	(1/2+)	-54,950	10,7 d	$\epsilon, \epsilon p$
		149m	(11/2-)	-54,208	10,8 d	$\epsilon, \epsilon p, IT$
		150	0+	-58,120	18,5 d	ϵ
		151	(7/2-)	-58,460	23,5 d	ϵ
		152	0+	-60,640	10,3 d	α 90%, ϵ 10%
		153	(7/2-)	-60,670	37,1 d	α 53%, ϵ 47%
		154	0+	-62,622	3,68 m	ϵ 99,53%, α 0,47%
		155	3/2-	-62,220	5,3 m	ϵ 99,98%, α 0,02%
		156	0+	-64,100	19,5 m	ϵ
		157	3/2-	-63,420	18,65 m	ϵ, α
		158	0+	-65,300	2,24 j	E
		159	3/2-	64,570	36 m	E
		160	0+	-66,063	28,58 j	E
		161	3/2-	-65,203	3,21 j	ϵ
		162	0+	-66,346	0,14%	
		163	5/2-	-65,177	75,0 m	ϵ
164	0+	-65,952	1,61%			
165	5/2-	-64,530	10,36 j	ϵ		
166	0+	-64,933	33,6%			

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
68	Er	167	7/2+	-63,298	22,95%	
		167m	1/2-	-63,090	2,269 d	IT
		168	0+	-52,998	26,8%	
		169	1/2-	-60,930	9,40 h	β^-
		170	0+	-60,117	14,9%	
		171	5/2-	-57,727	7,52 j	β^-
		172	0+	-56,491	49,3 j	β^-
		173	(7/2-)	-53,660	1,4 m	β^-
		174	0+	-65,952	3,3 m	β^-
		69	Tm	147	(11/2-)	-36,710	0,56 d	$\epsilon \approx 90\%$, $p \approx 10\%$
148m	(10+)			-39,880	0,7 d	ϵ
149	(11/2-)			-44,510	0,9 d	ϵ
150	(6-)			-47,010	2,3 d	ϵ
151m	(11/2-)			-51,220	4,13 d	ϵ
151m	(1/2+)			-51,220	5,2 d	ϵ
152	(9+)			-51,850	5,2 d	ϵ
152m	(2-)			-51,850	8,0 d	ϵ
153	(11/2-)			-54,240	1,48	α 91%, ϵ 9%
153m	(1/2+)			-54,197	2,5 d	α 95%, ϵ 5%
154	(2-)			-54,700	8,1 d	ϵ 56%, α 44%
154	(9+)			-54,700	3,30	α 90%, ϵ 10%
155				-56,730	32 d	$\epsilon > 94\%$, $\alpha < 6\%$
156	2-			-56,980	83,8 d	ϵ 99,91%, α 0,09%
156m				-56,980	19 d	α
157	1/2+			-58,890	3,5 m	ϵ
158	2-			-58,900	4,02 m	ϵ
158m	(5+)			-58,900	≈ 20 d	
159	5/2(+)			-60,670	9,15 m	ϵ
160	1-			-60,460	9,4 m	ϵ
160m	(5)			-60,360	74,5 d	ϵ 15%
161	7/2+			-62,100	33 m	1,810 j
162	1-			-61,550	21,7 m	2,0 m
162m	5+			-61,358	24,3 d	IT 82%, ϵ 18%
163	1/2+			-62,738	1,810 j	E
164	1+			-62,738	2,0 m	ϵ , ϵ 39%
164	6-			-61,990	5,1 m	IT $\approx 80\%$, $\epsilon \approx 20\%$
165	1/2+			-62,938	30,06 j	ϵ
166	2+			-61,894	7,70 j	ϵ
167	1/2+			-62,550	9,25 h	ϵ
168	3(+)			-61,319	93,1 h	ϵ 99,99%, β^- 0,01%
169	1/2+			-61,280	100%	
170	1-			-59,802	128,6 h	β^- 99,85%, ϵ 0,15%
171	1/2+	-59,217	1,92 th	β^-		
172	2-	-57,382	63,6 j	β^-		
173	(1/2+)	-56,265	8,24 j	β^-		
174	(4-)	-53,870	5,4 m	β^-		
175	(1/2+)	-52,300	15,2 m	β^-		
176	(4+)	-49,700	1,9 m	β^-		
177			130 d			
70	Yb	151	(1/2+)	-41,960	$\approx 1,6$ d	ϵ , ϵp
		151m	(11/2-)	-41,960	$\approx 1,6$ d	ϵ , ϵp
		152	0+	-46,640	3,1 d	ϵ
		153		-47,270	4,2 d	α 50%, ϵ 50%

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
70	Yb	154	0+	-50,220	0,402 d	$\alpha \approx 98\%$, $\epsilon \approx 2\%$
		155		-50,700	1,72 d	$\alpha 84\%$, $\epsilon 16\%$
		156	0+	-53,410	26,1 d	$\epsilon 90\%$, $\alpha 10\%$
		157	(7/2-)	53,630	38,6 d	$\epsilon 99,5\%$, $\alpha 0,5\%$
		158	0+	-56,022	1,57 m	ϵ , $\alpha \approx 0,003\%$
		159	(5/2)	-55,900	1,40 m	ϵ
		160	0+	-58,160	4,8 m	ϵ
		161	3/2-	-57,900	4,2 m	ϵ
		162	0+	-59,850	18,87 m	ϵ
		163	3/2-	-59,370	11,05 m	ϵ
		164	0+	-60,990	75,8 m	ϵ
		165	5/2-	-60,175	9,9 m	ϵ
		166	0+	-61,589	56,7 j	ϵ
		167	5/2-	-60,596	17,5 m	ϵ
		168	0+	-81,575	0,13%	
		169	7/2+	-60,371	32,022 h	IT
		169m	1/2-	-60,347	46 d	
		170	0+	-60,770	3,05%	
		171	1/2-	-59,314	14,3%	
		172	0+	-59,262	21,9%	
		173	5/2-	-57,558	16,12%	
		174	0+	-56,951	31,8%	
		175	7/2-	-54,702	4,19 h	β^-
		176	0+	-53,501	12,7%	
		176m	(8-)	-52,451	11,4 d	IT $\geq 90\%$, $\beta^- < 10\%$
		177	9/2+	-50,996	1,9 j	β^-
		177m	1/2-	-50,664	6,41 m	IT
		178	0+	-49,705	74 m	β^-
179			8,1 m	β^-		
180			2,4 m	β		
71	Lu	150		-25,350		
		151		-31,000	85 md	p
		152	(6-, 5-)	-34,050	0,7 d	ϵ
		153		-38,840		
		154		-40,000	0,96 d	ϵ
		155		-42,990	70 md	$\alpha 79\%$, $\epsilon 21\%$
		155m		-41,192	2,60 md	α
		156		-43,830	$\approx 0,5$ d	$\alpha \approx 70\%$, ϵ
		156m		-43,830	0,18 d	$\alpha \approx 95\%$, IT, ϵ
		157		-46,690	5,4 d	$\epsilon 94\%$, $\alpha 6\%$
		158		-47,490	10,4 d	$\epsilon > 98,5\%$, $\alpha < 1,5\%$
		159		-49,770	12,3 d	ϵ , $\alpha 0,04\%$
		160		-50,460	35,5 d	ϵ
		161	(5/2+)	-52,600	72 d	ϵ
		162	(1-)	-52,860	1,37 m	ϵ
		162m	(4-)	-52,860	1,5 m	ϵ
		162m		-52,860	1,9 m	ϵ
		163	(1/2-)	-54,770	238 d	ϵ
		164		-54,740	3,14 m	ϵ
		165m	(7/2+)	-56,260	10,74 m	ϵ
165m	1/2+	-56,260	12 m			
166	(6-)	-56,110	2,65 m	ϵ		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
71	Lu	166m	(3-)	-56,076	1,41 m	ϵ 58%, IT 42%
		166m	(0-)	-56,067	2,12 m	ϵ >80%, IT <20%
		167	7/2+	-57,470	51,5 m	ϵ
		168	(6-)	-57,090	5,5 m	ϵ
		168m	3+	-56,870	6,7 m	ϵ >95%, IT <5%
		169	7/2+	-58,078	34,06 j	ϵ
		169m	1/2-	-58,049	160 d	IT
		170	0+	-57,311	2,00 d	ϵ
		170m	4-	-57,218	0,67 d	IT
		171	7/2+	-57,834	8,24 h	ϵ
		171m	1/2-	-57,763	79 d	IT
		172	4-	-56,741	6,70 h	ϵ
		172m	1-	-56,699	3,7 m	IT
		173	7/2+	-56,886	1,37 th	ϵ
		174	(1-)	-55,575	3,31 th	ϵ
		174m	(6-)	-55,404	142 h	IT 99,38%, ϵ 0,62%
		175	7/2+	-55,171	97,41%	
		176	7-	-53,394	3,78x10 ¹⁰ th	β^-
		176m	1-	-53,271	3,635 j	β^- 99,38% ϵ 0,1%
		177	7/2+	-52,394	6,71 h	β^-
		177m	23/2-	-51,424	160,9 h	β^- 79%, IT 21%
		178	1(+)	-50,338	28,4 m	β^-
		178m	(9-)	-50,118	23,1 m	β^-
		179	(7/2+)	-49,110	4,59 j	β^-
		180	3+, 4+, 5+	-46,690	5,7 m	β^-
		181	(7/2+)		3,5 m	B ⁻
		182	(0, 1, 2)		2,0 m	β^-
		183	(7/2+)		58 d	β^-
		184			\approx 20 d	β^-
		72	Hf	154	0+	-33,420	2 d	$\epsilon$, $\alpha$
155				-34,600	0,89 d	ϵ , α
156	0+			-38,180	25 md	α
157				-38,960	110 md	α 91%, ϵ 9%
158	0+			-42,400	2,9 d	ϵ 54%, α 46%
159				-43,050	5,6 d	ϵ 88%, α 12%
160	0+			-56,080	\approx 12 d	ϵ 97,7%, α 2,3%
161				-46,480	17 d	α , ϵ
162	0+			-49,176	37,8 d	ϵ
163				-49,380	40,0 d	ϵ
164	0+			-51,790	2,8 m	ϵ
165	(11/2-)			-51,670	1,7 m	ϵ
166	0+			-53,790	6,77 m	ϵ
167	(5/2-)			-55,290	2,05 m	ϵ
168	0+			-54,810	25,95 m	ϵ
169	(5/2-)			-54,810	3,24 m	ϵ
170	0+			-56,210	16,01 j	ϵ
171	(7/2+)			-55,439	12,1 j	ϵ
172	0+			-56,390	1,87 th	ϵ
173	1/2-			-55,290	23,6 j	ϵ
174	0+			-55,851	2,0x10 ¹⁵ th	α
175	5/2-			-54,488	0,162%	
176	0+	-54,582	70 h	ϵ		
			5,206%			

DAFTAR ISOTOP (lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan
72	Hf	177	7/2-	-52,892	18,606%	
		177m	23/2+	-51,577	1,08 d	IT
		177m	37/2-	-50,152	51,4 m	IT
		178	0+	-52,446	27,297%	
		178m	8-	-51,299	4,0 d	IT
		178m	16+	-50,000	31 th	IT
		179	9/2+	-50,475	13,629%	
		179m	1/2-	-50,100	18,67 d	IT
		179m	25/2	-49,369	25,1 h	IT
		180	0+	-49,791	35,100%	
		180m	8-	-48,649	5,5 j	IT \geq 98,6% $\beta^- <$ 1,4%
		181	1/2-	-47,416	42,39 h	β^-
		182	0+	-46,062	9x10 ⁶ th	β^-
		182m	8-	-44,889	61,5 m	β^- 58%, IT 42%
		183	(3/2-)	-43,290	1,067 j	β^-
		184	0+	-41,500	4,12 j	β^-
		73	Ta	156		-26,230
157				-30,030	5,3 md	$\alpha >$ 77%
158				-31,370	36,8 md	α 93%, ϵ 7%
159				-34,820	0,57 d	α 80%, ϵ 20%
160				-35,850	1,4 d	α
161				-38,980	2,7 d	$\epsilon \approx$ 95%, $\alpha \approx$ 5%
162				-40,060	3,52 d	ϵ, α
163				-42,600	11,0 d	$\epsilon \approx$ 99,8%, $\alpha \approx$ 0,2%
164				-43,320	14,2 d	ϵ 99,98%, $\alpha \approx$ 0,02%
165				-45,850	31,0 d	ϵ
166	(2-)			-46,310	34,4 d	ϵ
167				-48,470	1,4 m	ϵ
168	(3+)			-48,590	2,44 m	ϵ
169				-50,380	4,9 m	ϵ
170	(3+)			-50,210	6,76 m	ϵ
171	(5/2-)			-51,730	23,3 m	ϵ
172	(3-)			-51,470	36,8 m	ϵ
173	5/2(-)			-52,490	3,14 j	ϵ
174	3(-)			-51,850	1,18 j	ϵ
175	7/2+			-52,490	10,5 j	ϵ
176	(1)-			-51,470	8,09 j	ϵ
177	7/2+			-51,726	56,6 j	ϵ
178	1+			-50,530	9,31 m	ϵ
178	(7)-			-50,530	2,36 j	ϵ
179	7/2+			-50,365	1,79 th	ϵ
180	1+			-48,939	8,152 j	ϵ 86%, β^- 14%
180m	9-			-48,864	$>$ 1,2x10 ¹⁵ th	
181	7/2+			-48,444	99,988%	
182				-46,436	114,43 h	β^-
182m	3-			-46,420	283 md	IT
182m	5+	-45,916	15,84 m	IT		
183	10-7/2+	-45,299	5,1 h	β^-		
184	(5-)	-42,844	8,7 j	β^-		
185	(7/2+)	-41,402	49 m	β^-		
186	2, 3	-38,620	10,5 m	β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro / kelimpahan	Peluruhan		
74	W	158	0+	-24,380	\approx 1,4 md	α		
		159		-25,720	7,3 md	α		
		160	0+	-29,690	81 md	α		
		161		-30,620	410 md	$\alpha \approx 82\%$, $\epsilon \approx 18\%$		
		162	0+	-34,300	1,39 d	ϵ 54%, α 46%		
		163		-35,110	2,75 d	ϵ 59%, α 41%		
		164	0+	-38,380	6,4 d	ϵ 97,4%, α 2,6%		
		165		-39,030	5,1 d	$\epsilon > 97,4\%$, $\alpha < 1,5\%$		
		166	0+	-41,898	16 d	ϵ 99,4%, α 0,6%		
		167		-42,350	19,9 d	ϵ , α		
		168	0+	-44,840	53 d	ϵ		
		169		-44,940	1,3 m	ϵ		
		170	0+	-47,240	4 m	ϵ		
		171	(5/2-)	-47,080	2,4 m	ϵ , α		
		172	0+	-48,970	6,7 m	ϵ		
		173m	(5/2-)	-48,690	7,97 m	ϵ		
		174	0+	-50,150	31 m	ϵ		
		175	(1/2-)	-49,590	34 m	ϵ		
		176	0+	-50,680	2,5 j	ϵ		
		177	(1/2-)	-49,730	135 m	ϵ		
		178	0+	-50,440	21,6 h	ϵ		
		179	(7/2-)	-49,306	37,5 m	ϵ		
		179m	(1/2-)	-49,084	6,4 m	IT 99,72% ϵ 0,28%		
				180	0+	-49,647	0,12%	ϵ
				181	9/2+	-48,256	121,2 h	
				182	0+	-48,250	26,3%	
				183	1/2-	-46,369	14,28%	
				183m	11/2+	-46,060	5,2 d	IT
				184	0+	-45,709	$> 3 \times 10^{17}$ th 30,7%	
				185	3/2-	-43,393	75,1 h	β^-
				185m	11/2_	-43,196	1,67 m	IT
				186	0+	-42,515	28,6%	
				187	3/2-	-39,910	23,72 j	β^-
		188	0+	-38,673	69,4 h	β^-		
		189	(3/2-)	-35,480	11,5 m	β^-		
		190	0+	-34,310	30,0 m	β^-		
75	Re	161		-21,170	10 md	α		
		162		-22,670	100 md	α		
		163		-26,330	260 md	α 64%, ϵ 36%		
		164		-27,510	0,88 d	α 56%, ϵ 42%		
		165		-30,910	2,4 d	ϵ 87%, α 13%		
		166		-32,130	2,2 d	α , ϵ		
		167		-34,910	6,1 d	$\epsilon \approx 99,3\%$, $\alpha \approx 0,7\%$		
		168		-35,880	6,9 d	α , ϵ		
		168m		-35,880	6,6 d	α , ϵ		
		169m		-38,600	12,9 d	α		
		170	(5)	-39,040	8,0 d	ϵ		
		171	(9/2-)	-41,440	15,2 d	α		
		172	(5)	-41,660	15 d	ϵ , α		
		172m	(2)	-41,660	55 d	ϵ , α , IT		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
76	Os	185	1/2-	-42,813	93,6 h	ϵ
		186	0+	-43,003	$2,0 \times 10^{15}$ th	α
		187	1/2-	-41,224	1,6%	
		188	0+	-41,142	13,3%	
		189	3/2-	-38,993	16,1%	
		189m	9/2-	-38,962	5,8 j	IT
		190	0+	-38,714	26,4%	
		190m	(10)-	-37,009	9,9 m	IT
		191	9/2-	-36,401	15,4 h	β^-
		191m	3/2-	-36,327	13,10 j	IT
		192	0+	-35,892	41,0%	
		192m	(10)-	-33,877	6,1 d	IT
		193	3/2-	-33,405	30,5 j	β^-
		194	0+	-32,442	6,0 th	β^-
		195		-29,700	6,5 m	β^-
		196	0+	-28,300	34,9 m	β^-
		77	Ir	166		-13,540	>5 md	$\alpha$
167				-17,360	>5 md	α
168				-18,670	?	α
169				-22,210	0,4 d	α
170				-23,530	1,05 d	α 75%, ϵ 25%,
171				-26,420	1,5d	α
172				-27,490	2,1 d	$\epsilon \approx 97\%$, $\alpha \approx 3\%$
173				-30,230	3,0 d	ϵ 97,98%, α 2,02%
174				-31,010	4 d	ϵ 99,53%, α 0,47%
175				-33,490	4,5 d	α
176				-34,000	8 d	ϵ 99,53%, α 0,47%
177				-36,100	21 d	α
178				-36,350	12 d	ϵ
179				-38,050	4 m	ϵ
180				-37,840	1,5 m	ϵ
181	(7/2+)			-39,360	4,90 m	ϵ
182m	(5-)			-38,950	15 m	ϵ
183	(7/2+)			-40,110	57 m	ϵ
184	5-			-39,540	3,09 j	ϵ
185	5/2-			-40,210	14,4 j	ϵ
186	5+			-39,172	16,64 j	ϵ
186m	2-			-39,172	2,0 j	ϵ
187	3/2+			-39,720	10,5 j	ϵ
188	1-			-38,333	41,5 j	ϵ
189	3/2+			-38,462	13,2 h	ϵ
190	(4) ₋			-36,710	11,78 h	ϵ
190m	(7)+			-36,684	1,2 j	IT
190m	(11)-			-36,535	3,25 j	ϵ 85%, IT 99,98%
191	3/2+			-36,715	37,3%	
191m	11/2-			-36,544	4,94 d	IT
191m				-34,668	5,5 d	IT
192	4(-)	-34,843	73,831 h	β^- 95,4%, ϵ 85%		
192m	1(+)	-34,785	1,45 m	IT 99,98%, β^- 0,02%		
192m	(9+)	-34,688	241 th	IT		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan		
77	Ir	193	3/2+	-34,544	62,7%			
		193m	11/2-	-34,464	10,53 h	IT		
		194	1-	-32,539	19,15 j	β^-		
		194m	(10, 11)	-32,349	171 d	β^-		
		195	3/2+	-31,700	2,5 j	β^-		
		195m	11/2-	-31,600	3,8 j	β^- 95%, it 5%		
		196	(0-)	-29,460	52 d	β^-		
		196m	(10, 11-)	-29,050	1,40 j	β^-		
		197	3/2+	-28,292	5,8 m	β^-		
		197m	11/2-	-28,177	8,9 m	β^- , it		
		198		-25,830	8 d	β^-		
		78	Pt	168	0+	-11,370	?	α
				169		-12,610	2,5 md	α
				170	0+	-16,610	6 md	α
171				-17,680	25 md	α		
172	0+			-21,240	0,10 d	α 98%, ϵ 2%		
173				-22,110	342 md	α 84%, ϵ 16%		
174	0+			-25,324	0,90	α 83%, ϵ 17%		
175				-25,950	2,52 d	α 64%, ϵ		
176	0+			-28, 880	6,33 d	ϵ 62%, α 38%,		
177				-29,390	11 d	ϵ 91%, α 9%,		
178	0+			-31,950	21,0 d	ϵ 92,3%, α 7,7%		
179	1/2-			-32,200	43 d	ϵ 99,76%, α 0,24%		
180	0+			-34,400	52 d	ϵ , $\alpha \approx 0,3\%$		
181	(1/2-)			-34,310	51 d	ϵ , $\alpha \approx 0,06\%$		
182	0+			-36,170	2,2 m	$\epsilon \approx 99,98\%$		
						$\alpha \approx 0,02\%$		
183	1/2-			35,700	6,5 m	ϵ , $\alpha \approx 0,0013\%$		
183m	(7/2-)			-35,665	43 d	ϵ , it		
184	0+			-37,360	17,3 m	ϵ , $\alpha \approx 0,001\%$		
185	(9/2+)			-36,510	70,9 m	E		
185m	(1/2-)			-36,407	33,0 m	ϵ 99 %, it<0,24%		
186	0+			-37,790	2,0 j	ϵ , $\alpha \approx 1,4 \times 10^{-4}\%$		
187	3/2-			-36,820	2,35 j	E		
188	0+			-37,827	10,2 h	ϵ , α 2,6x10 ⁻⁵ %		
189	3/2-			-36,491	10,87 j	E		
190	0+			-37,331	6,5x10 ¹¹ th	α		
					0,01%			
191	3/2-			-35,701	2,9 h	ϵ		
192	0+			-36,303	0,79%			
193	1/2-			-34,487	50 th	ϵ		
193m	13/2+			-34,337	4,33 h	IT		
194	0+			-34,787	32,9%			
195	1/2-			-32,821	33,8%			
195m	13/2+			-32,562	4,02 h	IT		
196	0+	-32,671	25,3%					
197	1/2-	-30,446	18,3 j	β^-				
197m	13/2+	-30,046	95,41 m	IT 96,7%, β^- 3,3%				
198	0+	-29,932	7,2%					
199	5/2-	-27,432	30,8 m	β^-				
199m	(13/2+)	-27,008	13,6 d	IT				

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan	
78	Pt	200	0+	-26,627	12,5 j	β ⁻	
		201	(5/2-)	-23,750	2,5 m	β ⁻	
79	Au	173		-12,890	59 md	A	
		174		-14,330	120 md	A	
		175		-17,210	0,20 d	A	
		176		-18,520	1,25 d	A	
		177		-21,370	1,3 d	α, ε	
		178		-22,530	2,6 d	ε≤60%, α≥40%	
		179		-24,990	7,5 d	ε 78%, α 22%	
		180		-25,750	8,1 d	ε≤98,2%, α≥1,8%	
		181		-27,920	11,4 d	ε 98,9%, α 1,1%	
		182		-28,390	21 d	ε, α 0,038%	
		183	(5/2-)	-30,170	42,0 d	ε 99,64%, α 0,36%	
		184	3+	-30,130	53,0 d	ε, α 0,02%	
		185	5/2-	-31,750	4,3 m	ε 99,9%, α 0,1%	
		185m		-31,750	6,8 m	ε, IT	
		186	3-	-31,570	10,7 m	ε	
		187	1/2+	-32,900	8,4 m	ε, α	
		187m	9/2-	-32,779	2,3 m	IT	
		188	1(-)	-32,530	8,84 m	ε	
		189	1/2+	-33,640	28,7 m	ε, α < 3,0x10 ⁻⁵ %	
		189m	11/2-	-33,393	4,59 m	ε, IT	
		190	1-	-32,889	42,8 m	ε, α < 1,0x10 ⁻⁶ %	
		191	3/2+	-33,870	3,18 j	ε	
		191m	(11/2-)	-33,604	0,92 d	IT	
		192	1-	-32,787	4,94 j	ε	
		193	3/2+	-33,430	17,65 j	ε	
		193m	11/2-	-33,140	3,9 d	IT 99,97% ε=0,03%	
			194	1-	-32,295	38,02 j	ε
			195	3/2+	-32,594	186,09 d	ε
			195m	11/2-	-32,275	30,5 d	IT
	196	2-	-31,166	6,183 h	ε 92,5%, β ⁻ 7,5%		
	196m	5+	-31,081	8,1 d	IT		
	196m	12-	30,570	9,7 j	IT		
	197	3/2+	-31,165	100%			
	197m	11/2-	-30,756	7,73 d	IT		
	198	2-	-29,606	2,6935 h	β ⁻		
	198m	(12-)	-28,794	2,30 h	IT		
	199	3/2+	-29,119	3,139 h	β ⁻		
	200	1(-)	-27,280	48,4 m	β ⁻		
	200m	12-	-26,290	18,7 j	β ⁻ 82%, IT 18%		
	201	3/2+	-26,413	26 m	β ⁻		
	202	(1-)	-24,420	28,8 d	β ⁻		
	203	3/2+	-23,153	53 d	β ⁻		
	204	2-	-20,720	39,8 d	β ⁻		
80	Hg	175		-8,210	≈20 md	α	
		176	0+	-11,890	34 md	α	
		177		-12,950	0,17 d	α≈85%, ε≈15%	
		178	0+	-16,321	0,26 d	α≈50%, ε≈50%	

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
80	Hg	179		-17,090	1,09 d	$\alpha \approx 53\%$, $\epsilon \approx 47\%$ $\epsilon \approx 15\%$
		180	0+	-20,200	3,0 d	ϵ 51%, α 49%,
		181	1/2(-)	-20,680	3,6 d	α 64%, ϵ 36%
		182	0+	-23,530	11,3 d	ϵ 84,8%, α 15,2%,
		183	1/2-	-23,740	8,8 d	ϵ 74,5%, α 25,5%, $\epsilon \rho$ 0,06%
		184	0+	-26,310	30,6 d	ϵ 98,89%, α 11,1%,
		185	1/2-	-26,110	49 d	ϵ 94%, α 6%,
		185m	13/2+	-26,011	21 d	IT 54%, ϵ 46% $\alpha \approx 0,03\%$
		186	0+	-28,540	1,38 m	ϵ 99,98%, α 0,02%,
		187	13/2+	-28,130	2,4 m	ϵ , $\alpha < 1,2 \times 10^{-4}\%$,
		187m	3/2-	-28,130	1,9 m	ϵ , α $3,5 \times 10^{-6}\%$,
		188	0+	-30,230	3,25 m	ϵ , α $3,7 \times 10^{-5}\%$,
		189	3/2-	-29,690	7,6 m	ϵ , $\alpha < 3,0 \times 10^{-5}\%$,
		189m	13/2+	-29,690	8,6 m	ϵ , $\alpha < 3,0 \times 10^{-5}\%$,
		190	0+	-31,410	20,0 m	ϵ , $\alpha < 5,0 \times 10^{-5}\%$,
		191	(3/2-)	-30,690	49 m	ϵ
		191m	13/2+	-30,690	50,8 m	ϵ
		192	0+	-32,060	4,85 j	ϵ
		193	3/2-	-31,090	3,80 j	ϵ
		193m	13/2+	-30,949	11,8 j	ϵ 92,9%, IT 7,1%,
		194	0+	-32,255	520 th	ϵ
		195	1/2-	-31,070	9,9 j	ϵ
		195m	13/2+	-30,894	42,6 j	IT 54,2%, ϵ 45,8%,
		196	0+	-31,852	0,15%	
		197	1/2-	-30,566	64,14 j	ϵ
		197m	13/2+	-30,267	23,8 j	
		198	0+	-30,979	9,97%	
		199	1/2-	-29,572	16,87%	
		199m	13/2+	-29,039	42,6 m	IT
		200	0+	-29,529	23,10%	
201	3/2-	-27,588	13,10%			
202	0+	-27,270	29,86%			
203	5/2-	-25,292	46,612 h	β^-		
204	0+	-24,716	6,87%			
205	1/2-	-22,312	5,2 m	β^-		
206	0+	-20,969	8,15 m	β^-		
207	(9/2+)	-16,270	2,9 m	β^-		
81	Tl	179		-8,020	0,16d	α
		179m		-8,020	1,4 md	α
		180		-9,300		
		181		-12,350		
		182		-13,500		α
		183	(1/2+)	-16,210		
		183m	(9/2-)	-16,210	60 md	α
		184		-17,030	11d	ϵ 97,9%, α 2,1%,
		185	(1/2+)	-19,490		
		185m	(9/2-)	-19,036	1,8 d	α , IT
		186m	(7+)	-20,080	27,5 d	ϵ , $\alpha < 6,0 \times 10^{-4}\%$
		186m	(10-)	-19,706	2,9 d	IT
187	(1/2+)	-22,200	≈ 51 d	ϵ		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
81	Tl	187m	(9/2-)	-21,865	15,60 d	ϵ , IT, α
		188m	(2-)	-22,430	71 d	ϵ
		188m	(7+)	-22,430	71 d	ϵ
		189	(1/2+)	-24,450	2,3m	ϵ
		189m	(9/2-)	-24,169	1,4 m	ϵ IT <4%,
		190m	(2-)	-24,490	2,6 m	ϵ
		190m	(7+)	-24,490	3,7 m	ϵ
		191	(1/2+)	-26,190		
		191m	9/2-	-25,891	5,22 m	ϵ
		192	(2-)	-25,950	9,6 m	ϵ
		192	(7+)	-25,950	10,8 m	ϵ
		193	1/2(+)	-27,450	21,6 m	ϵ
		193m	(9/2-)	-27,085	2,11 m	IT75%, ϵ 25%
		194	2-	-27,070	33,0 m	ϵ , α <1,0x10 ⁻⁷ %
		194m	(7+)	-27,070	32,8 m	ϵ
		195	1/2+	-28,070	1,16 j	ϵ
		195m	9/2-	-27,787	3,6 d	it
		196	2-	-27,500	1,84 j	ϵ
		196m	(7+)	-27,105	1,41 j	ϵ 95,5%, it 4,5%
		197	1/2+	-28,400	2,84 j	ϵ
		197m	9/2-	-27,792	0,54 d	IT
		198	2-	-27,520	5,3 j	ϵ
		198m	7+	-26,976	1,87 j	ϵ 54%, IT 46%
		199	1/2+	-28,140	7,42 j	ϵ
		200	2-	-27,073	26,1 j	ϵ
		201	1/2+	-27,205	72,912 j	ϵ
		202	2-	-26,006	12,23 h	ϵ
		203	1/2+	-25,784	29,524%	
		204	2-	-24,369	3,78 th	β^- 97,43% ϵ 2,57%
				205	1/2+	-23,846	70,476%
		206	0-	22,278	4,199 m	β^-
		206m	(12-)	-19,635	3,74 m	IT
		207	1/2+	-21,049	4,77 m	β^-
		207m	11/2	-19,701	1,33 d	IT, β^- < 0,1%
		208	5(+)	-16,774	3,053 m	β^-
		209	(1/2+)	-13,652	2,20 m	β^-
		210	(5+)	-9,262	1,30 m	β^- , β -n 0,007%
82	Pb	182	0+	-6,874	55 md	α
		183	(1/2-)	-7,720	300 md	α
		184	0+	-11,000	0,55 d	α
		185		-11,580	4,1 d	α
		186	0+	-14,630	4,79 d	α
		187m	(13/2+)	-14,920	18,3 d	ϵ 98%, α 2%,
		187m		-14,920	15,2 d	ϵ , α ,
		188	0+	-17,780	24,2 d	ϵ 78%, α 22%
		189m		-17,820	51 d	ϵ >99%, α ~0,4%,
		190	0+	-20,420	1,2 m	ϵ 99,1%, α 0,9%,
		191		-20,300	1,33 m	ϵ 99,99%, α 0,01%,
		191m	(13/2+)	-20,300	2,18 m	ϵ
		192	0+	-22,580	3,5 m	ϵ 99,99%, α 0,01%,
		193	(3/2-)	-22,280	?	ϵ

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
82	Pb	193m	(13/2+)	-22,180	75,8 m	ϵ
		194	0+	-24,250	12,0 m	ϵ , $\alpha < 7,3 \times 10^{-6} \%$
		195	3/2-	-23,780	≈ 15 m	ϵ
		195m	13/2+	-23,576	15,0 m	ϵ
		196	0+	-25,420	37 m	ϵ , $\alpha < 0,0001 \%$
		197	3/2-	-24,800	8 m	ϵ
		197m	13/2+	-24,481	43 m	ϵ 81%, IT 19%, $\alpha < 3,0 \times 10^{-4} \%$
		198	0+	-26,100	2,40 j	ϵ
		199	3/2-	-25,270	90 m	ϵ
		199m	13/2+	-24,840	12,2 m	IT 93%, ϵ 7%,
		200	0+	-26,280	21,5 m	ϵ
		201	5/2-	-25,300	9,33 j	ϵ
		201m	13/2+	-24,671	61 d	IT > 99%, $\epsilon < 1 \%$,
		202	0+	-25,957	$52,5 \times 10^3$ th	ϵ , $\alpha < 1 \%$
		202m	9-	-23,787	3,53 j	IT > 90,5%, $\epsilon < 9,5 \%$
		203	5/2-	-24,810	51,873 j	ϵ
		203m	13/2+	-23,985	6,3 d	IT
		203m	29/2-	-21,861	0,48 d	IT
		204	0+	-25,132	$\geq 1,4 \times 10^{17}$ th	1,4%
		204m	9-	-22,946	67,2 m	IT
		205	5/2-	-23,793	$1,52 \times 10^7$ tb	ϵ
		206	0+	-23,809	24,1%	
		207	1/2-	-22,476	22,1	
		207m	13/2+	-20,843	0,805 d	IT
		208	0+	-21,772	52,4%	
		209	9/2+	-17,638	3,253 j	β^-
		210	0+	-14,752	22,3 th	β^- , $\alpha < 1,9 \times 10^{-6} \%$
		211	(9/2+)	-10,494	36,1 m	β^-
		212	0+	-7,571	10,64 j	β^-
		213		-3,240	10,2 m	β^-
214	0+	-0,188	26,8 m	β^-		
83	Bi	186		-3,380		
		187	(9/2-)	-6,100	35 md	α
		187m	(1/2+)	-6,040	8 md	α
		188m		-7,330	0,21 d	α , ϵ
		188m		-7,330	44 md	α , ϵ
		189	(9/2-)	-9,800	680 md	$\alpha > 50 \%$, $\epsilon < 50 \%$,
		190m		-10,690	6,2 d	α 68%, ϵ 32%,
		190m		-10,690	6,3 d	α 82%, ϵ 18%,
		191	(9/2-)	-12,990	12 d	α 60%, ϵ 40%,
		191m		-12,990	20 d	α , ϵ
		192		-13,520	37 d	ϵ , α 18%
		192		-13,520	39,6 d	ϵ , α 9,2%
		193	(9/2-)	-15,720	67 d	ϵ 95%, α 5%
		193m	(1/2+)	-15,413	3,2 d	$\alpha \approx 90 \%$, $\epsilon \approx 10 \%$,
		194	(2+, 3+)	-16,040	106 d	ϵ
		194m	(6+, 7+)	-16,040	92 d	ϵ 99,93%, α 0,07%
		194m	(10-)	-16,040	125 d	ϵ 99,79%, α 0,21%
195	(9/2-)	-17,930	183 d	ϵ 99,97%, α 0,03%		
195m	(1/2+)	-17,529	87 d	ϵ 67%, α 33%		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan		
83	Bi	196m		-17,970	5 m	ϵ		
		196m	(10-)	-17,970	4,6 m	ϵ , IT		
		197	(9/2-)	-19,640	?	ϵ , $\alpha \approx 1,0 \times 10^{-4} \%$		
		197m	(1/2+)	-19,140	5,2 m	α 55%, $\epsilon < 45\%$, IT		
		198	(7+)	-19,540	11,85 m	ϵ		
		198m	(10-)	-19,291	7,7 d	IT		
		199	9/2-	-20,920	27 m	ϵ		
		199m	(1/2+)	-20,240	24,70 m	ϵ 99%, IT $\leq 2\%$ $\alpha \approx 0,01\%$		
		200	7+	-20,400	36,4 m	ϵ		
		200m	(2+)	-20,200	31 m	$\epsilon > 90\%$, IT $< 10\%$		
		200m	(10-)	-19,972	0,40 d	IT		
		201	9/2-	-21,470	108 m	ϵ , $\alpha < 1 \times 10^{-4} \%$		
		201m	1/2+	-20,624	59,1 m	$\epsilon > 93\%$, it $\leq 6,8\%$ $\alpha \approx 0,3\%$		
		202	5+	-20,800	1,72 j	ϵ , $\alpha < 1 \times 10^{-5} \%$		
		203	9/2-	-21,580	11,76 j	ϵ , $\alpha \approx 1,0 \times 10^{-5} \%$		
		204	6+	-20,730	11,22 j	ϵ		
		205	9/2-	-21,084	15,31 h	ϵ		
		206	6(+)	-20,052	6,243 h	ϵ		
		207	9/2-	-20,079	32,3 th	ϵ		
		208	(5+)	-18,894	3,68x10 ⁵ th	ϵ		
		209	9/2-	-18,282	100%			
		210	1-	-14,815	5,013 h	β^- , α 1,3x10 ⁻⁴ %		
		210m	9-	-14,544	3,0x10 ⁶ th	α		
		211	9/2-	-11,872	2,14 m	α 99,72% β^- 0,28%		
		212	1(-)	-8,142	60,55 m	β^- 64,06% α 35,94% α 0,014%		
		212m	(9-)	-7,892	25 m	$\alpha \leq 93\%$, $\beta^- \geq 7\%$		
		212m	(15-)	-7,442	9 m	β^-		
		213	9/2(-)	-5,244	45,59 m	β^- 97,84% α 2,16%		
		214	1-	-1,218	19,9 m	β^- 99,98% α 0,02%		
		215	(9/2-)	-1,710	7,4 m	β^-		
		216		-5,960				
		84	Po	192	0+	-8,030	0,034 d	α
				193m		-8,280	360 md	α
193m				-8,280	260 md	α		
194	0+			-11,010	0,44 d	α		
195	(3/2-)			-11,120	4,5 d	α 75%, ϵ 25%		
195m	(13/2+)			-10,890	2,0 d	$\alpha \approx 90\%$, $\epsilon \approx 10\%$ IT $< 0,01\%$		
196	0+			-13,500	5,5 d	α , ϵ		
197	(3/2-)			-13,450	56 d	ϵ 56%, α 44%		
197m	(13/2+)			-13,246	26 d	α 84%, $\epsilon \leq 16\%$, IT		
198	0+			-15,510	1,76 m	α 70%, ϵ 30%		
199	3/2-			-15,280	5,2 m	ϵ 88%, α 12%		
199m	13/2+			-14,970	4,2 m	ϵ 59%, α 39%		
200	0+			-17,010	11,5 m	ϵ 85%, α 15%		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
84	Po	201	3/2-	-16,570	15,3 m	ϵ 98,4%, α 1,6%
		201m	13/2+	-16,146	8,9 m	ϵ 98,4%, IT 40% $\alpha \approx 2,9\%$
		202	0+	-17,970	44,7 m	ϵ 98%, α 2%
		203	5/2-	-17,350	34,8 m	ϵ 99,89%, α 0,11%
		203m	13/2+	-17,350	1,2 m	IT, ϵ 4,5%, $\alpha \approx 0,04\%$
		204	0+	-18,370	3,53 j	ϵ 99,34%, α 0,66%
		205	5/2-	-17,555	1,66 j	ϵ 99,96%, α 0,04%
		206	0+	-18,205	8,8 h	ϵ 94,55%, α 5,45%
		207	5/2-	-17,169	5,60 j	ϵ 99,98%, α 0,02%
		207m	19/2-	-15,786	2,8 d	IT
		208	0+	-17,492	2,898 th	α , ϵ
		209	1/2-	-16,390	102 th	ϵ 99,74%, α 0,26%
		210	0+	-15,977	138,376 h	α
		211	9/2+	-12,457	0,516 d	α
		211m	(25/2+)	-10,994	25,2 d	α
		212	0+	-10,394	0,298 μ d	α
		212m	(16+)	-7,473	45,1 d	α
		213	9/2+	-6,676	4,2 μ d	α
		214	0+	-4,493	164,3 μ d	α
		215	(9/2+)	-0,542	1,780 md	α , β^- 0,0002%
		216	0+	1,760	0,145 d	α
217		5,840	<10 d	α >95%, β^- <5%		
218	0+	8,351	3,10 m	α 99,98%		
85	At	194		-0,760	0,18 d	α -
		195		-3,170	?	α >75%, ϵ <25%
		196		-3,890	0,3 d	α
		197	(9/2-)	-6,190	0,35 d	α , ϵ
		197m	(1/2+)	-6,138	3,7 d	α , ϵ , IT
		198		-6,720	4,9 d	α , ϵ
		198m		-6,620	1,5 d	α , ϵ , IT
		199	(9/2-)	-8,730	7,2 d	α 90%, ϵ 10%
		200	(5+)	-8,940	43 d	ϵ 65%, α 35%
		200m	(10-)	-8,650	4,3 d	IT \approx 80%, $\alpha \approx$ 10% $\epsilon \approx$ 10%
		201	(9/2-)	-10,740	89 d	α 71%, ϵ 29%
		202	(5+)	-10,770	181 d	ϵ 88%, α 12%
		202m	(10-)	-10,379	\leq 1,5 d 7,4 m	IT
		203	9/2-	-12,290	7,4 d	ϵ 69%, α 31%
		204	(7)+	-11,900	9,2 m	ϵ 95,7%, α 4,3%
		205	9/2-	-13,030	26,2 m	ϵ 90%, α 10%
		206	(5)	-12,490	30,0 m	ϵ 99,04%, α 0,96%
		207	9/2-	-13,290	1,80 j	ϵ 91,3%, α 8,7%
		208	6+	-12,560	1,63 j	ϵ 99,45%, α 0,55%
		209	9/2-	-12,902	5,41 j	ϵ 95,9%, α 4,1%
		210	5+	-11,995	8,1 j	ϵ 99,82%, α 0,18%
211	9/2-	-11,674	7,214 j	ϵ 58,3%, α 41,7%		
212	(1-)	-8,640	0,314 d	α		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan		
85	At	212m	(9-)	-8,415	0,119 d	α		
		213	9/2-	-6,603	0,11 ud	α		
		214	1-	-3,403	558 nd	α		
		214m		-3,344	265 nd	α		
		214m	9-	-3,171	760 nd	α		
		215	9/2-	-1,269	0,10 md	α		
		216	1(-)	2,231	0,30 md	α , $\epsilon < 0,006\%$, $\beta^- < 3 \times 10^{-7}\%$		
		217	9/2(-)	4,383	32,3 md	α 99,99%, β^- 0,01%		
		218	(2-)	8,090	1,6 d	α 99,9%, β^- 0,1%		
		219		10,520	0,9 m	α 97%, β^- 3%		
		220		14,290				
		86	Rn	198	0+	-1,240	?	α , ϵ
				198m	0+	-1,240	50 md	α , ϵ , IT
				199	(3/2-)	-1,560	0,62 d	α 95%, ϵ 5%
				199m	(13/2+)	-1,560	0,3 d	α , ϵ
200	0+			-4,040	1,06 d	α \approx 98%, ϵ \approx 2%		
201	(3/2-)			-4,160	7,0 d	α \approx 80%, ϵ \approx 20%		
201m	(13/2+)			-3,880	3,8 d	α \approx 90%, ϵ \approx 10%, IT		
202	0+			-6,320	9,85 d	α , ϵ $<$ 30%		
203	(3/2, 5/2)-			-6,230	45 d	α 66%, ϵ 34%		
203m	(13/2+)			-5,869	28 d	α \approx 80%, ϵ \approx 20% IT $<$ 0,1%		
204	0+			-8,040	1,24 m	α 68%, ϵ 32%		
205	(5/2)-			-7,760	170 d	ϵ 77%, α 23%		
206	0+			-9,160	5,67 m	α 62%, ϵ 38%		
207	5/2-			-8,670	9,3 m	ϵ 77%, α 23%		
208	0+			-9,690	24,35 m	α 62%, ϵ 38%		
209	5/2-			-8,973	28,5 m	ϵ 83%, α 17%		
210	0+			-9,623	2,4 j	α 96%, ϵ 4%		
211	1/2-			-8,780	14,6 j	ϵ 74%, α 26%		
212	0+			-8,682	24 m	α		
213	(9/2+)			-5,722	25,0 md	α		
214	0+			-4,343	0,27 ud	α		
214m	6+			-2,900	0,7 nd	α		
214m	8+			-2,718	6,5 nd	α		
215	(9/2+)			-1,193	2,30 ud	α		
216	0+			0,231	45 ud	α		
217	9/2+			3,634	0,54 md	α		
218	0+			5,199	35 md	α		
219	5/2-			8,828	3,96 d	α		
220	0+			10,590	55,6 d	α		
221	(7/2+, 9/2+)			14,420	25 m	β^- 78%, α 22 %		
222	0+	16,367	3,8235 h	α				
223			23 m	β^-				
224	0+		107 m	β^-				
225	7/2-		4,5 m	β^-				
226	0+		6,0 m	β^-				
227			23 d	β^-				
228	0+		65 d	β^-				

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
87	Fr	201	(9/2-)	3,770	48 md	α , $\epsilon < 1\%$
		202		3,100	0,34 d	$\alpha \approx 97\%$, $\epsilon \approx 3\%$
		203	(9/2-)	0,970	0,55 d	$\alpha \approx 95\%$, $\epsilon \approx 5\%$
		204	(5+, 6+)	0,650	2,1 d	$\alpha \approx 80\%$, $\epsilon \approx 20\%$
		205	(9/2-)	-1,270	3,85 d	α , $\epsilon < 1\%$
		206	(5)	-1,420	15,9 d	α 88%, ϵ 12%
		206m		-0,889	0,7 d	IT, α
		207	9/2-	-2,960	14,8 d	α 95%, ϵ 5%
		208	7+	-2,710	59,1 d	α 90%, ϵ 10%
		209	9/2-	-3,830	50,0 d	α 89%, ϵ 11%
		210	6+	-3,400	3,18 m	α 60%, ϵ 40%
		211	9/2-	-4,200	3,10 m	$\alpha > 70\%$, $\alpha < 30\%$
		212	5(+)	-3,600	20 m	ϵ 57%, α 43%
		213	9/2-	-3,572	34,6 m	α 99,45%, ϵ 0,55%
		214	(1-)	-0,983	5,0 md	α
		214m	(9-)	-0,861	3,35 md	α
		215	9/2(-)	0,292	0,12 ud	α
		216	(1-)	2,960	0,70 ud	α , $\epsilon < 2 \times 10^{-7}\%$
		217	9/2-	4,293	22 ud	α
		218	(1-)	7,036	1,0 md	α
		219	(9/2-)	8,609	21 md	α
		220	1+	11,456	27,4 d	α 99,65%, β^- 0,35%
		221	5/2(-)	13,266	4,9 m	α
		222	2-	16,380	14,2 m	β^-
		223	(3/2)-	18,381	21,8 m	β^- 99,99% α 0,01%
		224	1(-)	21,620	3,30 m	β^-
		225	3/2-	23,840	4,0 m	β^-
		226	1	27,210	48 d	β^-
		227	1/2+	29,590	2,48 m	β^-
		228	2-	33,140	39 d	β^-
		229			50 d	β^-
230	(3)		19,1 d	β^-		
231			17,5 d	β^-		
88	Ra	204	0+	5,990		α
		205		5,760		α
		206	0+	3,520	0,24 d	α
		207	(5/2, 3/2)-	3,470	1,3 d	$\alpha \approx 90\%$, $\epsilon \approx 10\%$
		208	0+	1,660	1,3 d	α 95%, ϵ 5%
		209		1,810	4,6 d	α
		210	0+	0,420	3,7 d	α 96%, ϵ 4%
		211	(5/2-)	0,800	13 d	$\alpha > 93\%$, $\epsilon < 7\%$
		212	0+	-0,230	13,0 d	$\alpha \approx 94\%$, $\epsilon \approx 6\%$
		213	(1/2-)	0,311	2,74 m	α 80%, ϵ 20%
		213m		2,081	2,1 md	IT 99%, α 1%
		214	0+	0,075	2,46 d	α 99,94%, α 0,06%
		215	(9/2+)	2,509	1,59 md	α
		216	0+	3,269	182 nd	α , ϵ
		217	(9/2+)	5,864	1,6 ud	α
218	0+	6,627	25,6 ud	A		
219		9,363	10 md	A		
220	0+	10,250	25 md	α		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan		
88	Ra	221		12,938	29 d	α		
		222	0+	14,303	38,0 d	α, ¹⁴ C 3x10 ⁻⁶ %		
		223	1/2(+)	17,232	11,434 h	α, ¹⁴ C		
		224	0+	18,804	3,66 h	α, ¹⁴ C 4.3x10 ⁻⁹ %		
		225	1/2+	21,988	14,9 h	β ⁻		
		226	0+	23,662	1600 th	α, ¹⁴ C 3x10 ⁻⁹ %		
		227	(3/2+)	27,172	42.2 m	β ⁻		
		228	0+	28,936	5,75 th	β ⁻		
		229	5/2(+)	32,660	4,0 m	β ⁻		
		230	0+	34,660	93 m	β ⁻		
		231			1,72 m	β ⁻		
		232	0+		250 d	β ⁻		
		89	Ac	209		8,890	0,10 d	α
				210		8,620	0,35 d	α 96%, ε 4%
211	(9/2-)			7,080	0,25 d	α > 99,8%, ε < 0,2%		
212				7,240	0,93 d	α ≈ 98%, ε ≈ 2%		
213	(9/2-)			6,100	0,80 d	α		
214				6,380	8,2 d	α ≥ 89%, ε ≤ 112%		
215	(9/2-)			5,970	0,17 d	α 99,91%, ε 0,09%		
216	(1-)			8,060	≈ 0,33 md	α		
216m	(9-)			8,060	0,33 md	α		
217	9/2-			8,685	0,07 μd	α		
218				10,820	1,12 μd	α		
219	(9/2-)			11,540	7 μd	α		
220				13,730	26,1 md	α, ε 5x10 ⁻⁴ %		
221				14,500	52 md	α		
222	(1-)			16,603	5,0 d	α 99%, ε ≤ 2%		
222m				16,603	63 d	α ≥ 88%, it ≤ 10% ε ≤ 2%		
223	(5/2-)			17,817	2,2 m	α 99%, ε 1%		
224	0-			20,204	2,9 j	ε 90,9%, α 9,1%, β ⁻ < 1,6%		
225	(3/2-)			21,626	10,0 h	A		
226	(1)			24,303	29,4 j	β ⁻ 83%, ε 17% α 0,006%, β ⁻ 83%, α 1,38%, β ⁻ , α 5x10 ⁻⁶ %		
227	3/2(-)			25,848	21,773 th	β ⁻ 83%, α 1,38%, β ⁻ , α 5x10 ⁻⁶ %		
228	3(+)			28,890	6,15 j	β ⁻		
229	(3/+)			30,900	62,7 m	β ⁻		
230	(1+)	33,760	122 d	β ⁻				
231	(1/2+)	35,910	7,5 m	β ⁻				
232	(1+)	39,240	119 d	β ⁻				
233	(1/2+)		145 d	β ⁻				
234	(1+)		44 d	β ⁻				
90	Th	212	0+	12,040	30 md	α		
		213		12,080	150 md	α		
		214	0+	10,670	100 md	α		
		215	(1/2-)	10,890	1,2 md	α		
		216	0+	10,270	0,028 d	α, ε ≈ 0,006%		
		216	(8+, 11-)	12,298	0,18 md	IT ≈ 97%, α ≈ 3%		
		217		12,160	0,252 md	α		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan		
90	Th	218	0+	12,348	109 nd	α		
		219		14,450	1,05 μ d	α		
		220	0+	14,647	9,7 μ d	α , ϵ $2 \times 10^{-7}\%$		
		221		16,917	1,68 md	α		
		222	0+	17,182	2,8 md	α		
		223		19,357	0,66 d	α		
		224	0+	19,980	1,05 d	α		
		225	(3/2)+	22,283	8,72 m	$\alpha \approx 90\%$, $\epsilon \approx 10\%$		
		226	0+	23,183	30,6 m	α		
		227	(3/2+)	25,803	18,718 h	α		
		228	0+	26,749	1,9131 th	α		
		229	5/2+	29,581	7340 th	α		
		230	0+	30,858	$7,538 \times 10^4$ th	α		
		231	5/2(+)	33,812	25,52 j	β^- , α		
		232	0+	35,444	$1,405 \times 10^{10}$ th	α		
					100%			
				233		38,729	22,3 m	β^-
				234	0+	40,607	24,10 h	β^-
				235	(1/2+)	44,250	7,2 m	β^-
				236	0+		37,5 m	β^-
91	Pa	215		17,680	≈ 14 md	α		
		216		17,680	0,20 d	$\alpha \approx 80\%$, $\epsilon \approx 10\%$		
		217		17,020	4,9 md	α		
		217m		17,020	1,6 md	α		
		218		18,600	0,12 md	α		
		219		18,500				
		220		20,190				
		221		20,310	6 μ d	α		
		222		21,940	$\approx 4,3$ md	α		
		223		22,310	6,5 md	α		
		224		23,780	0,95 d	α 99,9%, ϵ 0,1%		
		225		24,310	1,7 d	α		
		226		26,015	1,8 m	α 74%, ϵ 26%		
		227	(5/2-)	26,824	38,3 m	$\alpha \approx 85\%$, $\epsilon \approx 15\%$		
		228	(3+)	28,856	22 j	ϵ 98,15%, α 1,85%		
		229	(5/2+)	29,887	1,50 h	ϵ 98,52%, α 0,48%		
		230	(2-)	32,168	17,4 h	ϵ 91,6%, β^- 8,4%		
				231	3/2-	33,422	$3,276 \times 10^4$ th	α
				232	(2-)	35,924	1,31 h	β^- , $\epsilon \approx 0,2\%$
				233	3/2	37,485	26,967 h	β^-
		234	4(+)	40,334	6,70 j	β^-		
		234m	(0-)	40,408	1,17 m	β^- 99,87% IT 0,13%		
		235	(3/2-)	42,330	24,4 m	β^-		
		236	(1-)	45,340	9,1 m	β^-		
		237	(1/2+)	47,640	8,7 m	β^-		
		238	(3-)	50,910	2,3 m	β^-		
92	U	222	0+		1,0 μ d	α		
		225			0,05 d	α		
		226	0+	27,170	0,5 d	α		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
92	U	227		28,970	1,1 m	α
		228	0+	29,209	9,1 m	$\alpha > 95\%$, $\epsilon < 5\%$
		229	(3/2+)	31,181	58 m	$\epsilon \approx 80\%$, $\alpha \approx 20\%$
		230	0+	31,600	20,8 h	α
		231	(5/2-)	33,780	4,2 h	ϵ , α 0,006%
		232	0+	34,587	68,9 th	α
		233	5/2+	36,915	1,592x10 ⁵ th	α
		234	0+	38,141	2,45 x10 ⁵ th	α
					0,0055%	
		235	7/2-	40,915	703,8x10 ⁶ th	α
					0,720%	
		235m	1/2+	40,916	≈ 25 m	IT
		236	0+	42,441	2,3415x10 ⁷ th	α
		237	1/2+	45,387	6,75 h	β^-
		238	0+	47,305	4,468x10 ⁹ th	α
					99,2745%	
		239	5/2+	50,570	23,50 m	β^-
		240	0+	52,711	14,1 j	β^-
		242	0+		16,8 m	β^-
		93	Np	228		
229				33,740	4,0 m	$\alpha > 50\%$, $\epsilon < 50\%$
230				35,220	4,6 m	$\epsilon \leq 97\%$, $\alpha \geq 3\%$
231	(5/2)			35,620	48,8 m	ϵ 98%, α 2%
232	(4+)			37,280	14,7 m	ϵ , $\alpha \approx 0,003\%$
233	(5/2+)			38,010	36,2 m	ϵ , $\alpha \leq 0,001\%$
234	(0+)			39,952	4,4 h	ϵ
235	5/2+			41,039	396,2 h	ϵ , α 0,0014%
236	(6-)			43,370	115x10 ³ th	ϵ 91%, β^- 8,9%, α
236m	1(-)			43,420	22,5 j	ϵ 52%, β^- 48%
237	5/2+			44,868	2,14x10 ⁶ th	α
238	2+			47,451	2,117 h	β^-
239	5/2+			49,306	2,355 h	β^-
240	(5+)			52,231	61,9 m	β^- 99,89%
240m	1(+)			52,231	7,22 m	IT 0,11%
241	5/2+			54,260	13,9 m	β^-
242	(1+)			57,410	2,2 m	β^-
242	(6)			57,410	5,5 m	β^-
94	Pu			243		59,922
		231		38,390		
		232	0+	38,349	34,1 m	$\epsilon \approx 80\%$, $\alpha \approx 20\%$
		233		40,020	20,9 m	ϵ 99,88%, α 0,12%
		234	0+	40,335	8,8 j	ϵ 94%, α 6%
		235	(5/2+)	42,160	25,3 m	ϵ , α 0,0027%
		236	0+	42,879	2,87 th	α
		237	7/2-	45,090	45,2 h	ϵ , α 0,004%
		237m	1/2+	45,236	0,18 d	IT
		238	0+	46,160	87,74 th	α
		239	1/2+	48,584	24119 th	α
		240	0+	50,122	6563 th	α
		241	5/2+	52,952	14,35 th	β^- , α
		242	0+	54,713	3,733x10 ⁵ th	α
243	7/2+	57,751	4,956 j	β^-		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
94	Np	244	0+	59,802	8,08x10 ⁷ th	α
		245	(9/2-)	63,175	10,5 j	β ⁻
		246	0+	65,391	10,84 h	β ⁻
		247			2,27 h	β ⁻
95	Am	232			55 d	ε≈98%, α≈2%
		233		43,270		
		234		44,340	2,6 m	ε
		235		44,640		
		236		46,010		
95	Am	237	5/2-	46,640	73,0 m	ε99,98%, α0,02%
		238	1+	48,420	98 m	ε >99,99% α 0,0001%
		239	(5/2)-	49,385	11,9 j	ε99,99%, α0,01%
		240	(3-)	51,498	50,8 j	ε, α 1,9x10 ⁻⁴ %
		241	5/2-	52,931	432,7 th	α
		242	1-	55,463	16,02 j	β ⁻ 82,7%, ε 17,3%
		242m	5-	55,512	141 th	IT 99,54%
						α 0,46%
		243	5/2-	57,169	7380 th	α
		244	(6-)	59,877	10,1 j	β ⁻
		244m	1+	59,965	≈26 m	β ⁻ 99,96% ε 0,04%
						β ⁻
						β ⁻
						β ⁻ , IT < 0,01%
				β ⁻		
				β ⁻		
96	Cm	235		48,020		
		236	0+	47,870		
		237		49,150		
		238	0+	49,380	2,4 j	ε≥90%, α≤10%
		239	(7/2-)	51,090	≈2,9 j	ε, α < 0,1%
		240	0+	51,702	27 h	α>99,5%, ε<0,5%
		241	1/2+	53,700	32,8 h	ε 99%, α 1%
		242	0+	54,800	162,79 h	α
		243	5/2+	57,177	29,1 th	α 99,76%, ε 0,24%
		244	0+	58,449	18,10 th	α
		245	7/2+	60,998	8500 th	α
		246	0+	62,614	4730 th	α 99,97%
		247	9/2-	65,528	1,56x10 ⁷ th	α
		248	0+	67,388	3,40x10 ⁵ th	α 91,74%
		249	1/2(+)	70,746	64,15 m	β ⁻
		250	0+	72,985	9700 th	α 11% β ⁻ ≈ 9%
						β ⁻
				β ⁻		
97	Bk	251	(1/2+)	76,642	16,8 m	β ⁻
		252	0+		<2 h	β ⁻
		237		53,190		
		238		54,070		
		239		54,270		
		240		55,600	4,8 m	ε

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan		
97	Bk	241		56,100				
		242		57,800	7,0 m	ϵ		
		243	(3/2-)	58,683	4,5 j	ϵ 99,85%, α 0,15%		
		244	(1-)	60,700	4,35 j	ϵ 99,85%, α 0,006%		
		245	3/2-	61,809	4,94 h	ϵ 99,85%, α 0,12%		
		246	2(-)	64,110	1,80 h	ϵ , α < 0,2%		
		247	(3/2-)	65,484	1380 th	α		
		248	1(-)	68,107	23,7 j	β^- 70%, ϵ 30% α < 0,001%		
		97	Bk	248	(6+)	66,107	>9 th	α > 70%
				249	7/2+	69,842	320 h	β^- , α 0,0014%
250	2-			72,951	3,217 j	β^-		
251	(3/2-)			75,222	55,6 m	β^- , α \approx 1,0x10 ⁻⁵ %		
252				78,530				
98	Cf			239		58,250	42 d	α
		240	0+	58,020	1,06 m	α		
		241		59,180	3,78 m	ϵ \approx 90%, α \approx 10%		
		242	0+	59,320	3,49 m	α		
		243	(1/2+)	60,910	10,7 m	ϵ \approx 86%, α \approx 14%		
		244	0+	61,460	19,4 m	α		
		245		63,380	43,6 m	ϵ \approx 70%, α \approx 30%		
		246	0+	64,087	35,7 j	α , ϵ < 5,0x10 ⁻⁴ %		
		247	(7/2+)	66,130	3,11 j	ϵ 99,96%, α 0,03%		
		248	0+	67,237	333,5 h	α		
		249	9/2-	69,717	351 th	α		
		250	0+	71,167	13,08 th	α 99,92%		
		251	1/2+	74,129	898 th	α		
		252	0+	76,030	2,645 th	α 96,91%		
		253	(7/2+)	79,296	17,81 h	β^- 99,96%, α 0,31%		
		254	0+	81,338	60,5 h	α 0,31%		
		255	(9/2+)		85 m	β^-		
		256	0+		12,3 m	β^- < 1%, α \approx 1,0x10 ⁻⁶ %		
99	Es	241		63,830				
		242		64,620				
		243		64,710	21 d	ϵ \leq 70%, α \geq 30%		
		244		65,970	37 d	ϵ 96%, α 4%		
		245		66,380	1,33 m	ϵ 60%, α 40%		
		246	(4-, 6+)	67,940	7,7 m	ϵ 90,1%, α 9,9%		
		247		68,550	4,7 m	ϵ \approx 93%, α \approx 7%		
		248	(2-, 0+)	70,290	27 m	ϵ > 99%, α \approx 0,25%		
		249	7/2(+)	71,110	102,2 m	ϵ 99,43%, α 0,57%		
		250	1(-)	73,270	2,22 j	ϵ \geq 99%, α \leq 1%		
		250	(6+)	73,270	8,6 j	ϵ > 97%, α < 3%		
		251	(3/2-)	74,506	33 j	ϵ 99,51%, α 0,49%		
		252	(5-)	77,290	471,7 h	α 76%, ϵ 24% β^- \approx 0,01%, α		
		253	7/2+	79,007	20,47 h	α , ϵ < 1,0x10 ⁻⁴ %		
		254	(7+0)	81,994	275,7 h	β^- 1,7x10 ⁻⁶ %, α		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

Z	I s o t o p Unsur	A	J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
99	Es	254m	2-	82,072	39,3 j	β^- 98%, IT < 3%
		255	(7/2+)	84,083	39,8 h	α 0,33%, ϵ 0,08%
		256	(1+)	87,160	25,4 m	β^- 92%, α 8%
		256	(8+)	87,160	\approx 7,6 j	β^-
100	Fm	242	0+		0,8 md	
		243		69,360	0,18 d	α 40%
		244	0+	69,040	3,7 md	
		245		70,040	4,2 d	α
		246	0+	70,120	1,1 d	α 92%
						$\epsilon \leq 1\%$
		247		71,530	35 d	α 50%, ϵ 50%
		247		71,530	9,2 d	α
		248	0+	71,888	36 d	α 99%, $\epsilon \approx 1\%$
		249	(7/2+)	73,510	2,6 m	$\epsilon \approx 85\%$, $\alpha \approx 15\%$
		250	0+	74,060	30 m	$\alpha > 90\%$, $\epsilon < 10\%$
		250m		75,060	1,8 d	IT > 80%
		251	(9/2-)	75,978	5,30 j	ϵ 98,2%, α 1,8%,
		252	0+	76,814	25,39 j	α
		253	1/2+	79,339	3,0 h	ϵ 88%, α 12%,
		254	0+	80,900	3,240 j	α 99,94%,
		255	7/2+	83,768	20,07 j	α
256	0+	85,482	157,6 m	α 8,1%		
257	(9/2+)	88,585	100,5 h	α 99,79%		
258	0+		370 μ d			
259			1,5 d			
101	Md	247		76,060	3 d	α
		248		77,100	7 d	ϵ 80%, α 20%,
		249		77,270	24 d	$\alpha \approx 70\%$, $\epsilon \approx 30\%$
		250		78,580	52 d	ϵ 93%, α 7%
		251		79,050	4,0 m	$\epsilon \geq 90\%$, $\alpha \leq 10\%$
		252		80,620	2,3 m	$\alpha < 50\%$, $\epsilon > 50\%$
		253		81,240	?	α , ϵ
		254		83,490	10 m	ϵ
		254		83,490	28 m	ϵ
		255	(7/2-)	84,835	27 m	ϵ 92%, α 8%,
		256	(0-, 1-)	87,550	76 m	ϵ 90,7%, α 9,3%,
		257	(7/2-)	89,010	5,3 j	ϵ 90%, α 10%,
		258	(1-)	91,840	60 m	ϵ
258	(8-)	91,840	55 h	α		
259	(7/2-)		103 m	$\alpha < 3\%$		
260			31,8 h	$\alpha \leq 25\%$		
				$\epsilon < 15\%$, $\beta^- < 10\%$,		
102	No	250	0+		0,25 md	$\alpha \approx 0,05\%$,
		251		82,760	0,8 d	α , $\epsilon \approx 1\%$
		252	0+	82,857	2,39 d	α 73,1%
		253	(9/2-)	84,330	1,7 m	$\alpha \approx 80\%$, $\epsilon \approx 20\%$
		254	0+	84,711	55 d	α 90%, ϵ 10%,
		254m		85,211	0,28 d	IT > 80%
255	(1/2+)	86,848	3,1 m	α 61,4%, ϵ 38,6%,		

DAFTAR ISOTOP (Lanjutan)

I s o t o p			J π	Δ (MeV)	Umur paro/ kelimpahan	Peluruhan
Z	Unsur	A				
102	No	256	0+	87,793	3,3 m	α 99,8%
		257	(7/2+)	90,220	25 d	α
		258	0+	91,430	\approx 1,2 md	α 0,001%
		259	(9/2+)	94,018	58 m	α 75%, ϵ 25%,
		260	0+		106 md	
103	Lr	252			\approx 1 d	$\alpha \approx$ 90%, $\epsilon \approx$ 10%
		253		88,630	1,3 d	α 90%, $\epsilon \approx$ 1%
		254		89,750	13 d	α 78%, ϵ 22%
		255		90,080	22 d	α 85%, $\epsilon <$ 30%
		256		91,930	28 d	$\alpha >$ 80%, $\epsilon <$ 20%
		257	(9/2+)	92,670	0,646 d	α
		258		94,750	4,3 d	$\alpha >$ 95%, $\epsilon <$ 5%
		259		95,840	5,4 d	$\alpha >$ 50%, $\epsilon <$ 0,5%
		260		98,130	180 d	α 75%, $\epsilon \approx$ 15%
		261			39 m	
		262			3,6 j	ϵ
104	Rf	253			\approx 1,8 d	$\alpha \approx$ 50%, $\epsilon \approx$ 50%
		254	0+		0,5 md	$\alpha \approx$ 0,3%
		255	(9/2+)	94,290	1,5 d	α 48%
		256	0+	94,234	6,7 md	α 2,2%
		257	(7/2+)	95,900	4,7 d	α 79%, ϵ 18%
		258	0+	96,340	12 md	$\alpha \approx$ 13%
		259		98,280	3,1 d	α 93%, $\epsilon \approx$ 0,3%
		260	0+	99,020	20,1 md	$\alpha \approx$ 2%
		261		101,150	65 d	$\alpha >$ 80%, $\epsilon <$ 10%
		262	0+		47 md	
105	Ha	255			1,6 d	$\alpha \approx$ 80%
		256			2,6 d	$\alpha \leq$ 90%, $\epsilon \approx$ 10%
		257		100,360	1,3 d	α 82%, ϵ 1%
		258		101,620	4,4 d	α 67%, ϵ 33%
		258		101,620	20 d	ϵ
		259		102,110		
		260		103,620	1,52 d	$\alpha \geq$ 80%, $\epsilon <$ 2,5%
		261		104,170	1,8 d	$\alpha >$ 50%
		262		105,970	34 d	α 26%, $\epsilon \approx$ 3%
263			26 m	α		

LAMPIRAN 2

TETAPAN DAN KONVERSINYA

Besaran	Lambang	Nilai	Satuan
Tetapan Planck	h	$6,6260755 \times 10^{-34}$ $6,6260755 \times 10^{-27}$ $4,1357320 \times 10^{-21}$	joule detik erg detik MeV detik
Tetapan gas	R	8,314510 $8,314510 \times 10^7$ $8,205783 \times 10^{-6}$ 1,987216 kalori	joule per derajat kelvin erg per mol per derajat kelvin meter kubik atmosfer per mol per derajat kelvin kalori per mol per derajat kelvin
Bilangan Avogadro	N_A	6,0221367	molekul atau atom per mol
Tetapan Boltzmann	$k = R/N_A$	$1,380658 \times 10^{-23}$ $1,380658 \times 10^{-16}$ $8,617411 \times 10^{-5}$	joule per derajat kelvin erg per derajat kelvin elektron volt per derajat kelvin
Muatan elektron	E	$1,60217733 \times 10^{-19}$	Coulomb
Kecepatan cahaya	C	$2,99792458 \times 10^8$ $2,99792458 \times 10^{10}$	meter per detik sentimeter per detik
Tetapan gravitasi	G	$6,67259 \times 10^{-11}$ $6,67259 \times 10^{-8}$	newton meter kuadrat per kilometer kuadrat sentimeter kubik per gram per detik kuadrat
Percepatan gravitasi	G	9,80665	meter per detik kuadrat
Satuan massa atom	U	$10^{-3} \text{ kg mol}^{-1} / N_A$ $1,6605402 \times 10^{-27}$ $9,3149432 \times 10^2$	kilogram MeV
Massa diam elektron	m_e	$9,1093897 \times 10^{-31}$ $5,1099906 \times 10^{-1}$ $5,48579903 \times 10^{-4}$	kilogram MeV sma
Massa diam proton	m_p	$1,6726231 \times 10^{-27}$ $9,3827231 \times 10^2$ 1,007276470	kilogram MeV sma
Massa diam neutron	m_n	$1,6749286 \times 10^{-27}$ $9,3966563 \times 10^2$ 1,008664904	kilogram MeV sma
Massa diam deutron	m_d	$3,3435860 \times 10^{-27}$ $1,87561339 \times 10^3$ 2,013553214	kilogram MeV sma
Massa diam partikel alfa	m_α	$6,6447111 \times 10^{-27}$ $3,7273799 \times 10^3$ 4,001474918	kilogram MeV sma
Rasio massa proton / massa elektron	m_p/m_e	$1,836152701 \times 10^3$	

LAMPIRAN 2

TETAPAN DAN KONVERSINYA (Lanjutan)

EKIVALENSI TETAPAN

Panjang 1 meter = 3,28083 kaki = 39,3700 inci

Volume 1 liter = 1,000 cm³ = 1,056688 kuarts = 2,641720 x 10⁻¹ galon

Massa 1 kilogram = 2,2046 pond = 6,0247 x 10²⁶ sma

Gaya 1 newton = 10⁵ dine

Energi 1 joule = 2,778 x 10⁻⁷ kilowatt jam = 10⁷ erg = 6,2419 x 10⁻¹⁸ eV =
60,23889 gram per kal

Daya 1 watt (joule per detik) = 0,73756 kaki per pond per detik =
0,0013410 tenaga kuda

KONVERSI

1 Ci = 3,700 x 10¹⁰ Bq

1 rad = 1,000 x 10⁻² Gy

1 rem = 1,000 x 10⁻² Sv

1 R = 2,580 x 10⁻⁴ C/kg

1 sma = 1 dalton = 1,661 x 10⁻²⁷ kg = 9,315 x 10² MeV

1 eV = 1,602 x 10⁻¹⁹ J

1 MeV = 1,602 x 10⁻¹³ J

1 cal = 4,184 J

1 J = 2,38 x 10⁻¹ kal = 2,38 x 10⁻⁴ kkal

LAMPIRAN 3

PENGARUH ISOTOP PADA KINETIKA REAKSI

Reaksi	Suhu °C	Rasio isotop	Ekspe- rimen	Teori
$\text{HC}^{14}\text{OOH} \xrightarrow{\text{H}_2\text{SO}_4} \text{H}_2\text{O} + \text{C}^{14}\text{O}$	0	k_{14}/k_{12}	0,89	0,88
$2 \text{C}^{13}\text{OOH} \longrightarrow \text{C}^{13}\text{O}_2 + \text{C}^{12}\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	100	k_{12}/k_{13}	1,027	1,023
$\text{CH}_2\text{C}^{13}\text{OOHCOOH} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_3\text{C}^{13}\text{OOH}$	138	k_{12}/k_{13}	1,028	1,021
$\text{C}_6\text{H}_2(\text{CH}_3)_3\text{C}^{13}\text{OOH} \longrightarrow \text{C}^{13}\text{O}_2 + \text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_3$	60	k_{12}/k_{13}	1,038	1,041
$\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{C}^{14}\text{O} \\ \quad \quad \quad \diagdown \\ \quad \quad \quad \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \diagup \\ \text{C}_6\text{H}_5\text{C}^{12}\text{O} \end{array} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \longrightarrow$ $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}^{14}\text{OH} + \text{C}_6\text{H}_5\text{C}^{12}\text{OOC}_2\text{H}_5$	30	k_{12}/k_{14}	1,127	1,043

LAMPIRAN 4

PENENTUAN UNSUR MENGGUNAKAN RADIOSOTOP UMUR PENDEK DAN PANJANG

Unsur	Radioisotop	Umur paro	Lama penyinaran	Batas deteksi, ug	Radiasi yang diukur
Silikon	Si-31	2,62 j	1 hari	2×10^{-7}	β
	Al-28	2,25 m	10 menit	2×10^{-7}	β, γ
Belerang	P-32	14,28 h	1 hari	3×10^{-4}	β
	S-37	5,05 m	30 menit	6×10^{-5}	β
Kalsium	Ca-45	162,7 h	1 hari	2×10^{-4}	β
	Ca-49	8,72 m	1 jam	10^{-6}	β
skandium	Sc-46	843,81 h	1 hari	3×10^{-8}	β, γ
	Sc-46m	18,7 d	1 menit	4×10^{-10}	γ
seng	Co-60	5,271 th	1 hari	4×10^{-7}	β, γ
	Co-60m	10,47 m	1 jam	10^{-9}	γ
selenium	Se-75	120 h	1 hari	3×10^{-6}	γ
	Se-77m	17 d	2 menit	10^{-8}	γ
brom	Br-82	35,9 j	1 hari	10^{-8}	β, γ
	Br-80	17,6 m	1 jam	10^{-9}	γ
rubidium	Rb-86	18,6 h	1 hari	2×10^{-7}	β
	Rb-86m	1,0 m	5 menit	4×10^{-7}	γ
stronsium	Sr-89	51 h	1 hari	5×10^{-7}	β
	Sr-87m	2,9 j	1 jam	10^{-7}	γ
rutenium	Ru-103	40 hi	1 hari	5×10^{-6}	β, γ
	Ru-105	4,5 j	1 jam	2×10^{-7}	β
perak	Ag-110m	253 h	1 hari	10^{-6}	γ
	Ag-110	24 d	1 jam	10^{-10}	β
indium	In-114m	50 h	1 hari	10^{-7}	β
	In-116m	51 m	1 jam	2×10^{-11}	β
timah	Sn-121	27 j	1 hari	5×10^{-7}	β
	Sn-125	9,5 m	1 jam	3×10^{-7}	β, γ
telurium	Te-127	9,4 j	1 hari	10^{-7}	β
	Te-131	25 m	1 jam	6×10^{-8}	β, γ
barium	Ba-131	12 h	1 hari	Tidak baik	γ
	Ba-181	85 m	1 jam	4×10^{-8}	β, γ
hafnium	Hf-181	45 h	1 hari	2×10^{-7}	γ
	Hf-179m	19 d	2 menit	10^{-9}	γ
talium	Tl-204	3,6 th	1 hari	5×10^{-6}	β
	Tl-206	4,2 m	20 menit	10^{-8}	β
neptunium	Np-239	2,355 h	1 hari	3×10^{-8}	β, γ
uranium	U-239	23,5 m	1 jam	5×10^{-9}	β, γ

DAFTAR PUSTAKA

1. G. Friedlander, J.W. Kennedy, J.M. Miller,
NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY
John Wiley & Sons, Inc. New York, 1964
2. G.D.Chase, J.L. Rabinowitz,
PRINCIPLES OF RADIOISOTOPE METHODOLOGY,
Burgess Publishing Company, Mineapolis, 1967
3. M. Ridwan (Editor),
**PENGANTAR ILMU PENGETAHUAN DAN TEKNOLOGI
NUKLIR**
Badan Tenaga Atom Nasional, 1978
4. Irving Kaplan,
NUCLEAR PHYSICS, 2nd edition,
Addison Wesley Publishing Company, London, 1979
5. G.R. Chopin, J. Rydberg,
NUCLEAR CHEMISTRY, THEORY AND APPLICATION,
Pergamon Press, Oxford, 1980
6. W.H. Tait,
RADIATION DETECTION,
Butterworths, London, 1980
7. W.S. Lyon, (Editor),
ANALYTICAL CHEMISTRY IN NUCLEAR TECHNOLOGY,
Ann Arbor Science Publishers, 1981
8. H.J. Arnikaar,
ESSENTIALS OF NUCLEAR CHEMISTRY,
Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 1982
9. W.D. Ehmann, D.E. Vance,
RADIOCHEMISTRY AND NUCLEAR METHODS OF ANALYSIS,
John Wiley & Sons, New York, 1991
10. N. Tsaulfanidis,
DETECTION AND MEASUREMENT OF RADIATION,
Taylor & Francis, Washington D.C., 1995

Riwayat Hidup



Achmad Amiruddin, Prof. Dr. adalah putera Sulawesi Selatan dilahirkan di Sengkang, Sulawesi Selatan pada tanggal 25 Juli 1932.

Seorang pendidik sejati yang memulai kariernya sebagai asisten dosen (1955) sebelum lulus sebagai sarjana kimia (1958) dari Bagian Kimia, FIPIA, Institut Teknologi Bandung. Setelah kembali dari menuntut studi lanjut di University of Kentucky, Lexington, KY, U.S.A. dan berhasil memperoleh gelar Ph.D.(1961) Penulis melanjutkan tugasnya sebagai dosen di Departemen Kimia, Fakultas MIPA, ITB. Gelar Profesor (golongan IV/e) dari ITB diperolehnya pada tahun 1978. Penulis juga menjadi dosen di Nubika Seskoad.

Peransertanya dalam dunia pendidikan antara lain sebagai anggota Komisi Istilah Lembaga Bahasa dan Kesusasteraan, Depdikbud (1962-1969), anggota Majelis Pertimbangan Bahasa Indonesia-Malaysia (1967-1969), anggota Komisi Pembaharuan Pendidikan (1980-1981), anggota Komisi Pertimbangan Pendidikan Tinggi (1977-1982), anggota Badan Akreditasi Nasional (1993-1998), dan sebagai Wakil Ketua Badan Pertimbangan Pendidikan Nasional.

Sebagai administrator Penulis menjabat antara lain sebagai Ketua Bagian Kimia, ITB; Pembantu Direktur Jenderal BATAN; Dekan Fakultas Kimia Biologi, ITB; Direktur Pusat Penelitian Pasar Jumat, BATAN; Ketua Bagian Kimia, Universiti Kebangsaan Malaysia; Rektor Universitas Hassanuddin, Ujung Pandang; Anggota Kopertis IX, Sulawesi, Maluku, Irian Jaya; Deputy Ketua BPPT.

Sebagai negarawan Penulis adalah Gubernur Sulawesi Selatan selama dua periode (1983 – 1993) dan Wakil Ketua MPR (1993).

Penghargaan yang diterimanya ialah Satyalancana Wirakarya (BATAN), Doctor Sains Hon. (Universiti Kebangsaan Malaysia), Bintang Mahaputera Utama dan Bintang Mahaputera Adipradana.