

Alfian Noor & Muhammad Zakir



KIMIA RADIASI

PENERBIT
CV. 21COM

KIMIA **RADIASI**

Alfian Noor & Muhammad Zakir

iISBN 978-602-60206-9-7

PENERBIT
CV. 21COM

Kimia Radiasi

© Alfian Noor dan Muhammad Zakir

CV. 21 COM

978-602-60206-9-7

Cetakan Pertama, Juli 2012

Cetakan Kedua, Edisi Revisi, Maret 2018

Perancang Sampul

Muhammad Amri Murad

Penata Letak

Muhammad Amri Murad

Noor, Alfian.

Kimia Radiasi

Makassar; CV. 21COM, 2018

vi+251 hlm.; 14.8 cm x 21 cm

ISBN 978-602-60206-9-7

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

Lingkup Hak Cipta

Pasal 1 Hak Cipta adalah hak eksklusif pencipta yang timbul secara otomatis berdasarkan prinsip deklaratif setelah suatu ciptaan diwujudkan dalam bentuk nyata tanpa mengurangi pembatasan sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan.

Ketentuan Pidana

Pasal 113

- (1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/ atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/ atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/ a tau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/ atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/ a tau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

Pengantar Edisi Kedua

Kali ini buku yang dibuat mengalami beberapa perubahan, antara lain :

1. Dr. Muhammad Zakir ikut memberikan sumbangan pengajaran sehingga pengarang buku menjadi dua orang yaitu saya (Alfian Noor) dan Muhammad Zakir
2. Memasuki tahun 2018, banyak hal telah terjadi di lingkungan kita. Ilmu kimia telah mencapai kemajuan yang luar biasa karena semakin mudahnya cara orang belajar. Isi buku kedua ini tidak banyak berubah namun proses interaksinya di dalam kelas akan sangat bervariasi dengan misalnya menerapkan sumber daya internet untuk menggali kemajuan di bidang ini. Olehnya itu, mahasiswa masa kini diharuskan untuk lebih proaktif, mengambil inisiatif dan menyusun sendiri pengetahuannya tentang subyek radiasi ini.

Mudah-mudahan para pembaca dapat menyimak lebih jauh pengertian dan peran kimia radiasi dalam memajukan kebudayaan dunia.

Makassar Maret 2018
Kampus Unhas Tamalanrea

Alfian Noor
Guru Besar Kimia Analitik dan Radiasi

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Pengantar Edisi Kedua	iv
Daftar isi	v
Pendahuluan	1
Bab I Sejarah Teori Atom dan Nuklida	
I.1 Pendahuluan	13
I.2 Atom	14
I.3 Sejarah Kelahiran Teori Atom	17
I.4 Nuklida	31
Bab II Sifat dan Jenis Peluruhan Radioaktif	47
II.1 Radionuklida dan Stabilitas Inti	47
II.2 Jenis-jenis Peluruhan	51
II.3 Laju Peluruhan Radioaktif	60
Bab III Karakteristik Radiasi Pengionisasi	71
III.1 Partikel Alfa (α)	71
III.2 Partikel Beta (β)	78
III.3 Sinar Gamma (γ)	85
Bab IV Instrumentasi Nuklir	98
IV.1 Processor	98
IV.2 Pre Amplifier	100
IV.3 Amplifier	103
IV.4 Pemilih Tinggi Pulsa	106
IV.5 Pengskala (<i>Scaler</i>)	107
IV.6 Analisator Tinggi Pulsa	109
IV.7 Perangkat Output	114
IV.8 Sirkuit Koinsidens	115
Bab V Detektor Radiasi	118
V.1 Karakterisasi Umum Detektor	118
V.2 Prinsip Dasar Deteksi Radiasi	118
V.3 Ionisasi Gas	121
V.4 Sintilasi	128
V.5 Semi Konduktor	127
Bab VI Teknik Radioanalisis	144
VI.1 Analisa Pengenceran Radioisotop	144
VI.2 Metode Radiometrik	146
VI.3 Titrasi Radiometrik	147
VI.4 Analisa Aktivasi Netron	148

Bab VII Statistik Nuklir	152
VII.1 Introduksi	153
VII.2 Beberapa Parameter Distribusi Fungsi	155
VII.3 Statistika Cacah Nuklir	157
Bab VIII Aplikasi Teknik Nuklir	161
VIII.1 Bidang Kesehatan	161
VIII.2 Industri	162
VIII.3 Makanan dan Pertanian	163
Bab IX Radionuklida Alam dan Kajian Zona Pesisir	164
IX.1 Pendahuluan	164
IX.2 Laju Penghilangan Kontaminan Reaktif	168
IX.3 Dinamika Partikel di Perairan Pantai	170
IX.4 Lahan Basah	184
IX.5 Eutrofikasi dan Mekar (<i>Blooming</i>)	191
IX.6 Perikanan : Umur dan Kelas Ukuran Ikan	198
Bab X Aplikasi Radiokarbon dalam Kajian Kelautan	202
X.1 Pendahuluan	202
X.2 Teknik <i>Sampling</i> dan Pengukuran	212
X.3 Sejarah <i>Sampling</i>	215
X.4 Memisahkan Komponen Alami dan Bom	230
X.5 Aplikasi Oseanografi	233
X.6 Ventilasi dan Pencampuran Laut Dalam	234
X.7 Kesimpulan	243
X.8 Senarai	243
Daftar Pustaka	245
Glosarium	248

PENDAHULUAN

Ketika tanggal 6 Agustus 1945 pukul 08.15 pagi waktu lokal, Hiroshima di bom nuklir oleh Amerika maka banyak orang berpendapat bahwa itulah awal dari era nuklir di planet kita. Perkembangan pengetahuan nuklir terus dipelajari dan setelah porak poranda akibat dua perang dunia serta perang-perang regional dan lokal lainnya sains dan teknologi nuklir memasuki dunia dengan wawasan baru yang tidak hanya lewat perlombaan senjata militer tetapi terutama menyusun strategi menyelesaikan masalah-masalah kemanusiaan seperti kesehatan, pangan, energi, dan kemiskinan.

Penggunaan iptek nuklir untuk pembangkit tenaga listrik, hasil samping reaksi inti dalam proses industri, terapi radiologis, dan penelitian radiokimia lainnya adalah sebagian contoh pemanfaatan energi nuklir bagi peningkatan kesejahteraan manusia. Awal usaha kemanusiaan ini diawali ketika pada tahun 1953, Dwight Eisenhower, presiden Amerika Serikat, menyampaikan pidato didepan Dewan Keamanan PBB dan mengatakan "...jika ada bahaya di dunia maka bahaya tersebut menyangkut kita semua, dan demikian pulalah jika ada harapan maka harapan itu terkait kita semua.." dan beliaulah yang memelopori pembentukan organisasi yang disebut Badan Tenaga Atom Internasional atau IAEA

(International Atomic Energy Agency) pada tahun 1957 yang tujuan utamanya memanfaatkan iptek nuklir untuk tujuan damai, *nuclear for peace*.



Gambar-1. Inilah Dwight Eisenhower, tokoh dunia yang memelopori pembentukan IAEA dan menyerukan atom/nuklir untuk tujuan damai

Pada tahun 2007 yang lalu, IAEA merayakan ulang tahunnya yang ke 50. Pembentukan badan ini sebetulnya dilandasi kekhawatiran akan banyaknya negara yang terus-menerus melakukan lomba percobaan senjata nuklir khususnya negara-negara maju pemenang perang dunia kedua dimotori Amerika Serikat, Uni Sovyet/Rusia, Inggris, Perancis dan Cina. Dipelopori presiden AS, Dwight Eisenhower, bersama kurang lebih 80 negara anggota Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) termasuk Indonesia, mereka menandatangani deklarasi pembentukan IAEA dengan landasan tema utama yaitu “Nuclear for Peace” artinya IAEA menjadi motor pemanfaatan energi nuklir untuk tujuan damai. Indonesiapun segera membentuk “sister organization” yang mewakili negara mengurusi

masalah nuklir tersebut. Tahun 1961 berdirilah organisasi yang disebut BATAN singkatan dari Badan Tenaga Atom Nasional lalu kemudian berubah menjadi Badan Tenaga Nuklir Nasional. Perlu kiranya dicatat bahwa reaktor atom pertama di Indonesia dibangun di Bandung dengan direktur pertamanya adalah bapak Achmad Amiruddin, ahli kimia nuklir pertama di Indonesia, mantan Rektor Universitas Hasanuddin serta Gubernur Propinsi Sulawesi Selatan. Beliau adalah dosen fakultas MIPA ITB dan UNHAS sampai pensiun.

Dengan kepemimpinan beliau, berdirilah Laboratorium Radiokimia yang kemudian menjadi Laboratorium Kimia Radiasi (LKR) yang kami kelola saat ini. Bekerjasama dan dengan bantuan BATAN dan IAEA, LKR memperoleh berbagai peralatan dasar untuk aplikasi teknologi nuklir dalam beberapa bidang seperti ilmu-ilmu pertanian, ilmu kelautan, mipa, kesehatan, dan teknik. Sejak tahun 1992 LKR dicanangkan sebagai tempat kajian lintas-disiplin yang bertumpu pada sains dan teknologi nuklir. Sampai tahun 2011 misalnya, LKR dengan anggota yang terdiri dari laboratorium ilmu tanah, kultur jaringan, agronomi, kimia dan bioteknologi memperoleh bantuan teknik dari IAEA melalui BATAN dalam bentuk sejumlah peralatan untuk meningkatkan penggunaan teknologi nuklir dalam kegiatan yang bertajuk : ‘Application of Nuclear Techniques for Screening and Improving Cash Crop Plants in Coastal Saline Land’ atau Aplikasi Teknik Nuklir Untuk Skrining dan Perbaikan Penghasilan Penanaman Tumbuhan di Tanah Pantai

Bergaram. LKR adalah satu-satunya laboratorium sejenisnya di universitas yang ada di Indonesia.

Apa sebenarnya yang dimaksud dengan atom atau nuklir untuk perdamaian ?.

Tema ini adalah komitmen untuk diplomasi, kerjasama teknik dan mencegah penyebaran senjata atom atau nuklir yang terangkum dalam statuta IAEA dan perjanjian untuk tidak mengembangkan senjata nuklir atau dikenal sebagai Non Proliferation Treaty (NPT). Limapuluh tahun terakhir IAEA bekerjasama dengan badan tenaga nuklir di negara-negara anggotanya mengembangkan sains nuklir dan aplikasinya di berbagai bidang seperti dan terutama pertanian, peternakan, kelautan, kesehatan, dan industri. Beberapa contoh nuklir untuk perdamaian (dikutip dari buku 50 tahun IAEA) :

1. Dari Pameran Sains Dunia di Brussel pada tahun 1958



Gedung Atomium (1958) di Brussel, simbol kebangkitan sains dan teknologi nuklir yang dimanfaatkan untuk maksud damai

2. Bioteknologi tanaman



Seorang pemantau benih (plant breeder) mengamati kematangan pohon pisang di laboratorium IAEA. Varitas superior dan teknik baru digunakan untuk membantu negara anggota dalam program nasional pembenihan mereka

3. Pengukuran Radionuklida



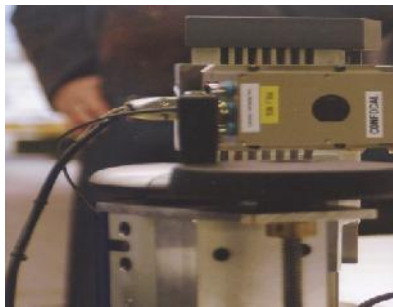
Riset IAEA untuk mengetahui absorpsi karbon dan panas melalui pengukuran radionuklida. Hasilnya digunakan untuk menganalisa hubungan antara samudera dan iklim.

4. Percobaan testing nuklir



Pandangan angkasa di atol Mururoa, lokasi pengujian senjata nuklir yang dilakukan tahun-tahun belakangan ini

5. Spektroskopi X-Ray Fluorescence



Penggunaan instrumen Fluorosensi sinar X yang salah satu aplikasinya adalah menguji kondisi dan komposisi kimia Salieri, suatu mahakarya jaman renaissans yang pernah dicuri dari Museum Sejarah Budaya Wina

Radiasi yang dihasilkan suatu reaksi inti sebenarnya relatif sama dengan reaksi molekuler biasa yaitu gelombang elektromagnetik dengan trayek panjang gelombang mulai dari sinar gamma, bilangan angstrom, sampai gelombang radio, bilangan meter. Diantaranya adalah sinar X, Ultra-Violet, Tampak, Infra Merah, Gelombang-Mikro sampai gelombang radio. Pemanfaatannya dapat dilihat misalnya dalam daftar penjelasan yang diberikan buku 'The Recent Trends in Radiation Chemistry' (Buku yang diedit oleh James F Wishart , *Brookhaven National Laboratory, USA* dan BSM Rao, *University of Pune, India* dan diterbitkan dalam musim semi 2010) seperti berikut :

An Incomplete History of Radiation Chemistry

Ultrafast Accelerators for Pulse Radiolysis and Their Applications

Instrumentation in Pulse Radiolysis

Pulse-Radiolysis Time-Resolved Microwave Conductivity Studies:

From Gases to Liquid Crystals

Infrared Spectroscopy and Radiation Chemistry

Chemical Processes in Heavy Ion Tracks

An Overview on Solvated Electrons

The Structure and Dynamics of Solvated Electron

Femtosecond Events in the Bimolecular Free Electron Transfer

Radiolysis of Supercritical Water

Pulse Radiolysis in Supercritical Rare Gas Fluids

Radiation Chemistry of Ionic Liquids

Radiation Induced Polymerization In Ionic Liquids

Structure-Reactivity Studies with Substituted Benzenes

Sulphur-centered Radicals Chemistry

Radiolysis of Metalloproteins

Radiation Induced Processes at Solid-Liquid Interfaces

Radiation Chemistry Applied to Antioxidant Research

Radiation Induced DNA Damage: Indirect Effects

Mechanisms of Radiation-Induced DNA Damage: Direct effects

Radiolysis of Water Confined in Nanoporous Materials

Metal Clusters and Nanomaterials: Contributions of Radiation

Maka jelas sekali luasnya aplikasi radiasi dalam berbagai bidang seperti biologi fundamental, kedokteran, farmasi, ilmu bahan, ilmu-ilmu pertanian, dan tentunya ilmu kimia sendiri. Manfaat radiasi nuklir kedepan akan menjadi semakin penting karena sifatnya yang 'self energetic' artinya untuk menghasilkan radiasi tidak memerlukan sumber energi lain. Kita ambil contoh sumber sinar tungsten (W) dalam spektrofotometer sinar tampak yang untuk memancarkan radiasi gelombang sinar tampak memerlukan eksitasi unsur tungsten ke tingkat energi lebih tinggi sebelum memancarkan hasil emisi de-eksitasi. Sumber energi untuk eksitasi diperoleh dari listrik yang disediakan secara umum.

Kunci utama dihasilkannya radiasi adalah adanya unsur-unsur radioisotop yang tidak stabil dan untuk itu harus menyesuaikan diri dengan cara mengeluarkan energi dalam bentuk radiasi agar menuju kepada kestabilan. Ragam radiasi ini sangat banyak dan akan dibahas secara rinci dalam salah satu bab buku ini.

Karenanya kajian radiasi dalam kaitan dengan sains nuklir tidak lain daripada kajian pemanfaatan radioisotop.

Pada dasarnya ada delapan kategori penggunaan radioisotop berdasarkan sifatnya yaitu :

1. Pengaruh radiasi pengionisasi untuk aktivasi suatu reaksi
2. Penyerapan radiasi oleh materi untuk industri
3. Penetapan umur benda-benda tertentu
4. Transformasi baterai termonuklir untuk sumber listrik pesawat ruang angkasa
5. Pelacak radioisotop dalam proses fisis dan biologis
6. Pemantauan kualitas lingkungan melalui pengukuran radioaktivitas alamiah dan buatan
7. Peningkatan hasil pertanian melalui perbaikan kualitas benih dan pengelolaan lahan pertanian dengan pengukuran dan pengaturan sumber air, nutrisi dan tanah, dan
8. Pemanfaatan radiasi nuklir dalam kesehatan seperti sinar-X, sinar-gamma, dan sebagainya

Buku ini akan menerangkan secukupnya prinsip dasar kategori diatas sehingga pembaca dapat memperoleh gambaran kedalam tentang peranan radiasi dalam peradaban dunia. Namun demikian, seperti diutarakan diatas tekanan diberikan kepada menjawab pertanyaan kenapa radiasi dihasilkan dan bagaimana prinsip pengukuran dan aplikasinya. Pendekatan komprehensif, tidak terlalu rinci, tidak dapat dihindari mengingat isinya yang ringkas dan bersifat introduktif.

Dalam bab-bab awal, akan dijelaskan bentuk hubungan antara unsur dan radiasi diikuti dengan pengertian istilah-istilah yang menyertainya. Dengan pembelajaran ini mahasiswa diharapkan memperoleh gambaran dasar apa itu radiasi nuklir dan kompleksitasnya. Ini akan membawa mahasiswa ke tahap berikut yaitu membedakan jenis dan sumber-sumber radiasi dengan kelemahan dan kelebihan masing-masing yang pada akhirnya dapat menjelaskan kegunaan dan pemanfaatannya masing-masing. Tentu tidak setiap jenis radiasi berlaku untuk semua jenis aplikasi.

Urutan penyajiannya adalah sebagai berikut :

1. Sejarah Teori Atom dan Nuklida
2. Sifat dan Jenus Peluruhan Radioaktif
3. Karakteristik Radiasi Pengionisasi
4. Instrumentasi Nuklir
5. Detektor Radiasi
6. Teknik Radioanalisis
7. Statistik Nuklir
8. Aplikasi Kimia Radiasi

Perkembangan pemanfaatan radiasi kimia ternyata telah merambah industri teknologi tinggi seperti dalam kendali mutu produksi mesin berpresisi tinggi maupun dalam sterilisasi dan pengawetan produk-produk pertanian. Iptek nuklir untuk pengembangan industri, lingkungan dan pertanian telah memasuki era milenium ketiga dengan berbagai kegiatan riset yang mendukung peningkatan mutu seperti dalam bioteknologi, pemulihan ladang minyak, pemantauan kebocoran bejana proses dalam industri, dan produksi varitas unggul tanaman padi dan kedelai.

Mereka yang berkecimpung dalam bidang kimia perlu mengantisipasi perkembangan ini agar dapat memahami arah kegiatan riset dasar dan aplikasinya diwaktu mendatang.

Mudah-mudahan buku ini memberi manfaat.

BAB I

SEJARAH TEORI ATOM DAN NUKLIDA

I.1. PENDAHULUAN

Kalau kita kembali melihat bagaimana atom telah mengubah cara pandang manusia tentang unsur-unsur yang kecil, dan ternyata kemudian sangat menentukan sifat, karakter, dan perilaku sebuah benda yang menjadi kumpulan unsur-unsur kecil tadi. Itu pulalah yang sejak lama menjadi pikiran dan bahan kontemplasi para filosof bangsa Yunani yang memang terkenal getol berenung tentang alam. Dalam bab ini kita mencoba memahami apa yang menjadi bahan perbincangan tentang hal-hal kecil tersebut dengan menelusuri sejarah perkembangan pikiran sebagai hasil pergulatan intelektual orang-orang Yunani dimasanya. Ini kemudian disusul dengan perkembangan teori atom modern yang memperkenalkan inti atom dan selanjutnya berbagai pengertian seperti nuklida.

Seringkali atom disalah-artikan sebagai benda yang terkecil di alam semesta ini. Ternyata masih ada yang lebih kecil yaitu inti atom. Jadi atom terdiri dari inti atom dan orbital atom yang berisi elektron mengitari inti atom tersebut sesuai dengan nomor atom intinya. Bahkan inti atom pun kalau belajar lebih dalam di fisika inti dan kimia inti sebenarnya masih terdiri dari partikel-partikel kecil

yang dapat dideteksi sebagai materi yang nyata. Sampai saat ini komponen penyusun inti dapat terdiri dari lebih seratus partikel, namun dalam kimia inti hanya proton dan neutron yang dipelajari karena keduanya mempengaruhi sifat kimia sebuah transformasi inti.

I.2. Atom

Orang Yunani pernah bertanya apa yang terjadi kalau benda saya iris sampai tidak dapat lagi diiris namun irisan terkecil tersebut masih memiliki sifat yang sama dengan irisan lebih besar. Tentu tidak bisa dibakar atau diuapkan karena akan mengubah sifat benda tersebut. Sekarang kita tahu bahwa mengiris tidak bisa terus-terusan, ada batasnya. Dari sini kita dapat mengungkapkan bahwa benda sebenarnya terdiri dari kumpulan benda-benda yang lebih kecil dan tidak dapat dilihat dengan mata telanjang. Benda terkecil suatu unsur itulah yang disebut *atom*. Alasan utama orang percaya adanya atom adalah karena penjelasan seorang Inggris guru sekolah sekaligus ahli kimia, namanya John Dalton (1807) yang telah membuat berbagai pengukuran angkabanding massa unsur-unsur yang bergabung membentuk senyawa dan mampu mendeteksi angkabanding massa yang konsisten yang membawanya kepada sebuah konsep atom yang disebut *atomic hypotheses* atau hipotesis atom yaitu :

1. Semua atom satu unsur adalah sama
2. Atom unsur berbeda memiliki massa berbeda pula

3. Senyawa adalah gabungan spesifik atom-atom dari lebih dari satu unsur
4. Dalam suatu reaksi kimia, atom tidaklah diciptakan atau dihilangkan melainkan bertukar pasangan untuk menghasilkan senyawa baru

Dalton mendasarkan hipotesisnya dari sejumlah besar pengukuran laboratorium. Saat ini instrumentasi modern mengungkapkan lebih banyak bukti langsung tentang atom, jadi bukan sekedar eksperimen deduktif (Gambar I.1.).



Gambar I.1. Atom individu dapat dilihat sebagai gundukan di atas permukaan padat melalui teknik scanning tunneling microscopy. Gambar di atas adalah citra permukaan galium arsenida. Atom Ga berwarna biru dan arsen berwarna merah (bukan warna sebenarnya). Sumber : Atkins, 1999.

Tidak diragukan lagi bahwa atom itu nyata dan merupakan satuan penyusun unsur. Demikianlah ilmuwan kimia lalu membuat definisi suatu unsur sebagai senyawa yang disusun oleh satu jenis atom saja. Tetapi definisi ini tidak tepat sama karena ada unsur yang sama memiliki sedikit perbedaan dalam massa. Inilah yang nantinya akan dibicarakan dalam bagian nuklida.

Namun demikian konsep tentang atom datang tidak begitu saja. Konsep ini didahului berbagai proses dan bahkan perdebatan keberadaan atom tersebut. Masih banyak yang meragukan waktu itu tentang kebenaran pemikiran tersebut. Dalam buku “The Atomic Debates” yang disunting oleh W.H. Brock, pengajar Sejarah Sains di Universitas Leicester, Inggris, dikemukakan bahwa tiga pemikiran untuk mengklarifikasi tentang sains waktu itu. Ketiganya adalah sifat mekanik panas, eksistensi eter, dan eksistensi atom (1901). Tetapi Einstein, Perrin, Rutherford dan von Laue berpendapat tidak ada lagi gunanya memperdebatkan hal-hal yang secara eksperimental valid dan terbukti tentang model atomik molekuler, yang dianggap teori tersebut adalah keberhasilan besar fisika dan kimia di abad ke sembilan belas. Namun demikian skeptisisme tetap muncul untuk membuat alternatif atomisme. Sir Benjamin Brodie, seorang matematikawan terkenal pada waktu itu, menolak teori atom yang diajukan oleh ahli kimia. Pada tahun 1866 Brodie mempublikasikan dalam *Philosophical Transactions* bagian pertama dari *Calculus of Chemical Operation* dimana dia mendeklarasikan bahwa teori atom Dalton tidak lagi menjelaskan fakta ilmu kimia dan dalam Calculus-nya besaran hipotetik seperti atom tidak tampak. Didepan Himpunan Kimia Inggris tahun 1867 orasinya bertajuk ‘Ideal Chemistry’ menyatakan teori adalah esensial untuk eksistensi ilmu kimia, tetapi dia mencatat Davy telah membuat penemuan penting tanpa teori dan deduksinya berasal dari isi percobaannya yang disertai dengan fakta analisis numerik. Memang harus diakui teori Dalton menawarkan hipotesa non-existence tapi

didukung oleh hasil eksperimen yang sesuai. Sanggahan Brodie gugur dengan sendirinya seperti yang dapat dilihat dari Gambar-1 diatas.

Pandangan tentang atom juga berkembang dari waktu ke waktu sejak jaman dulu kala. Seringkali kita jumpai dalam sejarah terjadi tumbukan antara pandangan tentang atom dan filosofi dan agama. Beberapa pikiran manusia tentang atom dapat dirinci sebagai berikut (sumber utama : Bernard Pullman, Oxford, 1998) *The Atom : In the History of Human Thought*)

I.3. Sejarah kelahiran Teori Atom

Konsep atom, setelah memenangkan suatu masa pergulatan yang panjang, lahir kurang lebih 25 abad yang lalu di kota Yunani Tua. Kendati bukan tidak mungkin, tampaknya sulit untuk memandang kelahiran teori atom ini sebagai suatu kebetulan atau keberuntungan. Untuk bisa mengerti sepenuhnya asal muasal dan dampak intelektual perkembangan ini, ada baiknya kita tinjau dulu lokasi geografis dan lingkungan sejarah yang terlibat: Kenapa di tempat yang khusus ini dan di waktu yang khusus pula?. Pertanyaan seperti ini tentunya tidak mudah dijawab, dan ada bahaya yang muncul dari perjalanan melalui terobosan yang gelap. Kendatipun demikian, periode ini telah menandai titik balik dalam sejarah umat manusia yang mengagumkan para sejarawan, dan akan sangat bodoh untuk melupakan usaha ini apa lagi seperti tidak peduli.

Titik awal eksperimen unik dan luar biasa ini adalah 'Keajaiban Yunani'. Pada suatu waktu ketika kebanyakan orang percaya dunia yang dapat diamati diatur sepenuhnya oleh dewa-dewa dengan kekuatan yang besar tetapi anehnya dipenuhi kelemahan dan selera manusia, maka sejumlah pemikir Hellenic menyusun suatu penjelasan rasional yang semata menyangkut sebab dan akibat alamiah tanpa memasuki kekuatan transenden. Ini bukan berarti mereka menolak eksistensi kekuatan seperti itu, tapi mereka memutuskan untuk mendapatkan sesuatu tanpa campur-aduk.

Meminjam kalimat Farrington (B.Farrington, *Greek Science: Its Meaning for Us*, Penguin, 1944) meletakkan Tuhan di dunia luar (inter-world) sebagai latar belakang. Meskipun tidak menyangkut pencarian ilmiah seperti saat ini, dengan hipotesa campuran, disertai bukti-bukti, kita sudah mulai memasuki dunia filosofi alam yang mengenal hanya alasan apa yang mungkin dan buktinya. Begitulah, bahan-bahan utama pendekatan ilmiah mulai mendapatkan bentuknya seperti : dorongan menjelajahi alam semesta dan esensinya; percaya bahwa alam, dengan kompleksitas dan diversitasnya yang mengejutkan, bersembunyi sebuah aturan yang dapat diartikulasikan dalam bentuk unsur-unsur sederhana dan interaksinya; harapan bahwa, dalam kasus-kasus terbaik, alasan menyatukan bahkan mungkin mengatasi keragaman yang besar dan perubahan tak-henti dari unsur-unsur alam; dan diatas semua keyakinan bahwa dalam teka teki kesemestaan ini hanya unsur dan peristiwa rasional saja yang ikut campur, dengan kata lain tidak ada tempat untuk suatu mediasi supernatural.

Mari kita ikuti contoh proses intelektual yang berlangsung saat itu. Milesian School di Ionia, di pantai Laut Aegean di Asia Kecil, adalah sekolah pemikiran rasional pertama, 600 tahun sebelum Masehi, di Yunani Tua. Tiga pemikirnya yang paling menonjol adalah Thales, Anaximenes, dan Anaximander. Ketiganya fokus pada pertanyaan kosmogenik untuk mencari alasan rasional dan alamiah suatu hal atau kejadian yang mereka hadapi dalam istilah *primary reality* atau *primordial substance*. Namun demikian, mereka berbeda dalam memilih senyawa apa kiranya. Thales mengambil air (water), Anaximenes udara (air), sedangkan *apeiron* yaitu senyawa tak terbatas dan tidak bisa dibedakan dan didefinisikan, untuk Anaximander. Mereka juga berbeda tentang mekanisme multiplikasi senyawa ini. Thales mengaku tidak tahu, pengurangan dan kondensasi buat Anaximenes, dan suatu pertumbuhan dan dorongan bagi Anaximander. Pengembangan teori-teori yang berbeda terhadap tema yang sama ini hanya bisa terjadi jika berakar kepada metode ilmiah yang berlangsung cepat. Komponen metode ilmiah ada dua. Pertama berdasarkan kebebasan menyatakan pendapat, menerima divergensi pendapat, suatu keterbukaan menuju debat, dan absennya dogmatisme atau klaim tidak-dapat-salah (infallibility) dalam komunitas cendekiawan.

Kedua adalah toleransi relatif di pihak otoritas publik. Mereka menjauhkan diri mengintervensi debat selama tidak menimbulkan isu pemberontakan atau secara terbuka melawan kepercayaan yang sudah ada.

Kita kembali ke pertanyaan awal, kenapa di Miletus, Ionia penjelajahan ilmiah ini terjadi. Ada beberapa argumen. Pertama adalah argumen geografis. Ionia adalah persimpangan jalan sejumlah besar rute perdagangan antara timur dan barat khususnya yang menghubungkan Yunani dengan Timur Dekat dan Mesir. Berlokasi di ujung selatan pantai Aegean Yunani (saat ini Turki), Miletus terpapar sejumlah pengaruh intelektual yang tanpa keraguan telah menyumbang terhadap tingkat budaya maju mereka. Memang ada pihak yang menyatakan bahwa Thales pergi ke Mesopotamia dan Mesir, dimana dikatakan telah belajar benih astronomi dan matematika. Anaximander sering dikatakan yang pertama membuat peta geografis. Kenyataannya, filosof pre-Socrates memang seringkali bepergian. Kedua adalah argumen etnografis. Beberapa peneliti percaya bahwa ada *inter-breeding* kultural antara berbagai tempat yang menstimulir wawasan mereka. Orang Aeolians dan Ionians yang sebelumnya bermigrasi dari Phocis, Peloponnesus, dan Attica sejak lama menghuni teluk Smyrna, Ephesus, dan Miletus. Kota-kota mereka membentang dari utara ke selatan oleh pusat-pusat urban lainnya, sedang dalam proses membentuk konfederasi yang kuat. Campuran antara Hellenis dan populasi asli bisa menghasilkan hasil yang paling diinginkan, paling tidak suatu gerakan pemikiran yang istimewa.

Ketiga adalah argumen ekonomi. Dari abad 8 sampai 6 sebelum Masehi (sebelum penghancuran oleh Persia), Miletus adalah kota pantai Asia yang paling penting. Dia punya pusat komersial yang besar dan megah, plaza yang hebat, dan rumah

ibadah yang cantik. Miletus juga sukses mendirikan sejumlah koloni. Puncaknya bersamaan dengan, secara kebetulan, sejumlah penemuan (yang paling penting adalah mata uang yang dijamin negara) yang mempercepat kenaikan kekuatan ekonominya. Argumen ini sangat beralasan dan prestatif. Apakah Aristoteles tidak menyatakan bahwa kelahiran dan pengembangan sains dan teknologi memerlukan orang-orang kaya? (*men of leisure*).

Keempat adalah argumen sosio-politik. Ini berhubungan dengan pembangunan unik pada waktu itu, yaitu membangun negara-kota diseluruh Yunani dan menghadirkan debat tentang bagaimana membangun struktur politik terbaik dan bentuk pemerintahan. Fenomena ini mempromosikan kultur debat terbuka dan divergensi ideologis, serta keinginan untuk menerima kemungkinan lebih dari satu solusi. Atmosfir keterbukaan dan toleransi yang menyebabkan lahirnya pemikiran kritis filosofis dan ilmiah tampaknya masuk akal. Lebih jauh lagi, suasana nyaman ini tetap kebal dari kontrol penguasa atau intervensi masyarakat sipil maupun agama. Karena mereka bebas, orang Yunani berhasil membangun kota-kota, menyingkirkan tiran, dan mengakui bahwa tidak akan ada kebebasan nyata tanpa hukum. Itulah awal dari suatu keajaiban. Mereka secara dramatis mencontohkan apa yang dipercaya oleh sebagian ahli sosiologi bahwa suatu deskripsi dunia memerlukan masyarakat terorganisir.

Tentu saja tidak mungkin memastikan argumen diatas sebagai realitas sejarah yang akurat. Kalaupun betul, itu adalah suatu usaha *a posteriori*, yang merasionalisasi jalannya kalau bukan

merupakan peristiwa acak. Dari sudut pandang berbeda kita bisa mempertanyakan mengapa selain Yunani tidak ada keajaiban serupa padahal capaian intelektualnya juga sangat besar. Begitulah adanya, semua konsep dimasa dulu kala paling besar dampaknya berasal dari Yunani dan Hebrew. Keduanya dianugerahi kualitas spiritual istimewa dan berkeinginan kuat terhadap hal-hal universal (yang menjelaskan ketetapan legasinya). Kenapa orang Hebrew gagal memberi kita yang terbaik harus dilacak balik ke 13 abad sebelum filosof Miletus yaitu 19 abad sebelum Masehi ketika Ibrahim yang juga mencari penyebab primordial dan prinsip semua benda, menemukan Yahweh, sang pencipta unik dan pengatur alam semesta. Bukan air, bukan udara, ataupun senyawa atau angka tidak tentu. Hasilnya Ibrahim menandai masa depan rakyatnya dengan stempel yang tidak terhapus. Sementara Miletus terus bergulat dan mencapai puncaknya abad ke enam SM, pandangan Hebrew tentang dunia telah dikodifikasi selama 3 abad. Jadi kebenaran telah diberikan (*bequeathed*) dan tidak ada peluang bagi observasi ilmiah atau pengembangan filosofi independen kurang tantangan bagi otoritas yang mapan. Juga tidak ada ruang yang diberikan untuk suatu perbedaan (*disagreement*) terhadap isu fundamental pengetahuan. Kepastian suatu kebenaran mutlak mencegah tiap keperluan mempertanyakan validitasnya. Orang Hebrews merasa tidak perlu mempertanyakan apa yang dibicarakan oleh filosof Yunani. Jadi betapa berbedanya kesemestaan intelektual Milesian.

Bagi orang Hebrew semua berawal dari Tuhan, sebagai *primary cause* pencipta dunia dan segala aturannya, telah menyusun

jawaban yang sudah dibuat terhadap pertanyaan tentang asal mula benda, keragamannya, dan perubahannya, isu-isu yang menjadi fokus esensial dimasa awal pemikir ilmiah. Sebaliknya bagi Milesian, promosi air menjadi *primary substance* oleh Thales hampir tidak dapat dihindari justru mengundang kontra-proposal yaitu udara oleh Anaximenes, atau api oleh Heraclitus dari Ephesus (Ephesus adalah kota kedua paling penting sesudah Ionian). Karena tidak ada dari senyawa ini yang bisa, tentu saja, memberikan jawaban yang paling memuaskan, maka dituntut penjelasan lebih lanjut: teori-teori kedua elemen tadi dibela oleh Parmenides dari Elea, dan lalu teori empat lemen (air-udara-api-tanah) dilanjutkan oleh Empedocles dari Agrigentum dan selanjutnya diadopsi oleh Aristotle (yang kemudian bahkan zat kelima yaitu eter), atau teori ketakterbatasan (*infinitude*) senyawa oleh Anaxagoras dari Clazomenae, juga asli Inonia.

Diluar dari medan pembenihan intelektual yang subur, berkembanglah pendekatan lain, yang berdasarkan konsep atom. Konsep ini sukses karena ia menjadi penampung problema rumit diseputar diskontinuitas, kekosongan, ketakterbatasan, dan isu-isu lain. Jadi seperti bola salju, permulaan yang melintas salah telah memaksa suatu pengembangan usulan kontradiktif atau komplementer yang melalui suatu proses dialektika dari restrukturisasi dan penajaman, menjamin suatu dinamisme intelektual yang menjadi kunci lahirnya sains. Keajaiban Yunani benar-benar fenomenal kendati kurang kandungan aktualnya dibandingkan horison yang dibukanya. Seperti kata M.A.Rey

(*Jeunesse de la science*) : Itu adalah titik balik yang besar. Lahirnya Sains dapat dipandang dari kesemestaannya, dalam aspek logika dan rasionalnya. Ia telah memberikan semangat, metode, dan pemikiran tentang segalanya. Inilah peradaban intelektual keseluruhan. Inilah keajaiban Yunani.

Sebuah alternatif pandangan tentang teka-teki Yunani ini diajukan oleh Ludwig : Mereka yang hidup di pantai laut dan secara konstan berlari keluar menuju horison jauh akan terinspirasi untuk mempunyai pandangan yang lebih menonjol tentang model manusia, Tuhan, cinta dan musik.... Itulah Yunani.

Dari perspektif hubungannya dengan filosofi dan agama, teori atom hanyalah satu usaha singkat dari banyak ofensif intelektual Yunani yang ditujukan untuk menjelaskan struktur materi, asalnya, polimorfismenya, dan transformasinya. Sasarannya adalah untuk mengerti arti perubahan ditengah ketidak-dapatan berubah (*immutable*), untuk mencari penjelasan tentang skala universal yang dapat berlaku bagi benda mati dan benda hidup, melintasi surga dan bumi. Atomisme hanyalah satu dari banyak kaitan dalam pencarian itu, dengan tak ada lagi makna *a priori* daripada teori lainnya. Namun demikian, ini adalah contoh yang paling penting dan subur tentang imajinasi intuitif dan yang memberikan begitu besarnya dampak ilmiah. Untuk betul-betul mengerti keaslian dan makna teori atom, adalah esensial untuk mengukurnya terhadap doktrin kompetitifnya yang juga maju dengan tujuan yang sama. Periode yang relevan berjalan dari abad 6 sampai abad 5 SM. Fondasi teori atom mulai diletakkan pada

permulaan abad ke 5 SM. Di latar depan adalah berbagai teori senyawa primordial yang pertama kali muncul di abad ke 6 SM meskipun bersamaan dengan permulaan doktrin atom dan dikembangkan secara paralel. Sukar untuk menunjukkan secara pasti kapan aktor-aktor utama yang ambil bagian dalam pengembangan ini hidup di masa lalu dengan jarak waktu berjauhan. Jarang sekali diketahui kapan mereka lahir atau mati. Lebih celaka lagi, perbedaan diantara berbagai sumber bisa sangat besar. Sekarang mari kita bicarakan filosof alam pada bentuk dininya. Ini tercakup dalam apa yang disebut *School of Milesian* diantaranya:

Thales : adalah penganut sekaligus pengusung konsep filosofi pragmatis. Substansi primordial adalah air, kata Thales. Ini didasarkan pada pikiran, seperti diuraikan Aristotle, bahwa benih dari semua benda memiliki karakter lembab (moist), padahal bertentangan dengan fakta mayat itu mengering, tidak menguap seperti air. Menurut sumber lain, dia juga dituntun oleh pengamatan polimorfisme air, suatu zat yang dapat menjadi padat dan uap. Harus dipahami bahwa pada waktu itu hanya air yang memiliki sifat luar biasa. Ada juga yang mengatakan bahwa dia dipengaruhi oleh hasil kunjungannya ke Mesir yang banjir di sungai Nil dan muncul kehidupan dalam air. Bahkan ada yang mengatakan bahwa dia dipengaruhi oleh pengajaran kuno *Sumerians* yang memitoskan air sebagai benda utama, unsur kehidupan terbaik, tetapi yang sudah dimasuki pendekatan spiritual. Atau sekedar menggemakan sebagian ayat-ayat Homer (*Iliad XIV*, 201) merayakan samudera yang digambarkan sebagai sungai perkasa mengelilingi bumi, mengirigasi

dan menyuburkannya. Kita tidak tahu persis bagaimana Thales melakukan visualisasi 'air sebagai sumber semua senyawa'. Tapi dia mengusulkan begini: air menjadi jalan untuk menciptakan tiga unsur lain yaitu udara dan api yang dikatakannya semata perubahan dari air, dan tanah yang membentuk sedimen. Bahkan Nietzsche, filosof kondang, menilai : tiga alasan untuk mendukung pandangan Thales. Pertama, itu adalah suatu aksioma yang berbicara tentang asal benda, kedua menyangkut isu tanpa hanyut dalam cerita dan dongeng, dan terakhir karena mengandung gagasan, meskipun masih embriotik, bahwa segala sesuatu adalah satu. Tapi alasan pertama tadi kemudian menempatkan Thales dalam perspektif religius dan superstisius, tetapi alasannya yang kedua menjauhkan dari keterkaitan itu dan menjadi seorang ilmuwan alam, dan alasan yang ketiga menunjukkan ke-Yunani-annya. Thales yang sudah memasuki suatu tahap filosofi rasional, terutama observasi empiris, itulah keutamaan yang membuatnya dianggap sebagai garda terdepan dalam filsafat alam (Natural Philosophy). Sebagai catatan pelengkap patutlah kiranya mengutip ucapan Cicero ' Thales dari Miletus yang pertama melakukan kajian substansi primer mengatakan bahwa air adalah materi utama, dan Tuhan adalah intelektual yang membentuk semua benda dari air'. Ternyata kita harus menunggu 23 abad kemudian untuk menentukan senyawa alam air. Terima kasih kepada terutama Priestley (1733-1804), Lavoisier (1743-1794) dan Cavendish (1731-1810). Akhirnya air sebagai primary substance telah dikalahkan. Ahli kimia Perancis, Guyton de Morveau dengan lantang menyatakan Air adalah

senyawa!. Sukar menghindari perasaan terkejut mendengar proposisi yang bertentangan dengan tradisi yang sudah berabad-abad diajarkan kepada siswa-siswa di sekolah.

Anaximander : Perlu diingat dia adalah murid Thales dan dianggap sebagai penerus Sekolah Milesian tapi tidak sejalan pikirannya. Usulan fundamental kader muda ini adalah pada pandangan pertama tidak ada lain dari variasi aksioma pendiri sekolah ini : Udara melepaskan air sebagai senyawa primordial. Dia membayangkan dua proses yang terjadi yaitu reduksi dan kondensasi setiapnya terkait peningkatan atau penurunan suhu. Misalnya reduksi, udara akan menjadi api sementara dengan kondensasi udara menjadi angin, air, tanah dan batu. Semua benda lain berasal dari mekanisme ini.

Anaximenes : Sebagai penerus Anaximander, kita kembali kepada jalan pikiran Thales. Sama saja dengan Anaximander, menurutnya ada dua proses yaitu reduksi dan kondensasi setiapnya ditentukan oleh naik turunnya suhu. Kelebihannya adalah dia mengemukakan apa yang disebut *apeiron* yaitu udara tidak terbatas, tidak berbentuk untuk dapat dirasakan seperti tidak bergerak, tidak kelihatan, tapi terasa ketika bergerak, hangat, dingin dan sebagainya. Jadi ada konkretisasi gagasannya. Bahkan diriwayatkan bahwa dia menyamakan udara dengan tuhan. Seperti halnya air, udarapun seperti dibuktikan oleh kimiawan Inggris adalah campuran, bukan *primary substance*. Sebenarnya ada beberapa lagi pemikir yang lahir dari School of Milesian seperti Heraclitus yang mengusulkan substansinya adalah api yang dengan kondensasi menghasilkan air,

dan melalui kondensasi lebih sempurna menghasilkan tanah. Proses dapat dibalik dan menghasilkan kembali api. Heraclitus kemudian terakhir menambahkan udara sehingga menjadi empat bagian yaitu air, api, tanah dan udara. Heraclitus, hidup di zaman pre-Socrates, lebih sebagai filosof daripada seorang fisikawan. Dia berpendapat dunia mengalami transformasi tak berujung seperti katanya “Every day sees a new sun”. Dia percaya bahwa dunia adalah hasil lawan dan balans antara kontras-kontras. Apa yang bertentangan itu berguna dan keluar dari konflik muncul suatu harmoni yang indah.

Selain Milesian School dari mana Thales dkk. berasal, ada juga sekolah lain yang dikenal dengan nama Eleatic School yang pemikirnya antara lain Xenophon yang menyatakan bahwa tanah adalah substansi primer dan Parmenides yang membela gagasan api dan tanah sebagai substansi primordial. Kemudian muncul pengembangan ide yang diusulkan oleh *Empedocles of Agrigentum* yaitu plurisubstantialisme yang menyatakan substansi primer itu lebih dari satu atau ada empat yaitu air, udara, api dan tanah. Keempatnya berhubungan dengan suhu, udara dan api adalah hangat dan kering, tanah dan air dingin dan lembab. Tahapnya menjadi kualitas nyata dalam substansi. Teori empat substansi ini banyak dianut oleh filosof pre-Socrates dan bahkan merambah sampai ke dunia kedokteran. Kemudian *Anaxagoras of Clazomenae* yang menyatakan bahwa tidak ada keberadaan datang dari ketidakterdapat (*nothing can come into being from non being*) dan dialah sebenarnya yang menggagas istilah ‘dalam sesuatu ada bagian kecil dari semua’ yang disebutnya *omioneres*. Ini sebenarnya cikal bakal

yang lebih dekat dengan pengertian atom. Mungkin tidak ada nama filsuf Yunani yang bertahan seperti Phytagoras dengan dalilnya yang terkenal sampai di sekolah menengah pertama. Merekalah (Phytogoreans) yang pertama kali tertarik dengan matematika. Mereka percaya bahwa angka memiliki banyak kesamaan dengan keberadaan abadi demikian pula dengan pokok ciptaan yang menjadi, mereka percaya bahwa angka berarti lebih besar dibanding sekedar penggunaannya dalam api, tanah dan air. Juga angka memberi makna realitas konkrit. Mereka dihubungkan dengan ruang dan gambar spesifik : 1 untuk titik, 2 untuk garis, 3 untuk bidang, 4 adalah volume, dan karena setiapnya memiliki bentuk maka dapatlah dinyatakan secara matematik. Fantasi Phytagorean ini bahkan bergerak lebih jauh. Kata Aristotle : Phytagorean (maksudnya orang Phytagoras) lah yang pertama berminat dalam matematika yang kemudian disempurnakan. Begitu mendalamnya sehingga mereka mengatakan bahwa angka adalah sama dengan keberadaan abadi seperti pokok penciptaan kejadian, maka mereka percaya bahwa angka jauh lebih bermakna dibandingkan api, tanah, dan air.

Akhirnya, tentang Tuhan atau tuhan-tuhan, menarik untuk mengutip kata-kata Anaxagoras ; “Tuhan mungkin bukan pencipta dunia, tapi bagaimanapun dia adalah arsitek dan agen pengatur (agent of order)”.

Dalam pengembangan filsafat alam secara keseluruhan dan kemunculan teori atomisme pada pandangan pertama ditujukan pada ‘prinsip’ atau ‘unsur’ primordial. Pendiri teori ini adalah **Leucippus**

dan **Democritus** yang baru tampil di panggung sesudah filosof besar seperti Milesian School dan Pythagoras. Formula prinsipil teori atom sudah diletakkan oleh Leucippus seperti kata Diogenes Laertius : ‘Leucippus adalah orang pertama yang mengangkat atom pada tingkat prinsipil. Sementara Cicero menyebut bahwa Leucippus mengakui dua prinsip utama yaitu “ruang terisi dan ruang kosong”. Jadi sebetulnya teori atom tidak menyangkut benda padat saja tapi juga ruang kosong. Sifat dualistik ini bisa juga dilihat dari konteks pemikiran Yunani kuno yaitu antara berada (being) dan menjadi (becoming). Eksistensi kosong ini memungkinkan terjadinya pergerakan dan ini mengindikasikan suatu dinamisme dan mekanisme tidak kaku, dan terlebih penting adalah munculnya elemen observasi yang merupakan bagian penting dalam filsafat alam. Selain itu, pergerakan yang disebutkan diatas juga dapat membawa perubahan dan menjadi dasar untuk memisahkan antara ruang dan materi. Dengan adanya konsep kosong ini maka mau tidak mau kita sudah harus membicarakan tentang atom.

Setelah itu, muncul pikiran-pikiran yang lebih progressif seperti Plato dan Aristoteles dan akhirnya menuju kepada teori atom modern yang menggabungkan antara teori dan eksperimen serta pembuktian berkelanjutan. Kita tidak berpretensi menguraikan rinci sejarah perkembangan teori atom ini, melainkan hanya ingin menunjukkan perspektif sejarah tentang betapa lamanya suatu jalan pikiran terdorong menjadi kenyataan yang pada gilirannya memajukan peradaban manusia lewat pemecahan masalah global yang kita alami dewasa ini. Di abad 19, pencarian atom dengan

dipelopori Dalton dkk, umumnya dibicarakan tentang atom yang tak terbagi dan tak terlihat. Sebaliknya, di abad 20 yang barusan lewat, yang menjadi isu adalah tentang atom yang terlihat dan terbagi.

Maka milenium ketiga dimana kita hidup saat ini besar peluang untuk mendapatkan pengertian baru karena kemajuan iptek seperti nanoteknologi mampu membawa manusia untuk melakukan eksplorasi lebih detail dan akurat tentang potensi dan pemanfaatan atom dimasa depan. Harapan ini membangkitkan antusiasme untuk meneliti lebih jauh aspek fundamental keatoman ini.

1.4. Nuklida

Dua ratus tahun yang lalu, Dalton menggambarkan atom seakan sebuah bola bilyar tanpa gambaran lebih lanjut. Sekarang kita tahu bahwa atom mempunyai struktur internal yang terbentuk dari partikel yang jauh lebih kecil daripada suatu atom yang disebut partikel subatomik. Dengan menyelidiki struktur internal suatu atom kita dapat melihat bagaimana suatu unsur berbeda satu sama lain. Perbedaannya bergantung pada jumlah setiap jenis partikel subatomik dalam atom.

Atom yang merupakan bagian terkecil dari suatu benda dengan massa yang sangat kecil dan dengan struktur yang sangat sederhana, tersusun atas dua komponen utama, yaitu inti yang bermuatan positif dan awan elektron, dengan elektronnya bermuatan negatif. Awan elektron ini mengandung 1-100 elektron yang bergerak pada orbitalnya dengan jarak tertentu dari inti atom.

Muatan dari elektron besarnya adalah $1,6022 \times 10^{-19}$ coulomb (C), dan muatan dari inti atom sama besarnya dengan elektron, akan tetapi mempunyai tanda yang berlawanan. Untuk atom yang paling sederhana, misalnya atom hidrogen yang mempunyai satu inti atom dan satu elektron, tidak mempunyai muatan. Inti atom menempati sebagian kecil dari suatu atom. Hal ini dapat dilihat dari jari-jari inti yang besarnya $\pm 0,0001 \text{ \AA}$ atau 10^{-12}cm , yang sama besarnya dengan jari-jari elektron. Sedangkan besarnya jari-jari atom adalah 1 \AA atau 10^{-8} . Dimensi ini jauh dibawah kemampuan mikroskop elektron untuk membedakannya.

Kerapatan suatu inti atom, dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\text{Kerapatan (D)} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}$$

Contoh sederhana, misalnya inti atom hidrogen mempunyai massa inti sebesar $1,66 \times 10^{-24}$ gram dan jari-jarinya sebesar $1,2 \times 10^{-13}$ cm, maka kerapatan inti atom hidrogen = 230.000 ton/mm^3 . Dari jumlah ini, maka kita dapat membayangkan berapa besar energi yang tersimpan dalam suatu materi dan sangat besarnya gaya yang diperlukan untuk mengikat materi secara bersama-sama.

Fenomena keradioaktifan melibatkan perubahan dalam inti atom, sedangkan pada reaksi kimia biasa melibatkan interaksi antara elektron orbital dari suatu atom. Perubahan energi yang dihasilkan dari interaksi elektron selama berlangsungnya reaksi kimia biasa relatif kecil, bila dibandingkan dengan proses transformasi nuklir yang jelas sangat besar. Contohnya, untuk pembakaran 1 gram atom

karbon (graphite) menjadi CO_2 , melepaskan 94.000 kalori. Tetapi pada proses transformasi radioaktif dari 1 gram atom karbon-14 menjadi nitrogen memerlukan kurang lebih 3 triliun kalori.

Energi yang terlibat dalam keradioaktifan dihitung per-inti. Jika kalori yang digunakan untuk satuan energi, jumlahnya akan sangat besar, maka satuan lain yang dapat digunakan adalah elektron volt (eV). Elektron volt ini sama dengan energi kinetik dari suatu elektron yang bergerak dengan potensial sebesar 1 volt. ($1 \text{ eV} = 3,85 \times 10^{-20}$ kalori). Pada reaksi kimia biasa, energi yang dibutuhkan sebesar 10 eV per atom. Sedangkan energi yang dibutuhkan untuk proses perubahan inti sampai pada tingkat KeV atau MeV per inti.

Inti Atom

Inti atom terdiri atas *netron* dan *proton*, kedua komponen ini disebut dengan *nukleon*. Proton merupakan partikel yang bermuatan positif, dengan massa kira-kira 1836 kali lebih besar daripada elektron orbital. Proton tidak dapat diartikan sebagai partikel yang tidak bergerak dalam inti, akan tetapi gerakan proton ini adalah konstan.

Jumlah proton dalam suatu inti disebut dengan *nomor atom* dari suatu unsur, dengan simbol Z . Jumlah proton berkisar 1 untuk atom hidrogen sampai dengan 105 untuk hahnium-unsur terbaru yang ditemukan. Jumlah proton dari suatu inti sama dengan jumlah elektron dari unsur tersebut.

Netron adalah nukleon tak bermuatan, mempunyai massa yang sama dengan massa proton. Jumlah total netron dalam inti disebut *nomor netron*, N . Netron dan proton diikat bersama oleh satu

dari empat gaya fundamental dalam alam, yakni interaksi kuat atau gaya inti. Jumlah total nukleon dalam inti merupakan bilangan bulat yang disebut *nomor massa*, A .

$$A = N + Z$$

Walaupun A dinyatakan dalam bilangan bulat, tetapi massa inti ini sesungguhnya tidaklah bulat.

Menandai suatu inti tertentu, ditunjukkan dengan notasi



Dimana : X adalah simbol dari suatu unsur, contoh :



yaitu inti karbon dengan 6 proton dan 8 neutron, atau biasanya dituliskan secara sederhana dengan C-14.

Suatu spesies inti tertentu dengan jumlah proton dan neutron tertentu disebut nuklida. Lebih dari 1500 nuklida yang telah diketahui. Di dalam biologi, hubungan antara unsur dan nuklida secara kasar sama dengan hubungan antara klasifikasi tingkat genus dan spesies.

Isobar merupakan nuklida dengan *nomor massa* (A) yang sama, atau dapat dikatakan isobar mempunyai jumlah partikel inti (nukleon) yang sama dalam inti, contohnya ${}^3\text{He}$ dan ${}^3\text{H}$ adalah isobar dengan jumlah nukleonnya masing-masing tiga. *Isoton* adalah inti dengan nomor *neutron* (N) yang sama, contohnya ${}^3\text{He}$ dan ${}^2\text{H}$, yang masing-masing mempunyai jumlah neutron satu.

Isotop menunjukkan suatu inti yang mempunyai *jumlah proton* (Z) yang sama, tetapi *jumlah neutronnya* (N) berbeda. ^2H dan ^3H merupakan isotop untuk unsur hidrogen. Isotop merupakan inti dari suatu unsur tertentu mempunyai nomor massa yang berbeda. Secara umum sifat kimia dari suatu atom sangat tergantung pada elektron atom, dan isotop mempunyai struktur elektron yang sama dari atom, sehingga dengan demikian sifat kimianya juga sama.

Jumlah isotop berbeda-beda antar unsur yang satu dengan yang lainnya. Hanya sedikit isotop yang terdapat di alam, dan disebut nuklida stabil, sedangkan yang lainnya dalam bentuk tidak stabil, yaitu isotop yang terdapat di alam secara tidak tetap.

Selain dari ketiga macam nuklida di atas dikenal pula istilah isomer, yaitu nuklida yang mempunyai nomor atom dan bilangan massa yang sama, akan tetapi berbeda dalam hal sifat keradioaktifannya. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan susunan tingkat energi proton dan neutron dalam inti.

Banyaknya nuklida stabil berbeda dari suatu unsur dengan unsur lainnya., Misalnya Uranium tidak mempunyai nuklida yang stabil, sedangkan untuk timah mempunyai 10 nuklida yang stabil. Total jumlah nuklida dari seluruh unsur yang ada adalah kira-kira 280. Unsur-unsur alam yang terdapat di tanah ataupun di atmosfer, umumnya bercampur dengan nuklida stabil dari unsur yang bersangkutan.

Stabilitas inti berhubungan dengan rasio proton dan neutron, yang secara tidak langsung menunjukkan ikatan antar inti. Kekuatan ikatan antar inti akan besar jika inti saling berpasangan. Nuklida

stabil yang mengandung jumlah proton dan neutron yang genap terdapat sebanyak 166 nuklida stabil. Kalau salah satu jumlah proton atau neutronnya ganjil ada sekitar 106 nuklida stabil, dan hanya 6 nuklida stabil dengan jumlah proton atau neutronnya sama-sama ganjil.

Radionuklida

Nuklida di alam cepat atau lambat akan mengalami perubahan inti. Perubahan terjadi hingga mencapai rasio proton dan neutron yang setimbang hingga mencapai kedudukan yang paling stabil. Perubahan inti ini melibatkan emisi spontan partikel atau radiasi elektromagnetik dari inti. (Radiasi elektromagnetik ini dalam bentuk kuantum energi yang diskrit, seperti sinar gamma atau foton, sedangkan sinar X mempunyai panjang gelombang yang lebih pendek.) Fenomena ini dikenal dengan *radioaktivitas* dan nuklida yang mengalami perubahan ini disebut *radionuklida* atau isotop radioaktif, atau yang lebih dikenal dengan *radioisotop*. Radioisotop yang dikenal lebih dari 1250, jauh melebihi jumlah nuklida stabil. Dua jenis radioisotop yang diketahui, yaitu radioisotop alamiah yang jumlahnya lebih sedikit daripada radioisotop buatan.

Radioisotop alamiah

Secara alamiah sekitar $4,6 \times 10^9$ tahun yang lalu, dimungkinkan begitu banyak radioisotop yang ada, sudah tidak mengalami perubahan secara alamiah lagi. Nuklida seperti ^{244}Pu yang sangat tidak stabil memerlukan waktu yang panjang untuk

mengalami peluruhan. Nuklida-nuklida yang ada mengalami peluruhan sangat lambat atau mengalami peluruhan berseri, yaitu peluruhan suatu nuklida tak stabil yang terjadi secara alamiah, meluruh membentuk nuklida tak stabil lainnya, dan stabilitas tercapai setelah mengalami beberapa tahapan peluruhan.

Ada tiga seri peluruhan yang dialami nuklida dalam tanah, yaitu: (1) Seri Uranium-Radium, dimana ^{238}U membentuk 14 hasil antara hingga menjadi nuklida stabil ^{206}Pb , (2) Seri Aktinium dimana ^{235}U membentuk 11 nuklida antara hingga menjadi ^{207}Pb , dan (3) seri thorium, dimana ^{232}Th dengan melewati 10 nuklida antara hingga membentuk ^{208}Pb yang stabil. Hasil akhir dari peluruhan berseri ini merupakan isotop timbal, tetapi masing-masing beda untuk tiap proses, ini terbukti perbedaannya dengan sampel tanah yang diambil dari lokasi yang berbeda.

Radioisotop alamiah dengan nomor atom yang rendah, dalam ilmu biologi yaitu ^{40}K . Kelarutan yang tinggi dari potasium menjadikannya terdistribusi dengan luas dalam bumi dan cairan tubuh. Meskipun potasium terdapat dalam jumlah besar dalam kehidupan manusia, tetapi jumlah ^{40}K yang ada sangat kecil. Misalnya, untuk rata-rata berat seseorang 160 pon mengandung $1,7 \times 10^{-5}$ g ^{40}K dalam tubuhnya, atau sekitar 0,012% dari seluruh potasium yang ada. Faktor ini menjadikan ^{40}K merupakan kontributor yang berarti terhadap radiasi latar belakang.

Radioisotop yang mengalami peluruhan di atmosfer melalui proses penembakan sinar kosmik dari atom-atom di atas atmosfer. Kecepatan dari proses peluruhannya sama dengan kecepatan

pembentukannya, hingga kelimpahannya relatif konstan di alam. Tritium (^3H) suatu nuklida yang dihasilkan dengan proses ini. Ketika ^{14}N ditabrak oleh neutron, menghasilkan ^3H dan ^{12}C . Neutron yang menabrak ^{14}N ini diperoleh dari interaksi partikel sinar kosmik dengan inti lainnya di atas atmosfer. Reaksi inti dengan hasil serupa dapat dijumpai pada reaksi antara ^{14}C dan ^1H . Sebagai contoh, Tabel-1 dibawah ini merinci perbandingan neutron-proton pada inti hidrogen dan karbon.

Radioisotop buatan : Radioisotop buatan pertama ditemukan oleh Curie dan Joliot pada tahun 1934 yang merubah ^{27}Al menjadi ^{30}P . Kemudian selanjutnya sebanyak ratusan radioisotop buatan diperoleh selama empat dekade.

Metode dasar dari proses transformasi inti umumnya melibatkan penembakan nuklida stabil dengan beberapa partikel, baik yang bermuatan maupun yang tidak. Penembakan ini membuat target inti tidak stabil untuk sementara, menghasilkan lompatan partikel inti atau emisi radiasi elektromagnetik dan spesies baru. Jenis reaksi yang penting dari pembentukan nuklida buatan ini melibatkan penggunaan partikel bermuatan atau neutron.

Tabel -1. Kombinasi Perbandingan Neutron-Proton Untuk Hidrogen dan Karbon

Unsur	Nomor Atom	Nomor Neutron	Nomor Massa	Kestabilan Nuklida
Hidrogen	1	0	1	Stabil
(Deuterium)	1	1	2	Stabil
(Tritium)	1	2	3	Tidak stabil
Karbon	1	3	4	Tidak ada
	6	3	9	Cenderung tidak stabil
	6	4	10	Tidak stabil
	6	5	11	Tidak stabil
	6	6	12	Stabil
	6	7	13	Stabil
	6	8	14	Tidak stabil
	6	9	15	Tidak stabil
	6	10	16	Tidak stabil
	6	11	17	Cenderung tidak stabil

Seperti telah dijelaskan diatas, atom adalah bentuk terkecil suatu unsur lalu dengan perjalanan riset dan temuan, orang dapat menentukan struktur suatu atom. Harus dimaklumi juga bahwa perlu waktu sangat panjang untuk membuktikan keberadaan struktur suatu atom. Sejak Mendeleev menemukan sifat keberkalaan unsur-unsur kimia berdasarkan berat atomnya kemudian dibuktikan sekaligus diperbaiki susunannya oleh Moseley yang menyatakan susunan berkala unsur berdasarkan nomor atomnya maka kimiawan

termasuk fisikawan mulai melihat kemungkinan atom yang terstruktur dalam bentuk ruang kosong, elektron, inti atom, lintasan orbital, eksitasi, absorpsi, dan dinamika konsep kestabilan energi. Uraian tentang struktur atom ini tidak saja didorong oleh dinamika fisika teori seperti fisika kuantum, mekanika kuantum, maupun mekanika gelombang, tetapi juga oleh kimia teori seperti termodinamika statistik, reaktivitas, transisi elektronik dan vibrasional, maupun format orbital yang menciptakan kestabilan suatu unsur dan dengan sendirinya juga suatu molekul. Tetapi ini semua telah dibuktikan secara eksperimental dari riset yang satu ke riset yang berikut dengan partisipasi ilmuan sehingga menuju kesimpulan konvergen yang disepakati sebagai suatu fakta dan kebenaran yang tidak dapat dipungkiri. Namun demikian prinsip kebenaran dalam sains adalah kebenaran relatif, artinya suatu kebenaran yang siap untuk dikoreksi manakala muncul pemikiran teoritik dan fakta eksperimental yang lebih baik dan masuk akal.

Struktur Inti

Setelah dibuktikan bahwa ada struktur atom, pertanyaan berikut adalah apakah ada struktur inti atom tersendiri? Pertanyaan ini sangat logis diajukan karena 99% massa atom terletak dalam inti atom dan tentunya memiliki prinsip tertentu untuk ketersediaan, aplikasi, dan mekanisme pergerakan massanya agar mampu mempertahankan diri dalam suatu ruang yang sangat kecil, massa yang sangat besar yang berarti energi yang sangat besar. Inilah sebenarnya yang mengilhami pembuatan bom atom atau lebih

tepatnya bom nuklir sebagai senjata pembunuh yang dahsyat tetapi juga mengilhami pembuatan listrik tenaga nuklir.

Ada setidaknya dua alasan fundamental perbedaan antara struktur atom dan struktur suatu inti atom. Pertama, gaya ikatan antara nukleon untuk mengikat mereka secara bersama adalah jauh lebih rumit dibanding gaya ikatan elektrostatik antar atom. Kedua, dinamika sistem banyak-partikel bahkan jauh lebih sulit dalam inti dibanding dalam atom atau dalam sistem astronomis. Sampai sekarang setidaknya ada tiga model yang menjelaskan struktur suatu inti. Model-model tersebut secara ringkas dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Model Kulit.

Model ini diilhami oleh data pelepasan neutron dari isotop Pb, seperti terlihat dalam Tabel-2 dibawah ini.

Tabel-2. Energi yang dibutuhkan untuk melepaskan satu neutron dari isotop Pb

Isotop	Jumlah Neutron	Energi Untuk Melepaskan Satu Neutron, MeV
^{205}Pb	123	6,64
^{206}Pb	124	8,16
^{207}Pb	125	6,73
^{208}Pb	126	7,38
^{209}Pb	127	3,87
^{210}Pb	128	5,23
^{211}Pb	129	3,77

Hasil diatas, dan banyak bukti yang lainnya, menunjukkan bahwa struktur inti ^{208}Pb (126 neutron) adalah stabil dan disebut bilangan

ajaib atau *magic number*. Melalui tabel periodik juga dijumpai hal yang kurang lebih sama. Dalam tabel-3 dibawah ini ditunjukkan beberapa bilangan ajaib dan inti yang mengandung bilangan ajaib disebut inti ajaib atau magic nucleus seperti ; ^{208}Pb dengan 82 proton dan 126 netron demikian juga ^{40}Ca dengan 20 inti.

Tabel-3. Angka Ajaib Proton dan Netron

Proton	Netron
2	2
8	8
20	20
28	28
50	50
82	82
126	126

Model Kulit ini mulai dengan asumsi drastis setiap nukleon bergerak dalam sumur potensial yang adalah representasi dari interaksi nukleon tersebut dengan semua nukleon lainnya.

Gerakan nukleon tidak terganggu dengan adanya semua nukleon lain kecuali tanggungjawab semua nukleon tersebut dalam membentuk sumur potensial. Konsep sumur potensial dapat dilihat dalam bagian lain buku ini. Dalam bentuk paling sederhana dari model kulit ini, nukleon dianggap sebagai bentuk bola (spheric). Dengan model seperti ini orang dapat melanjutkan penghitungan

energi baik energi potensial maupun energi kinetik. Dengan demikian model kulit ini memosisikan nukleon dalam tingkat energi seperti pada model struktur atom. Beberapa bukti lain yang mendukung model kulit ini adalah jumlah isotop dan isoton stabil, kelimpahan nuklida alamiah, sifat peluruhan radioaktif, emisi dan penangkapan neutron, momen kuadropol inti, dan spin serta paritas inti.

2. Model Gas Fermi

Model ini juga meninjau inti dalam suatu sumur potensial dalam mana proton dan neutron bergerak. Gaya antar nukleon sama sekali diabaikan. Maka yang dilakukan adalah penghitungan interaksi berbasis statistik seperti perlakuan gas dalam teori kinetik. Model ini masih memerlukan perbaikan fundamental.

3. Model Kolektif

Meskipun model kulit terlihat cukup memuaskan namun masih banyak sifat-sifat inti yang tidak bisa dijelaskan dengan baik. Yang sangat jelas adalah momen kuadropol listrik yang sangat besar dalam inti yang jauh dari kulit tertutup. Untuk menjawab masalah ini tampaknya asumsi inti sebagai bentuk bola harus direvisi. Jadi untuk pendekatan kualitatif model kulit dianggap cukup memadai untuk diaplikasikan. Pada tahun 1950, Rainwater menyarankan adanya perubahan bentuk atau deformasi inti yang disebabkan oleh gerakan bagian terluar inti. Bayangkan sebuah inti dengan kulit lengkap atau tertutup (closed shell) oleh neutron dan proton dan jika ditambah lagi satu neutron (^{17}O misalnya). Seperti halnya lintasan bulan mengitari bumi menghasilkan pasang di samudera, demikian

pula kiranya gerakan inti ganjil tersebut menghasilkan pasang dalam inti ^{16}O . Kalau hanya sedikit deformasi yang dihasilkan maka jika dipaksakan dengan lebih dari satu inti ganjil, deformasi yang lebih besar mungkin dihasilkan. Masih banyak lagi koreksi yang dilakukan dalam model kolektif ini namun tidak akan dibahas karena itu adalah domain dari kimia inti, bukan kimia radiasi.

Gaya Antar Inti

Penting juga kiranya mengetahui secara umum gaya-gaya yang bekerja dalam inti dan antar inti. Dari berbagai eksperimen sudah dilakukan diperoleh bahwa gaya inti bekerja pada jarak yang sangat pendek yaitu 10^{-13} cm. Kebanyakan informasi detail datang dari inti sederhana terutama deutron tetapi yang paling lengkap berasal dari studi hamburan nukleon satu sama lain. Misalnya suatu berkas proton atau neutron dapat dihamburkan dari hidrogen untuk memperoleh informasi tentang interaksi proton atau neutron dengan proton. Beberapa kondisi yang dapat mempengaruhi kuat interaksi antara dua nukleon adalah sebagai berikut :

1. Apakah kedua nukleon tersebut keduanya proton, atau neutron, atau proton plus neutron
2. Jarak antara kedua nukleon
3. Apakah spinnya paralel antiparalel
4. Antar hubungan antara arah spinnya dengan arah garis yang menghubungkan kedua nukleon
5. Kecepatan relatif mereka
6. Ada atau tidak adanya nukleon tambahan

Hasil eksperimen hamburan dan pengukuran energi ikat inti menunjukkan bahwa pada tingkat kecermatan tinggi gaya antara sebuah pasangan inti tidak dipengaruhi oleh jenisnya, apakah p-p, p-n, atau n-n, kecuali adanya gaya tolak Coulomb yang lemah antara p-p.

Selain itu, Yukawa, 1935, mengusulkan bahwa gaya antar inti bisa muncul dari pertukaran partikel diantara mereka. Karena seharusnya ada hubungan antara trayek gaya dan partikel yang dipertukarkan dan dapat menunjukkan bahwa partikel mestinya memiliki kurang lebih 280 massa elektron. Pada tahun 1936, massa seperti ini ditemukan dari radiasi kosmik yang jatuh ke bumi dari luar angkasa. Namun demikian partikel ini, disebut μ -meson atau muon, ternyata tidak menunjukkan sifat yang diinginkan karena partikel ini berinteraksi lemah dengan nukleon. Kemudian 1947, meson Yukawa (sekarang disebut meson atau pion) ditemukan oleh Lattes, Occhialini, dan Powell juga dari luar angkasa. Pion bisa bersifat netral, bermuatan positif atau negatif. Beberapa partikel dan sifatnya dapat dijumpai pada tabel-4 dibawah ini.

Tabel-4. Ringkasan beberapa sifat sejumlah partikel

Partikel	Muatan	Spin	Massa,eV	BPU	WH
Foton,	0	1	0	stabil	-
Neutrino,	0	$\frac{1}{2}$	mungkin 0	stabil	-
Elektron, e^-	-1	$\frac{1}{2}$	0,5111006	stabil	-
e^+	+1	$\frac{1}{2}$	0,5111006	stabil	-
Muons, μ^-	-1	$\frac{1}{2}$	105,659	$\mu^- \rightarrow e^- +$	$2,2 \times 10^{-6}$
μ^+	+1	0	105,659	$\mu^+ \rightarrow e^- +$	$2,2 \times 10^{-6}$
Pions, π^+	+1	$\frac{1}{2}$	139,60	$\pi^+ \rightarrow e^- +$	$2,55 \times 10^{-8}$
π^0	0	0	135,01	$\pi^0 \rightarrow 2$	$1,8 \times 10^{-16}$
π^-	-1	0	139,60	$\pi^- \rightarrow \mu^- +$	$2,55 \times 10^{-8}$
Proton,p	+1	$\frac{1}{2}$	938,256	stabil	-
Netron,n	0	$\frac{1}{2}$	939,550	stabil	-

BPU : Bentuk Peluruhan Utama, WH : Waktu Hidup rata-rata, detik

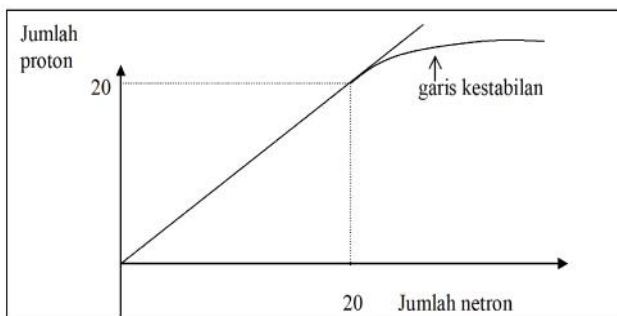
Demikianlah sekilas tentang model struktur inti yang dari waktu ke waktu berkembang seiring pemikiran dan fakta eksperimental yang diperoleh di laboratoria seluruh dunia.

BAB II

SIFAT DAN JENIS PELURUHAN RADIOAKTIF

II.1. Radionuklida dan Stabilitas Inti

Seperti diketahui bahwa inti mengalami peluruhan secara spontan untuk mencapai kondisi yang lebih stabil. Kestabilan inti ini ditentukan oleh rasio neutron dan proton dalam inti. Unsur dengan berat atom rendah (sampai 20) rasio kestabilannya adalah 1:1, sedangkan untuk unsur yang berat atomnya lebih tinggi rasionya mendekati 1,5:1. Rasio kestabilan ini ditunjukkan dengan garis kestabilan seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Garis kestabilan inti

Kedudukan nuklida tidak stabil terhadap garis kestabilan menentukan tipe peluruhan radioaktif yang akan dilalui untuk mencapai keadaan yang lebih stabil. Nuklida-nuklida tak stabil yang

berada di sebelah kanan garis kestabilan mempunyai rasio kestabilan yang tinggi, maka pola peluruhannya adalah dengan mengurangi kandungan neutron atau menambahkan proton. Sebaliknya nuklida radioaktif yang berada di sebelah kiri garis kestabilan mempunyai rasio proton-neutron yang tinggi, sehingga pola peluruhannya adalah dengan mengurangi kandungan proton atau menambahkan neutron.

Cara yang digunakan di atas tidaklah kuantitatif untuk menggambarkan peluruhan. Terdapat cara lain yang lebih kuantitatif untuk menjelaskan peluruhan radioaktif dengan melibatkan perubahan energi.

Sebelumnya, beberapa satuan penting dan istilah yang sering digunakan dalam hal ini harus diketahui terlebih dahulu.

Inti mempunyai massa yang sangat kecil yaitu 10^{-23} gram, untuk lebih mudahnya kita akan menggunakan dua satuan peluruhan lainnya yaitu satuan massa atom (sma) dan millielektron volt (MeV).

Satu satuan massa atom (1 sma) sama dengan $1,66053 \times 10^{-24}$ gram. Jika massa inti atom C-12 adalah $1,992 \times 10^{-24}$ gram, maka massa inti C-12 dalam satuan sma adalah

$$\frac{1,992 \times 10^{-24} \text{ gram}}{1,66053 \times 10^{-23} \text{ gram/sma}} = 12 \text{ sma}$$

Satuan lain yang juga digunakan adalah millielektron Volt (MeV) yang merupakan satuan energi: 1 MeV/molekul sama dengan

23.045.000 kalori/mol. Maka untuk menghitung massa suatu inti dengan satuan energi digunakan persamaan Einstein; $E = mc^2$,

Dimana : E = besarnya energi dalam erg atau Joule

m = massa inti (gram atau kg)

c = kecepatan cahaya (cm/det atau m/det.)

Contoh : Andaikan massa suatu inti 1 sma ($1,66053 \times 10^{-24}$ gram) dengan kecepatan cahaya $2,997925 \times 10^{10}$ cm/detik, maka energi inti, E ;

$$E = mc^2 = (1,66053 \times 10^{-24} \text{ gram}) \times (2,997925 \times 10^{10} \text{ cm/det.})^2 \\ = 1,492 \times 10^{-3} \text{ erg.}$$

Dalam satuan energi, $1 \text{ erg} = 1,66022 \times 10^{-6} \text{ MeV}$, sehingga

$$E = (1,492 \times 10^{-3} \text{ erg}) \times (1,66022 \times 10^{-6} \text{ MeV/erg}) = 931,5 \text{ MeV}$$

Dengan kata lain massa inti 1 sma setara dengan energi sebesar 931,5 MeV. Jadi untuk merubah satuan massa atom menjadi satuan energi MeV, tinggal mengalikan dengan 931,5.

Satuan massa inti yang lebih tepat digunakan adalah konsep Energi Ikat inti (EI). Energi Ikat inti (EI) adalah energi yang dilepaskan ketika nukleon-nukleon membentuk inti. Contoh energi Ikat (EI) untuk ${}^4\text{He}$ adalah

$$EI \text{ } {}^4\text{He} = 2M[{}^1\text{H}] + 2M[\text{n}] - M[{}^4\text{He}]$$

Dimana ; $M[{}^1\text{H}]$ = massa atom ${}^1\text{H}$

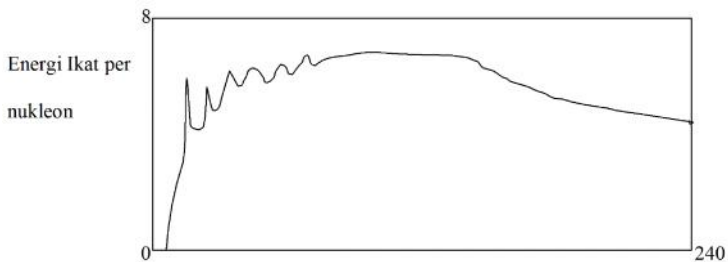
$M[\text{n}]$ = massa neutron

$M[{}^4\text{He}]$ = massa atom ${}^4\text{He}$

$$\begin{aligned} EI[{}^4\text{He}] &= 2(1,00183) + 2(1,00896) - 4,00398 = 0,03030 \text{ sma} \\ &= 0,03030 \text{ sma} \times 931,5 \text{ MeV/sma} = 28,22 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Besaran yang lebih sederhana adalah energi ikat/nukleon. Jadi untuk ${}^4\text{He}$ (2 neutron + 2 proton) Energi ikat nukleonnya adalah $28,22\text{MeV}/4$ atau $7,1 \text{ MeV}$.

Jika antara EI/nukleon diplotkan dengan nomor massa inti, akan diperoleh grafik seperti pada gambar 3.2. Pertanyaan yang muncul kemudian adalah mengapa inti meluruh. Inti terikat oleh gaya inti dengan sangat kuat. Inti ini akan mengalami peluruhan atau terdisintegrasi hanya jika cukup energi untuk terjadinya peluruhan tersebut. Gaya dorong (driving force) peluruhan inti bukanlah kestabilan total suatu inti, tetapi kestabilan relatif inti untuk membentuk produk peluruhan yang memungkinkan. Untuk mengetahui suatu peluruhan dapat berlangsung, maka harus dihitung energi (Q) yang dilepaskan akibat peluruhan tersebut.

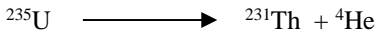


Gambar 2.2. Hubungan antara energi ikat per nukleon dan nomor massa inti

$Q \equiv [\text{massa inti mula-mula}] - [\text{massa produk peluruhan}]$

Jika nilai Q positif, peluruhan dapat terjadi. Jika nilai Q negatif, tidak terjadi peluruhan.

Contohnya, kestabilan ^{235}U terbentuk dengan pelepasan partikel α (inti atom ^4He).



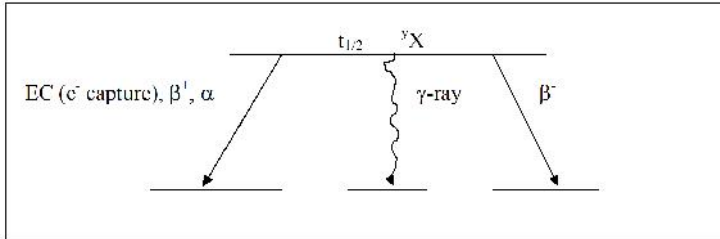
$$\begin{aligned} Q &= M^{235}\text{U} - (M^4\text{He} + M^{231}\text{Th}) \\ &= 235,043915 - (4,002603 + 232,036291) \\ &= 0,005021 \text{ sma} \\ &= 0,005021 \text{ sma} \times 931,5 \text{ MeV} = 4,68 \text{ MeV} \text{ (peluruhan dapat berlangsung)} \end{aligned}$$

Besarnya energi yang dilepaskan juga mempengaruhi laju peluruhan. Pada umumnya waktu paruh dari suatu isotop berbanding terbalik dengan energi peluruhan.

II.2. Jenis-Jenis Peluruhan

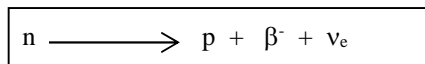
Skema peluruhan memberikan ikhtisar informasi jenis peluruhan radioaktif. Simbol nomor massa dan waktu paruh dari nuklida diletakkan pada bagian atas garis horisontal. Peluruhan dengan emisi partikel negatif ditunjukkan dengan garis panah diagonal yang ke kanan, sedangkan peluruhan yang melibatkan emisi partikel positif atau penangkapan elektron orbital ditunjukkan dengan garis panah yang agak ke kiri. Jarak antara garis horisontal dengan ujung garis panah dari emisi tersebut menunjukkan tingkat energi dari suatu peluruhan. Jika produk peluruhan yang dihasilkan berada pada keadaan tereksitasi, emisi sinar gamma ditunjukkan

dengan garis vertikal sampai pada titik energi terendah dari inti. Jika inti mengalami lebih dari satu jenis peluruhan, maka kita dapat menentukan persentase tiap jalur peluruhan.



Gambar 2.3. Skema pola peluruhan radionuklida

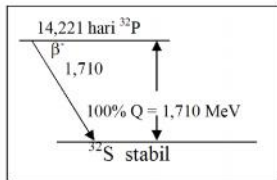
II.2.1. Peluruhan dengan memancarkan beta negatif (β^-)



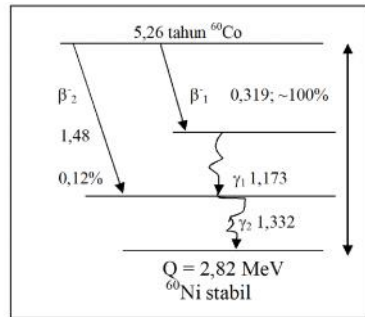
Pada kondisi tertentu, nuklida yang kelebihan neutron berusaha mencapai kestabilan dengan mengkonversi neutron menjadi proton yang disertai dengan pelepasan partikel- β^- (elektron) dan partikel kecil yang disebut antineutrino (anti partikel, $\bar{\nu}_e$). Elektron yang dilepaskan pada peluruhan ini berasal dari inti, bukan merupakan elektron orbital. Tetapi partikel β^- dapat diidentikkan dengan elektron yang diciptakan oleh inti atom dari energi yang ada. Perubahan inti ini terjadi dengan hilangnya satu neutron dan bertambahnya satu proton, dengan demikian posisi nuklida berada pada garis kestabilan.

Emisi negatron menghasilkan pertambahan satu satuan nomor atom (Z) tetapi nomor massanya tidak berubah. Kelebihan energi yang menyertai emisi β^- akan diubah dalam bentuk foton atau sinar γ .

Skema peluruhan yang melibatkan emisi negatron tampak pada gambar 2.4 dan 2.5 . Pada skema peluruhan ^{60}Co terdapat dua atau lebih lajur peluruhan, energi disintegrasi total yang diperlukan untuk mencapai ground state merupakan nilai konstan untuk setiap nuklida. Besarnya energi ini adalah 2,82 meV untuk ^{60}Co .



Gambar 3.4. Peluruhan ^{32}P



Gambar 3.5 peluruhan ^{60}Co

Partikel neutrino yang dihasilkan dari peluruhan ini bermuatan netral dan mempunyai massa yang sangat kecil. Jika dibandingkan dengan massa elektron, maka massa neutrino mendekati nol.

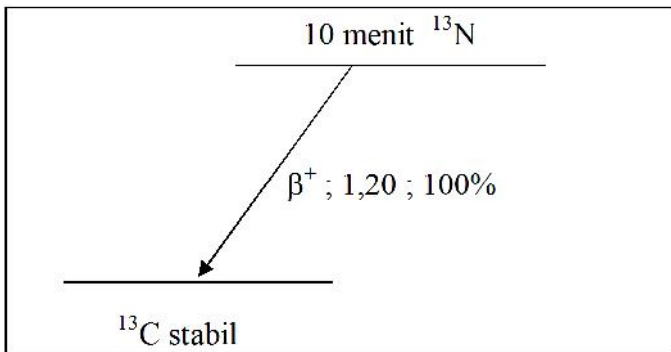
II.2.2. Peluruhan dengan memancarkan positron (S^+)

Bila terdapat kelebihan proton dalam suatu nuklida, maka nuklida tersebut akan memancarkan positron untuk mencapai

kestabilan. Positron adalah partikel- β yang bermuatan positif. Pada peluruhan ini proton akan diubah menjadi neutron, dilepaskan dengan kecepatan tinggi bersama-sama partikel antineutrino(ν_e). Jenis peluruhan ini ditunjukkan pada persamaan di bawah:



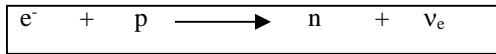
Peluruhan positron ini tidak merubah nomor massa (A), tetapi nomor atom (Z) akan mengalami pengurangan sebesar satu unit. Kelebihan energi yang menyertai pelepasan positron ini memancarkan radiasi sinar gamma. Skema peluruhan ^{13}N ditunjukkan pada gambar 3.6.



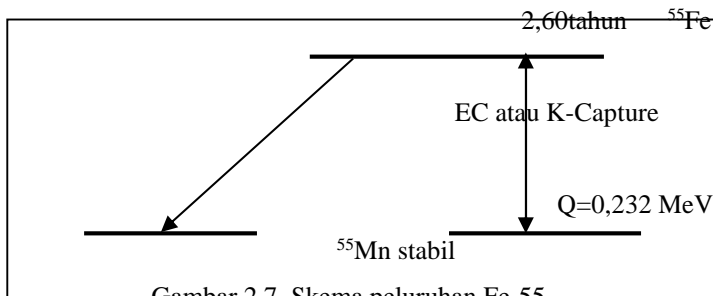
Gambar 2.6. Peluruhan ^{13}N

II.2.3. Peluruhan dengan menangkap elektron orbital (electron capture, EC)

Proses penangkapan elektron adalah cara lain untuk mengurangi proton dalam inti. Hasil yang diberikan akan sama dengan proses pemancaran positron. Satu dari elektron orbital terdekat bereaksi dengan inti, kemudian bereaksi dengan proton menghasilkan neutron dan sebuah massa kecil yang tidak bermuatan yang disebut neutrino(ν_e).



Peluruhan ini akan menyebabkan berkurangnya satu proton dan bertambahnya satu neutron. Hanya partikel ν_e yang dihasilkan dari peluruhan ini yang sulit dideteksi, sedangkan sinar-X yang dipancarkan sebagai akibat penataan ulang elektron orbital dari proses penangkapan elektron ini, dapat dideteksi. Jika elektron yang ditangkap berasal dari *kulit K* maka peluruhan ini disebut *K-capture*. Contohnya dalam ilmu biologi, peluruhan ^{55}Fe dengan proses ini menghasilkan sinar-X sebagai hasil dari penataan ulang elektron orbital.



Gambar 2.7. Skema peluruhan Fe-55

Nuklida tak stabil cenderung untuk mengalami peluruhan positron atau menangkap elektron. Seperti pada Na-22 menangkap elektron menyebabkan nomor atomnya bertambah, sedangkan nomor massanya tetap. Peluruhan dengan memancarkan positron lebih dominan daripada peristiwa penangkapan elektron jika nuklidanya mempunyai nomor atom (Z) yang rendah.

II.2.4. Peluruhan sinar gamma (γ)

Pelepasan sinar γ terjadi karena inti mengalami peluruhan dari keadaan tereksitasi ke keadaan yang lebih rendah (keadaan dasar atau ground state), atau akibat lompatan elektron orbital. Sinar γ ini diemisikan dalam bentuk foton yang merupakan energi diskrit. Peluruhan ini tidak menyebabkan perubahan jumlah proton dan neutron. Hanya energi tereksitasi dari inti yang mengalami perubahan dari tingkat tereksitasi yang tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah. Inti yang mengalami peluruhan partikel β^- sering diikuti peluruhan sinar γ . Jika peluruhan terjadi antara dua tingkatan yang dapat diukur waktunya, maka akan terjadi yang disebut **transisi isomer (IT = isomeric transition)**. IT ini hanya terjadi pada peluruhan sinar γ .

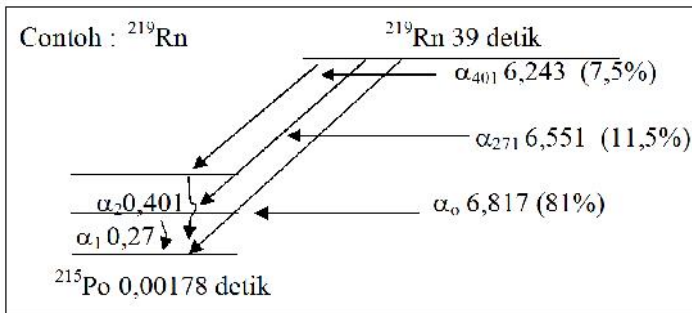
II.2.5. Konversi Internal

Jika suatu peluruhan disertai dengan pelepasan sinar γ kemungkinan lain bisa juga timbul. Inti tereksitasi dapat berinteraksi dengan elektron orbital terdalam dengan seluruh energi eksitasi inti dipindahkan kepada elektron tersebut. Akhirnya elektron akan melesat keluar dari atom. Peristiwa ini disebut *konversi internal*

(*Internal Conversion, IC*) dan elektron yang dipancarkan disebut elektron konversi (*Conversion Electron*). Proses ini umumnya terjadi pada nuklida dengan nomor atom yang lebih besar dan transisi energi sinar γ yang rendah. Elektron konversi merupakan monoenergetik.

II.2.6. Peluruhan dengan memancarkan partikel α

Tipe peluruhan ini hanya terjadi pada unsur dengan berat atom yang tinggi (diatas 210), sehingga emisi partikel lainnya (proton, neutron atau deuteron) dari dalam inti tidak terjadi. Partikel α adalah suatu inti helium yang telanjang yaitu ikatan kuat antara dua neutron dan dua proton. Pemancaran partikel α akan mengurangi Z sebesar dua unit ($Z - 2$) dan A sebesar empat unit ($A - 4$). Inti pemancar α umumnya tidak digunakan sebagai perunut tetapi mempunyai beberapa kepentingan biologis.

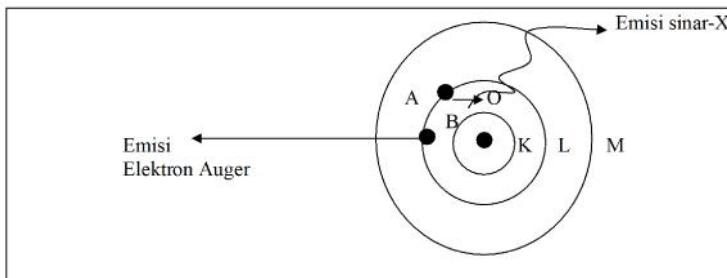


Gambar 3.8. Peluruhan ^{219}Ru

α_{401} berarti energi eksitasi inti yang menyertai pemancaran partikel adalah 0,401 MeV.

II.2.7. Pengaruh luar inti peluruhan radioaktif

Dalam **IC** (*Internal Conversion*) dan **EC** (*Electron Capture*) awan elektron orbital yang meliputi inti terganggu. Adanya posisi kosong dari elektron pada orbital terdalam akibat peristiwa IC dan EC diisi oleh elektron yang berasal dari orbital diluarnya. Demikian seterusnya, sehingga terjadi penyusunan ulang atau pergeseran elektron orbital. Pergeseran ini menurunkan energi potensial sehingga ada energi yang tersisa. Akibatnya dihasilkan pancaran sinar-X dan pancaran elektron Auger. Sinar-X dihasilkan karena beda tingkat energi elektron yang terdeksitasi dan dipancarkan dalam bentuk radiasi elektromagnetik.



Gambar 2.9. Diagram skematik emisi sinar X dan emisi elektron Auger

$$E_{\text{sinar-X}} = E_B(1) - E_B(2)$$

Dimana : $E_B(1)$ = tingkat energi awal elektron

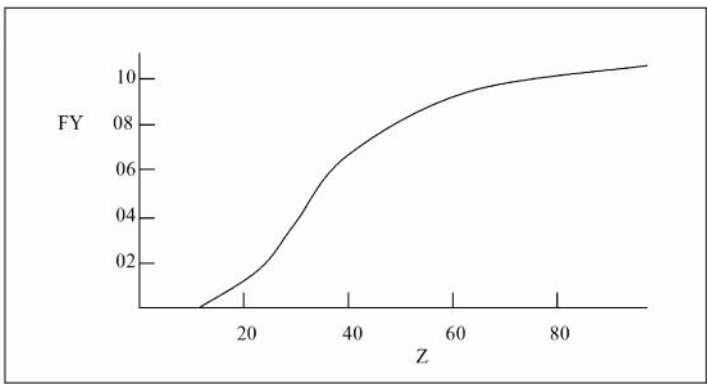
$E_B(2)$ = tingkat energi akhir elektron

Pancaran elektron Auger bersaing dengan pancaran sinar-X. Dalam emisi elektron Auger energi yang biasanya dilepaskan sebagai sinar-X dipindahkan ke elektron orbital lebih luar dan akhirnya elektron tersebut keluar dari atom. Emisi elektron Auger analog dengan konversi internal. Energi elektron Auger (monoenergetik) ditunjukkan dengan persamaan

$$E_{\text{Auger}} = E_{\text{sinar-X}} - E_{\text{B}(3)}$$

$E_{\text{B}(3)}$ adalah tingkat energi elektron yang keluar dari atom akibat proses Auger. Kebolehjadian relatif antara pancaran sinar-X dan elektron Auger disebut **Hasil Fluoresen** (Fluoresence Yield), yaitu **fraksi tuna elektron yang diisi dengan emisi sinar-X**.

$$\text{FY} = \frac{\text{Jumlah sinar-X yang dipancarkan}}{\text{Jumlah posisi elektron}} = \omega$$



Gambar 2.10. Hubungan hasil fluoresensi (FY) dengan nomor massa unsur (Z)

Karena sinar X dan elektron Auger dari proses konversi internal (IC) dan penangkapan elektron (EC) dapat dideteksi, maka kedua tipe peluruhan ini sering digunakan sebagai perunut.

II.3. Laju Peluruhan Radioaktif

Jumlah inti yang mengalami disintegrasi selama interval waktu tertentu menurun secara eksponensial. Laju ini tidak bergantung pada tekanan, temperatur, hukum aksi massa, atau pembatas kecepatan lainnya yang sering ditemukan dalam reaksi kimia dan fisika biasa. Laju peluruhan sangat berguna untuk mengidentifikasi suatu nuklida. Peluruhan radioaktif menggambarkan proses transformasi radionuklida yang tidak stabil menjadi radionuklida yang stabil atau sebaliknya. Inti tak stabil dalam radioaktif tidak mengalami peluruhan secara serentak tetapi mengalami proses acak, sehingga diperlukan suatu metode statistik untuk menggambarkan peristiwa radioaktif.

II.3.1. Kinetika peluruhan radioaktif

Peluruhan radioaktif mengikuti kinetika reaksi orde satu yaitu bahwa kecepatan peluruhan sebanding dengan jumlah inti radioaktif dalam contoh.

Laju peluruhan partikel \equiv [Laju disintegrasi inti radioaktif] \propto [jumlah inti radioaktif dalam sampel].

Atau jika dikonversikan dalam bentuk persamaan maka

$$\boxed{\text{Laju peluruhan} = [\text{Tetapan peluruhan}] \times [\text{jumlah inti radioaktif}]}$$

Tetapan peluruhan, λ adalah menunjukkan rata-rata peluruhan yang terjadi per inti. Oleh karena itu λ dikali jumlah inti untuk memperoleh laju peluruhan partikel.

Secara matematik ditunjukkan oleh persamaan

$$\begin{aligned} -dN/dt &= \lambda N \\ dN/N &= -\lambda dt \end{aligned}$$

Pada $t = 0 \rightarrow N = N_0$, sehingga $N = N_0 e^{-\lambda t}$; dimana N adalah jumlah inti yang tersisa pada waktu t . Pada eksperimen runut radioaktif yang ingin diketahui adalah kecepatan cacah (count rate) atau aktifitas sampel (A). A didefinisikan sebagai kecepatan cacah yang sama dengan kecepatan disintegrasi inti radioaktif dalam sampel dikalikan dengan efisiensi pengukuran radiasi.

$$A = C \left(\frac{-dN}{dt} \right) = C \lambda N$$

dimana : C = tetapan efisiensi

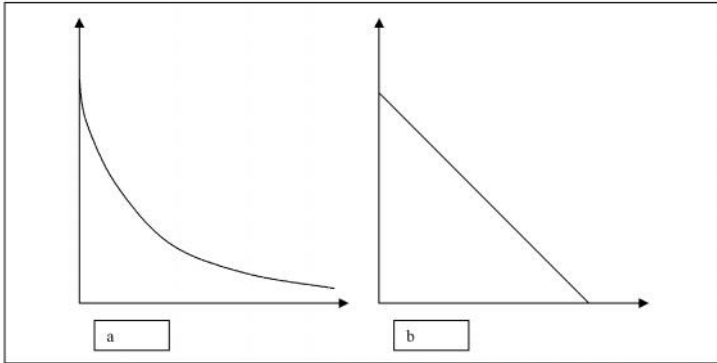
Dengan cara yang sama pada N akan diperoleh :

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

dimana A = kecepatan cacah pada waktu t

A_0 = kecepatan cacah pada waktu $t = 0$

Persamaan A inilah yang mengatur hubungan antara jumlah inti yang ada dengan yang dapat diamati oleh detektor sebagai fungsi waktu. Bentuk kurvanya adalah :



Gambar 2.11. Kurva peluruhan: a. Kurva linier, b. Kurva semilogaritma

Beberapa Cara Menghitung A dan N

a. **Menggunakan daftar log**

$$\text{Log } N = \text{Log } N_0 - 0,4343 \lambda t$$

$$\text{Log } A = \text{Log } A_0 - 0,4343 \lambda t$$

Jadi jikalau tiga besaran dari empat diketahui, maka yang tersisa akan diketahui $[\lambda, t, A, A_0]$ atau $[N, N_0, \lambda, t]$.

Contoh : ^{131}I ($\lambda = 0,0861$ / hari) digunakan dalam eksperimen, bagaimana menghitung pengurangan aktivitas ^{131}I dalam satu hari ?

Jawab : $2,303 \log A/A_0 = -\lambda t = - (0,0861/\text{hari}) (1 \text{ hari})$

$$\log A/A_0 = -0,037386$$

$$A/A_0 = 0,918$$

Jadi sesudah 1 hari, aktivitas ^{131}I tersisa adalah 91,8% dari jumlah semula

b. Menggunakan Mistar Slide Log-log

Penggunaan mistar ini dibuat dengan menggunakan nilai λt pada skala D (LL/0 atau LL/1 atau LL/2 atau LL/3) yang menunjukkan nilai $e^{-\lambda t}$. Pilihan skala ditentukan oleh nilai λt seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut.

λt	Skala
1 – 10	LL/3
0,1 – 1	LL/2
0,01 – 0,1	LL/1
0,001 – 0,01	LL/0

Nilai $e^{-\lambda t}$ digunakan untuk menghitung A atau A_0 dan N atau N_0

c. Menggunakan tabel koreksi peluruhan

Dengan tabel yang mudah dibuat, kita dapat menghitung dengan cepat dan teliti fraksi aktivitas yang tersisa pada selang waktu tertentu. Ini penting terutama untuk peneliti perunut radioaktif.

II.3.2. Waktu Paruh ($t_{1/2}$)

Waktu paruh adalah waktu yang diperlukan agar aktivitas berkurang setengahnya. Setelah satu kali waktu paruh aktivitas nuklida tinggal 50%, setelah dua kali waktu paruh aktivitas nuklida tinggal 25%, dan setelah tiga kali waktu paruh aktivitas nuklida

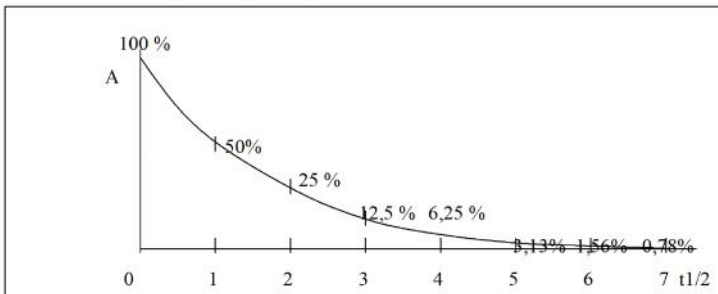
hanya 12,5%. Demikian seterusnya. Waktu paruh juga merupakan cara lain untuk menentukan λ .

Pada $t = t_{1/2} \rightarrow A = \frac{1}{2} A_0$:

$$2,303 \log \frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2}$$

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

Waktu paruh bervariasi dari 10^{-6} detik $\rightarrow 10^{10}$ tahun.



Gambar 2.12. Hubungan antara $t_{1/2}$ dengan aktivitas

Nilai $t_{1/2}$ ini telah ditentukan untuk semua radionuklida yang umumnya digunakan. Penentuan waktu paruh merupakan tahapan pertama untuk mengidentifikasi suatu radionuklida. Penentuan ini dilakukan dengan memplotkan semilog aktivitas dengan periode waktu.

Radionuklida umur panjang sulit menentukan waktu paruhnya. Variasi laju disintegrasi tidak tepat untuk waktu yang panjang. Dalam hal ini λ dapat dihitung dengan persamaan :

$$N = \frac{\text{Bilangan Avogadro}}{\text{BA Radioisotop}} \times \text{Massa Radioisotop}$$

Massa radioisotop dapat ditentukan dengan spektrometri massa. Derajat akurasi dari perhitungan waktu paruh dibatasi oleh asosiasi akurasi seperti pada tabel dibawah.

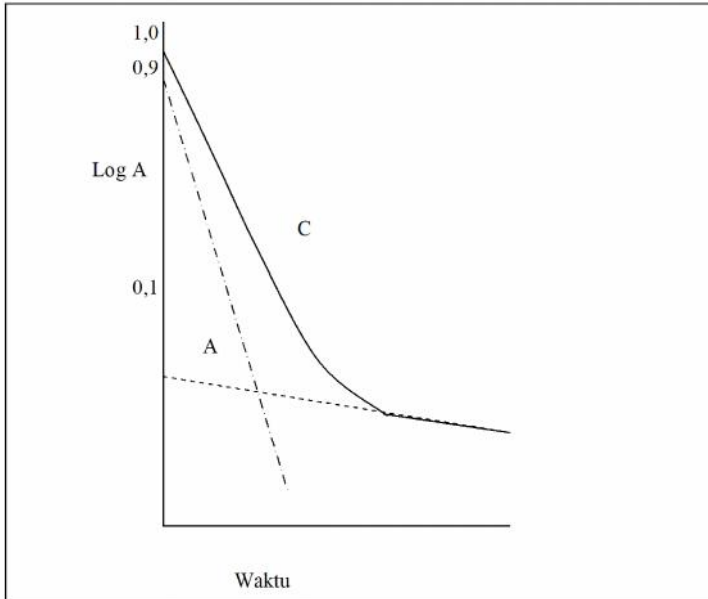
Hal yang harus diketahui pada peluruhan radioaktif yaitu pertama; faktor koreksi radionuklida umur pendek harus diketahui sebelum digunakan pada studi perunut. Kedua; laju peluruhan radioaktif merupakan faktor evaluasi pengaruh biologis radioisotop. Pengaruh biologis ini cenderung mengecil ketika isotop meluruh dengan cepat. Ketiga; pelibatan laju peluruhan untuk menentukan sisa limbah radionuklida.

Nuklida	$t_{1/2}$
^{42}K	12,36 ± 0,03 jam
^{24}Na	14,96 ± 0,02 jam
^{90}Y	64,03 ± 0,05 jam
^{198}Au	2,967 ± 0,002 hari
^{131}I	8,05 ± 0,02 hari
^{32}P	14,24 ± 0,015 hari
^{86}Rb	18,66 ± 0,02 hari
^{51}Cr	27,8 ± 0,1 hari
^{59}Fe	45,6 ± 0,2 hari
^{35}S	87,9 ± 0,1 hari
^{45}Ca	165 ± 4 hari
^{65}Zn	245 ± 0,5 hari
^{22}Na	2,62 ± 0,03 tahun
^{60}Co	5,263 ± 0,01 tahun
^3H	12,262 ± 0,004 tahun
^{90}Sr	27,7 ± 0,3 tahun
^{14}C	5730 ± 30 tahun
^{36}Cl	3,08 ± 0,03 x 10 ⁵ tahun

Tabel nilai waktu paruh untuk beberapa senyawa

II.3.3. Peluruhan Gabungan

Kalau beda $t_{1/2}$ besar, hal ini dapat dibedakan dengan cara grafis.



Gambar 2.14. Kurva peluruhan gabungan

Garis C menunjukkan aktivitas yang teramati. Aktivitas komponen A dengan umur yang lebih panjang teramati setelah komponen B yang umurnya lebih pendek untuk mengalami peluruhan. Ekstrapolasi garis linier ke waktu 0 menunjukkan kurva untuk komponen A. Sedangkan kurva untuk komponen B diperoleh dengan mengurangi titik terluar kurva gabungan dengan titik nilai aktivitas komponen A.

Jika waktu paruh kedua komponen sulit dibedakan dengan grafik diatas, metode deteksi diferensial dapat digunakan. Jika karakteristik isotop-isotop dalam campuran berbeda nyata, maka dimungkinkan mengukur aktivitas satu komponen tanpa gangguan dari radiasi komponen lainnya.

Tipe peluruhan gabungan lainnya yang tidak ditemukan pada penggunaan perunut radioaktif adalah radionuklida yang merupakan gabungan antara **radionuklida induk** dengan **radionuklida turunannya**. Campuran ini ditemukan oleh ahli biologi diantaranya ^{90}Sr (induk) – ^{90}Y (turunan) dan ^{137}Cs (induk)- ^{137}Ba (turunan).

II.3.4. Waktu Rata-rata (Average Life)

Waktu rata-rata suatu partikel adalah waktu disintegrasi suatu atom (Z yang besar) yang diperlukan sejak permulaan kehidupan isotop sampai tak terhingga.

$$\text{TA} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{atau} \quad \text{TA} = 1,433 t_{1/2}$$

Konsep ini penting dalam perhitungan jumlah total partikel dan yang diemisikan selama periode peluruhan tertentu. Nilai ini juga digunakan untuk menghitung dosis radiasi radiasi total yang dikandung suatu sampel radioaktif, misalnya dalam penelitian medis dan terapi.

Satuan Standar Keradioaktifan

Pada mulanya radium merupakan suatu standar untuk menentukan jumlah radioaktivitas. Radium-226 merupakan unsur

dengan kemurnian yang tinggi dan mempunyai waktu paruh yang panjang. Curie (Ci) didefinisikan sebagai jumlah diintegrasi 1 gram radium yang terjadi selama 1 detik. Jika waktu paruh radium 1600 tahun, maka

$$1600 \text{ tahun} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Jadi

$$\lambda = \frac{0,693}{1600 \text{ tahun}} = \frac{0,693}{(1600) (\pi) (10^7)} = 1,38 \times 10^{-11}/\text{detik}$$

Karena berat atom radium adalah 226 maka 1 gram radium mengandung $2,66 \times 10^{21}$ atom ($6,023 \times 10^{23}$ atom/ 226 gram).

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} \text{ (disintegrasi 1 gram radium/detik)} \\ &= (1,38 \times 10^{-11}) \times (2,66 \times 10^{21}) \\ &= 3,7 \times 10^{10} \text{ disintegrasi/detik (dpdet)} \end{aligned}$$

Jumlah inilah yang digunakan sebagai satu Curie (1 Ci) oleh IUPAC dan UPAP.

Curie (Ci) hanya berurusan dengan laju disintegrasi inti, bukan laju emisi partikel β , sinar γ , atau jenis radiasi lainnya. Untuk menghitung laju emisi memerlukan skema peluruhan nuklida. Contohnya, ^{198}Au biasanya mengemisikan satu partikel β^- dan dua sinar γ untuk setiap peluruhan inti, sedangkan ^{60}Co mengalami

peluruhan yang sama tetapi energinya berbeda, maka ^{60}Co akan mengemisikan foton- γ dua kali lebih banyak dari ^{198}Au .

Yang penting diperhatikan juga adalah karena radionuklida memiliki $t_{1/2}$ yang berbeda, maka jumlah inti akan berbeda antara satu spesies dengan spesies lainnya.

Contoh :

1 mCi tritium ($t_{1/2} = 12,26$ tahun) mengandung $2,06 \times 10^{16}$ inti.

$$N = \frac{(-dN/dt)}{\lambda} = \frac{(3,7 \times 10^7)}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{0,693}{t_{1/2}} = \frac{(0,693)}{(12,26)(\pi)(10^7)} = 1,799 \times 10^{-9} / \text{sec}$$

$$N = \frac{(3,7 \times 10^7)}{(1,799 \times 10^{-9})} = (2,06 \times 10^{16}) \text{ inti}$$

Aktivitas Spesifik

Radionuklida umumnya bercampur dengan nuklida stabil dari suatu unsur. Sehingga perlu untuk mengetahui kelimpahan relatif suatu radioisotop. Aktivitas spesifik menunjukkan aktivitas radioisotop persatuan massa sampel. Aktivitas spesifik (A_s) biasanya dinyatakan dalam bentuk:

- laju disintegrasi/satuan massa material (dps/mM atau dpm/mM)
- kecepatan cacah/satuan massa material (cps/mM atau cpm/mM)

- satuan Curie/satuan massa material (Ci/mM, mCi/mM, μ Ci/mM).

Jika ingin membandingkan keradioaktifan beberapa contoh, maka konsep As lebih berguna.

Contoh :

L-alanin- ^{14}C mempunyai As sebesar 1000 dpm permillimole senyawa, tetapi tidak diketahui dimana atom ^{14}C terletak. Setelah degradasi, atom karbon dari karboksil diubah menjadi CO_2 dan hasil reaksinya 50%. Total radioaktivitas yang teramati pada CO_2 adalah 500 dpm. Maka disini tidak dapat diambil suatu kesimpulan. Jika hasilnya dinyatakan dalam Aktivitas spesifik dengan As dari CO_2 sebesar 1000 dpm/mM maka dapat disimpulkan bahwa ^{14}C terletak pada gugus karboksil (COOH).

BAB III

KARAKTERISTIK RADIASI PENGIONISASI

Jenis radiasi yang sering dijumpai pada penggunaan radioisotop sebagai perunut adalah partikel : α , β (β^+ atau β^-) dan sinar γ . Ketiga emisi ini mempunyai karakteristik fisika yang berbeda, dalam hal ini adalah interaksinya dengan materi. Partikel α adalah partikel besar (inti helium), bermuatan +2, bergerak dengan kecepatan rendah. Sebaliknya, radiasi β bermuatan 1 dan mempunyai massa yang sangat kecil, dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan cahaya. Sedangkan sinar γ merupakan radiasi elektromagnetik (foton), tidak bermuatan, dan bergerak pada kecepatan cahaya.

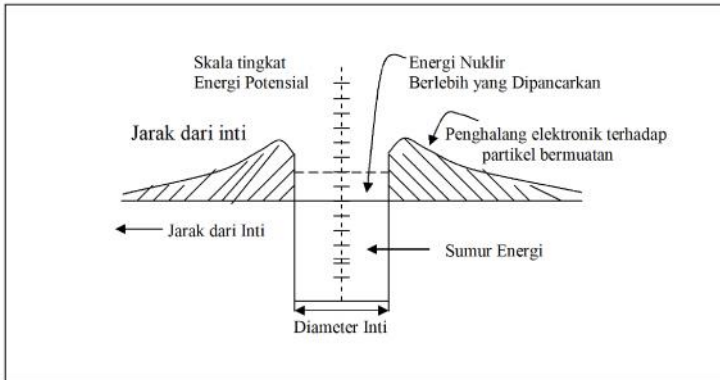
3.1. Partikel Alfa (α)

Isotop pemancar α tidak digunakan sebagai perunut karena nuklidanya adalah unsur dengan berat atom yang tinggi ($Z > 82$). Unsur-unsur seperti ini tidak terdapat dalam sistem biologi dan kimia. Namun demikian, kehadiran unsur berat di lingkungan menimbulkan bahaya biologis.

Pada penjelasan sebelumnya, partikel α digambarkan sebagai inti helium yang terdiri dari dua neutron dan dua proton (merupakan partikel besar). Mekanisme utama hilangnya energi oleh tumbukan partikel α dengan materi adalah tumbukan inelastik dengan elektron

atom. Karena massanya yang besar, arah lintasan partikel α adalah lurus.

Emisi partikel α dari suatu radionuklida melibatkan energi kinetik yang besarnya 4 – 8 Mev. Energi ini menunjukkan bahwa emisi partikel α ini dalam bentuk diskrit. Sifat diskrit menunjukkan kespesifikan nuklida. Konsep mekanisme pancaran partikel α dapat menjelaskan hubungan antara waktu paruh nuklida tertentu dengan energi pancaran partikel α pada peluruhan nuklida tersebut. Menurut konsep ini, konsentrasi yang tinggi dari proton dalam inti (Z tinggi) akan menghasilkan potensial penghalang yang tinggi disekitar inti. Muatan positif yang tinggi ini akan menolak partikel bermuatan positif lainnya yang akan mendekati inti. Dengan kata lain potensial penghalang menyebabkan nukleon terjebak dalam “**sumur energi**”. Pada saat inti mengalami peluruhan α , energi yang berlebihan dalam inti diberikan ke partikel α . Peristiwa ini menyebabkan energi dari inti akan berkurang untuk mencapai kedudukan yang lebih stabil. Oleh karena kelebihan energi dalam inti lebih rendah daripada energi potensial penghalang, partikel α tidak dapat keluar dari inti.



Gambar 3.1 Diagram konsep sumur energi

Tetapi mekanika kuantum memberikan kemungkinan keluarnya partikel dari dalam inti dengan cara menerobos (tunneling) energi penghalang. Peluang partikel α untuk mampu menerobos energi penghalang berbanding terbalik dengan besarnya energi penghalang yang diserap. Semakin besar kelebihan energi dari dalam “sumur energi”, semakin kecil potensial penghalang yang diserap, semakin besar peluang terobosan partikel α . Artinya semakin banyak partikel α yang dipancarkan pada periode tertentu, semakin rendah pula $t_{1/2}$ -nya. Sebaliknya jika energi partikel α relatif rendah, peluang terobosan α semakin kecil. Dan karenanya waktu paruhnya ($t_{1/2}$) semakin panjang.

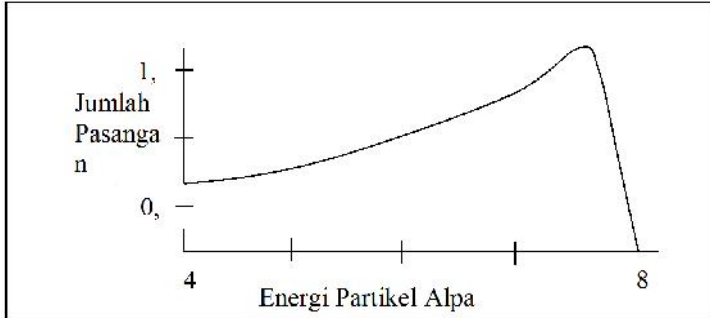
Interaksi partikel Alfa (α) dengan materi

Mekanisme utama hilangnya energi oleh tumbukan partikel α dengan materi adalah tumbukan inelastik partikel α dengan elektron

atom, yang menyebabkan elektron akan meninggalkan atom sehingga menghasilkan suatu ion (ionisasi). Bisa juga terjadi (tetapi sangat kecil), eksitasi elektron dengan cara menghabiskan (dissipasi) energi kinetik partikel α , tetapi elektron tersebut tidak keluar dari atom. Lalu elektron-elektron ini akan kembali ke orbital semula dan akan membebaskan energi. Energi yang dihasilkan dari proses eksitasi ini biasanya dalam jumlah kecil.

Ketika elektron keluar dari atom karena interaksi partikel α dengan suatu materi, maka atom tersebut akan bermuatan positif. Ion positif dan elektron yang dihasilkan akibat interaksi materi dengan partikel α disebut pasangan ion (ion pair), dan prosesnya disebut ionisasi. Pasangan ion yang dihasilkan dari proses ini dapat mengionisasi atom tersebut lebih lanjut. Proses ini disebut proses sekunder, yang 60 – 80%-nya disebabkan oleh interaksi partikel α . Pembentukan pasangan ion dalam keadaan gas memerlukan rata-rata 34 eV energi kinetik partikel α . Dengan kata lain, energi 6,8 Mev akan memproduksi sekitar 2×10^5 pasangan ion di udara sebelum energi itu terbuang habis.

Intensitas ionisasi ditunjukkan dengan istilah ionisasi spesifik, yaitu jumlah pasangan ion yang terbentuk per cm lintasan partikel α di udara pada tekanan standar.

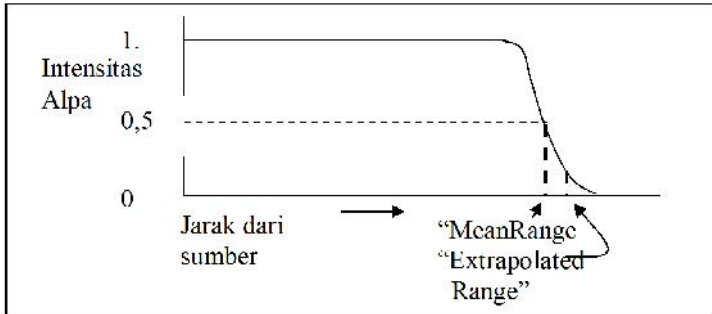


Gambar 3.2. Kurva ionisasi spesifik untuk partikel- udara

Tumbukan antara molekul gas dengan partikel α menyebabkan partikel ini banyak kehilangan energi kinetik, oleh karena itu kecepatannya menjadi berkurang. Penurunan kecepatan ini menyebabkan partikel α yang tersisa membutuhkan periode waktu yang lebih panjang untuk berinteraksi dengan molekul gas. Setelah besarnya ionisasi spesifik mencapai puncak yang mendekati nol, partikel α mengeluarkan energi kinetiknya untuk menangkap dua elektron menjadi atom helium-4 yang netral.

Karena emisi partikel α adalah energi diskrit, partikel α akan menempuh jarak tertentu dalam materi. Jarak ini dapat ditentukan secara eksperimen dengan pengukuran intensitas radiasi α pada kenaikan jarak pemancar partikel α . Hasil yang absolut dari penentuan jarak ini lebih sulit, oleh karenanya jarak ini lebih sering

dinyatakan dalam jarak rata-rata (mean range), yaitu jarak dari sumber pada saat intensitas radiasi α berkurang setengahnya.



Gambar 3.3 Kurva jarak rata-rata partikel- α di udara

Hubungan jarak dengan energi adalah :

$$R = (0,005 E + 0,285) E^{3/2}$$

R = jarak rata-rata (MR) diudara dalam cm

E = energi (MeV)

R yang ditempuh partikel α dalam suatu materi selain gas akan lebih pendek, sehingga R ini dinyatakan dalam mikron (1 mikron = 1/1000 mm).

Tabel 1. Jarak partikel- α 7 MeV dalam beberapa penyerap

Udara	Air(jaringan)	Al	Mika	Cu	Pb
59.000 μ	74 μ	34 μ	29 μ	14 μ	2 μ

Disini terlihat bahwa R ditentukan oleh rapat jenis bahan medium. Karena R kecil dan sukar diukur, sering dipakai rapatan luas (mg/cm^2). Satuan ini lebih praktis karena hanya perlu

menimbang luas bahan tertentu untuk menentukan rapatan luasnya (*thickness*).

Dalam praktek, MR yang sangat pendek menimbulkan persoalan dalam desain alat deteksi radiasinya. Karena partikel α akan menghabiskan energinya dalam dinding detektor ionisasi gas. Contohnya, suatu berkas α 7 MeV tidak dapat menembus dinding tebing detektor mika 20 μ atau ketebalan 9 mg/cm². Selain itu, pembuatan cacah α sangat sulit karena mudahnya partikel α diserap dalam sampel.

Radiasi α tidak berbahaya bagi manusia secara eksternal, karena lapisan epidermis cukup tebal untuk menyerap semua radiasi α . Demikian juga penyimpanan isotop pemancar α tidak menimbulkan kesukaran karena bejana logam atau gelas tipis menyerap semua radiasi α . Tetapi yang paling berbahaya bagi manusia adalah ; jika isotop pemancar α masuk lewat pencernaan dan pernapasan. Disini energi terpusat pada jaringan yang sangat kecil sehingga terjadi perusakan lokal yang sangat hebat. Selain itu, isotop pemancar α alamiah mempunyai $t_{1/2}$ panjang. Secara khusus, ²³⁸Pu adalah sangat toksis.

Tabel 2. Konsentrasi maksimum pemancar alfa dalam tubuh

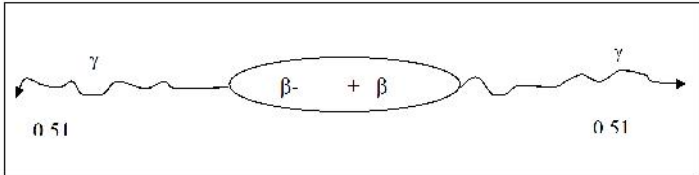
Nuklida	Konsentrasi ($\mu\text{Ci}/70$ kg berat badan)
^{210}Pb	0,4
^{226}Ra	0,1
^{228}Th	0,01
^{232}Th	0,04
^{233}U	0,03
^{235}U	0,05
^{239}Pu	0,04
^{252}Cf	0,01

3.2. Partikel Beta (β)

Partikel β mempunyai dua pengertian yang berbeda yaitu negatron (β^-) dan positron (β^+). Keduanya adalah produk perubahan dalam inti. Secara fisik partikel ini bermuatan, dimana positron membawa muatan positif dan negatron muatannya negatif (sama dengan elektron). Massanya $1/7300$ massa α , karenanya sangat mudah dibelokkan oleh atom-atom yang dilewatinya. Jalur yang ditempuh oleh partikel β berliku-liku tidak seperti pada jalur α . Massa yang kecil dan kecepatan yang tinggi dari partikel β menghasilkan peluang interaksi yang lebih kecil dengan elektron orbital suatu atom yang melewatinya. Hal ini menyebabkan daya penetrasi partikel β lebih besar dan MR-nya lebih panjang.

Negatron dan elektron orbital tidak berbeda kecuali asal usulnya. Negatron akhirnya akan terikat pada ion positif sebagai elektron orbital. Tetapi positron hanya menyatu sementara. Setelah semua energi kinetik habis positron berinteraksi dengan satu

elektron dan saling menghilangkan (anihilasi). Dan keduanya dikonversi menjadi energi $2 \times 0,51$ MeV dengan arah 180° satu sama lain.

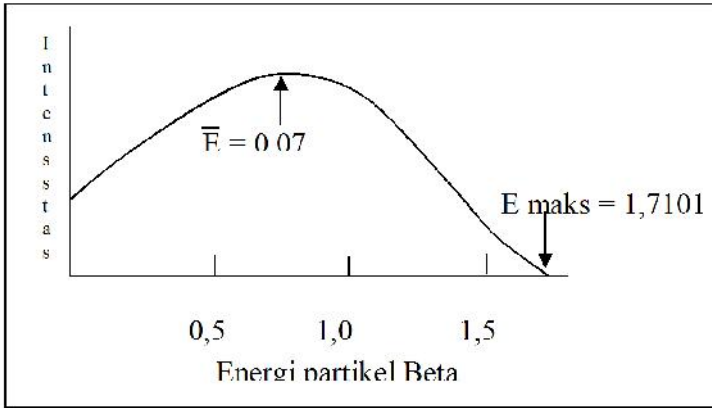


Gambar 3.4. Proses anihilasi positron dengan negatron

Karena eksitasi positron tidak langsung, maka pada prakteknya partikel β^- disamakan saja dengan negatron.

Partikel lainnya yang mempunyai kecepatan tinggi adalah elektron konversi internal. Energi pancaran- γ dari peluruhan inti akan dipindahkan ke elektron terdalam. Elektron tersebut kemudian secara energetik akan melompat keluar dari atom dengan kecepatan tinggi. Jadi dalam hal ini, tidak ada emisi- γ pada proses konversi internal. Karena sinar- γ diemisikan dalam bentuk energi diskrit, jadi elektron konversi internal dilompatkan dalam bentuk diskrit dari nuklidanya. Selanjutnya partikel- β^- diasumsikan sebagai elektron yang berasal dari inti.

Berbeda dengan partikel- α , karakter yang paling khas dari radiasi- β adalah energi kinetik yang dipancarkan secara kontinyu sampai harga maksimum, yang merupakan karakteristik dari suatu nuklida (E_{\max}). E_{\max} berkisar antara 0,019 MeV untuk ^3H sampai 4,81 MeV untuk ^{38}Cl .

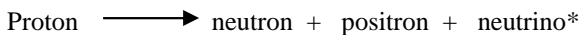
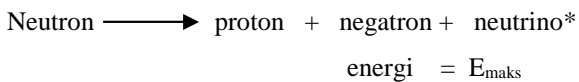


Gambar 3.5. Kurva distribusi energi partikel β untuk ^{32}P .

Pauli menjelaskan bahwa partikel β terjadi dengan pelibatan energi yang sama dengan E_{maks} partikel β . Total energi ini, terbagi juga untuk suatu partikel yang tidak ditemui yaitu neutrino. Contohnya emisi partikel β dari radionuklida ^{32}P dengan energi 1 MeV ditambah energi neutrino 0,71 MeV menjadikan energi total emisi 1,71 MeV ($E_{\text{maks}} = 1,71 \text{ MeV}$).

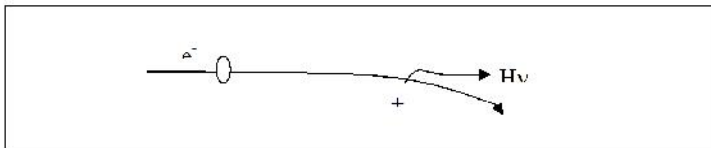
Neutrino yang dihasilkan merupakan partikel yang tidak bermuatan dan massanya dapat diabaikan. Interaksinya dengan materi dapat diabaikan, dan partikel ini sangat sulit dideteksi. Tetapi keberadaan neutrino dapat ditunjukkan secara eksperimen pada tahun 1956.

Reaksi peluruhan β , sebagai berikut :



Interaksi Beta dengan Materi

Sebagaimana partikel α , ionisasi dan eksitasi adalah hasil interaksi β dengan materi, tetapi terdapat mekanisme minor lainnya akibat transfer energi β . Yang pertama adalah “emisi bremsstrahlung” (braking radiation), yaitu suatu proses dimana elektron berenergi tinggi dari peluruhan negatron (β^-) yang melewati inti yang bermuatan positif. Elektron ini dilepaskan dan mengalami percepatan oleh gaya coulomb inti. Percepatan ini melepaskan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik (bremsstrahlung) yang secara skematik ditunjukkan oleh gambar 4.6.



Gambar 3.6. Skema terjadinya “bremsstrahlung”

Pentingnya bremsstrahlung dapat dilihat dari persamaan empiris dibawah ini:

Jumlah energi yang hilang oleh bremsstrahlung	$E_{\beta} \times Z$
Jumlah energi yang hilang oleh ionisasi	800

Dimana : E_{β} = energi partikel beta

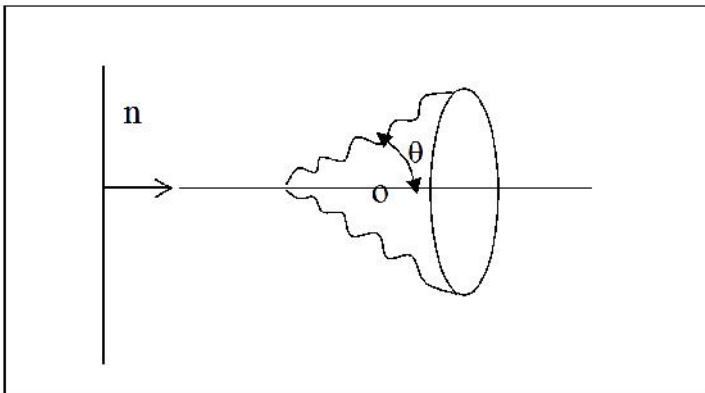
Z = nomor atom

Untuk atom Z tinggi ($Z \approx 80$), jumlah energi yang hilang oleh bremsstrahlung adalah kecil ($\sim 10\%$ untuk $E_e = 1 \text{ MeV}$). Tidak ada harga tertentu energi bremsstrahlung dan ini dapat mengganggu deteksi radiasi $-\beta$.

Mekanisme lain adalah radiasi Cerenkov, yaitu radiasi elektron yang kelebihan energinya dihasilkan karena adanya perpindahan medium suatu partikel bermuatan yang kecepatannya (v) mendekati kecepatan cahaya. Emisi dari radiasi Cerenkov sama dengan fenomena “sonic boom”, yaitu cahaya yang dipancarkan terbatas pada bentuk kerucut (setengah sudutnya adalah θ) disekitar arah gerak elektron yang datang, sehingga:

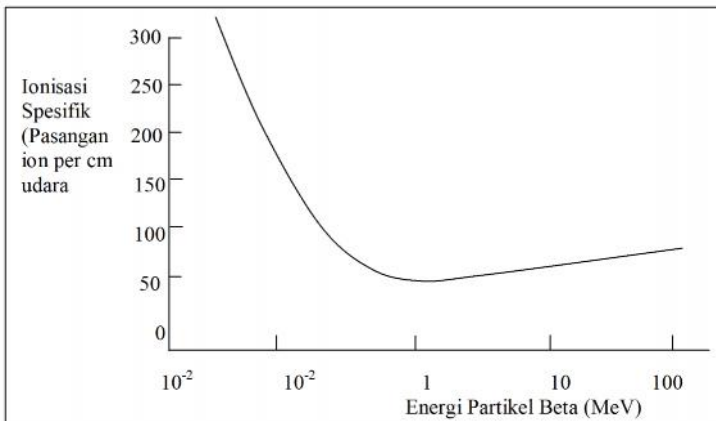
$$\cos \theta = \frac{c}{nv}$$

Secara skematik ditunjukkan pada gambar 3.7



Gambar 3.7. Skema emisi radiasi Cerenkov

Seperti dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa partikel- β dapat dibelokkan dan dicampurkan, dan juga sifat spektrum energi- β yang dipancarkan secara kontinu dan mengakibatkan intensitas radiasi- β berkurang. Sehingga pola ionisasi radiasi- β tidak sebanding dengan radiasi- α . Pada energi partikel- β yang rendah, ionisasi spesifik menurun tajam dengan meningkatnya energi tersebut. Ionisasi spesifik agak komplikatif karena emisi partikel- β sangat dipengaruhi oleh deteksi dan sifat spektrum kontinyu. Menentukan jarak radiasi partikel- β sangatlah sulit. Jarak ini dinyatakan dalam “kerapatan luas” (mg/cm^2) suatu penyerap. Pada gambar 3.9, **pertama** nampak bahwa proses absorpsi adalah pseudoeksponensial yang disebabkan karena pengaruh gabungan spektrum energi yang kontinyu dengan penghamburan partikel.



Gambar 3.8. Ionisasi spesifik di udara

Kedua, kurva akan menjadi datar atau mencapai nilai konstan karena terjadinya peristiwa penyerapan bremsstrahlung. Ketiga, meskipun besarnya jarak partikel- β dapat ditentukan dengan ekstrapolasi yang ditunjukkan bukanlah nilai sebenarnya.

Satu metode penentuan nuklida pemancar- β adalah penentuan MR partikel - β pada suatu materi. MR ini dapat dihubungkan dengan E_{maks} partikel- β , yang nilainya sangat spesifik untuk nuklida tertentu. Cara pertama adalah pembuatan kurva serapan Al dari suatu pemancar yang tidak diketahui MR-nya dibandingkan dengan kurva pemancar yang diketahui. Cara kedua adalah menggunakan hubungan semiempiris, diperoleh persamaan :

$$R = 407 E_{\text{maks}}^{1,38} \quad \text{untuk } 0,15 \leq E_{\text{maks}} \leq 0,8 \text{ MeV}$$

$$R = 542 E_{\text{maks}} - 133 \quad \text{untuk } E_{\text{maks}} > 0,8 \text{ MeV}$$

dimana R adalah jarak Al dalam mg/cm^2 dan E_{maks} dinyatakan dalam MeV.

Perlu ditekankan bahwa R tidak ditentukan oleh bahannya. Jadi, jika untuk Al = $6 \text{ mg}/\text{cm}^2$, maka demikian pula untuk udara. Dalam prakteknya, sangatlah sulit untuk mendeteksi terutama yang berenergi rendah. Ini disebabkan oleh karena bahan jendela dimana radiasi lewat menuju detektor menyerap hampir semua radiasi β , sehingga detektor pun tidak kebagian. Pemancar β lunak (berenergi rendah), sayangnya justru radioisotop yang sangat penting dalam biologi. Maka diperlukan teknik tertentu untuk mendeteksi,

misalnya dengan *ultrathin window* atau dengan mencampur contoh dengan medium pendeteksi (*sintilasi cair*).

Secara eksternal bahaya pemancar β di laboratorium tidak berarti, asalkan kita tidak langsung mengganggunya. Gelas tebal atau bejana logam akan menyerap semua radiasi beta. Tetapi orang harus hati-hati berurusan dengan radiasi beta berenergi tinggi karena ada batas dosis yang diperkenankan. Penting juga untuk mengamati bremsstrahlung dan pemancar β berintensitas tinggi. Pemancar β amat berbahaya, karena isotopnya terdapat dalam tubuh seperti C, H, S, dan P. Kalau misalnya ^3H masuk DNA kromosom atau ^{45}Ca masuk tulang, maka kerusakan akan meluas.

3.3. Sinar gamma (γ)

Sinar γ mempunyai sifat elektromagnetik, yaitu memancarkan foton. Foton adalah partikel netral dengan massa nol pada keadaan diam, karenanya sinar γ mudah berinteraksi dengan suatu materi dan MR-nya dari 0 – 100 m.

Sinar tampak, X, γ , IR, Radio semuanya adalah radiasi elektromagnetik. Perbedaannya adalah frekuensinya dan λ masing-masing. Perbedaan ini juga disebabkan oleh asal mula dari radiasi tersebut. Sinar γ merupakan radiasi elektromagnetik yang dihasilkan dari proses transformasi dalam inti. Sedangkan sinar-X dihasilkan dari proses transformasi yang melibatkan elektron atom.

Mungkin pertanyaan yang timbul adalah : Apa itu radiasi elektromagnetik ?

Suatu muatan listrik menciptakan kondisi dalam ruang disekitarnya sedemikian, sehingga bila suatu muatan lain ditempatkan dalam ruang tersebut, suatu gaya akan bekerja padanya. Jadi suatu potensial untuk menghasilkan suatu gaya disebut *medan elektromagnet* dan akan melingkupi setiap benda bermuatan.

Kalau benda bermuatan tersebut “dikocok” akan terbentuk gelombang dalam medan elektromagnet, yang disebut : *Radiasi Elektromagnet*. Kecepatan kocokan akan menentukan frekuensi dan λ -nya. Pada frekuensi yang sangat tinggi, gelombang ini berubah sifat seperti partikel. Teori mekanika kuantum menganggap perbedaan antara gelombang dan partikel adalah tidak nyata. Tetapi hal ini dapat dijelaskan secara mudah dengan melihat beberapa fenomena alam. Pola difraksi cahaya pada pelangi merupakan salah satu contoh sifat gelombang, sedangkan efek fotolistrik menjelaskan bahwa cahaya merupakan berkas energi yang disebut kuantum atau foton yang bersifat sebagai partikel. Sifat menduanya adalah teologis. Sains hanya bertanggung jawab menjelaskan sebaik mungkin fenomena tersebut. Jadi, kadang-kadang cahaya lebih cocok dijelaskan secara gelombang tetapi dilain waktu lebih cocok dijelaskan lewat partikel.

Sinar γ merupakan radiasi yang menyertai emisi partikel- α dan β dari suatu inti. Pada nuklida tertentu, contohnya ^{131}I kelebihan energi pada posisi tereksitasi diubah dalam bentuk pancaran sinar- γ . Umumnya emisi sinar- γ terjadi 10^{-12} detik setelah emisi partikel. Maka tampak bahwa emisi sinar- γ menggambarkan penataan ulang kandungan energi dalam suatu radionuklida dari

keadaan tereksitasi ke keadaan yang lebih stabil. Pada beberapa nuklida, emisi- γ diperlambat (sampai beberapa jam), dalam hal ini radionuklida tetap pada posisi tereksitasi untuk beberapa lama. Perlambatan ini karena adanya *transisi isomerik*.

Dalam analisis sinar- γ menunjukkan bahwa energinya adalah diskrit (monoenergetik). Sinar- γ dari beberapa radionuklida mempunyai range energi 10 KeV – 3 MeV. Ada yang sampai 7 MeV tetapi jumlahnya sangat sedikit. Karena peluruhan brlangsung dengan beberapa cara, beberap isotop memancarkan sinar- γ dengan tingkat energi yang berbeda.

Sinar-X biasanya dihasilkan dari proses radiasi EC dan IC, dan energinya merupakan karakteristik dari tingkat energi elektron terdalam. Range energinya dari beberapa eV sampai 120 KeV, sangat berbeda dengan energi sinar- γ .

Interaksi gamma dengan materi

Setidaknya ada 5 cara sinar- γ berinteraksi dengan materi :

1. Transformasi inti

Energi sinar gamma yang sangat tinggi memungkinkan untuk berinteraksi secara langsung dengan inti, sehingga menyebabkan eksitasi nukleon. Interaksi ini juga menyebabkan terjadinya lompatan partikel yang ummnnya neutron dan transmudasi atom menjadi nuklida. Nuklida ^3H dan ^9Be mengalami fotodisintergrasi pada 2,23 dan 1,67 MeV yang berhubungan dengan energi sinar- γ . Kemudian neutron dapat dibuat dari ^9Be dan ^{124}Sb yang merupakan

pemancar γ dengan waktu paruh 60,9 hari. Neutron yang dihasilkan dari nuklida ini sebesar $3,2 \times 10^6$ neutron/sec/Ci.

2. Hamburan Bragg (difraksi bragg)

Energi sinar γ yang rendah dapat dihamburkan dari kristal tanpa ada energi yang hilang. Difraksi sinar-X digunakan dalam studi stuktur molekular dan metode yang penting dalam analisa perunut.

3. Efek Fotolistrik

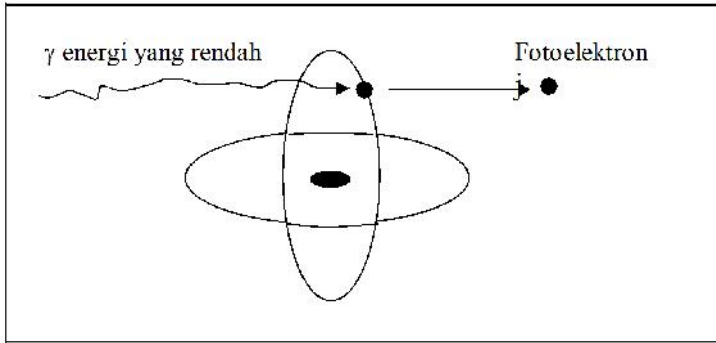
Pada efek fotolistrik, sinar γ berinteraksi dengan elektron orbital dimana seluruh energinya dipindahkan ke elektron dan menghilang pada proses ini. Elektron melompat ke luar dari atom dengan adanya energi kinetik.

$$E_E = E_\gamma - E_{Be}$$

dimana : E_γ = energi sinar γ

E_{Be} = energi ikatan dari energi elektron yang melompat ke luar

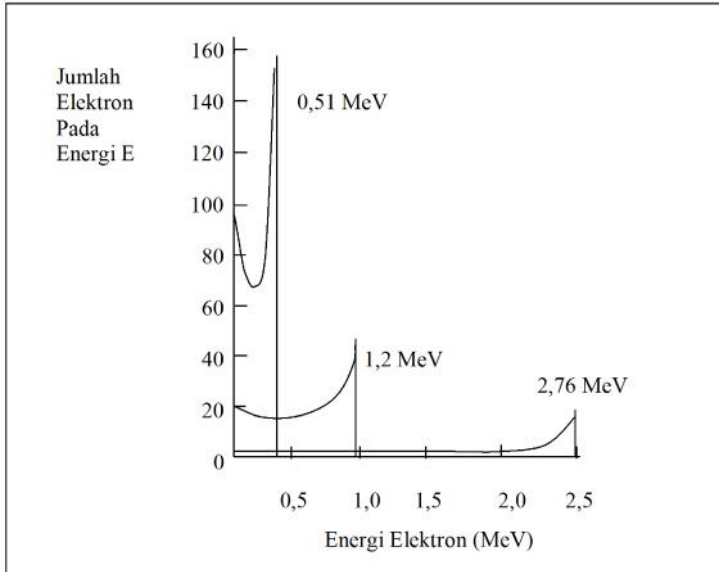
Proses ini akan menyebabkan atom terionisasi, tetapi hal ini dapat terjadi apabila energi sinar- γ sama dengan energi pengikat elektron. Pada hal elektron akan menyerap energi sinar- γ , elektron pada kulit K akan menyerap energi terbesar dalam proses ini.



Gambar 3.9. Proses efek fotolistrik

4. Efek Compton

Energi sinar- γ medium (0,5 – 1,5 MeV) dapat menyebabkan tumbukan elastis dengan elektron orbital yang terikat lemah. Sebagian energi sinar- γ dipindahkan ke elektron yang kemudian akan dilepaskan. Foton sinar- γ dibelokkan arahnya dengan energi recoil. Jumlah elektron recoil yang lepas tergantung dari range energi sampai tingkat tertentu, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.10. Distribusi energi elektron Compton oleh foton primer pada 0,51; 1,2; dan 2,76 MeV.

Pada foton yang mengalami pembelokan 180° dari arah semula akan menyebabkan terjadinya perpindahan energi maksimum ke elektron, dan energi elektron (E_e) didefinisikan sebagai :

$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + 0,511/2}$$

dimana : E_γ adalah energi γ yang datang (dalam MeV).

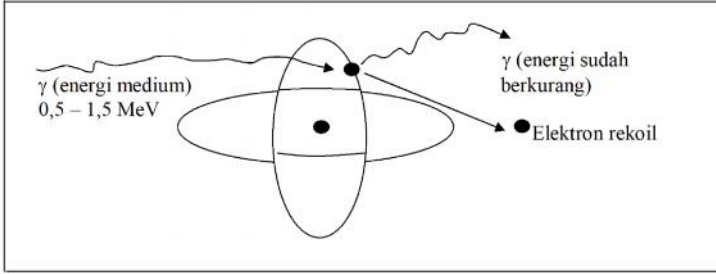
Efek Compton merupakan suatu tipe interaksi sinar γ energi sedang yang paling cocok untuk berinteraksi dan sebagai penyerap yang mempunyai nomor atom sedang sampai rendah. Seperti pada efek fotolistrik, jika elektron orbital terdalem dilompatkan ke luar, maka emisi sinar-X dan elektron Auger akan dihasilkan.

5. Produksi Pasangan (*Pair Production*)

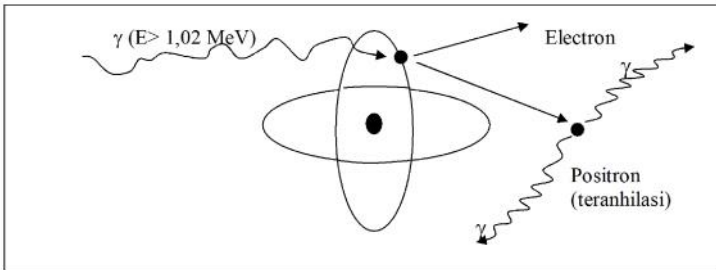
Merupakan fenomena unik yang terjadi ketika sinar- γ berinteraksi dengan medan gaya inti. Seluruh energi foton diubah menjadi dua partikel yaitu positron dan elektron yang keluar dari atom dengan energi yang berbeda-beda. Syarat terjadinya pasangan ini adalah energi gamma yang masuk harus sama atau lebih dari 1,02 MeV, yaitu energi yang sama dengan massa diam dari satu positron dan satu elektron. Setelah mencapai energi termal, positron akan berinteraksi dengan elektron didekatnya, dan mengalami proses anhilasi yang menghasilkan 2 foton 0,511 MeV, yang bergerak pada arah berlawanan. Proses ini akan menyebabkan atom bersangkutan mengalami ionisasi.

Secara keseluruhan, tiga proses terakhir (efek fotolistrik, efek compton, dan produksi pasangan) saja yang penting dalam penggunaan sinar- γ dengan cara menghabiskan energinya. Efek ionisasi elektron sekunder merupakan hasil dari penyerapan- γ .

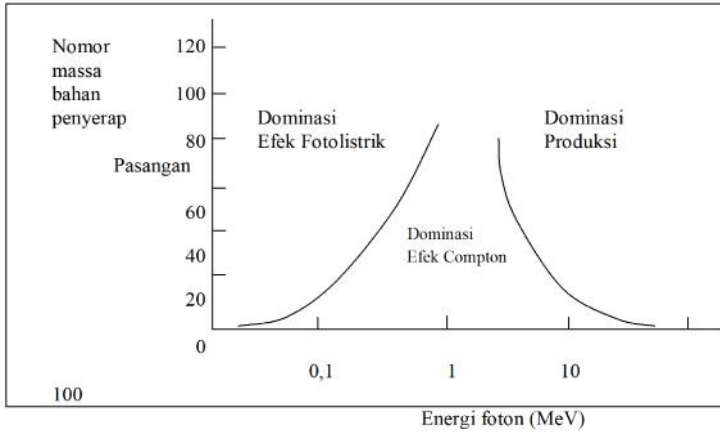
Ilustrasi tentang efek Compton dan produksi pasangan dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 3.11. Efek Compton



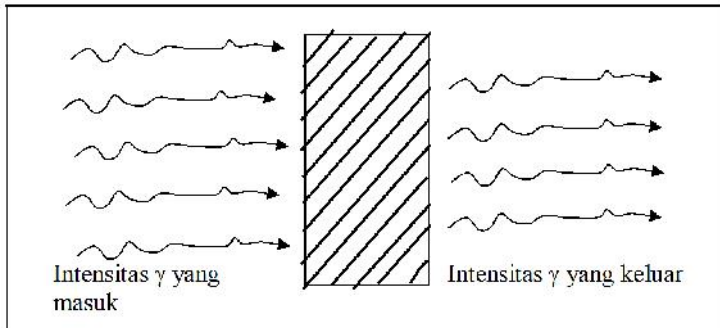
Gambar 3.12. Produksi Pasangan



Gambar 3.13 Peranan relatif dari tiga tipe interaksi sinar gamma

Penyerapan Terhadap Sinar Gamma

Untuk menentukan secara kuantitatif penyerapan sinar gamma, secara ideal ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



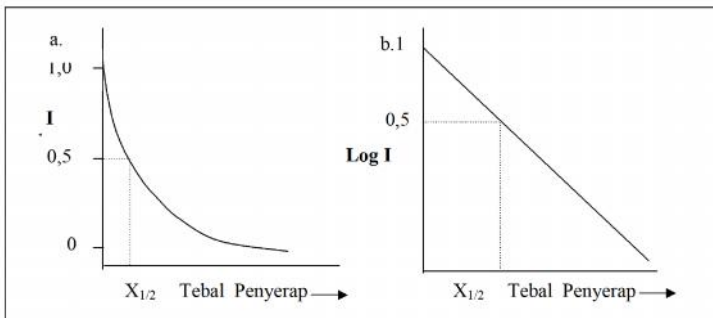
Gambar 4.14. Penyerapan Sinar Gamma

Intensitas berkas sinar gamma I_0 melewati penyerap dengan ketebalan x , maka beberapa sinar gamma akan diserap. Asumsikan bahwa tiap foton saling lepas satu sama lain, dan kebolehdjadian rata-rata foton keluar dari sinar persatuan panjang penyerap adalah μ_1 (koefisien arbsorpsi linier). Laju pengurangan intensitas foton adalah

$$\frac{dI}{dx} = -\mu_1 \cdot I \qquad \frac{\ln I}{I_0} = -\mu_1 \cdot x$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_1 x}$$

Disini terlihat hubungan eksponensial antara intensitas γ dengan tebal penyerap.



Gambar 3.15. Plot serapan radiasi sinar- γ ; a. plot linier, b. Plot semilog.

Contoh : Berapa fraksi sinar γ 1,5 MeV yang akan melewati balok Pb 5 cm. [Dari tabel μ_{Pb} untuk 1,5 MeV = 0,590]

Jawab :

$$\ln I/I_0 = -\mu_1 x$$

$$\log I/I_0 = -0,434 \mu_1 x = (-0,434)(0,590 \text{ cm}^{-1})(5 \text{ cm})$$

$$\log I/I_0 = -1,280$$

$$I/I_0 = 0,052$$

Jadi $I = 5\% I_0$; atau yang terserap adalah $95\% I_0$

Kemudian ada lagi koefisien absorpsi massa (μ_m), dimana :

$$\mu_m = \mu_1 / \rho$$

$$\text{atau } \mu_1 = \mu_m \cdot \rho$$

sehingga persamaan menjadi :

$$I = I_0 e^{-\mu_1 x} = I_0 e^{-\rho \mu_m x} = I_0 e^{-\mu_m d}$$

dimana ; d = tebal penyerap yang dinyatakan dalam $\rho \cdot x$ (yaitu g/cm^2) sedang μ_m dalam cm^2/g atau cm^2/mg .

Menggunakan μ_m lebih disukai karena perbedaan antara absorben tidak besar.

Untuk menghitung berapa tebal yang diperlukan untuk menyerap radiasi digunakan **konsep tebal setengah** ($x_{1/2}$ atau $d_{1/2}$), yaitu tebal bahan penyerap yang akan mengurangi intensitas radiasi yang datang dengan faktor 2 ($I = 1/2 I_0$).

$$\ln I_0/I = \mu_m d_{1/2} \longrightarrow \ln 2 = \mu_m d_{1/2} \longrightarrow$$

$$d_{1/2} = 0,693 / \mu_m$$

Bagaimana menghitung ketebalan “shielding” yang dibutuhkan dalam eksperimen sinar γ ?

$$\ln X = \mu_m D$$

dimana ; X = faktor yang berhubungan dengan pengurangan intensitas sinar- γ

D = ketebalan total baha penyerap

Karena $\mu_m = 0,693/d_{1/2}$ sehingga :

$$\ln X = \frac{0,693}{d_{1/2}} \times D$$

$$\begin{aligned} \text{Jika } N = D/d_{1/2} \quad \ln X &= 0,693 D/d_{1/2} \\ \ln X &= 0,693 N \\ N &= 3,32 \log X \end{aligned}$$

Persamaan ini digunakan untuk menghitung ketebalan shielding yang dibutuhkan.

Misalnya diinginkan intensitas γ yang keluar adalah $1/8I_0$, maka tebal shielding yang dibutuhkan adalah :

$$N = 3,32 \log 8 \longrightarrow N = 3$$

D = 3 $d_{1/2}$ [bahan yang tebalnya

3 x $d_{1/2}$ -nya . $d_{1/2}$ dihitung berdasarkan nilai μ_m bahan tersebut].

Hubungan Sinar- γ dan Kerapatan Penyerap

Dari tiga proses interaksi (efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan) mempunyai peranan penting dalam analisis

perunut. Ketiganya mempunyai ketergantungan yang tinggi terhadap energi sinar- γ dan kerapatan penyerap.

Proses penyerapan sinar- γ sama dengan penyerapan sinar-X, perbedaannya adalah produksi pasangan yang melibatkan sinar-X hanya menghasilkan energi yang rendah, tetapi pada proses hamburan sangat berarti. Aplikasi sinar-X terutama pada proses hamburan kristal untuk mengetahui jarak atom dalam kristal.

Yang penting diingat adalah sangat berbeda dengan partikel α dan β , sinar- γ mempengaruhi tubuh secara keseluruhan baik dengan cara eksternal maupun masuk dalam tubuh. Sinar- γ dalam laboratorium juga menimbulkan persoalan background. Dalam penggunaan detektor untuk deteksi sinar- γ , diinginkan detektor yang serapannya maksimum. Oleh karenanya digunakan kristal NaI (Tl) atau kristal semikonduktor. Detektor kamar ionisasi isian gas untuk deteksi α dan β sangat tidak efisien.

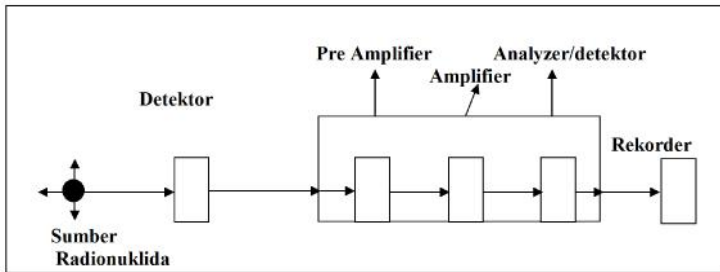
BAB IV

INSTRUMENTASI NUKLIR

Secara garis besar instrumentasi nuklir terbagi atas :

1. Sumber radiasi; dalam hal ini adalah radionuklidanya.
2. Detektor
3. Processor

Secara skematik dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.1. Diagram skematik instrumentasi nuklir

4.1. Processor

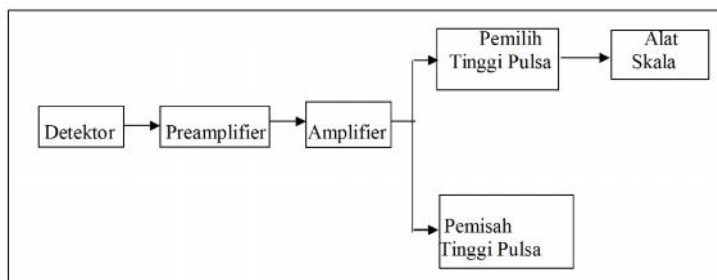
Sebelum membicarakan detektor sebagai tulang punggung utama instrumentasi nuklir, akan dijelaskan secukupnya operasi processor. Fungsi processor adalah mengolah sinyal listrik dari detektor untuk memberikan informasi sebanyak mungkin tentang radiasi yang dideteksi. Umumnya terdapat tiga tahap dasar yang dilakukan oleh processor yaitu :

1. *Penguatan (amplification)*, yaitu membuat isyarat datang menjadi lebih besar, umpamanya pulsa 0,1 volt diubah menjadi pulsa 5 volt
2. *Pembentukan (Shaping)*, yang berfungsi mengubah bentuk isyarat listrik.
3. *Analisa*, yaitu memilah pulsa-pulsa berdasarkan tinggi atau luas dan sebagainya.

Ketiga tahapan ini bekerja dalam sistem sirkuit elektronik.

Dalam percobaan analisa perunut yang efektif, penting bagi kita untuk mengetahui tujuan umum dan pengoperasian tiap-tiap komponen elektronik dalam sistem pencacahan yang dihubungkan ke detektor. Seorang peneliti yang tidak mengerti secara umum bagaimana alat-alat elektronik bekerja akan mengalami kesulitan dalam menjelaskan apakah suatu alat bekerja sebagaimana mestinya atau tidak. Selain itu akan sulit baginya untuk memperbaiki peralatan tersebut. Sekalipun seorang teknisi dapat dipanggil untuk memperbaikinya, dia mungkin tidak akan mengerti persoalannya dengan menguji data eksperimen yang dapat menghubungkan kerusakan alat dalam istilah-istilah elektronik, kecuali penelitinya tentu.

Seluruh peralatan elektronik yang mengekstrak informasi dari sinyal detektor diklasifikasikan berdasarkan fungsinya, seperti



Gambar 4.2. Skema fungsi elektronika nuklir

Selepas dari detektor, *pre amplifier* menampung sinyal datang dan melakukan penguatan dan pembentukan pendahuluan. Lalu, dari pre amplifier sinyal masuk ke amplifier dimana terjadi penguatan dan pembentukan akhir. Dari sini sinyal mempunyai 2 pilihan. Jika disalurkan ke pemilih tinggi pulsa maka secara elektronis dapat dipilih pulsa dengan ukuran tertentu dan dicatat jumlah pulsa tersebut dalam alat skala. Jika disalurkan ke dalam pemisah tinggi pulsa maka pemisahan dilakukan berdasarkan kelompok tinggi pulsa dan jumlah pulsa tiap kelompok dicatat. Ini adalah gambaran umum cara kerja sistem elektronik suatu instrumen nuklir.

Berikut ini mari kita perhatikan lebih seksama, meskipun tidak terlalu mendalam, komponen fungsional yang disebut di atas.

4.2. Pre Amplifier

Interaksi radiasi dengan detektor radiasi akan mengakibatkan ionisasi. Ionisasi ini kemudian diubah menjadi pulsa muatan listrik, q . Karena q merupakan fungsi waktu, maka

dituliskan sebagai $q(t)$. Besarnya muatan $q(t)$ berkisar $10^{-10} - 10^{-15}$ Coulomb/ pulsa.

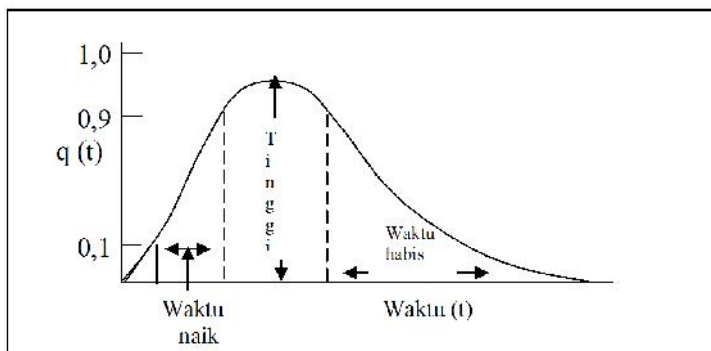
Pre amplifier menghasilkan tegangan sinyal $V(t)$ dengan melewati muatan listrik dari detektor menuju kapasitor.

$V(t) = q(t)/C$, dimana : $V(t)$ adalah tegangan dalam volt

$q(t)$ adalah muatan dalam Coulomb

C adalah kapasitansi dalam Farad

Sinyal detektor yang khas, ditunjukkan dalam gambar 5.3 di bawah ini :



Gambar 5.3 Diagram skematik pulsa tipikal suatu detektor

Karakteristik sinyal preamplifier untuk macam-macam detektor, dapat dilihat pada tabel 5.1. Tampak bahwa besar dan bentuk pulsa merupakan fungsi dari jenis detektornya. Kita juga dapat melihat secara langsung bagaimana faktor-faktor ini mempengaruhi penggunaan detektor.

Tabel 4.1
Karakteristik Sinyal output preamplifier

Tipe detektor	Besarnya tegangan (volt)	Waktu naik
Geiger-Muller	0-10	lambat
Proporsional	0-0,1	lambat
Semikonduktor	0-0,025	cepat
Sintilasi padat	0-2	cepat

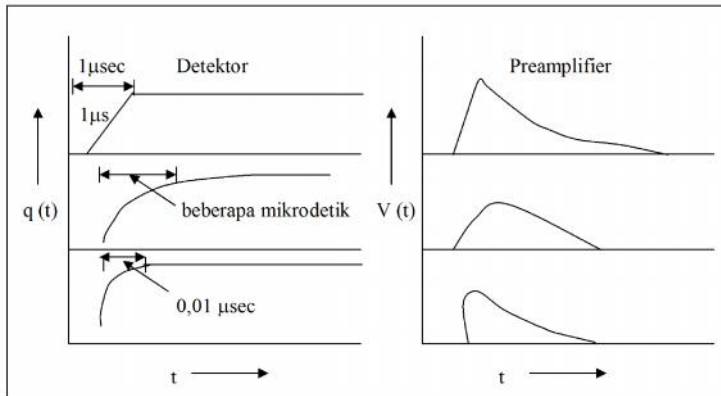
Preamplifier biasanya diletakkan berdekatan dengan detektor dan dihubungkan dengan kabel pendek. Hal ini dimaksudkan untuk :

1. *Mengurangi distorsi (gangguan)* yang disebabkan bukan oleh radiasi inti dengan interaksinya terhadap detektor. Misalnya ribut (noise) listrik dalam kabel. Gangguan (noise) listrik diartikan sebagai sinyal pada perlengkapan nuklir yang dihasilkan bukan oleh radiasi nuklir itu sendiri dan interaksi radiasi dengan detektor. Sumber-sumber umum dari gangguan disebabkan oleh vibrasi komponen sirkuit, agitasi termal elektron secara acak di dalam elektron dan pelepasan elektron oleh komponen-komponen sirkuit yang tidak diinginkan. Sumber-sumber noise ini memberikan sinyal yang kecil ke

sirkuit dan memberikan penyimpangan sinyal detektor yang utama.

2. *Menyiapkan bentuk dan kuat sinyal yang dapat diolah oleh amplifier.* Sinyal mentah tidak akan diolah oleh amplifier. Selain itu juga dimaksudkan agar rasio sinyal : keributan kabel (Signal to Noise Ratio) dapat sebesar mungkin ketika masuk amplifier.

Berikut ini disajikan output pulsa dari bermacam-macam detektor serta pulsa hasil setelah melalui preamplifier.



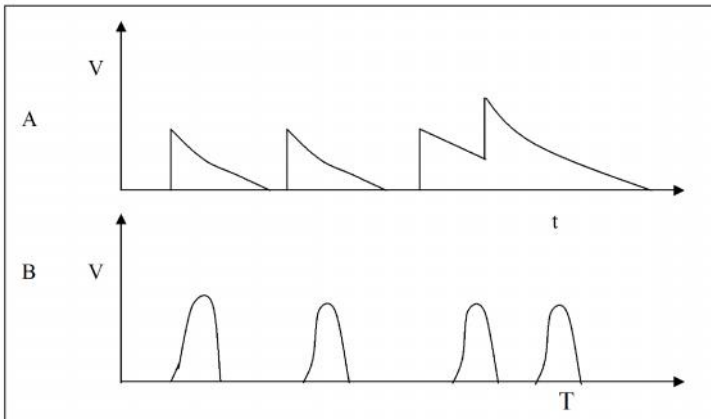
Gambar 4.4. Pulsa tipikal dari detektor dan preamplifier serta waktu naiknya.

4.3. Amplifier

Sinyal yang biasanya dari preamplifier akan mengalami perubahan lebih lanjut, bentuk dan ukurannya di dalam amplifier. Tujuan dari penguatan dan pembentukan yang dua kali lebih besar adalah :

1. Penguatan bertujuan meningkatkan rasio sinyal terhadap gangguan kabel ($S:N = \text{besar}$)
2. Sedangkan pembentukannya adalah bertujuan untuk mencegah pulsa bertumpuk (pile up)

Karena pulsa dari detektor radiasi terjadi secara acak, maka akan timbul overlap antara satu pulsa dengan pulsa berikutnya. Dengan memperpendek jarak waktu penguatan pulsa, overlap ini dapat dikurangi.

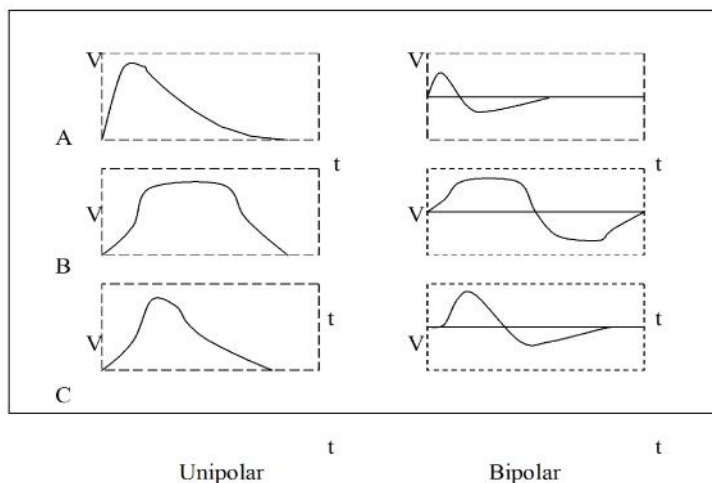


Gambar 4.5. A. Pulsa yang keluar dari pre-amplifier
B. Pulsa setelah melalui amplifier

Penguatan suatu amplifier dinyatakan dalam bentuk perbesaran (gain), yaitu rasio tinggi pulsa output dan input amplifier. Perbesaran amplifier umumnya sama untuk semua pulsa yang masuk ke amplifier. Kalau tinggi pulsa output berbanding secara linier dengan tinggi pulsa input, maka disebut *amplifier*

linier, dan jika tinggi pulsa output berbanding secara logaritma dengan tinggi pulsa input, maka dikatakan *amplifier logaritmik*.

Jenis-jenis pembentukan pulsa dalam amplifier dipilih secara eksperimen. Jenis-jenis amplifier pembentukan pulsa output antara lain : RC, hubungan lambat, dan semigaussian yang tersedia dalam format polar dan unipolar, yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6. Bentuk- bentuk output amplifier

A : RC, B : Hubungan Lambat C : Semi Gaussian

Untuk cacahan lebih besar dari 100 cps (count per second) pemilihan bentuk pulsa selalu menimbulkan konflik antara memperbesar rasio S/N (signal to noise) dengan overlapping pulsa. Namun beberapa aturan berikut dapat dipakai untuk memilih pembentukan pulsa yang lebih mudah :

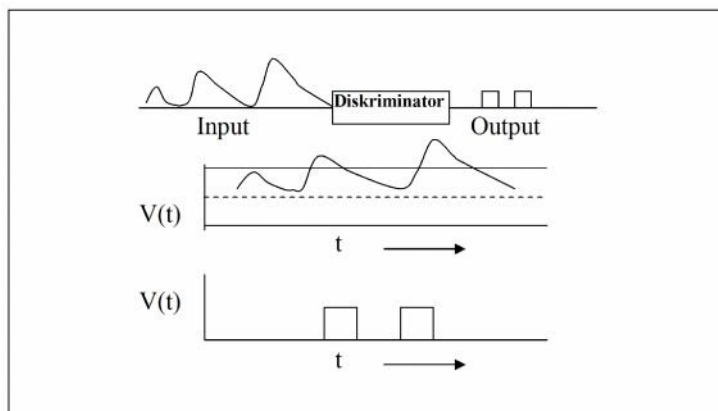
1. Untuk pencacah sintilasi, CPS tinggi, bentuk hubungan lambat (delay line) bipolar lebih disukai

2. Untuk detektor semikonduktor, pembentukan pulsa semi Gaussian yang terbaik, sebab akan tercapai resolusi energi 18% lebih baik dibandingkan dengan RC. Tetapi jika kita menginginkan amplifier yang lebih murah, RC dapat digunakan.
3. Secara umum bipolar dapat mengatasi overlap, tetapi rasio sinyal terhadap gangguan ($S : N$) menjadi lebih kecil dibandingkan unipolar. Sebaliknya unipolar memberikan rasio $S : N$ terbaik.

4.4. Pemilih Tinggi Pulsa

Peralatan dasar PTP adalah *diskriminator*, yang menghasilkan pulsa berukuran standar setiap kali sinyal input yang tingginya lebih besar dari harga batas. Pulsa output standar kemudian dihitung dengan menggunakan penskala atau menggunakan sirkuit elektronik lainnya. Secara skematik, gambaran dibawah ini menggambarkan kerja diskriminator.

Setiap kali pulsa input melewati batas diskriminator (diskriminator level), maka akan selalu dihasilkan pulsa output standar, tidak peduli terhadap beda tinggi pulsa inputnya. Dalam hal ini diskriminator mengacaukan seluruh informasi tentang tinggi pulsa yang kedua dan ketiga pada gambar 4.7. Nilai dari batas diskriminator ini diatur menggunakan alat pengontrol yang ditandai dengan “DISC” atau “BASELINE”.



Gambar 4.7. Tampak skematik diskriminator

4.5. Pengskala (Scaler)

Pengskala berfungsi untuk mencatat banyaknya pulsa yang datang selama interval waktu tertentu. Pengoperasiannya dikontrol oleh tombol manual yang sederhana atau dengan cara menghubungkan alat pengatur waktu dengan pengskala.

Ada 3 macam skalar yang digunakan :

1. Skalar Biner

Perhitungan ini didasarkan penggunaan aritmatika biner, yaitu sistem jumlah dengan dasar dua. Sistem skalar biner merupakan hubungan beberapa sirkuit. Banyaknya sirkuit n , maka cacahnya adalah 2^n . Skalar ini menghasilkan pembacaan yang buruk dan didapatkan pada sistem peralatan yang lama adalah rumit.

2. Skalar Decaden

Jika pulsanya terlalu besar untuk dihitung, sistem biner rumit digunakan. Lebih mudah bagi seorang peneliti jika cacah pulsa

ditunjukkan dalam bentuk desimal, dan ini dilakukan oleh skalar dekaden. Skalar dekaden didasarkan pada sistem 4 satuan biner dengan beberapa modifikasi.

Beberapa skalar mempunyai diskriminator yang dipasang ke modul skalar. Tujuan diskriminator skalar adalah untuk mencegah pulsa gangguan listrik pada waktu perhitungan. Karakteristik yang penting dari suatu skalar adalah kecepatan perhitungan maksimum. Nilai khas dari besaran ini berkisar antara $10^5 - 2 \times 10^7$ cps.

3. *Meter Kecepatan Cacah*

Meter kecepatan cacah merupakan alat yang menunjukkan kecepatan pencacahan, dan bukan jumlah cacah pada waktu tertentu selama pengskalaan dilakukan.

Keuntungan dari alat ini adalah pencatatan kecepatan cacah yang berlangsung secara kontinyu dan dapat digunakan dengan menghubungkannya ke pencatat atau alat lainnya yang fungsinya sama untuk memberikan perubahan secara grafis. Sebaliknya akurasi tinggi dalam pengukuran kecepatan diperoleh dengan kombinasi pengukur waktu dengan skalar.

Alat ini memperlihatkan langsung kecepatan cacah. Yang paling penting di sini bahwa :

$$V = n q R.$$

dimana : n = jumlah pulsa per satuan waktu

q = muatan per pulsa.

Hubungannya dapat linier atau logaritmik juga tetapan waktu yang mengendalikan jumlah waktu cacah harus diperhatikan.

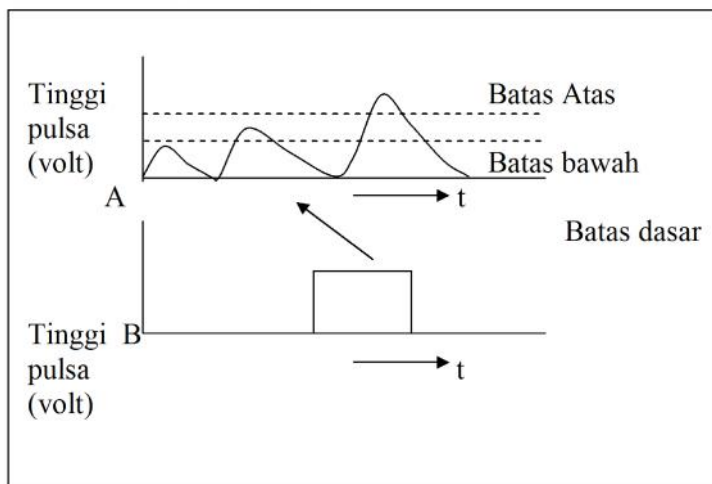
Satu parameter yang harus diperhatikan dalam penggunaan kecepatan cacah adalah nilai dari tetapan waktu. Tetapan ini mengontrol interval waktu yang diperlukan pada saat muatan masuk ke dalam kapasitor. Jika tetapan waktunya pendek, maka tidak cukup muatan yang dikumpulkan kapasitor yang menyebabkan pembacaannya menjadi tidak menentu dan berfluktuasi. Jika tetapan waktunya panjang, maka alat ini merespon dengan lambat perubahan kecepatan cacah.

4.6. Analisator Tinggi Pulsa (ATP)

Berbeda dengan diskriminator, yang hanya dapat menunjukkan beberapa pulsa yang terdapat pada tinggi pulsa lebih besar dari minimum tertentu (tingkat diskriminator), ATP dapat memberikan informasi berapa pulsa yang terdapat pada tinggi pulsa tertentu atau selang tinggi pulsa tertentu.

Ada dua tipe ATP, yaitu :

1. *Analisisator Saluran Tunggal (AST) atau single channel analyser* adalah analisator tinggi pulsa yang paling sederhana. Disini AST memberikan satu pulsa standar untuk setiap satu pulsa (sinyal) input yang nilai voltnya yang berada diantara dua harga batas voltase yang telah ditentukan (disebut lower level atau upper level).



Gambar 4.8. Tampak skematik cara kerja AST

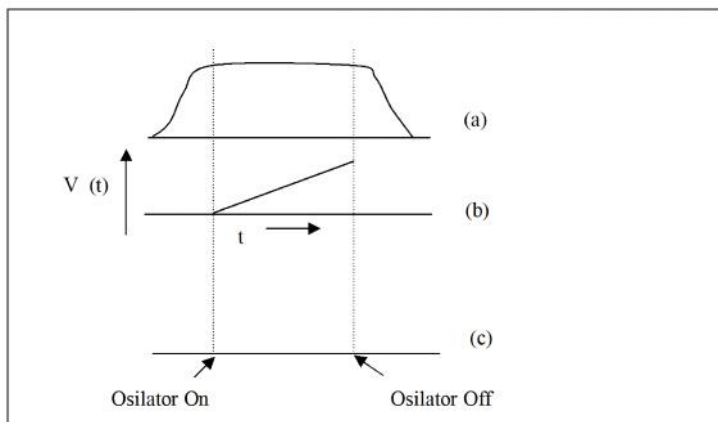
Dari gambar 5.8. diatas, terlihat bahwa pulsa diantara harga batas (upper level atau lower level) saja yang menghasilkan pulsa output standar. Pulsa yang lebih rendah atau lebih tinggi tidak menghasilkan output. Jadi perbedaan utama antara diskriminator dan ADT adalah bahwa pada diskriminator akan menghasilkan pulsa output jika pulsa inputnya lebih besar dari pulsa standar, sedangkan AST tidak hanya memerlukan harga batas rendah (lower level) untuk menghasilkan output, tetapi juga batas tinggi (upper level). Mengukur semua pulsa dapat dilakukan dengan mengatur harga batas secara manual, tetapi tentunya akan merepotkan, makan waktu dan tidak cocok bagi nuklida yang meluruh dengan cepat.

2. Analisator Saluran Ganda (ASG) atau Multi Channel Pulse Height Analyser

Kekurangan yang yang disebutkan pada AST di atas dapat diatasi oleh tipe ini. ASG adalah komputer digital kecil yang digunakan untuk mengukur dengan cepat spektrum tinggi pulsa yang berasal dari amplifier pulsa inti. Berbeda dengan komputer biasa lainnya yang digunakan dilaboratorium untuk pengolahan dan analisa data adalah bahwa mesin ASG telah diajarkan, dan hanya dapat diajar satu seri instruksi untuk mengolah dan menganalisa data. Instrumen ini sangat kompleks dan harganya berkisar antara \$ 3.000 sampai \$100.000.

Jantung ASG adalah analog to digital converter (ADC) yang mengubah sinyal amplifier analog yang datang menjadi kelompok pulsa bentuk standar. Jika tinggi pulsa yang datang adalah 4 volt, ADC bisa saja menghasilkan 400 pulsa standar. Jika tinggi pulsa adalah 3 volt, maka 300 pulsa akan dihasilkan. Dengan cara ini informasi analog (tinggi sinyal) dikonversi menjadi informasi digital (jumlah pulsa). Itulah sebabnya bagian ini disebut perubah analog ke digital (ADC).

Bentuk ADC yang umumnya digunakan adalah ADC tipe wilkinson, yang proses kerjanya ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4.9. Tampak skematik ADC Wilkinson

- Pulsa amplifier input setelah pelebaran puncak
- Jalur tegangan yang naik secara linier
- Pulsa-pulsa osilator

Sinyal yang masuk mengalami pelebaran puncak dengan menggunakan jaringan pelebar pulsa (pulse stretching). Ketika sinyal yang masuk mencapai puncak amplitudo, osilator menyala dan berarti menghasilkan rangkaian pulsa standar, dan pada waktu bersamaan penambahan tegangan juga mulai berjalan.

Ketika tegangan sinyal masuk sama dengan sinyal tegangan linier, osilator mulai langsung berhenti bekerja (OFF). Akibatnya semakin besar tegangan sinyal awal, semakin lama

tegangan linier sama dengan sinyal input, dan tentunya semakin banyak pula osilator yang akan dihasilkan.

Pulsa dari ADC dihitung dalam *Address Scalar* dan jumlah pulsanya disebut Address (jumlah saluran) pulsa tersebut. Sirkuit pemisah (analyzer) memeriksa address scalar, mencatat addressnya, meneruskannya ke pemisah satuan memori inti ferit. Secara khusus, sirkui ini akan menuju ke lokasi memori sesuai address, membacakan jumlah cacah (counter) pada lokasi itu ke dalam suatu scaler yang disebut data register, menambah jumlah cacah dengan satu, menyimpan kembali angka tersebut ke dalam memori. Siklus memori ini membutuhkan waktu antara 10 – 30 μ detik.

Setelah pulsa dipisahkan (dianalisa)dengan cara diatas, memori pemisah akan berisi distribusi tinggi pulsa dalam bentuk jumlah cacah per lokasi memori menurut jumlah pulsa pada tinggi tertentu.

Contohnya : Seperti yang telah dikemukakan sebelumnya pulsa 4 volt memberikan 400 pulsa luaran dari ADC, mungkin saja mengandung 1000 cacah pada lokasi 400 dalam memori dan 10.000 cacah pada lokasi 300. Sehingga kita mengetahui bahwa dari 11000 pulsa yang masuk ke dalam pemisah, 10.000 adalah tinggi 3 volt dan 1000 adalah tinggi 4 volt. Karena umumnya eksperimen, tinggi pulsa sebanding dengan energi yang tersimpan dalam detektor, maka spektrum tinggi pulsa juga sesuai dengan spektrum energi radiasi.

Pada ASG tertentu, banyaknya lokasi memori atau saluran, berkisar antara 200 – 8000 dengan kapasitas 10^5 – 10^6 cacah persaluran. ASG merupakan komputer kecil yang mempunyai kemampuan mengurangkan, menggandakan dan membagi. Karenanya, satu spektrum dapat disimpan dalam satu bagian memori, dikalikan faktor normal, dan kemudian dikurangkan dengan spektrum lainnya yang disimpan dalam bagian memori yang lain. Pemakaian seperti ini terutama untuk pengurangan cacah latar belakang (background count) akibat radiasi radionuklida lain atau radiasi dari luar kosmik.

Ketika ASG sibuk merubah dan menyimpan suatu pulsa, praktis ASG tidak dapat menerima ASG lainnya, sehingga perlu untuk mengoreksi *waktu mati (dead time)* ASG, ketika mengukur akurasi jumlah cacah pada waktu tertentu. Kebanyakan ASG mempunyai sistem yang secara otomatis mencatat waktu hidup ASG (misalnya kemampuan menerima pulsa) selama pengukuran. Pembacaan memori ASG bisa dilakukan dalam berbagai bentuk anatara lain : mesin tik, printer, kartu komputer, tape magnetik dan grafik.

4.7. Perangkat Output

Setelah dibentuk, dikuatkan dan dipisahkan, sinyal dari detektor dicatat dalam penskala (meter kecepatan cacah atau analisator saluran ganda). Setiap perangkat dilengkapi dengan sebuah alat visual pencatat data dalam bentuk satuan meter, sebuah

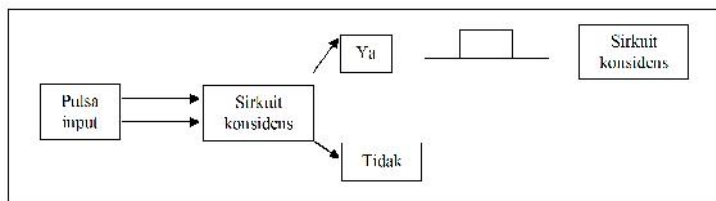
lampu atau tabung sinar katoda dari spektrum tinggi pulsa yang tersimpan. Perangkat output umumnya dibagi atas 2 bagian, yaitu :

1. Non-komputer terdiri dari mesin tik, unit teletype dan printer kecepatan tinggi (> 20 baris/det), yang memberikan suatu catatan digital dari data yang tersimpan pada pengskala atau ASG.
2. Komputer terdiri dari disc, punch cards, kertas dan lain-lain, memberikan data yang diformat untuk dapat masuk ke dalam komputer digital. Keuntungan dari sistem komputer ini adalah untuk mengatasi banyaknya data yang berulang.

4.8. Sirkuit Koinsidens

Sirkuit ini memungkinkan kita untuk menyelidiki hubungan waktu antara dua sinyal. Faktor ini berguna dalam mempelajari peristiwa nuklir dimana dua atau lebih radiasi dikeluarkan dalam waktu bersamaan (misalnya anihilasi β^+) atau suatu keadaan dimana radiasi terjadi secara berturut-turut (misalnya pada rangkaian peluruhan sinar γ). Sirkuit ini digunakan pada pencacah sintilasi cair untuk mengurangi pengaruh radiasi latar belakang yang disebabkan ribut (noise) listrik pada fotomultiplier (PMT).

Sirkuit koinsidens, menandakan apakah dua buah sinyal yang masuk ke dalam sirkuit berlangsung dengan interval waktu (Δt) yang disebut waktu pemisah (resolving time). Secara skematik operasi koinsidens ditunjukkan dalam gambar 4.10.



Gambar 4.10. Diagram blok sirkuit koinsidens

Jika kedua pulsa input masuk ke dalam sirkuit dengan interval waktu Δt , sirkuit akan menghasilkan pulsa output standar (Y_a). Jika sinyal tersebut tidak dapat masuk dengan interval waktu Δt tersebut, maka tidak ada pulsa out put yang keluar dari sirkuit (No). Misalnya, dua buah tinggi pulsa 1 volt masuk ke dalam sirkuit, maka apabila pulsa tersebut berada dalam waktu koinsidens, kedua pulsa akan memberikan tinggi pulsa 2 volt. Pulsa 2 volt ini diteruskan ke alat diskriminator 1,5 volt dan meneruskannya sehingga diperoleh pulsa output standar. Jika sinyal input 1 volt tidak berada dalam waktu koinsidens, kedua pulsa tersebut tidak dapat saling menambahkan, sehingga ketika mencapai alat diskriminator 1,5 volt tidak ada pulsa output yang dihasilkan. Sistem koinsidens biasanya diklasifikasikan berdasarkan nilai atau besarnya waktu pemisah yang digunakan. Sistem koinsidens yang lambat, ditemukan misalnya pada pencacah sintilasi cair yang mempunyai

waktu pemisah lebih besar dari 0,2 μ sekon, sedangkan sistem koinsidens cepat, mempunyai waktu pemisah 0,01 μ sekon. Range diantara kedua waktu tersebut merupakan sistem koinsidens agak cepat (medium fast).

BAB V

DETEKTOR RADIASI

5.1. Karakteristik Umum Detektor

Meskipun beberapa jenis detektor radiasi mempunyai respon yang berbeda, kriteria umumnya adalah :

1. *Kepekaan* : radiasi apa yang akan dideteksi ??

Contoh : Detektor sintilasi padat tidak digunakan untuk partikel α , karena partikel α tidak dapat menembus penutup detektor.

2. *Resolusi energi* : misalnya apakah dua sinar 1,10 MeV dan 1,15 MeV yang mengenai detektor dapat dipisahkan ataukah tidak.

3. *Waktu resolusi pulsa (time resolution of detector)*

Berapa kecepatan cacah tertinggi yang dapat diukur tanpa salah, seberapa cermat dan tepat kita dapat mengukur waktu tibanya partikel pada detektor.

4. *Efisiensi Detektor* : Dari 100 sinar yang melalui detektor, berapa tepatnya yang dapat dideteksi.

5.2. Prinsip Dasar Deteksi Radiasi

Berdasarkan cara kerjanya, ada 4 kelompok detektor :

1. *Ionisasi Gas*

Disini sifat ionisasi gas akibat radiasi dimanfaatkan. Pasangan ion yang dihasilkan dapat dikumpulkan secara terpisah. Bila potensial gradien dikenakan diantara 2 elektroda dalam kamar ion berisi gas, molekul-molekul bermuatan positif bergerak menuju katoda dan ion-ion negatif (elektron) bergerak

dengan cepat ke anoda, sehingga menghasilkan suatu pulsa yang terukur dan dengan mudah melalui arus sistem terpadu.

2. *Sintilasi*

a. *Sintilasi Fluor Padat*

Pada sintilasi ini, sebagian energi dari radiasi pengionisasi dapat dipindahkan ke molekul-molekul fluor (suatu molekul yang bersifat fluoresensi) dalam suatu kristal padat. Energi yang terserap menyebabkan eksitasi elektron orbital dalam fluor dan deeksitasinya menghasilkan emisi dari energi yang terserap sebagai radiasi elektromagnetik pada daerah sinar tampak atau daerah dekat UV (sintilasi). Metode ini memungkinkan pada kondisi tertentu, tetapi pada kondisi secara normal metode ini tidak tepat. Penggunaan tabung PMT (PhotoMultiplierTube) yang ditempatkan berdekatan dengan fluor padat, mengubah foton menjadi fotoelektron yang mengalami penguatan secara besar-besaran oleh pancaran elektron sekunder yang melewati rangkaian elektroda (dinoda) menjadi suatu pulsa listrik yang lebih besar. Sehingga dapat dikatakan energi eksitasi original diubah menjadi suatu pulsa yang dapat diukur.

b. *Sintilasi Fluor Cair*

Mekanisme deteksi sama dengan sintilasi padat. Dalam hal ini sampel radioaktif dan fluornya merupakan zat terlarut dalam medium cair, yang biasanya menggunakan pelarut non polar. Energi radiasi ini seringkali tampak sebagai foton yang

teremisi dari fluor yang melalui tahap transfer intermediet. Foton dideteksi dengan bantuan PMT.

3. *Detektor semi konduktor*

Disini radiasi berinteraksi dengan bahan detektor suatu semikonduktor seperti Si dan Ge, untuk menciptakan pasangan lubang elektron. Pasangan ini dikumpulkan pada elektroda bermuatan dimana elektron bergerak menuju elektroda positif, dan lubang-lubang ini ke elektroda negatif, sehingga menghasilkan pulsa listrik. Pulsa-pulsa ini berisi informasi tentang tipe pulsa, energi, waktu tiba, jumlah partikel yang tiba per satuan waktu. Keistimewaan detektor semikonduktor adalah resolusi energinya yang tinggi dan ukuran yang kompak.

4. *Emulsi inti dan Autoradiografi*

Proses ini melibatkan reaksi kimia dimana radiasi pengionisasi suatu sampel berinteraksi dengan butir perak halida dalam emulsi fotografik. Pengembangan film emulsi menghasilkan bayangan dan estimasi semikuantitatif dari radiasi yang datang dari sampel. Jika sampel ditempatkan dekat dengan emulsi, akan menghasilkan bayangan yang menggambarkan distribusi keradioaktifan dalam sampel yang digunakan. Proses ini disebut *Autoradiografi*. Emulsi inti tidak memerlukan peralatan elektronik rumit dan cukup baik untuk deteksi kasar.

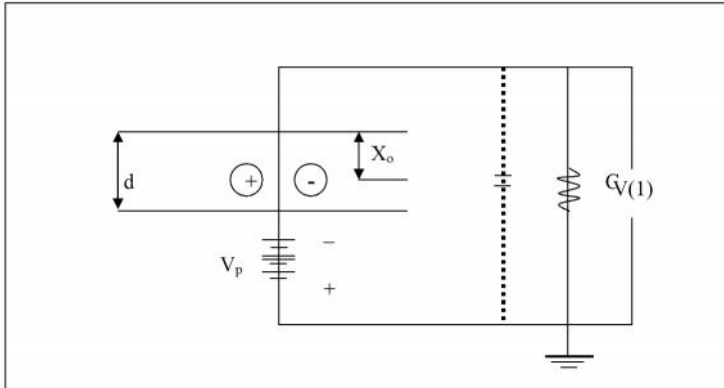
5.3. Ionisasi Gas

Ketika suatu partikel bermuatan dan energetik melewati suatu gas, medan elektrostatisnya akan melepaskan elektron orbital dari atom-atom yang cukup dekat dengan jalan lintasannya. Akibatnya terjadilah pasangan ion yaitu elektron yang bermuatan negatif dan ion positif. Energi minimum (eV) yang diperlukan untuk membentuk pasangan ion disebut potensial ionisasi. Nilai ini spesifik untuk gas-gas dan bergantung kepada jenis partikel bermuatan dan energi partikel tersebut. Ukuran lain yang dianggap lebih berarti yaitu hilangnya energi rata-rata partikel yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu pasang ion.

Pada volume gas tertentu, dengan energi ionisasi yang sama akan menghasilkan jumlah ionisasi yang sangat berbeda untuk setiap jenis partikel. Partikel α menghasilkan ionisasi (sekitar $10^4 - 10^5$ pasangan ion/cm), sedangkan partikel β menghasilkan $10^2 - 10^3$ pasangan ion/cm dan sinar γ menghasilkan 1 – 10 pasangan ion (itupun terjadi oleh mekanisme sekunder). Jadi dalam hal ini dapat dilihat bahwa partikel α dan β menghasilkan ionisasi spesifik. Ada beberapa jenis alat pengionisasi gas, yaitu :

1. Tanpa Penguatan Gas
 - a. *Kamar Ionisasi Tipe Pulsa (KITIP)*

Bagian terpenting dari KITIP adalah dua elektroda yang terpisah satu sama lain, yang diantaranya merupakan tempat yang berisi gas. Gambar dibawah ini menunjukkan cara operasi kamar ionisasi paralel bentuk pulsa.



Gambar 5.1. Tampak skematik KITIP dimana satu pasangan ion baru saja terbentuk. V_p = potensial sumber, R = tahanan, dan C = kapasitor

Jika rata-rata energi yang dilepaskan untuk membentuk pasangan ion di udara dari suatu partikel α 3,5 Mev menjadi 1×10^5 pasangan ion adalah 35 ev. Jika potensial elektroda dinaikkan, ion-ion ini akan bergerak dengan cepat ke elektroda. Elektron-elektron yang lebih kecil bergerak dengan cepat ke Anoda dan menghasilkan suatu kenaikan muatan dalam perangkat paralel (karena ion positif 1000 x dari elektron, pengaruhnya dapat diabaikan untuk saat ini). Waktu yang diperlukan untuk mengumpulkan elektron bermuatan adalah sekitar 0,1 – 1 μ sekon. Besarnya muatan akibat elektron-elektron tersebut dapat dihitung, sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Muatan 1 elektron} &= 1,6 \times 10^{-19} \text{ coulomb} \\ (1 \times 10^5 e^-) \times (1,6 \times 10^{-19} \text{ coulomb}/e^-) &= 1,6 \times 10^{-14} \text{ coulomb} \end{aligned}$$

Muatan yang terkumpul ini mengalir melewati sirkuit eksternal sebagai gelombang atau pulsa. Jika dipakai kapasitor $20 \text{ pF} = 20 \times 10^{-12} \text{ F}$, maka besarnya potensial pulsa $V(t)$ adalah :

$$\frac{\text{Muatan (C)}}{\text{Kapasitor (F)}} = V(t) \text{ ukuran pulsa dalam volt}$$

$$\frac{1,6 \times 10^{-14} \text{ C}}{20 \times 10^{-12} \text{ F}} = 8 \times 10^{-4} \text{ volt} = 0,0008 \text{ volt}$$

Kamar ionisasi tipe pulsa ini sering digunakan untuk analisis radionuklida pemancar- α , dimana kecepatan peluruhannya sangat lambat. Karena energi pemisah dari pencacah ini rendah dan sulit untuk mengoperasikannya, maka detektor semikonduktor lebih baik digunakan untuk partikel α ini.

b. *Kamar Ionisasi Tipe Arus*

Jaringan ini digunakan jika penambahan potensial kamar sampai ratusan volt, tidak memberikan peningkatan pengumpulan muatan yang berarti. Maka pada kondisi ini, “arus jenuh” pada elektroda pengumpul sangat tepat digunakan. Besarnya arus jenuh yang diperlukan, diperoleh dengan mengalikan muatan e^- dalam coulomb dengan banyaknya pasangan ion yang dihasilkan per detik.

$$n = \frac{N \times E}{W}$$

dimana n = jumlah pasangan ion yang dihasilkan

N = jumlah partikel yang masuk ke kamar tiap detiknya

E = energi rata-rata partikel tersebut

W = energi rata-rata yang diperlukan untuk
menghasilkan pasangan ion dalam kamar gas.

c. *Elektroskop Lauritsen*

Alat ini tidak umum digunakan untuk perunut radioaktif, karena panjangnya waktu yang diperlukan untuk menentukannya. Alat ini mengukur ionisasi total yang terjadi per satuan waktu, khususnya berguna untuk mengukur dosis radiasi.

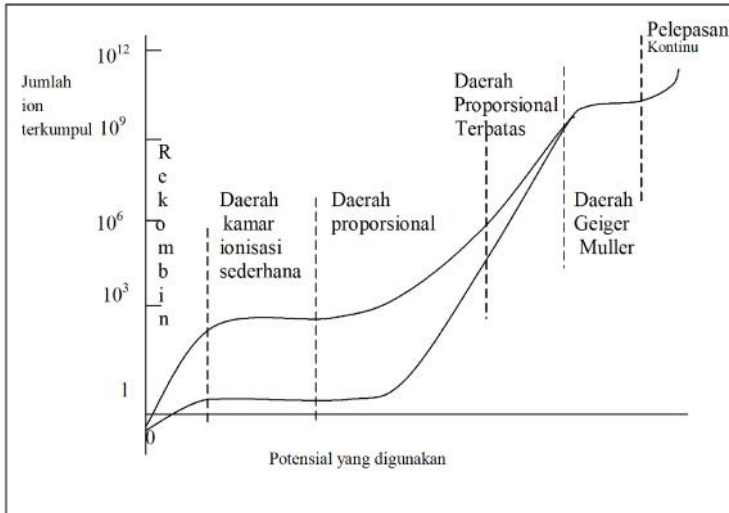
d. *Kamar Ion Elektrometer*

Merupakan paduan elektrometer, penguatan dan pengukur arus dari kamar ionisasi. Dua metode yang umum digunakan untuk pengukuran arus adalah; Pertama, metode IR dengan menggunakan Hukum Ohm $I = V/R$ yang digunakan untuk mendeteksi arus dengan resistensi lebih besar dari 10^{12} ohms. Kedua, metode kecepatan muatan (rate of change atau rate of driff) yang digunakan untuk arus kurang dari 10^{-12} ampere, $V = I t/ C$.

2. Dengan Penguatan Gas

Kekurangan cara tanpa penguatan gas adalah ukuran pulsa yang sangat kecil, sementara amplifikasi berlebihan dapat

juga menghasilkan listrik dan destabilisasi sirkuit elektronik. Karenanya penguatan yang terjadi di dalam detektor itu sendiri merupakan cara untuk memecahkan problem ini. Bila potensial ion dibuat jauh melampaui arus jenuh, praktis ion-ion negatif (elektron) akan terkumpul ke anoda dengan kecepatan yang tinggi. Kejadian ini menghasilkan ionisasi atom-atom gas dalam kamar yang sama dengan ionisasi partikel β primer. Penggunaan potensial gradien yang besar mempercepat pembentukan ion sekunder dengan proses ionisasi terus berlangsung. Aliran ion-ion yang bergerak ke arah elektroda berasal dari pasangan ion primer. Proses ini dikenal sebagai penguatan gas, sedangkan banjir ion yang dihasilkan disebut *Townsed avalanche* atau *terjunan Townsed*, sesuai nama penemu fenomena ini. Sebagai hasil dari penguatan gas ini, banyak sekali elektron yang terkumpul di anoda dalam waktu mikrosekon atau lebih kecil dari perjalanan partikel β tunggal menuju kamar. Jika potensial ditambah terus, berbagai peristiwa dapat terjadi, seperti dapat terlihat dalam gambar ini :



Gambar 5.2. Hubungan antara ukuran pulsa dengan beda potensial dalam kamar ionisasi

Dalam keadaan proporsional, terdapat kesebandingan antara muatan-muatan yang terkumpul dengan tingkat ionisasi awal. Faktor penguatan gas adalah 10^3 sampai 10^4 seperti pada kamar ionisasi sederhana. Faktor penguatan ini tergantung pada komposisi gas pengisi kamar dan potensial gradiennya. Dalam hal ini kita akan dapat membedakan partikel α dan β berdasarkan ukuran dasar pulsa.

Karena terjunan elektron-elektron dalam daerah proporsional hanya terkumpul pada satu bagian dari anoda sehingga menghasilkan sejumlah kecil fraksi volume gas untuk membentuk ion-ion, menyebabkan waktu matinya sangat pendek.

Yang berikut adalah daerah proporsional terbatas yang pada dasarnya sama dengan daerah proporsional kecuali bahwa besarnya penguatan maksimum dibatasi oleh ukuran kamar detektor, bentuk elektroda pengumpul dan jumlah atom-atom gas yang ada. Pembatasan penguatan ini hanya memungkinkan untuk proses radiasi pengionisasian yang tinggi seperti pada partikel α . Oleh karena itu, daerah ini tidak dapat menggunakan partikel α dan β .

Pada potensial gradien yang lebih tinggi, hingga melampaui 10^8 , partikel β lemah atau sinar γ sekalipun sudah cukup untuk membentuk pasangan ion yang mengisi sepenuhnya ruang ion dalam kamar. Akibatnya, ukuran muatan yang dikumpulkan di anoda tidak lagi tergantung pada jumlah ion primer yang dihasilkan dan tidak dapat lagi membedakan jenis-jenis radiasi. Daerah potensial ini disebut *Geiger Muller Region atau Daerah Geiger Muller*. Kamar ionisasi yang beroperasi pada daerah potensial ini disebut GM detektor. Karena penguatan gas maksimal, ukuran pulsa output dari detektor akan tetap sama pada jarak tegangan tertentu sampai pelepasan kontinyu terjadi. Kenyataan ini memungkinkan pemakaian suplai tegangan tinggi yang murah dibandingkan untuk detektor proporsional. Efek *dead time* [yaitu waktu yang tidak tercatat pulsa] serta efek pemadaman [quenching] adalah problem yang dihadapi di daerah G-M.

Tabel 1. Ringkasan dan perbandingan detektor-detektor gas ionisasi

Karakteristik	Kamar ionisasi	Proporsional	Geiger
Faktor penguat gas	1	$10^3 - 10^4$	10^8
Dead time (detik)	1	1-2	100-300
Jenis radiasi yang dideteksi secara efisien	α, β	α, β, X	β
Resolusi energi	$\alpha \sim 0,4\%$	Sinar-X, 5% pada 10 keV; β , 1,8% pada 100 keV.	Tidak ada
Efisiensi detektor	Hampir 100% untuk kamar diisi gas	50% untuk coenter berjendela	γ 0,01 $\beta \sim 50\%$
Harga	Mahal	Mahal, perlu amplifier dll.	Murah (\$200 untuk tabung)

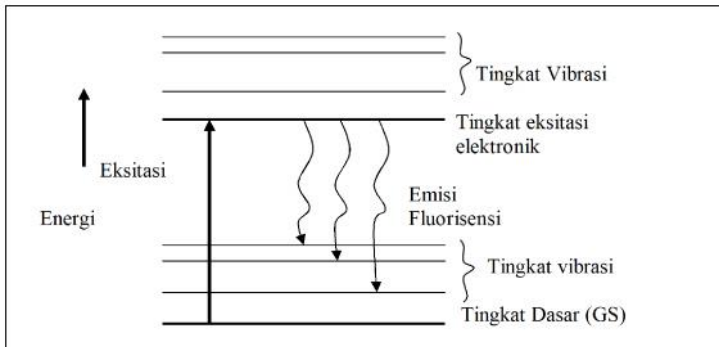
5.4. Sintilasi

Deteksi sintilasi didasarkan pada interaksi radiasi dengan senyawa yaitu Fluor, baik dalam bentuk padatan ataupun cairan, atau yang lebih dikenal dengan nama sintilator. Senyawa fluor ini dapat dikelompokkan dalam 2 kategori, yaitu *fluor anorganik (ionik)* dan *fluor organik*. Fluor anorganik biasanya dalam bentuk kristal besar tunggal, sedangkan fluor organik merupakan massa kompak dari kristal halus atau kristal tunggal atau kopolimer suatu plastik padat dan bahkan zat terlarut dalam pelarut organik (fluor cair). Pada fluor organik, terjadi perpindahan energi eksitasi dari molekul pelarut ke fluor organik, sedangkan pada fluor anorganik, hasil primer diperoleh dari eksitasi elektronik dalam suatu padatan dan keberadaan pengotor dalam kisi kristal.

1. Sintilasi Padat

Pada detektor ini proses radiasi terjadi dalam kristal fluor dengan cara menghabiskan energi radiasi tersebut. Mekanisme hilangnya energi tergantung pada jenis radiasi yang berlangsung. Interaksi sinar γ dengan materi dapat menyebabkan terjadinya eksitasi dan ionisasi dari kristal fluor. Interaksi langsung partikel β atau e^- dengan kristal fluor juga dapat menghasilkan eksitasi dan ionisasi.

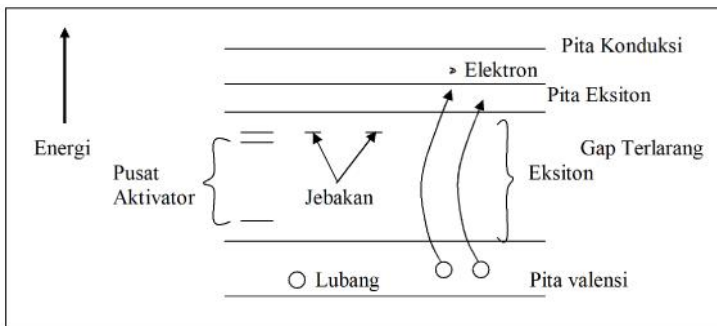
Pada proses sintilasi dalam kristal organik, molekul-molekul dari padatan organik dieksitasi dari tingkat dasar ke tingkat eksitasi elektronik. Deeksitasi yang memancarkan fluorosens mempunyai waktu 10^{-8} detik dan dilakukan dengan cara emisi kuantum cahaya. Ini terjadi dalam kristal organik seperti terlihat dalam gambar 5.3.



Gambar 5.3. Mekanisme skematik proses sintilasi dalam kristal organik

Tetapi berbeda proses sintilasi yang terjadi pada kristal anorganik yang didasarkan pada teori pita zat padat. Teori ini menunjukkan bahwa elektron terluar atau elektron valensi berada pada suatu tingkat energi yang disebut pita valensi dan energi yang diatas pita valensi membentuk pita konduksi. Diantara kedua pita ini terdapat daerah gap terlarang. Pada keadaan dasar pita valensi dari kristal terisi oleh elektron, sedangkan pita konduksi masih dalam keadaan kosong.

Bila suatu elektron energetik melewati kristal, elektron valensinya bisa tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi. Proses ini disebut *ionisasi*. Elektron yang tereksitasi akan meninggalkan tempat kosong pada pita valensi dan disebut “*hole*” atau “*lubang*”. Elektron pada pita konduksi dan “*hole*” pada pita valensi akan berpindah- pindah secara bebas di pitanya masing-masing. Kemungkinan lain juga dapat terjadi dimana elektron tereksitasi ke tingkat energi yang lebih rendah dari pita konduksi, proses ini disebut *eksitasi*.



Gambar 5.4. Sistem pita energi elektronik dalam suatu “insulator” kristal ionik

Elektron dan hole yang dihasilkan dalam proses ini disebut *Eksiton*, yang dapat bergerak bebas didalam kristal. Tempat melompatnya elektron ke tingkat energi tertentu menghasilkan pita eksiton.

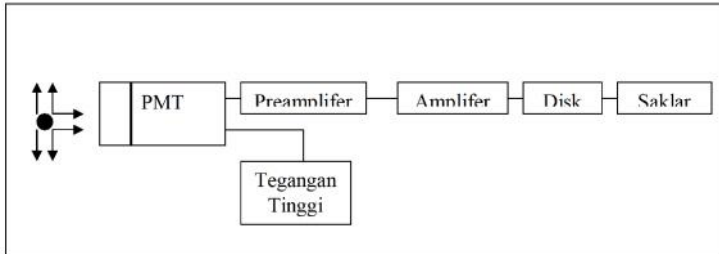
Jika terjadi cacat kristal atau secara sengaja memasukkan pengotor (impurities) dalam kristal akan menyebabkan pembentukan tingkat energi lokal dalam daerah gap terlarang yang disebut jebakan (trap) atau pusat aktifator seperti dalam Gambar 5.4.

Eksiton, lubang dan elektron yang dihasilkan oleh interaksi radiasi dengan kristal mengembara dalam kristal sampai terjebak dalam pusat aktifator atau jebakan. Diperlukan 6 – 8 ev setiap eksiton, misalnya I, kemudian memindahkan energi tersebut ke I yang lain. Jadi energi eksiton ini dapat dipindahkan dari I ke I yang lain dalam kisi kristal sampai akhirnya tertangkap oleh pusat aktifator atau pengotor kristal. Dengan menangkap eksiton, pusat aktifator juga akan tereksitasi. Deeksitasi pusat aktifator ini disertai emisi cahaya selama sekitar 0,3 μ detik.

Maka jumlah cahaya dipancarkan oleh kristal keseluruhan sebanding langsung dengan jumlah energi yang tersimpan dalam kristal akibat radiasi yang datang. Contoh kristal sintilasi adalah : NaI(Tl), antrasen, trans-stilben, p-terfenil, p-quaterfenil.

Detektor sintilasi padat biasanya digunakan sebagai pencacah atau sebagai spektrometer. Sebagai pencacah, detektor

sintilasi padat dapat meningkatkan efisiensi dibandingkan sebagai spektrometer. Dalam sistem pencacahan, cara kerja sintilasi dapat dilihat seperti skema di bawah ini :



Gambar 5.5. Diagram skematik alat pencacah integral

Efisiensi sistem ini dapat dinyatakan dengan hubungan

:

$$C = D \epsilon_T f_g \Omega$$

dimana : C = cacah perdetik dari sistem

D = disintegrasi per detik sumber

ϵ_T = probabilitas total yang mengenai detektor yang memberikan pulsa terukur

Ω = sudut kristal yang diarahkan ke detektor oleh sumber,

$$\Omega = \frac{\text{Luas detektor}}{4\pi r^2}, \text{ dan}$$

f_g = fraksi disintegrasi yang memberikan sinar γ

Jika sebagai pencacah yang terukur adalah jumlah partikel sinar γ yang merambah detektor radiasi (pencacahan integral), maka pada spektrometer yang diukur adalah besarnya energi yang tersimpan dari radiasi yang terjadi di detektor. Hal ini penting digunakan untuk pengetahuan lingkungan, ilmu fisika dan dalam ilmu biologi. Selain itu dapat juga digunakan untuk mengidentifikasi jenis dan jumlah nuklida pada proses radiasi.

Disini tinggi pulsa listrik akibat interaksi sinar γ dengan kristal NaI(Tl) akan berbanding lurus dengan energi yang tersimpan dalam kristal lewat tiga peristiwa yaitu fotolistrik, efek Compton, dan produksi pasangan. Jadi energi dan intensitas sinar γ yang masuk dapat diukur.

Mekanisme fisik yang mungkin akibat interaksi di atas menghasilkan pola kompleks distribusi tinggi pulsa yang sulit diinterpretasi. Spektrometri sintilasi akan dijelaskan secara khusus pada kesempatan lain.

2. *Sintilasi Cair*

Cara ini berkembang secara independen sejak 1950 ketika Reynold & Kalman menemukan bahwa larutan organik tertentu akan berfluoresensi jika berinteraksi dengan radiasi energi tinggi. Sinar fluoresensi ini kemudian diubah menjadi ledakan-ledakan fotoelektron di dalam PMT dan terukur sebagai pulsa listrik seperti pada sintilasi padat.

Keuntungan utama dari teknik ini antara lain adalah :

- Contoh dan Fluor tercampur homogen/bersuspensi
- Hubungan sampel detektor ekivalen dengan geometri

Deteksi 4π

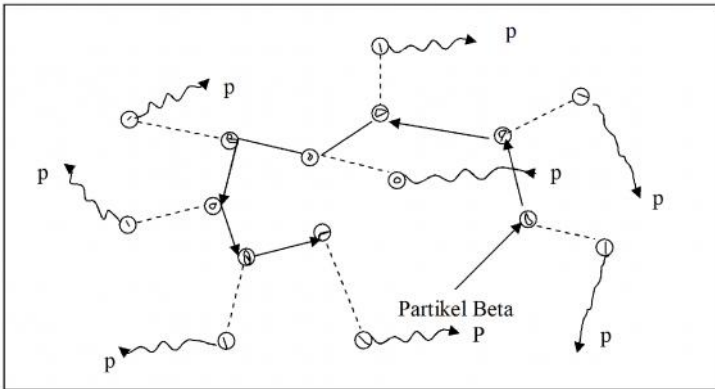
- Sensitivitas yang tinggi untuk pemancar β^- energi rendah.

Alat pencacah sintilasi cair merupakan alat yang paling populer saat ini untuk bekerja merunut radioisotop, khususnya isotop pemancar β^- .

Sintilasi cair merupakan larutan senyawa fluor dalam pelarut organik. Sampel radioisotop yang akan diukur juga dalam keadaan terlarut di dalam larutan ini. Karena kecilnya konsentrasi fluor dalam larutan ($\pm 1\%$), energi partikel radiasi tidak langsung dipindahkan ke molekul fluor, tetapi akan melewati rangkaian yang rumit untuk mencapai tingkat energi yang lebih tinggi.

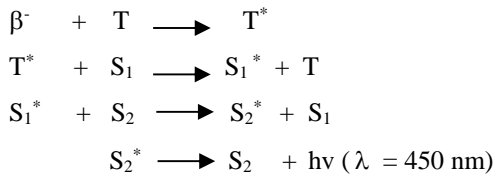
Proses-proses yang terlibat pada interaksi elektron-elektron energetik dengan zat terlarut dan pelarut, antara lain (a) eksitasi molekul; (b) ionisasi yang menghasilkan pasangan ion; (c) konversi molekul pelarut menjadi pusat-pusat pemadaman umur pendek; (d) rekombinasi pasangan ion yang menjadi molekul tereksitasi; (e) pemanasan lokal. Mekanisme deteksi sintilasi cair (contoh internal) dapat terlebih dahulu dilihat pada Gambar 6.6, di bawah ini. Interaksi partikel β^- dengan komponen sintilator (molekul pelarut) menghasilkan fluoresensi dengan panjang gelombang 270 nm (daerah UV). Foton dengan λ seperti itu tidak dapat melewati bahan gelas atau plastik dari

vial sintilasi yang digunakan. Dengan demikian perlu digunakan senyawa fluoresensi lain (zat terlarut/fluor, t.a. fluor primer dan fluor sekunder), yang fungsinya adalah memindahkan/mengubah panjang gelombang (wave shifter) fluoresens pelarut (270 nm) ke dalam daerah cahaya tampak(450 nm).



Gambar 5.6. Ilustrasi proses yang terjadi dalam sistem sintilasi cair. Ⓢ = molekul pelarut, Ⓞ = molekul zat terlarut (fluor), dan p = foton yang diemisikan oleh komponen sintilator

Secara sederhana, transfer energi yang terjadi pada komponen sintilator di atas dapat dituliskan sebagai berikut :



dimana : β^- = partikel beta, T = molekul pelarut, S_1 = solut (fluor) primer, S_2 = solut (fluor)sekunder, dan * = keadaan tereksitasi.

Detektor sintilasi cair umumnya digunakan untuk deteksi pemancar β energi rendah. Faktor komplikasi seperti absorpsi sendiri, absorpsi jendela, geometri, dan hamburan balik (back scattering) dapat dieliminir karena menyatunya contoh radioaktif dengan larutan fluor. Keuntungan lain yang diperoleh dari deteksi sintilasi cair adalah waktu peluruhan fluoresensi yang lebih cepat daripada deteksi sintilasi padat.

Persoalan yang sering timbul pada pencacah sintilasi cair, adalah :

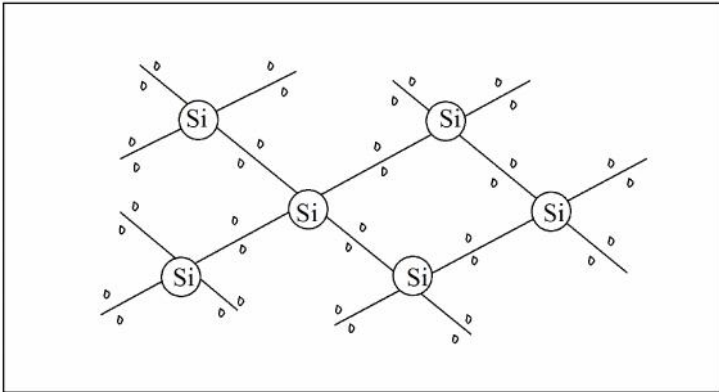
- Preparasi sampel dimana pelarut sintilasi yang digunakan biasanya tidak bercampur dengan sampel.
- Performansi PMT yang pada awalnya mempunyai derajat ketergantungan temperatur yang tinggi. Hal ini dapat dikurangi dengan cara penambahan sirkuit diskriminator tingkat rendah, mendinginkan seluruh perlengkapan pada awal pencacahan, atau dengan cara penggunaan 2 PMT yang bekerja pada model koinidens. Sensitivitas fotokatoda juga harus diperhatikan dalam penggunaan PMT.
- Pemadaman fluoresensi yang dapat menghasilkan pulsa output yang kecil pada PMT atau bahkan dapat menyebabkan kegagalan untuk menghasilkan pulsa output.

5.5 Semikonduktor

Inilah jenis detektor yang paling banyak digunakan dalam penelitian Kimia dan Fisika inti. Meskipun penggunaan dalam riset perunut (tracer) belum meluas, tetapi diperkirakan akan meningkat pada waktu mendatang akibat superioritas karakteristik detektor ini. Cara kerjanya mirip gas ionisasi kecuali pada sifat spesies positif dan negatif serta metode pengumpulan muatan.

Apa itu semikonduktor ?

Kita lihat umpamanya kristal silikon :

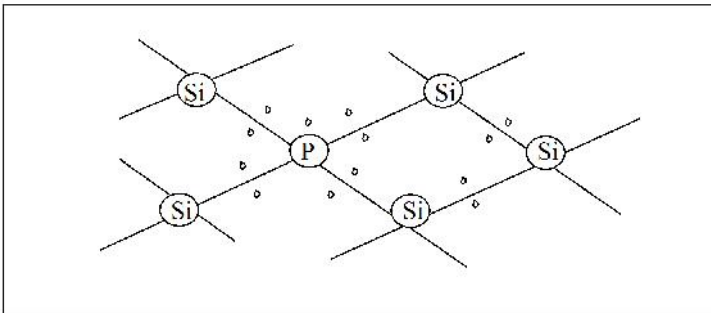


Gambar 5.7. Skema kisi kristal Si

Tanda \div adalah pasangan elektron antar atom Si

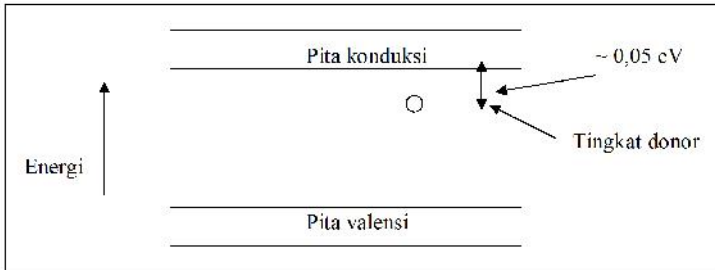
Terlihat bahwa kristal Si atau Ge mirip struktur kisi intan. Setiap atom Si mengikat 4 pasangan elektron, yang berarti sangat stabil (ingat kaidah oktet). Karenanya tidak bebas bergerak, sehingga silikon murni adalah konduktor yang buruk.

Pada pita valensi, elektron tidak bebas bergerak, sedangkan pada pita konduksi bebas bermigrasi di dalam kristal, dengan kata lain menghantarkan listrik. Daerah yang terlarang adalah daerah dimana tidak terdapat tingkat energi elektron dalam Si murni. Nah, kalau satu atom Si diganti dengan P (impurity) yang elektron valensinya 5, maka skema kisi kristal Si menjadi seperti :



Gambar 5.9. Diagram pengotoran tipe-n dalam kisi kristal Si

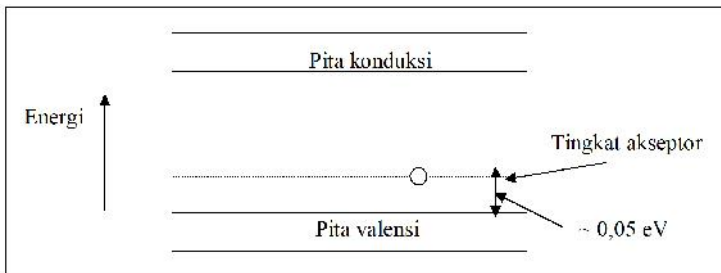
Terlihat bahwa terjadi kelebihan satu elektron. Elektron lebih ini tidak terikat erat dengan P dan mudah sekali lepas untuk menghantarkan listrik di dalam kristal. Secara diagramatis, tingkat energi akan menjadi :



Gambar 5 .10. Diagram tingkat energi kristal Si dengan donor P (impurity)

Dimana elektron ekstra dari P menempati tingkat donor yang sangat dekat dengan pita konduksi, jadi mudah sekali naik ke pita konduksi untuk menghasilkan listrik. Tipe seperti ini maksudnya kelebihan elektron, disebut *tipe-n*.

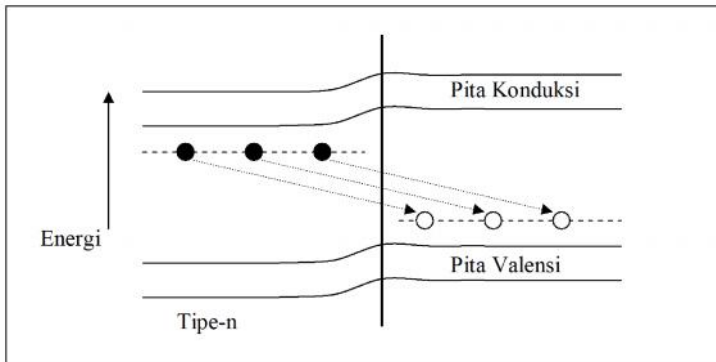
Bagaimana kalau yang mengganti Si adalah B (Gol. III) ? Ceritanya sama saja, cuma disini kristal kekurangan satu elektron atau terdapat lubang (hole) yang dekat dengan pita valensi seperti Gambar 5.11. di bawah ini :



Gambar 5.11. Diagram tingkat energi kristal Si dengan akseptor B

Di sini lubang dengan mudah, karena sangat dekat sekali, turun ke pita valensi (yang sebenarnya terjadi adalah satu elektron dalam pita valensi mengisi lubang pada tingkat akseptor sehingga terjadi lubang dalam pita valensi). Keadaan ini mengakibatkan timbulnya konduksi listrik (listrik adalah proses pergerakan muatan). Tipe lubang seperti ini disebut pengotoran *tipe - p*.

Suatu detektor radiasi semikonduktor silikon adalah kristal yang menghubungkan silikon tipe-p dan tipe-n, sehingga terjadi simpul atau titik temu (junction) antara p dan n (p-n junction).



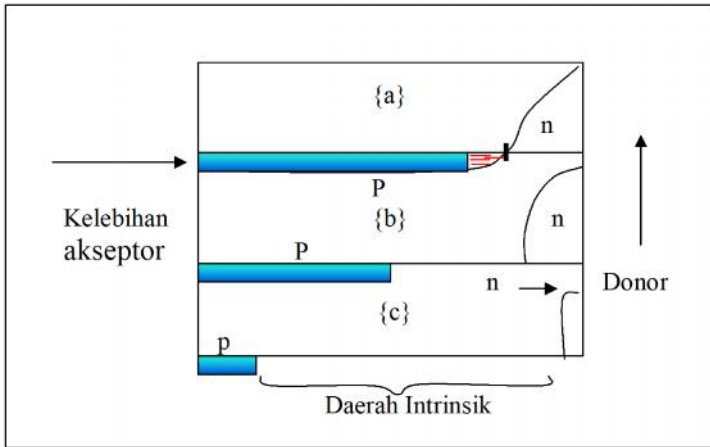
Gambar 5.12. Diagram p-n junction

Elektron dari tipe-n akan bermigrasi ke dalam lubang tipe-p melintasi junction p-n. Akibatnya daerah sekitar junction tidak mengandung kelebihan lubang dan elektron atau disebut daerah deplesi (depletion region). Jika kita kenakan tegangan positif pada material tipe-p dan tegangan negatif pada material tipe-n, maka elektron akan ditarik menjauhi junction ke material tipe-n sehingga menghasilkan pelebaran daerah deplesi. Tebal deplesi d sebanding

$(\rho V)^{1/2}$, dimana ρ adalah rasiotivitas silikon , V adalah tegangan yang diberikan.

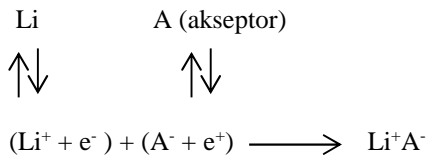
Daerah deplesi inilah yang berfungsi sebagai volum sensitif detektor. Jika radiasi pengionisasi melalui volum ini akan menyebabkan terbentuknya lubang pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi. Elektron akan bermigrasi ke muatan positif dari sisi-n, dan lubang akan bermigrasi dari sisi-p, sehingga pulsa listrik pada perangkat output.

Energi rata-rata yang diperlukan untuk menghasilkan pasangan elektron dan lubang dalam silikon adalah 3,6 eV, yaitu tiga kali besarnya energi promosi elektron dari bagian bawah pita valensi ke bagian atas pita konduksi ($\pm 1,1$ eV). Energi ini bergantung pada muatan dan massa partikel, karenanya detektor semikonduktor sangat berhubungan dengan tipe partikel radiasi. Jika kita bandingkan besarnya energi di atas dengan besarnya energi ionisasi yang diperlukan untuk menghasilkan pasangan ion yang kurang lebih 30 eV, maka apabila pada besarnya energi deposit yang sama dalam detektor diperoleh setidaknya 8% pasangan muatan dalam detektor semikonduktor. Salah satu tipe detektor semikonduktor yang paling sering digunakan adalah detektor hanyut Li (Li-drifted detector).



Gambar 5.13. Diagram cara penghanyutan lithium

Junction p-n seperti pada gambar 5.13 terbentuk dengan cara mendifusikan Li, sebagai donor, ke dalam material tipe-p. Karena ukuran yang kecil dan mobilitas yang tinggi, Litium dengan cepat berdifusi ke dalam kisi semikonduktor. Suatu tegangan reverse bias diberikan pada junction ini dan temperatur dinaikkan, ion Li bergerak ke arah potensial negatif dari material tipe-p. Penghanyutan ion ini terus berlangsung sampai konsentrasi Li(donor) tepat sama dengan konsentrasi akseptor dalam material tipe-p. Persamaan kimianya adalah :



Akibat reaksi ini, daerah deplesi yang lebar (intrinsik) ini dapat diperoleh. Karena kelebaran dari daerah deplesi ini, detektor semikonduktor dapat digunakan untuk mendeteksi radiasi penyerapan, misalnya partikel β^- , sinar-X, sinar- γ , atau partikel bermuatan-energetik.

Dengan keterangan-keterangan tentang detektor dalam uraian di atas, diharapkan bahwa para pembaca akan memiliki pengetahuan tentang latar belakang dan mekanisme kerja sistem pendeteksi radiasi.

BAB VI

TEKNIK RADIOANALISIS

Pendahuluan

Teknik radioanalisis merupakan teknik analisis yang populer yang melibatkan keradioaktifan sebagai bagian yang integral dari teknik ini, teknik ini juga merupakan senjata ampuh bagi seorang kimiawan analitik terutama untuk memecahkan persoalan analisa dengan kepekaan yang tinggi. Teknik radioanalisis dibedakan antara penggunaan perunut radiasi (radiotracer) seperti metode dilusi isotop dan radiometrik, sedangkan yang tidak menggunakan perunut radiasi adalah pada metode analisis aktivasi.

6.1. Analisa Pengenceran Isotop (IDA=Isotop Dilution Analysis)

Landasan dasar IDA adalah mengukur perubahan aktivitas spesifik suatu senyawa yang dimasukkan ke dalam suatu sistem yang juga mengandung senyawa tersebut dalam jumlah yang tidak diketahui. Ada beberapa tipe IDA :

a. IDA Langsung

Masalah yang dihadapi dari metode ini adalah penentuan jumlah material A tidak aktif. Jika jumlah sampel yang tidak diketahui ini adalah X gram maka dalam sistem ini mengandung zat A tak aktif sebanyak X gram, kemudian ditambahkan zat A* aktif sebanyak Y gram dengan aktivitas D.

Maka kita akan memperoleh aktivitas spesifik dari zat aktif yang ditambahkan, S_1 adalah :

$$S_1 = D/Y \quad \text{persamaan (1)}$$

Setelah melalui pencampuran zat A^* aktif dengan zat A tak aktif dalam sistem, aktivitas spesifik a^* aktif adalah S_2 .

$$S_2 = \frac{D}{x + y} \quad \text{persamaan (2)}$$

Bila kita memasukkan persamaan (1) ke persamaan (2) maka diperoleh

$$S_2 = \frac{D}{X + D/S_1} \quad \text{persamaan (3)}$$

Maka akan diperoleh :

$$x = \frac{D}{S_2} - \frac{D}{S_1} = \frac{D}{S_1} \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right) = y \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right)$$

b. IDA Terbalik

Metode IDA mempunyai sensitivitas yang tinggi dan presisi yang tinggi, dan sering digunakan untuk bahan-bahan organik.

Disini kita mengukur perubahan aktifitas spesifik dari A^* aktif setelah dielusi dengan A tak aktif. Berat A^* aktif tidak diketahui.

Kita asumsikan berat A^* aktif adalah $q \mu\text{g}$ dengan aktifitas spesifik S_q dimana S_q diukur atau dengan mengisolasi sejumlah kecil A^* aktif, menimbanginya dan kemudian diukur aktivitasnya (D), maka :

$$S_q = D/q \dots\dots\dots \text{persamaan (4)}$$

Jika kita menambahkan r mg A tak aktif ke dalam A* aktif dan mencampurkannya, kemudian kita isolasi dan dimurnikan, diperoleh aktivitas spesifiknya adalah S_r, dimana

$$S = \frac{D}{q + r} = \frac{q S_q}{q + r}$$

Maka :

$$S_r (q + r) = q S_q$$

$$\frac{r}{q} = \frac{S_q}{S_r} - 1$$

$$q = \frac{r}{[(S_q/S_r) - 1]}$$

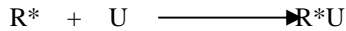
Teknik IDA lain yang ada adalah :

- a. IDA substoikiometri yaitu jumlah senyawa yang didilusi maupun tidak akan dianalisa dan dihitung.
- b. IDA ganda dimana aktivitas spesifik A* aktif tidak diukur dengan beberapa alasan. Dilakukan dilusi kedua untuk menentukan aktivitas spesifik dari sampel.

6.2. Metoda Radiometrik

Dasar analisa dari metoda ini adalah menggabungkan secara kuantitatif senyawa R* aktif (aktivitasnya diketahui) dengan

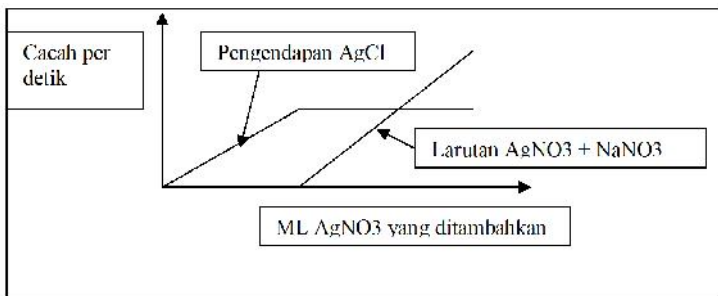
senyawa U (aktivitas tidak diketahui) untuk membentuk produk R^*U



Dengan mengukur aktivitas R^*U , maka aktivitas U dapat diketahui. Keuntungan dari metoda ini adalah sensitivitas yang tinggi, sedangkan kerugiannya adalah reaksi antara R^* dan U harus kuantitatif dan tidak boleh ada spesies lain selain U yang dapat bereaksi dengan R^* .

6.3. Titrasi Radiometrik

Teknik yang populer dengan metoda ini adalah titrasi radiometrik. Disini senyawa tidak diketahui dititrasi dengan pereaksi radioaktif dan keradioaktifan produk atau supernatandi reaksi tersebut dicatat sebagai fungsi volume titran untuk menentukan titik akhir. Oleh karena itu komponen radioaktif harus diisolasi selama titrasi dan diukur aktivitasnya. Jadi titrasi ini adalah diskontinyu.



Gambar 6.1. Titrasi Radiometrik $AgNO_3$ dengan $NaCl$

6.4. Analisa Aktivasi Netron (AAN)

Analisa aktivasi netron adalah suatu teknik analisis yang sangat ampuh, yang didasarkan pada identifikasi dan pengukuran radiasi karakteristik yang dipancarkan radionuklida. Radionuklida yang diukur terbentuk dari reaksi antara inti atom sasaran dengan partikel penembak netron termal (energi 0,025 eV). Reaksi yang berlangsung disebut reaksi penangkapan netron. Persamaan reaksi suatu atom dengan netron dinyatakan sebagai berikut :



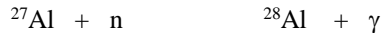
dimana : X = nuklida sasaran

M = massa atom sasaran

n = netron (termal) yang digunakan sebagai partikel penembak, dan

γ = sinar gamma yang dipancarkan

Contoh reaksinya adalah :



Reaksi diatas biasanya diringkas menjadi ${}^{27}\text{Al} (n,\gamma) {}^{28}\text{Al}$ seperti pada persamaan (1) diatas.

Besarnya radioaktivitas yang terbentuk dari suatu reaksi inti sebanding dengan jumlah atom yang terdapat dalam cuplikan. Hal ini dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$A = \frac{W Q}{M} N \tau \phi (1 - e^{-\lambda t})$$

dimana :

A = radioaktivitas yang dihasilkan (peluruhan per detik
(cps), Bq),

W = berat sasaran (gram)

Q = kelimpahan isotop sasaran (%)

M = Berat atom sasaran (g/mol)

N = bilangan Avogadro (inti/mol)

ϕ = fluks neutron (neutron/cm/detik)

τ = penampang lintang reaksi inti (barn), dan

t_i = lamanya iradiasi (detik)

Dengan persamaan tersebut diatas jumlah atom yang terdapat dalam cuplikan dapat ditentukan, jika radioaktivitas mutlak yang terbentuk dapat diukur. Akan tetapi pengukuran radioaktivitas mutlak ini sukar di laksanakan, dan nilai penampang lintang reaksi serta fluks partikel penembak biasanya tidak begitu teliti, sehingga metoda tersebut jarang digunakan. Untuk penentuan kuantitatif sehari-hari digunakan metoda perbandingan.

Jika cuplikan dan standar diradiasi dengan waktu dan posisi geometrik yang sama maka besaran ϕ , Q, t_i , dan τ dapat dihilangkan. Sehingga tinggal dibandingkan radioaktivitas cuplikan terhadap standar, kemudian dihitung jumlah unsur yang terdapat dalam cuplikan. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\frac{A_x}{A_s} = \frac{W_x}{W_s}$$

di mana W_x = berat cuplikan,

W_s = berat standar,

A_x = aktivitas cuplikan, dan

A_s = aktivitas standar.

Dalam prakteknya cuplikan atau standar yang telah diiradiasi dicacah setelah selang waktu t . Sehingga untuk mengetahui berapa aktivitas cuplikan atau standar setelah diiradiasi (setelah keluar dari reaktor, A_0) harus dihitung dari persamaan :

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

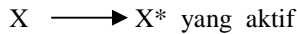
di mana A_t = aktivitas pada saat pencacahan

A_0 = aktivitas awal (setelah keluar dari reaktor), dan

t = waktu peluruhan.

Langkah kerja teknik AAN dapat diringkas sebagai berikut :

1. Iradiasi Y dengan radiasi pengionisasi sehingga :



2. Dengan cara kimia atau instrumentasi, pisahkan X dan X^* dari unsur lain dalam Y (tidak perlu kuantitatif), lalu ukur aktivitas X^* .
3. Hitung jumlah X yang ada berdasarkan rumus di atas.

Keuntungan teknik AAN ini adalah :

1. Kepekaan tinggi, bisa mendeteksi sampai 10^{-12} gram.
2. Untuk analisis multi unsur
3. Non destruktif
4. Akurasi 1%, presisi 5% untuk pengukuran konsentrasi unsur

Kekurangannya :

1. Mahal
2. Tidak bisa menetapkan status kimia unsur
3. Penggunaan tingkat keradioaktifan yang tinggi dibanding menurut radiasi biasa
4. Waktu lebih lama
5. Kadang diperlukan analisa kompleks

BAB VII

STATISTIK NUKLIR

Peluruhan keradioaktifan adalah suatu peluruhan yang acak. Jumlah inti dalam suatu contoh bahan radioaktif yang meluruh pada periode waktu tertentu bukan angka tetap melainkan berbeda secara umum dari satu periode ke periode lain. Hal ini jelas terlihat jika dilakukan pengukuran pada inti dengan waktu paruh besar dalam setiap periode waktu sama. Hasilnya dapat diperoleh dalam Tabel-7.1. Di sini dapat dicatat adanya pengelompokan nilai aktivitas di sekitar pusat distribusi. Dengan fakta seperti ini, pertanyaan yang muncul adalah bagaimana mendefinisikan kecepatan cacah rata-rata? Bagaimana kita membedakan cacah dari contoh-contoh yang berbeda? Jawaban semua ini hanya dapat diperoleh melalui upaya mengerti proses statistik suatu inti.

Tabel 7.1. Contoh nilai cacahan untuk nuklida dengan waktu paruh panjang (^{170}Tm).

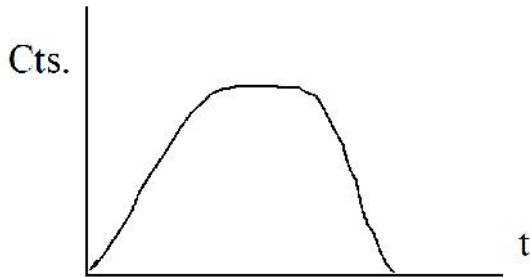
Urutan pengukuran	Nilai cacahan (cpm)
1	1880
2	1887
3	1915
4	1851
5	1874
6	1853
7	1931
8	1866
9	1980
10	1893

7.1. Dasar Distribusi Statistik Untuk Peluruhan Inti

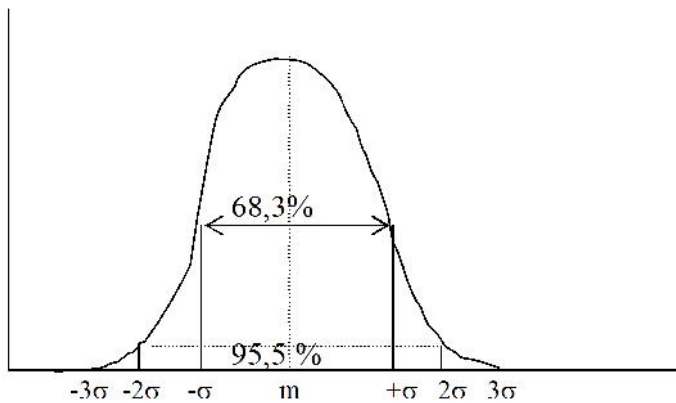
Seandainya kita mengulangi data percobaan seperti dalam Tabel-8.1 di atas dengan pengulangan yang jauh lebih besar, maka akan diperoleh gambar distribusi seperti dalam gambar 8.1 dengan kecepatan cacah sebagai fungsi waktu pengukuran distribusi yang dihasilkan dikenal sebagai distribusi normal atau Gaussian. Secara matematik dinyatakan sebagai :

$$P_x = 1 / (\sigma\sqrt{2\pi}) \cdot \text{Exp} (- (x-m)^2 / 2\sigma^2)$$

dimana σ : parameter simpangan standar, yang mencirikan lebar distribusi, dan m : angka rata-rata peluruhan yang sebenarnya terjadi pada waktu t .



Gambar 7.1. Kurva pencacahan untuk nuklida dengan waktu paruh panjang



Gambar 7.2. Kurva distribusi normal

Karena distribusi normal ini umumnya dipakai untuk menafsir eksperimen perunut radiasi, maka akan diuraikan secukupnya sifat-sifat distribusi normal. Gambar 7.2. menunjukkan kurva distribusi normal dengan beberapa penampilan umum. Simpangan standar memberi informasi tentang lebar fungsi distribusi. Terlihat bahwa 68,3% harga keaktifan yang diukur berada di sekitar $\pm\sigma$ dari harga rata-rata, m . Selain itu, 95,5% dari semua pengukuran adalah sekitar $\pm 2\sigma$ dari harga rata-rata. Jadi jika suatu simpangan standar distribusi normal dapat diketahui, kita akan mampu menyatakan sesuatu berkenaan dengan harga rata-rata yang sebenarnya dari suatu distribusi dengan pengukuran tunggal. Umpama, kita tahu $\sigma = 10$, dan jika kecepatan cacahnya diukur = 100, kita dapat menyatakan bahwa interval 68,3% benar, kecepatan cacah rata-rata adalah 90 dan 110. Dengan 95,5%, pasti m adalah antara 80 dan 120. Jadi nilai keaktifan adalah suatu peristiwa keboleh jadian yang berarti bahwa kita meletakkan harga suatu keaktifan dalam suatu trayek ($-\sigma$ ke $+\sigma$) dimana n yang berharga anantara 0 sampai 3 merinci kualitas kebenaran suatu pernyataan. Dalam praktek, adalah umum jika peneliti perunut radiasi menggunakan batas kepercayaan 68,3% atau $X \pm \sigma$. Namun demikian harus diingat bahwa dengan cara diatas kita mempunyai resiko kesalahan sebesar 31,7% dari waktu ke waktu, artinya 31,7% laju cacah rata-rata akan berada di luar $X \pm \sigma$. Jika resiko ini tidak dapat diterima, batas kepercayaan sebesar 95% atau $X \pm 1,96 \sigma$ dapat digunakan.

Jika nilai laju cacah pada percobaan perunut radioaktif didistribusikan dengan nilai tengahnya, maka dapat ditentukan distribusi interval waktu antara pencacahan yang berturut-turut. Waktu rata-rata pencacahan adalah $1/\text{laju pencacahan}$, tetapi interval waktunya tidak sama. Oleh karena itu interval waktu untuk pencacahan terjadi secara acak dan dinyatakan dengan “*distribusi interval*” .

7.2. Beberapa Parameter Fungsi Distribusi Statistik

Beberapa parameter penting yang mengkarakterisasi distribusi pengukuran adalah sebagai berikut :

- a. Harga rata-rata atau nilai tengahnya dengan simbol X
Dimana X_i adalah kecepatan cacah dalam tiap pengukuran
- b. Deviasi standar pengukuran σ yang menunjukkan lebar distribusi nilai tengah

Seandainya kita mengulang pengukuran sebanyak N kali, maka akan diperoleh x ($x_i = 1,2,3, \dots, N$). Harga X ini didistribusikan secara normal dengan pola yang lebih ramping dibandingkan dengan x_i dengan pengukuran tunggal.

Bagaimana dengan situasi yang lebih sering dijumpai dimana hanya ada suatu seri pengukuran keaktifan. Bagaimana orang memperkirakan dengan baik simpangan standarnya? Dengan mengetahui bahwa harga keaktifan mengikuti fungsi distribusi normal, maka orang dapat mengatakan bahwa :

$$\sigma = m^{1/2} \quad \text{untuk } m \gg 1$$

Artinya simpangan standar distribusi sama dengan akar pangkar dua harga rata-rata sebenarnya, m . Lalu kalau dilakukan pendekatan bahwa perkiraan terbaik untuk suatu harga rata-rata sebenarnya, m , adalah X , maka :

$$\sigma \approx X^{1/2} \text{ untuk } X \gg 1$$

Jadi dapatlah dikatakan bahwa batas kepercayaan sebesar 68,3% laju cacah rata-rata = $X \pm X^{1/2}$.

Dua model deviasi standar dari distribusi normal pencacahan adalah:

1. Deviasi standar distribusi dengan rumus-rumus yang dibuat diatas, sehingga setiap pengukuran besarnya

$$X + n\sigma$$

Dimana n adalah derajat kepercayaan pengukuran.

2. Deviasi standar dari nilai tengah, σX , yang digunakan pada suatu seri model pengukuran, bukan pengukuran tunggal. Atau singkatnya dari suatu pengukuran tunggal aktivitas, X , pengukuran terbaik dari nilai tengah aktivitas tersebut adalah berada pada jarak (range) $X \pm n\sqrt{X}$, dimana n adalah batas kepercayaan.

7.3. Statistika Cacah Nuklir

Dalam suatu kasus keaktifan sampel adalah 100 cpm (cacah per menit) termasuk di dalamnya cacah latarbelakangnya. Maka diperkirakan bahwa laju cacah rata-ratanya adalah 100 ± 10 cpm Tetapi pada pengukuran kedua laju cacah latar belakangnya adalah 10 cpm atau lebih, $10 \pm 3,2$ cpm. Maka bagaimana kebenaran laju cacah sampel dan ketidakpastiannya masing-masing,

$A \pm \sigma_a$, $B \pm \sigma_b$, maka kita dapat menggunakan aturan operasi matematika dalam statistika.

Kalau kita lanjutkan contoh di atas akan diperoleh :

$$\begin{aligned} \text{Laju bersih} &= (\text{contoh} + \text{latar belakang}) - \text{latar belakang} \\ &= 100 - 10 = 90 \end{aligned}$$

$$\text{Ketidakpastian laju bersih} = (10^2 + 3,3^2)^{1/2} = 10,5$$

Jadi dalam batas kepercayaan 68,3% suatu harga laju bersih adalah $90 + 10,5$ cpm. Selain itu, operasi matematik harus disesuaikan dengan kemampuan alat ukur yang digunakan. *Significant figure* atau gambar bermakna harus senantiasa diikuti dalam setiap operasi matematika. Contoh, tidak mungkin menimbang suatu benda dengan menggunakan timbangan kasar dengan ketelitian mikrogram.

Secara umum masalah yang dijumpai dalam statistik cacah nuklir, antara lain:

1. Laju cacah rata-rata

Permasalahan kita jumpai pada pencacahan selama satu menit. Jika dalam satu menit terdapat x cacah, maka laju pencacahan adalah $x \pm (x)^{1/2}$ cpm. Untuk memperkirakan laju cacah lebih dari 1 menit, maka :

$$R = \frac{\text{Jumlah cacah tercatat}}{\text{Waktu pengukuran}} = \frac{x}{t}$$

Dan deviasi standar laju cacah nuklir :

$$\sqrt{x} \quad \sqrt{R.t} \quad R$$

$$\sigma_R = \frac{\quad}{t} = \frac{\quad}{t} = \left(\frac{\quad}{t} \right)^{1/2}$$

2. Cacah sampel dan latar belakang

Untuk cacah nuklir yang hasilnya juga dipengaruhi oleh cacah latar belakang, dapat ditunjukkan fraksi deviasi standar dari rasio waktu pencacahan (sampel + latar belakang), t_{s+1} , dengan waktu pencacahan latar belakang, t_b .

$$\frac{t_{s+1}}{t_b} = \left(\frac{R_{s+1}}{R_b} \right)$$

dengan R_{s+1} dan R_b , masing-masing laju cacah (sampel + latar belakang) dan laju latar belakang.

3. Pilihan optimum detektor

Seringkali kita akan berhadapan dengan masalah untuk menentukan perunut radioaktif dan teknik pencacahan yang terbaik. Oleh Reynolds, masalah ini dapat dipecahkan dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$\frac{S}{\sigma} = \frac{S}{[(s+L) + L]^{1/2}} = \frac{S}{(S + 2L)^{1/2}}$$

Hasil terbaik diperoleh dengan S/σ yang tinggi.

4. Rata-rata tertimbang.

Untuk dua bilangan x_1 dan x_2 dengan deviasi standar berturut-turut σ_1 dan σ_2 , maka nilai rata-rata terbaik bukan $(x_1 + x_2)/2$, tetapi diperoleh dari nilai rata-rata tertimbang, \bar{x} , yang diperoleh dari persamaan :

$$\bar{x} = \frac{(x_1/\sigma_1^2 + x_2/\sigma_2^2)}{(1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2)}$$

5. Penolakan data abnormal

Prosedur preparasi sampel dan kesalahan pengukuran memberikan pengaruh terhadap hasil pencacahan, dan memberikan data yang tertolak jika perbedaan pencacahan pertama dan kedua adalah besar. Besarnya simpangan dari nilai tengah (nilai rata-rata) dapat diterima jika besarnya $\pm \frac{1}{2} N$, dimana N adalah banyaknya perlakuan yang dilakukan.

6. Uji statistik lainnya

Beberapa uji statistik dapat digunakan untuk menjelaskan hipotesa percobaan perunut radioaktif. Uji statistik yang sangat penting adalah uji T^2 , yaitu uji evaluasi data percobaan yang terdistribusi secara merata. Uji t dan F juga digunakan untuk membandingkan berturut-turut nilai tengah dan deviasi standar.

BAB VIII

APLIKASI TEKNIK NUKLIR

Iptek nuklir telah berkembang sangat jauh saat ini dibanding limapuluh tahun yang lalu. Usaha-usaha untuk menjalankan prinsip penggunaan nuklir untuk tujuan damai benar-benar telah diterapkan dibawah koordinasi berbagai lembaga multilateral yang berpusat di IAEA (International Atomic Energy Agency), Wina, Austria.

Dengan melihat masalah yang dihadapi bumi kita saat ini, pemanfaatan teknik nuklir umumnya ditujukan kepada sektor-sektor berikut ini :

1. Kesehatan dan Lingkungan
2. Industri
3. Makanan dan Pertanian

Berikut ini disampaikan secara singkat bagaimana penerapan teknik nuklir dalam setiap bidang tersebut.

VIII.1 Bidang Kesehatan

Penggunaan teknik nuklir baik radiasi maupun radioisotop cukup luas meliputi misalnya terapi kanker, kedokteran nuklir, radio terapi, dosimetri maupun kajian lingkungan nutrisi. Sebagai contoh terapi kanker, dimana sel kanker dimatikan dengan pemberian radiasi atau penyinaran pada dosis dan waktu tertentu. Kekurangannya adalah terapi ini tidak bisa menjamin hilangnya sel kanker sama sekali karena jika masih terdapat sel kanker tersisa akan tumbuh lagi, kecuali kalau dilakukan penyinaran yang luas. Kekurangan lain adalah cara ini berdampak buruk bagi pasien karena sel non kanker yang diperlukan manusia juga bisa ikut mati. Di bidang kedokteran nuklir banyak macam pengobatan yang

dilaksanakan menggunakan bahan radioaktif langsung ke dalam tubuh pasien. Penderita gondok misalnya diinjeksikan I-131 untuk mematikan sel gondok di sekitar leher. Tentu protokol pengobatan nuklir harus disertai kehati-hatian yang besar. Di seluruh universitas di kota-kota besar dunia sudah tersedia pelayanan kedokteran nuklir.

VIII.2 Industri

Dunia industri mendapat manfaat besar dari penerapan radiasi dan radioisotop untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas barang yang dihasilkan. Khususnya radioisotop, baik yang alamiah maupun yang buatan, penggunaannya dalam mesin-mesin peralatan, tekan, dan pencitraan sudah sangat luas. Penerapannya meluas dari pelaksanaan hukum, industri minyak, arkeologi, petani, dan pembuat produk konsumen yang umum. Kendati radiasi tak terlihat, tapi dapat dideteksi dengan mudah dengan instrumen yang tepat. Daya tembusnya serta kemampuan deteksi yang unik memberikan keuntungan nyata teknologi ini.

Contohnya adalah penentuan umur suatu benda kuno yang menjadi minat ahli purbakala. Suatu mantan benda hidup yang ingin diketahui umurnya dapat ditentukan dengan cukup teliti menggunakan apa yang disebut penanggalan karbon atau dikenal sebagai 'carbon dating'. Contoh tulang, arang, ataupun kulit dapat diukur dengan metode ini berdasarkan pengukuran C-14 yang radioaktif tapi alamiah. Semua benda hidup mengandung atom karbon dengan proporsi tertentu C-14 dibanding yang laing lain dan konstan. Namun ketika organisme ini mati, radiocarbon meluruh dan tidak tergantikan. Karena meluruh pada kecepatan konstan, berkurangnya konsentrasi C-14 dapat diukur dan waktu matinya material tersebut dapat diperkirakan. Contoh aplikasi klasik adalah penentuan umur kertas kuno Laut Mati selama 2000 tahun dan bukti bahwa kain pembungkus dari Turin dibuat pada abad ke-14.

Contoh lain adalah pendeteksi asap (*smoke detector*) yang mengandung sejumlah kecil americium-241 dalam bagian sensornya yang meng'trigger' alarm ketika ada asap. Pada botol minuman kaleng, radioisotop dipakai untuk mengukur dan mengontrol berapa banyak soda dalam botol minuman tersebut. Plastik atau film

pembungkus kabel insulator dimampatkan menggunakan radiasi bukan panas yang dapat merusak kabel.

Satu aplikasi lain dalam proses manufaktur adalah radiografi gamma yang berfungsi menguji material dari cacat seperti retakan yang tak terlihat, penyimpangan dan lubang dalam pengelasan. Keunggulan utama radiografi gamma dibanding teknik non nuklir lainnya adalah tidak merusak material uji, lebih cepat dan lebih murah. Bahkan dapat dipakai secara kontinu ketika material dilewatkan diatas 'conveyor belt'. Ini sama halnya dengan radiografi sinar-x di rumah sakit dan di bandara. Keuntungan utama radioisotop adalah dapat dibawa ke tempat yang diperlukan Dan tidak perlu listrik.

VIII.3 Makanan dan Pertanian

Dalam millenium development goals (MDG) masalah mengatasi kemiskinan menjadi perhatian utama khususnya penyediaan makanan yang cukup untuk itu. Untuk itu, organisasi pangan dunia (FAO = *Food Agriculture Organization*) bekerjasama dengan IAEA untuk mencari cara meningkatkan produksi pertanian melalui penerapan teknik nuklir. Suatu kerjasama teknik antara UNHAS dan IAEA/BATAN telah dibuat dibawah judul *Applying Nuclear Techniques for Screening and Improving Cash Crop Plants in Coastal Saline Lands* bertujuan meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi hasil tanaman di daerah bergaram dan marjinal (2007 – 2014). Berbagai penerapan teknik nuklir seperti pemakaian Troxler neutron probe untuk mengukur kadar air sampai kedalaman 6 meter. Alat ini juga menggunakan americium 241 sebagai sumber radiasi. Dengan berbagai pendekatan bioteknologi pertanian ditemukan bibit yang tahan kadar garam tinggi dan kadar nutrient/zat hara rendah. Penulis kebetulan menjadi counter part dalam kegiatan ini.

Demikianlah kurang lebih luasnya pemanfaatan teknik nuklir dalam kehidupan manusia. *Nuclear for peace*, itulah yang diharapkan terjadi dimasa datang.

BAB IX

RADIO NUKLIDA ALAM DALAM KAJIAN ZONA PESISIR

IX.1. Pendahuluan

Zona pesisir merupakan bagian dari lautan yang paling langsung terkena dampak aktivitas manusia. Pengembangan zona pesisir, eksploitasi sumberdaya alamnya, dan penggunaannya sebagai wadah untuk limbah masyarakat mengakibatkan masalah mulai dari kontaminasi sedimen dan sumber daya hayati laut hingga eutrofikasi dan tumbuhnya alga berbahaya. Untuk proses-proses tersebut, radionuklida dapat dimanfaatkan sebagai pelacak untuk mengkaji proses yang berkaitan dengan masalah zona pesisir. Dalam 25 tahun terakhir, radionuklida alami telah dimanfaatkan untuk mengukur laju proses alam laut-pesisir dan banyak dari hasil ini dapat diterapkan secara langsung untuk memberikan informasi penting yang dapat digunakan oleh penentu kebijakan dalam menangani masalah di zona pesisir.

Bab ini berawal dari permintaan dari Badan Tenaga Atom Internasional kepada penulis senior untuk memberikan gambaran umum tentang beberapa aplikasi utama radionuklida alami dalam mempelajari proses di zona pesisir, dengan penekanan pada masalah manajemen dimana radionuklida ini bisa digunakan. Aplikasi ini memang banyak: hampir semua adalah fokus dari penelitian dan

aplikasi saat ini, dan bisa menjadi acuan dalam ulasan ini. Dalam mempersiapkan bab ini, tentu saja, hanya beberapa artikel terseleksi yang disertakan.

Radionuklida alam terdiri dari beberapa pelacak yang sering digunakan untuk kajian proses zona pesisir, termasuk seri peluruhan U dan Th dan yang dihasilkan oleh interaksi sinar kosmik dengan gas atmosfer. Pilihan pelacak radionuklida yang sesuai bergantung pada hal berikut:

- (i) keterkaitan karakteristik sifat geokimia dengan dengan proses yang akan dikaji, dan
- (ii) keterkaitan waktu paruh dan laju dari proses tersebut.

Memang banyak proses zona pesisir berlangsung pada skala waktu yang relatif cepat terhadap proses serupa di laut terbuka atau dalam, dan karenanya memerlukan radionuklida dengan waktu paruh yang pendek untuk karakterisasi yang tepat.

Deretan radionuklida alam yang cocok digunakan untuk mempelajari proses zona pesisir meliputi (waktu paruh dalam tanda kurung):

- ^{234}Th (24 d) - Radionuklida seri ^{238}U ini, yang dihasilkan dalam larutan dari peluruhan ^{238}U yang terlarut, dengan cepat ditangkap oleh partikel dan dilepaskan ke sedimen bawah. Ini digunakan untuk menentukan penghilangan (*scavenging rate*), pencampuran sedimen oleh organisme atau proses fisik (seperti badai) atau tingkat akumulasi sedimen dalam kasus endapan sedimen yang cepat.

- ^{32}P (14,3 d) dan ^{33}P (25,3 d) - Isotop kosmogenik dari fosfor ini adalah pengemisi beta yang dihasilkan oleh tumbukan argon atmosfer dengan sinar kosmik. Isotop ini dengan cepat terasosiasi dengan aerosol dan masuk ke lautan, dan mengalami keseimbangan dengan fosfor anorganik terlarut. Hanya sebagian kecil ^{32}P dan ^{33}P yang diproduksi *in situ* di permukaan laut, dan dengan demikian sumber utama kedua isotop tersebut adalah deposisi basah.
- ^7Be (53 d) - Radionuklida kosmogenik ini dihasilkan oleh interaksi sinar kosmik dengan gas atmosfer (terutama N dan O) dan sampai ke permukaan bumi oleh deposisi basah dan kering dan, dimana konsentrasi partikel yang tertunda tinggi, dapat ditangkap oleh partikel dan diendapkan dalam sedimen bawah. Seperti pada ^{234}Th , ^7Be dapat digunakan untuk menentukan tingkat pencampuran, atau dalam kasus tertentu, tingkat akumulasi sedimen.
- ^{210}Pb (22,3 y) - Timbal-210 dihasilkan dari peluruhan ^{226}Ra melalui ^{222}Rn pada seri peluruhan ^{238}U . Di lautan pesisir, pasokan dominan ^{210}Pb biasanya melalui atmosfer dimana dihasilkan dari peluruhan ^{222}Rn yang berasal dari batuan dan tanah terestrial. Karena umur paruhnya yang panjang, profil ^{210}Pb pada sedimen pesisir mencerminkan proses pencampuran dan akumulasi.
- ^{226}Ra (1622 y), ^{228}Ra (5,7 y), ^{223}Ra (11,4 d), ^{224}Ra (3,7 d), ^{222}Rn (3,8 d) - Unsur radium meliputi isotop dalam seri peluruhan ^{238}U , ^{235}U dan ^{232}Th dan seri ^{221}Rn adalah anak

luruh dari ^{226}Ra . Semua adalah hasil peluruhan alfa dan diproduksi secara dominan dalam struktur mineral. Recoil terkait dengan produksi atom Ra atau Rn yang baru lahir memobilisasi nuklida ini ke perairan pori sedimen atau ke air tanah. Selanjutnya Ra dan Rn dapat dilepaskan dari sedimen ke atas air. Ketertarikan terakhir pada distribusi Ra dan Rn di perairan pesisir telah berfokus pada penggunaannya sebagai pelacak laju aliran masuk air tanah.

- ^{14}C (5730 y) – Meskipun aktivitas spesifik radiokarbon di lingkungan telah terpengaruh oleh pembakaran bahan bakar fosil serta produksi antropogenik yang terkait dengan pengujian nuklir di atmosfer, radionuklida ini juga diproduksi secara alami sebagai radionuklida kosmogenik. Radiokarbon dapat digunakan, terutama pada kedalaman sedimen, untuk menentukan laju akumulasi jangka panjang. Penentuan tersebut memberikan penilaian terhadap akurasi perkiraan laju akumulasi yang dihasilkan dengan menggunakan radionuklida berumur pendek yang tercantum di atas. Kemajuan terbaru dalam pengukuran menggunakan spektrometri massa akselerator (AMS) memberikan kesalahannya ± 50 tahun pada usia radiocarbon untuk karbon berumur ~ 2000 tahun, sehingga tingk atakumulasi sedimen akan ditentukan dalam interval waktu hanya beberapa ratus tahun.

IX.2. Laju penghilangan kontaminan reaktif di perairan pantai

Penggunaan radionuklida alami yang paling sederhana untuk menentukan tingkat penangkapan mengasumsikan keseimbangan antara produksi radionuklida dari peluruhan induk terlarut dan peluruhan dan penangkapan radionuklida itu sendiri.

$$P = D + k_d D, \quad (1)$$

dimana:

adalah konstanta peluruhan anak luruh,

P dan D masing-masing adalah aktivitas induk dan anak luruh dalam sampel air, dan

k_d adalah konstanta laju penghilangan (scavenging rate constant; orde satu) dari anak luruh.

Jika aktivitas induk dan anak diukur, semua kuantitas dalam persamaan (1) kecuali k_d diketahui dan k_d dapat dihitung; kebalikan dari k_d adalah scav, waktu tinggal rata-rata radionuklida putri sehubungan dengan penangkapan nuklida. Variasi persamaan (1) mencakup pengukuran terpisah dari fraksi partikulat dan terlarut dan menyiapkan persamaan analog yang menyebabkan perhitungan waktu tinggal D sehubungan dengan pemindahan dari larutan ke permukaan partikel dan dikeluarkan dari kolom air oleh partikel yang tenggelam

Isotop thorium mungkin adalah radionuklida partikel-reaktif yang paling klasik, dan keduanya ^{234}Th dan ^{228}Th telah digunakan untuk mengukur tingkat penangkapan Th di perairan pesisir (lihat Moore, 1992, untuk tinjauan ulang). Memang konsentrasi partikel tersuspensi tinggi dan kolom perairan dangkal di perairan pantai dan kopleng pelagis bentic-konsekuen yang menghasilkan waktu tinggal singkat berkenaan dengan penangkapan. Misalnya, pengukuran awal oleh Aller & Cochran (1976) menunjukkan bahwa ia memiliki waktu tinggal rata-rata sekitar 1 hari di perairan Long Island Sound, Amerika Serikat. Contoh ekstrem penangkapan cepat Th terlihat di perairan Laguna Venesia (Italia) (Cochran et al, 1995). Kolom air dangkal (<2 m) laguna, ditambah dengan resuspensi yang dimediasi secara rematik, menghasilkan waktu tinggal yang terlarut dari beberapa jam saja.

Waktu tinggal Th berkisar dari nilai yang sangat cepat ini di lingkungan pesisir dangkal sampai beberapa hari di lepas pantai (Kaufman et al., 1981). Telah diketahui secara umum bahwa konsentrasi partikel dan fluks adalah kontrol fundamental pada penghilangan spesies kimia reaktif Th dan lainnya dari kolom air (Santschi et al., 1979). Selain itu, ukuran partikel dan tipe memainkan peran (Honeyman & Santschi, 1989; Quigley et al., 2002). Faktor-faktor ini telah dimasukkan ke dalam model pembilasan dan pengalihan radionuklida reaktif yang lebih kompleks (terutama isotop Th) di antara fase terlarut dan partikulat.

Diskusi yang lebih rinci tentang penerapan radionuklida alami untuk model penangkapan diberikan pada Bab 5, buku ini.

Intensitas penangkapan di landas kontinen dan perairan muara membuat lingkungan ini tenggelam kuat untuk radionuklida reaktif dan juga kontaminan. Distribusi radionuklida alami di lingkungan tersebut memberikan informasi yang berguna mengenai tingkat dan tingkat transport partikel dan kontaminan (Aller et al., 1980; McKee et al., 1984; Gustafsson et al., 1998; Feng et al., 1999a)

IX.3. Dinamika Partikel di Perairan Pantai

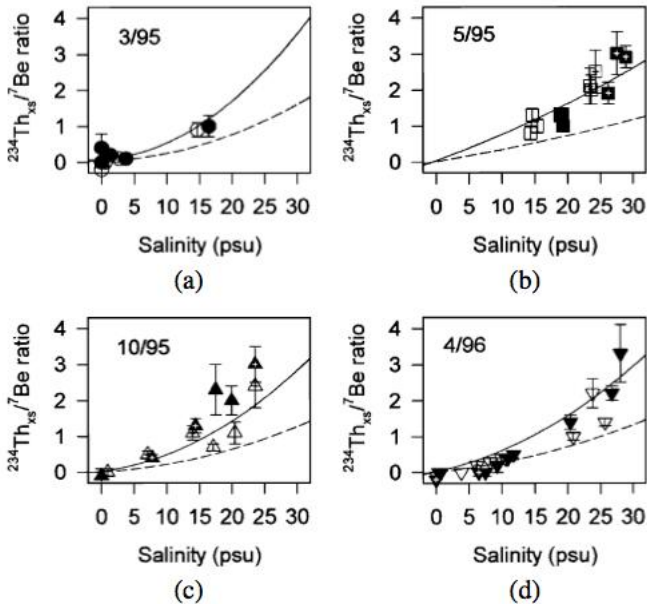
Setelah penangkapan, radionuklida terkait partikel berfungsi sebagai pelacak berguna dari nasib partikel di perairan pantai. Aplikasi penting termasuk menelusuri pergerakan partikel melalui sistem muara dan menentukan kronologi endapan sedimen. Yang terakhir ini memiliki banyak konsekuensi untuk pengelolaan pesisir, termasuk menentukan tingkat akumulasi sedimen di daerah yang dikeruk atau di sekitar dermaga atau bangunan lainnya, memperkirakan akumulasi kronologi kontaminan yang terkait dengan partikel, dan mengkarakterisasi laju dan intensitas pengerjaan ulang sedimen oleh fauna bentik.

IX.3.1 Transportasi partikel di muara

Pengangkutan partikel tersuspensi di muara diatur oleh aliran sungai, pencampuran pasang surut dan sirkulasi estuaria sisa. Radionuklida alami adalah pelacak yang berguna dari gerakan partikel tersuspensi di muara. Radionuklida berumur pendek ^{234}Th dan ^7Be sangat berguna dalam konteks ini karena waktu paruh mereka cukup singkat untuk memungkinkan distribusi radionuklida ini menyesuaikan diri dengan fluktuasi jangka pendek arus sungai dan pasang surut. Secara signifikan, ^{234}Th dan ^7Be memiliki sumber yang berbeda untuk muara: ^7Be ditambahkan langsung dari atmosfer, dan kecuali sistem estuaria sangat besar, pasokannya dapat dianggap seragam secara spasial, walaupun bersifat sementara. Di sisi lain, ^{234}Th diproduksi secara *in situ* dari peluruhan ^{238}U yang terlarut. Uranium berperilaku konservatif selama pencampuran di banyak, meskipun tidak semua, muara (Toole et al., 1987; McKee et al., 1987), namun U terlarut secara umum meningkat dengan meningkatnya salinitas. Dengan demikian, dihasilkan secara istimewa dalam jangkauan muara laut. Sejauh Th dan Be memiliki perilaku geokimia yang serupa di bawah kondisi konsentrasi partikel tersuspensi tinggi yang biasanya ditemukan di muara sungai, perbedaan sumber kedua radionuklida ini memastikan bahwa partikel yang menghabiskan banyak waktu di bagian salinitas tinggi dari muara akan memiliki rasio aktivitas yang lebih besar dari $^{234}\text{Th} / ^7\text{Be}$. Feng et al. (1999b) menunjukkan bahwa ini memang terjadi pada Muara Sungai Hudson (AS) (Gambar 1). Keberangkatan

dari rasio teoritis $^{234}\text{Th} / ^7\text{Be}$ diprediksi dari model pemulung sederhana menunjukkan bahwa, dalam kondisi aliran sungai rendah, partikel dapat diangkut ke muara atas jarak yang sebanding dengan pesiar pasang surut. Sebaliknya partikel mengungsi ke arah laut selama arus tinggi.

Fengetal. (1999c) juga menggunakan rasio $^{234}\text{Th} / ^7\text{Be}$ partikel tersuspensi di muara Sungai Sungai bawah yang lebih rendah untuk menentukan kontribusi sedimen resuspended lokal versus sedimen yang diangkut dari bagian seaward sistem ke maksimum kekeruhan (TM). Selama periode aliran sungai yang rendah, model kotak ^{234}Th dan ^7Be dalam sistem menunjukkan bahwa sekitar 30% endapan tersuspensi di TM diturunkan secara lokal dan sisanya digunakan untuk sirkulasi muara. Hasil ini berimplikasi pada pengangkutan kontaminan dalam sistem. Hudson (dan banyak muara) menunjukkan pola urbanisasi di mana kota-kota di dekat muara sungai menghasilkan sumber kontaminan yang kuat di ujung sistem yang menghadap ke laut. Dalam kasus Muara Sungai Hudson, Kota New York merupakan sumber logam bekas reaksi reaktif dan kontaminan organik. Mengam Feng et al. (1999a) menunjukkan bahwa rasio $^{234}\text{Th} / ^7\text{Be}$ pada partikel tersuspensi berkorelasi baik dengan rasio Ag / Fe . Perak adalah kontaminan yang sangat terkait dengan input air limbah ke perairan pesisir perkotaan (Sañudo-Wilhelmy & Flegal, 1992) dan korelasi yang baik menunjukkan hubungan antara sumber muara bawah ^{234}Th (dari aktivitas ^{238}U yang lebih tinggi di bagian pinggir laut sistem) dan Ag (dari input air limbah perkotaan).



Gambar 1. Rasio aktivitas $^{234}\text{Th} / ^7\text{Be}$ pada partikel tersuspensi versus salinitas di muara Sungai Hudson. Simbol terbuka dan penuh mewakili air permukaan dan bawah. Sampel yang dikumpulkan pada banjir pasang ditandai dengan +. Kurva padat menunjukkan batas atas rasio aktivitas $^{234}\text{Th} / ^7\text{Be}$, diperkirakan dari model yang mengasumsikan produksi in situ sebesar ^{234}Th , pasokan atmosfer ^7Be , pembilasan cepat, dan waktu tinggal pendek dari partikel tersuspensi di kolom air. Kurva yang putus-putus diperkirakan batas bawah ditentukan oleh resuspensi sedimen bawah lokal. (Dari Feng et al, 1999b, dengan izin dari Elsevier.)

Berilium-7 juga berfungsi sebagai pelacak variabilitas temporal yang berguna dalam pengangkutan sedimen oleh muara sungai. Di Hudson, Hirschberg dkk. (1996), Feng et al. (1998) dan Woodruff et al. (2001) menunjukkan bahwa freshet musim semi mengangkut sejumlah besar sedimen melalui sistem, menyimpannya sementara di Hudson bagian bawah. Dengan waktu materi ini, diberi label dengan aktivitas tinggi ^7Be , didistribusikan kembali melalui sistem. Pada skala yang lebih besar, Sommerfield dkk. (1999) menunjukkan bahwa musim semi dari Sungai Eel, California (AS), mengangkut sedimen sungai yang diberi label ^7Be ke rak yang berdekatan. Sedimen sungai yang baru disortir dibedakan dari endapan rak yang berdekatan dengan aktivitas ^7Be yang tinggi.

IX.3.2 Akumulasi sedimen

Memahami pola akumulasi sedimen di lingkungan pesisir sangat penting untuk mengevaluasi efek jangka panjang pengerukan dan pembangunan dermaga, misalnya. Banyak radionuklida alami reaktif partikel yang disebutkan di atas berguna dalam menentukan tingkat akumulasi sedimen pesisir. Memang tingkat akumulasi sedimen di daerah yang baru dikeruk bisa sangat cepat, sehingga memerlukan penggunaan radionuklida berumur pendek seperti ^{234}Th atau ^7Be untuk menentukan kronologi. Setelah kronologi akumulasi sedimen terbentuk, mereka dapat digunakan untuk membangun kronologi fluks dari kontaminan partikel ke situs

(misalnya Valette-Silver, 1993). Informasi ini memiliki nilai praktis dalam membantu pengelola zona pesisir untuk menentukan apakah input kontaminan ke sistem pesisir meningkat atau menurun. Akhirnya, membandingkan persediaan sedimen radionuklida alami, yang sumbernya biasanya terkendala dengan baik, terhadap persediaan kontaminan, yang sumbernya banyak dan seringkali kurang dicirikan, dapat membantu memilah-milah kepentingan relatif sumber kontaminan pada sistem pesisir.

Sejak awal bekerja oleh Koide dkk. (1973) menggunakan ^{210}Pb sebagai kronometer akumulasi sedimen, nuklida ini telah menjadi sine qua non untuk menentukan tingkat akumulasi pada sedimen pesisir. ^{210}Pb hadir dalam sedimen yang melebihi aktivitas kakek dan ^{226}Ra dan penurunan kelebihan ^{210}Pb dengan kedalaman sedimen dapat digunakan untuk mengekstrak tingkat akumulasi sedimen. Dengan menggunakan persamaan peluruhan yang sudah dikenal dengan waktu yang ditunjukkan sebagai (kedalaman sedimen)/(laju akumulasi sedimen), perubahan kelebihan ^{210}Pb dengan kedalaman kolom sedimen dapat digambarkan sebagai:

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{\lambda x}{S}\right), \quad (2)$$

dimana:

A = aktivitas pada kedalaman x pada sedimen

A_0 = aktivitas pada antar muka air-sedimen

λ = laju peluruhan

S = laju akumulasi sedimen

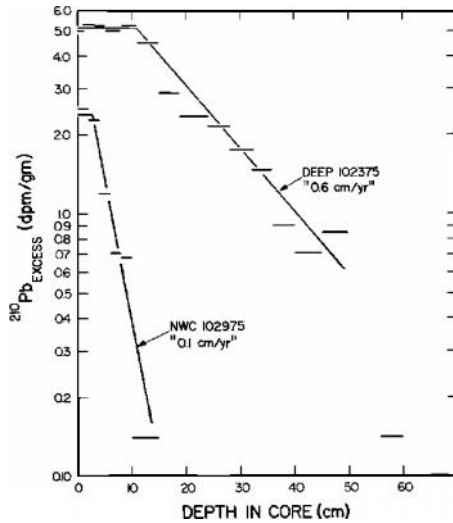
Sebagai aplikasi dari geochronometry ^{210}Pb ke sedimen pesisir subtidal tumbuh semakin banyak pada tahun 1970an dan 1980an (misalnya Goldberg et al., 1977, 1978; Thomson et al., 1975; Benninger et al., 1979; Turekian et al., 1980) menjadi jelas bahwa persamaan (2) adalah penyederhanaan yang berlebihan karena ia mengabaikan dampak proses penting, yaitu pencampuran sedimen oleh infauna, pada profil radionuklida. Hewan yang hidup dalam sedimen menggeser partikel melalui aktivitas makan dan meningkatkan pengangkutan zat terlarut ke permukaan air sedimen melalui pengairan liang dengan air di atasnya. Pencampuran partikel berfungsi untuk memodifikasi gradien kedalaman radionuklida dan menyebabkan tingkat akumulasi sedimen ditentukan dari persamaan (2) hingga keliru. Selain itu, intensitas pencampuran partikel menurun dengan kedalaman kolom sedimen sehingga pengaruhnya terhadap profil radionuklida bervariasi dengan kedalaman. Proses pencampuran yang disebabkan oleh organisme pemberian deposit permukaan telah dianalogikan dengan proses difusi eddy, dan persamaan diagenetik yang berkaitan dengan radionuklida partikel-reaktif dalam sedimen (tanpa pepadatan) biasanya ditunjukkan sebagai:

$$\frac{\delta A}{\delta t} = D_B \frac{\delta^2 A}{\delta x^2} - S \frac{\delta A}{\delta x} - \lambda A, \quad (3)$$

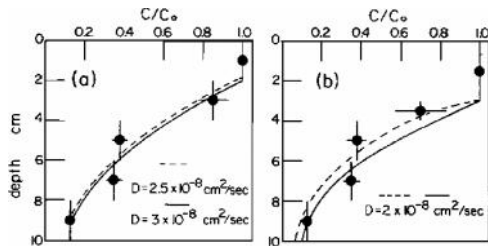
dimana:

D_B = koefisien pencampuran partikel

t = waktu



(A)



(B)

Gambar 2. (A) Kelebihan profil aktivitas ^{210}Pb versus kedalaman dalam dua inti sedimen dari Long Island Sound. Tingkat akumulasi sedimen yang ditunjukkan diperoleh dengan asumsi bahwa tidak ada pencampuran di bawah 4 cm atau 10 cm (inti NWC 102975 dan NWC 102375, masing-masing). Namun, kehadiran Pu (B) pada kedalaman yang sama dengan kelebihan ^{210}Pb menunjukkan bahwa akumulasi pencampuran dan sedimen dalam adalah proses penting yang mempengaruhi profil ^{210}Pb . Dalam (B) yang paling sesuai dengan aktivitas Pu yang dinormalisasi (C/C_0) untuk inti NWC 102975 ditunjukkan, mendapatkan DB di bawah zona campuran surfaktan yang memungkinkan perhitungan tingkat akumulasi sedimen $\sim 0.05 \text{ cm y}^{-1}$. (Dari Benninger et al., 1979; Turekian et al., 1980, dengan izin dari Elsevier.)

Jelas bahwa persamaan (2) dihasilkan dari solusi steady state terhadap persamaan (3) jika tidak ada pencampuran partikel ($DB = 0$)

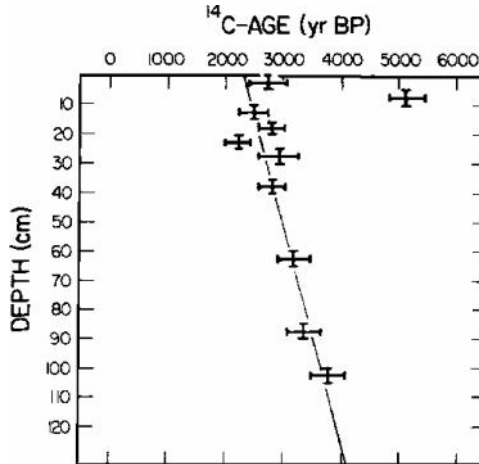
Efek pencampuran sedimen pada profil kelebihan ^{210}Pb sering kali menghasilkan campuran aktivitas campuran hampir konstan dalam beberapa sentimeter teratas (Gambar 2). Di bawah lapisan campuran baik adalah zona aktivitas yang menurun. Umumnya, pemeriksaan sedimen secara visual atau dengan X-radiografi cukup untuk mendokumentasikan adanya komunitas benthik aktif yang menyebabkan pencampuran cepat dalam sedimen surfaktan.

Waktu paruh yang pendek dari keduanya dan keduanya membuat mereka cocok untuk menentukan tingkat pencampuran dalam sedimen pesisir surfaktan, karena tingkat penguburan radionuklida oleh akumulasi sedimen kecil dibandingkan dengan laju pengangkutan ke bawah dengan mencampur (Aller & Cochran, 1976; Krishnaswami et al., 1980; Canuel et al., 1990; McKee et al., 1984). Namun, ada komplikasi yang signifikan, dalam mencoba memperkirakan tingkat akumulasi sedimen dari profil radionuklida di bawah kedalaman pencampuran surfaktan cepat. Asumsi yang umum adalah bahwa pencampuran tidak terjadi pada kedalaman di inti dan kelebihan ^{210}Pb digunakan (dalam persamaan (2)) untuk menentukan tingkat akumulasi. Namun, kelebihan ^{210}Pb umumnya hanya ada sampai puluhan sentimeter di kolom sedimen pesisir, wilayah kedalaman yang dipengaruhi oleh pencampuran peristiwa yang terjadi selama skala waktu paruh ^{210}Pb . Benninger dkk. (1979) mengartikulasikan efek penurunan pencampuran dengan kedalaman pada inti radionuklida dengan waktu paruh yang berbeda.

Jadi, seperti yang ditekankan oleh Smith (2001), langkah yang diperlukan untuk memvalidasi tingkat akumulasi dari profil radionuklida adalah menggunakan beberapa radionuklida dari waktu paruh yang berbeda. Kronometer potensial lainnya termasuk ^{137}Cs antropogenik, ditambahkan ke lingkungan yang terkait dengan uji coba senjata nuklir di atmosfer dan dengan rilis yang terkait dengan siklus bahan bakar nuklir. Cesium-137 digunakan berbeda dari ^{210}Pb sebagai kronometer, dengan ketergantungan ditempatkan

pada identifikasi cakrawala kedalaman yang sesuai dengan masukan pulsa yang diketahui dari ^{137}Cs ke lingkungan. Ini termasuk tampilan skala besar pertama radionuklida ini dari pengujian atomik senjata atom pada tahun 1950an, sebuah puncak dalam dampak global 1963-1964 yang sesuai dengan Perjanjian Pelarangan Uji Nuklir dan, di beberapa lokasi, puncak pada tahun 1986 dihasilkan dari Chernobyl kecelakaan. Isotop plutonium ($^{239,240}\text{Pu}$) atau ^{241}Am juga dapat digunakan untuk tujuan yang sama, dan dalam beberapa kasus dapat digunakan dengan ^{210}Pb untuk mengatasi efek akumulasi dan akumulasi sedimen pada profil radionuklida (Gambar 2).

Radiokarbon juga telah berhasil digunakan untuk menentukan tingkat akselerasi pada sedimen pesisir. Carbon-14 memiliki keuntungan memiliki masa paruh jauh lebih lama dari ^{210}Pb . Dengan demikian, ini berada lebih dalam di kolom sedimen dan kurang tunduk pada efek pencampuran (Gambar 3).

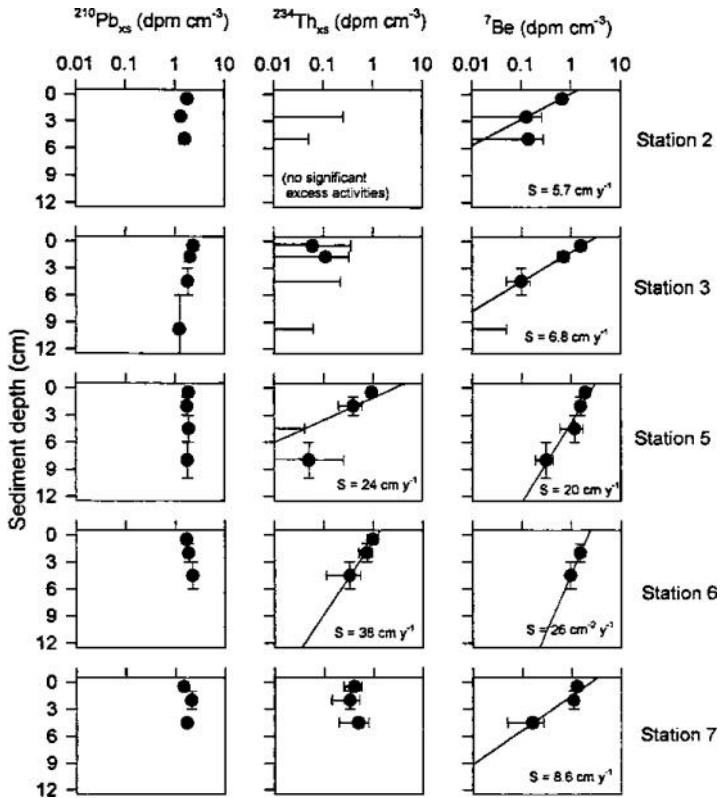


Gambar 3. Karbon-14 versus kedalaman pada fraksi organik inti NWC 102975. Tingkat akumulasi ^{14}C adalah $\sim 0,07 \text{ cm y}^{-1}$, dan dapat dibandingkan dengan hasil ^{210}Pb yang ditunjukkan pada Gambar 2 (A) untuk persamaan yang sama. inti. (Dari Benoit et al., 1979, dengan izin dari Elsevier.)

Selain itu, kemajuan terbaru dalam pengukuran radiokarbon oleh spektrometri massa akselerator telah memperbaiki presisi sehingga perbedaan usia beberapa ratus tahun dapat ditentukan. Perbandingan tingkat akumulasi sedimen yang berasal dari ^{210}Pb (tidak dikoreksi untuk bioturbasi) dan radiokarbon sering menunjukkan perbedaan faktor 2 atau lebih, dengan tingkat ^{210}Pb bias terhadap sisi yang tinggi, seperti yang diharapkan dari mengabaikan efek pencampuran (bandingkan Gambar 2 dan 3; Benoit dkk., 1979). Dengan demikian

pencampuran harus diperhitungkan untuk menentukan tingkat akumulasi sedimen di lingkungan subtidal secara tepat.

Namun, dalam beberapa kasus, tingkat akumulasi di daerah pesisir benar-benar tinggi, dari urutan beberapa cm sampai 10 cm per tahun. Situs dimana hal ini terjadi termasuk area yang baru dikeruk atau yang telah dibuat oleh kegiatan seperti pasir pertambangan di pelabuhan untuk digunakan secara agregat dalam pembuatan beton. Daerah tersebut secara signifikan berada di luar 'ekuilibrium' dengan hidrodinamika dasar laut yang tidak terganggu dan menjadi tempat akumulasi sedimen yang cepat. Kurangnya pencampuran yang signifikan didukung oleh X-radiograf yang menunjukkan laminasi dan infarko oportunistik kecil (jika ada). Dalam kasus tersebut, kronometer radionuklida berumur pendek ^{234}Th dan ^7Be adalah chronometer yang tepat (Gambar 4).



Gambar 4. Kelebihan ^{210}Pb , profil aktivitas ^{234}Th dan ^7Be yang berlebihan versus kedalaman di inti sedimen dari pinggir barat muara Sungai Hudson yang lebih rendah. Sedimen terakumulasi dengan cepat pada jangka pendek di lokasi ini dan tingkat akumulasi sedimen yang tinggi diperoleh dari profil ^{234}Th dan ^7Be yang berlebihan. (Dari Feng et al., 1998, dengan izin dari Federasi Penelitian Estuarine).

IX.4. Lahan basah

IX.4.1 Lajuakresi relatif terhadap faktor penyebab seperti kenaikan muka air laut

Lahan basah melayani fungsi penting sebagai habitat, sebagai tempat pembibitan bagi ikan remaja dan organisme laut lainnya, sebagai filter untuk kontaminan dari darat ke lautan, sebagai pendaur ulang bahan organik dan sebagai penyangga terhadap dampak badai di daerah pesisir. Lahan basah menghadapi banyak ancaman - dari perkembangan lokal daerah pesisir hingga peningkatan permukaan laut secara global. Salah satu cara penting untuk menilai kesehatan lahan basah adalah melalui penentuan tingkat akresi mereka. Lahan basah seperti rawa asin seringkali terapresiasi untuk mengimbangi kenaikan permukaan air laut. Lahan basah yang terakumulasi pada tingkat yang kurang dari kenaikan permukaan laut untuk jangka waktu yang signifikan berisiko kehilangan pencemaran. Dalam banyak kasus, pengembangan lahan yang berdekatan dengan pantai mencegah migrasi lahan basah ke daratan saat permukaan laut naik, dan ini merupakan faktor penyebab kerugian bersih mereka. Memang, sekitar dua pertiga lahan basah di Eropa dan Amerika Utara telah hilang selama akhir abad ke-20, dan 85% di kawasan Asia terancam (GESAMP, 2001)

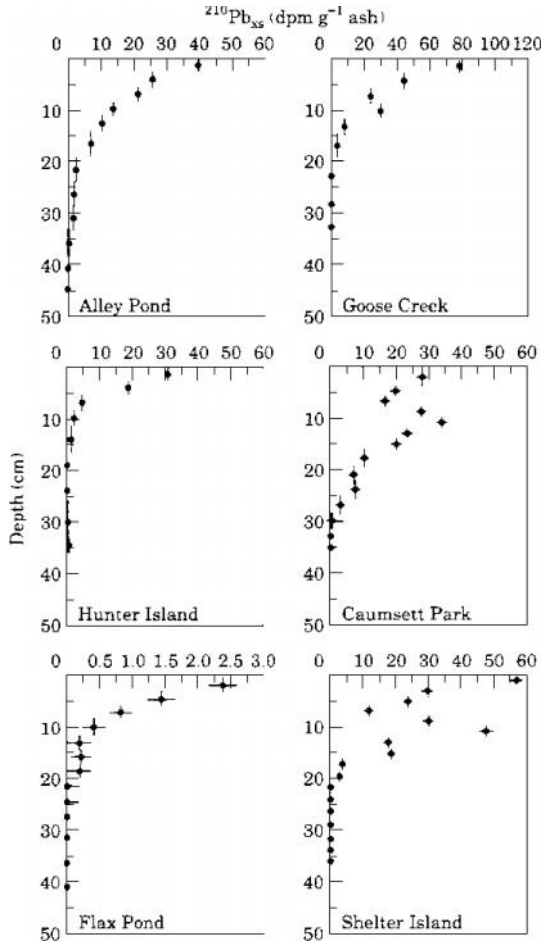
Tingkat akresi deposito lahan basah dapat ditentukan dengan menggunakan rangkaian radionuklida alami dan antropogenik yang

sama dengan endapan subtidal. Yang paling sering digunakan adalah ^{210}Pb (Armentano & Woodwell, 1975; McCaffrey & Thomson, 1980; Cochran et al., 1998a), ^{137}Cs (Kearney et al., 1994; Cochran et al., 1998b) dan ^{14}C . Lead-210 memberikan kronologi selama 100 tahun terakhir, skala waktu yang tepat karena sesuai dengan industrialisasi progresif abad ke-19 dan ke-20 dan pelepasan kontaminan yang bersamaan ke lingkungan laut pesisir (Gambar 5 dan 6). Radiokarbon berguna dalam memperpanjang kronologi rawa garam ke jangka panjang (misalnya Allen & Rae, 1988; Varekamp et al., 1992). Tidak seperti sedimen subtidal, profil radionuklida dalam deposit marsh garam seringkali kurang terganggu dengan pencampuran. Struktur akar padat rumput rawa cenderung menghambat omset sedimen surfaktan dengan pencampuran partikel yang umum terjadi pada sedimen subtidal. Berilium-7 dan / atau thorium-234 dapat memberikan penilaian lebih lanjut atas adanya atau tidak adanya pencampuran. Jika lokasi sampling dipilih jauh dari saluran drainase dan tanpa bukti menggali oleh kepiting, sejarah pertambahan rawa yang dapat diandalkan kemungkinan akan dipertahankan.

Aspek yang menarik dari penerapan ^{210}Pb ke banyak lahan basah, terutama yang berada dekat dengan pasang surut tinggi, adalah bahwa radionuklida ini dipasok secara dominan oleh endapan atmosfer. Fluks atmosfer ^{210}Pb ke permukaan bumi kira-kira konstan dengan waktu di lokasi tertentu (Turekian et al., 1977) dan dengan demikian model yang menggabungkan fakta ini dapat

digunakan untuk menentukan umur horizon kedalaman yang diberikan dalam inti rawa (Appleby & Oldfield, 1978). Model 'constant fluks' atau 'constant of model 210Pb' ini memungkinkan penentuan variasi laju pertambahan rawa garam dari waktu ke waktu.

Tingkat pertambahan lahan basah, dibandingkan dengan tingkat kenaikan permukaan air laut, adalah ukuran sederhana dari kesehatan sistem. Lahan basah yang tetap bisa bertahan, dalam jangka panjang, mengimbangi kenaikan permukaan air laut. Lahan basah yang tumbuh lebih cepat dari kenaikan permukaan air laut, jika hal ini dipertahankan dalam jangka waktu yang lama, akan berada dalam transisi dari rawa rendah ke rawa tinggi atau dari rawa tinggi ke tanah dataran tinggi. Kronologi akresi juga berguna dalam menentukan catatan fluks kontaminan ke permukaan rawa (lihat di bawah).

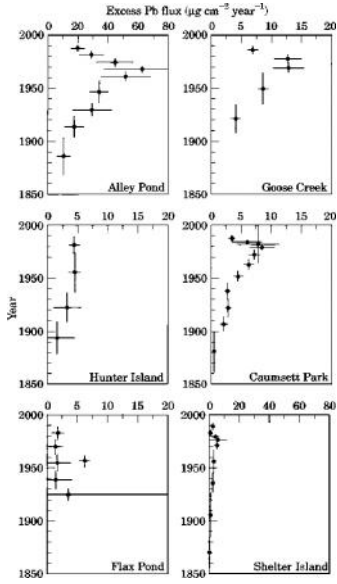


Gambar 5. Kelebihan profil aktivitas ^{210}Pb versus kedalaman di inti rawa garam dari New York City dan Long Island. Tingkat akselerasi rerata dihitung dengan model fluks konstan berkisar dari 0,1 cm y^{-1} sampai 0,4 cm y^{-1} . (Dari Cochran dkk., 1998b, dengan izin dari Elsevier.)

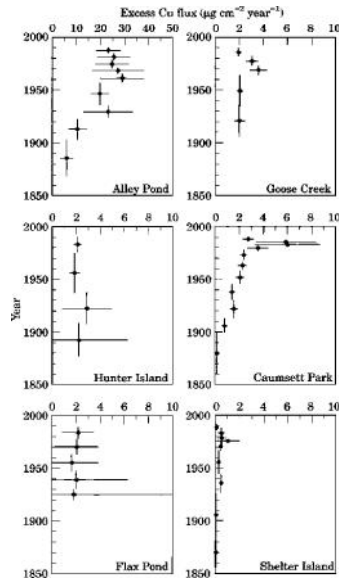
IX.4.2 Kronologi kontaminasi lahan basah pesisir

Lahan basah bertindak sebagai filter untuk kontaminan, dan sebagai konsekuensinya, endapan mencatat input kontaminan organik dan anorganik terkait partikel dari waktu ke waktu. Lahan basah tertentu (misalnya rawa-rawa garam tinggi) secara dominan menerima beban kontaminan mereka (dan juga ^{210}Pb ; lihat di atas) dari atmosfer, sehingga sedimen lahan basah mencatat pengendapan kontaminan atmosfer ke perairan pesisir. Mengetahui fraksi kontinuitas masukan kontaminan dari atmosfer penting dalam menentukan strategi pengelolaan alternatif untuk input kontaminan. Dengan demikian, kronologis kontaminan pada endapan lahan basah berfungsi baik fungsi pemantauan (apakah input meningkat atau menurun?) Dan indikator sumber (berapa fraksi kontaminan yang ada di sedimen pantai subtalnya di sekitarnya bersifat atmosfer?).

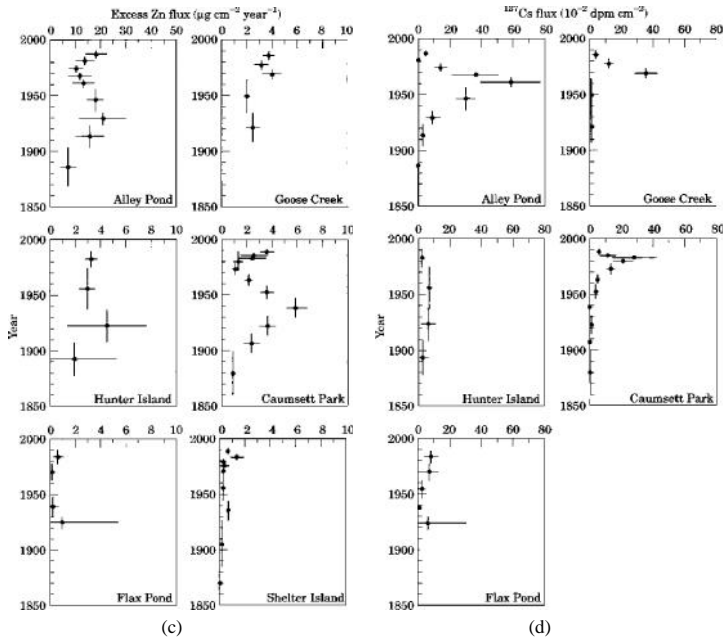
Bab IX
Radio Nuklida alam dalam
Kajian Zona Pesisir



(a)



(b)



Gambar 6. Kelebihan fluks logam ke lokasi rawa garam di New York, berdasarkan kronologi ^{210}Pb (lihat Gambar 5). (Kelebihan konsentrasi logam dihitung dengan mengurangkan nilai latar belakang pra-industri pada kedalaman inti dari konsentrasi total.) (A) Pb, (b) Cu, (c) Zn dan (d) ^{137}Cs . (Dari Cochran dkk., 1998b, dengan izin dari Elsevier.)

Menentukan kronologi kontaminan pada endapan rawa garam memerlukan kronologi pertambahan yang valid seperti yang diuraikan di atas, serta pengukuran konsentrasi kontaminan organik dan anorganik dengan kedalaman di inti. Fluks kontaminan

diturunkan dengan mengalikan laju akselerasi dengan konsentrasi kontaminan (Gambar 6). Pola fluks ini dari waktu ke waktu sering menunjukkan variasi yang masuk akal dibandingkan dengan input yang diketahui ke lingkungan pesisir.

Isu terkait adalah penentuan fraksi kontaminan relatif yang dipasok ke perairan pesisir oleh atmosfer. Seseorang harus terlebih dahulu memverifikasi bahwa lahan basah menerima kontaminan dari atmosfer. Hal ini dapat dilakukan dengan membandingkan persediaan ^{210}Pb di inti lahan basah dengan yang diperkirakan dari endapan atmosfer. Jika pengukuran langsung fluks atmosfer untuk kontaminan tersedia, mereka mungkin juga secara langsung dibandingkan dengan yang diperoleh dari inti lahan basah. Bagaimanapun, persediaan kontaminan dapat dinormalisasi menjadi ^{210}Pb dan dibandingkan dengan nilai sedimen subtit yang serupa. Pendekatan ini telah diterapkan di Connecticut dan New York, AS, dan di laguna Venesia, Italia (McCaffrey & Thomson, 1980; Turekian et al., 1980; Cochran et al., 1998a, b). Di situs ini masukan atmosfer Pb adalah jalur signifikan, yang memang dominan, dimana Pb ditambahkan ke zona pesisir.

IX.5. Eutrofikasi dan mekar (blooming)

IX.5.1 Pelepasan submarine ground water sebagai sumber nutrisi potensial ke daerah pesisir

Seiring berkembangnya wilayah pesisir, masukan nutrisi ke perairan pesisir semakin meningkat. Eutrofikasi ini telah menyebabkan peningkatan produksi pesisir, termasuk gangguan dan alga berbahaya (HABs). HAB dapat memiliki konsekuensi serius bagi kesehatan manusia jika individu mengkonsumsi kerang yang terkontaminasi dengan racun dari ganggang. Konsekuensi ekonomi juga dapat diakibatkan oleh menurunnya perikanan setelah ledakan alga yang berbahaya, yang terkait dengan pencemaran kerang yang kemudian tidak dapat dijual untuk konsumsi atau dampak negatif pada perikanan terkait dengan penurunan kualitas air (misalnya oksigen terlarut rendah yang disebabkan oleh penguraian alga).

Pemuatan nutrisi ke perairan pesisir terjadi dari daerah aliran sungai melalui sungai dan juga dari sumber air limbah sumber utama. Semakin banyak, masukan dari debit air bawah laut (SGD) dan dari atmosfer dianggap penting dalam keseimbangan gizi daerah pesisir. Misalnya, masukan air tanah nitrat telah terbukti penting di perairan pesisir New York, Massachusetts, Australia, Jamaika dan lokasi lainnya (IAEA, 2001). Jalur ini juga dapat menambahkan kontaminan lain, termasuk logam, senyawa organik dan radionuklida antropogenik ke zona pesisir. Radionuklida alami dapat membantu menentukan besarnya fluks air tanah ke zona pesisir dan dengan demikian mengevaluasi fluks nutrisi dan kontaminan yang terkait dengan input ini. Radon-222 dan isotop Ra (226, 228, 224, 223) adalah pelacak SGD yang sangat baik karena dimobilisasi

dalam sedimen atau akuifer dan tidak mudah sekali reaktif sekali di kolom air.

Masukan radon (^{222}Rn) dan isotop radium (misalnya ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra) dengan SGD telah dikenali selama sekitar 20 tahun, biasanya sebagai aktivitas radionuklida radionuklida yang tinggi secara anomali (perairan Fanning et al., 1981). Radon dan isotop radium dihasilkan dari radionuklida induk dalam struktur mineral sedimen, memasuki perairan pori sedimen melalui rekoil dan kemudian dapat keluar dari sedimen. Perhitungan neraca massa di banyak situasi menunjukkan bahwa difusi saja tidak cukup untuk menyebabkan aktivitas tinggi di kolom air, yang melibatkan aliran melalui sedimen dan masukan melalui SGD. Moore (1996) mencatat pengayaan signifikan ^{226}Ra di perairan pesisir South Atlantic Bight, AS, dan memasukkannya ke SGD. Memang Moore (1999) kemudian menciptakan istilah 'muara bawah tanah' untuk berkenaan dengan kenaikan isotop Ra yang terlarut sebagai konsekuensi pencampuran air garam dan air tawar di akuifer pesisir. Pengayaan serupa ^{222}Rn telah dikaitkan dengan SGD (Fanning et al., 1981; Cable et al., 1996).

Beberapa pendekatan yang mungkin dilakukan dalam menentukan tingkat SGD menggunakan radon dan radium. Mengevaluasi keseimbangan massa radionuklida adalah salah satu metode yang telah diterapkan pada ^{222}Rn (misalnya Corbett et al., 2000). Radon-222 persediaan di kolom air pantai dapat ditentukan dan

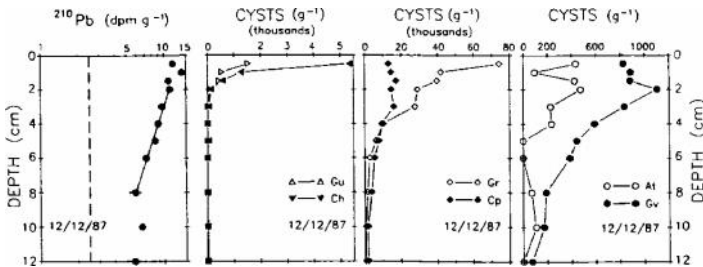
dibandingkan dengan kerugian ke atmosfer, pelepasan laut terbuka dan radioaktif untuk menentukan masukan dari sedimen. Hal ini dapat diubah menjadi tingkat SGD jika aktivitas radon air pori diketahui.

Penerapan rangkaian isotop Ra untuk memperkirakan SGD bergantung pada pembentukan gradien saat isotop memasuki perairan di atasnya dan bercampur jauh dari pantai. Waktu paruh ganda memungkinkan koefisien pencampuran eddy diffusive yang akan ditentukan (misalnya dengan menggunakan ^{223}Ra dan ^{224}Ra ; Moore, 2000) dan kemudian diterapkan pada ^{226}Ra yang berumur panjang untuk memperkirakan fluks lepas pantai dari isotop ini. Fluks ini harus diimbangi dengan masukan Ra dari SGD, dan mengetahui aktivitas ^{226}Ra dalam estimasi penggunaan air tanah untuk fluks SGD.

IX.5.2 Rekonstruksi sejarah mekar sebelumnya

Gangguan dan ganggang berbahaya (HABs) semakin umum di perairan pantai. Mekar seperti itu telah mempengaruhi kesehatan manusia dan menyebabkan kerugian ekonomi pada perikanan di seluruh dunia, termasuk Amerika Serikat, Eropa, Korea, Jepang, Cile dan tempat lain. Dalam banyak kasus, tidak jelas apakah organisme mekar telah hadir secara historis pada konsentrasi rendah di lingkungan dan pertumbuhannya telah distimulasi dengan mengubah keseimbangan nutrisi dan dinamika ekosistem, atau

apakah baru-baru ini diperkenalkan ke dalam sistem. Selain itu, banyak spesies yang penting dalam HAB memiliki tahap aktif yang melibatkan pembentukan kista. Kista dapat keluar dari kolom air dan disimpan di antarmuka air sedimen. Dalam sedimen, kista dapat dikuburkan oleh proses akumulasi sedimen dan pencampuran oleh makrofauna benthik (Keafer et al., 1992). Nasib dan kepentingan mereka selanjutnya dalam pembibitan mekar baru bergantung pada kemampuan mereka untuk tetap bertahan dalam lingkungan yang umumnya tidak memiliki oksigen. Dengan demikian, ada ketertarikan untuk mengkarakterisasi distribusi kista down-core sehubungan dengan kronologi sedimen.



Gambar 7. Profil Lead-210 dan kista untuk Perch Pond (Cape Cod). Untuk ^{210}Pb , garis putus-putus dan garis padat menunjukkan tingkat ^{210}Pb yang didukung dan analisis regresi untuk penentuan tingkat sedimentasi ($0,29 \text{ cm y}^{-1}$), masing-masing. Lapisan campuran permukaan terbatas pada $\sim 2 \text{ cm}$. Gu atas: Gyrodinium uncatenum, Ch: Cochloclinium heterolobatum, Gr: Gonyaulax rugosum, Cp: tidak diketahui Scripsiella sp., At: Alexandrium

tamarensis, Gv: *Gonyaulax verior*. (Dari Keafer et al., 1992, dengan izin dari Elsevier.)

Rekonstruksi sejarah HAB melibatkan pengumpulan inti sedimen dan penentuan kronologi sedimen dan kelimpahan kista dengan kedalaman sedimen. Namun, seperti disebutkan di atas, kehadiran pencampuran partikel oleh infauna sering kali mengkompromikan kemampuan untuk mengekstrak kronologi deposisi dari sebuah inti. Namun demikian, pemahaman tentang dinamika pencampuran dan akumulasi vis-à-vis kelimpahan kista dengan kedalaman sedimen memberikan informasi berharga tentang bagaimana kista dipertahankan dalam sedimen dan kemampuan mereka untuk menghasilkan mekar baru. Di lingkungan tambak garam yang terlindung di Cape Cod, misalnya, Keafer dkk. (1992) menemukan bahwa pencampuran dibatasi pada 2 cm atas, zona dimana kista bisa memicu mekar di kolom air di atasnya. Setelah disimpan lebih dalam dari 2 cm, kista tersebut diisolasi dari air di atasnya (Gambar 7).

Xx5.3 Siklus nutrisi dan turnover

Tingkat siklus hara di kolom air atas merupakan parameter penting yang dipengaruhi oleh input nutrisi 'baru', produksi primer dan sekunder, dan dekomposisi dan ekspor bahan organik. Peran fosfor dalam membatasi pertumbuhan dan distribusi fitoplankton laut belum diketahui. Isotop P 32 ppm (setengah hari 14,3 d) dan 33P

(umur separuh 25,3 d) berguna untuk menentukan omset di berbagai waduk P. Lal dkk. (1988) dan Lal & Lee (1988) mengemukakan bahwa jika input ^{32}P dan ^{33}P ke permukaan laut dari atmosfer dan aktivitasnya di berbagai waduk P di laut atas diketahui, adalah mungkin untuk menghitung tingkat serapan P dan omset, rata-rata sepanjang waktu skala minggu. Secara khusus, rasio $^{33}\text{P} / ^{32}\text{P}$ di berbagai reservoir P dibandingkan dengan rasio masukan dari atmosfer menyediakan sarana penuaan berbagai waduk P, dengan asumsi bahwa fraksinasi isotop yang bergantung pada massa dapat diabaikan (Waser et al., 1996). Model dasar untuk memperkirakan waktu perputaran P bergantung pada keseimbangan antara gain ^{32}P atau ^{33}P melalui konsumsi dan kerugian akibat peluruhan, ekskresi dan pembentukan partikel sinking yang besar. Model seperti itu dapat mengasumsikan bahwa plankton menelan P sepanjang hidup mereka (model serapan terus-menerus) atau hanya di awal umur mereka (model usia) (Waser et al., 1996).

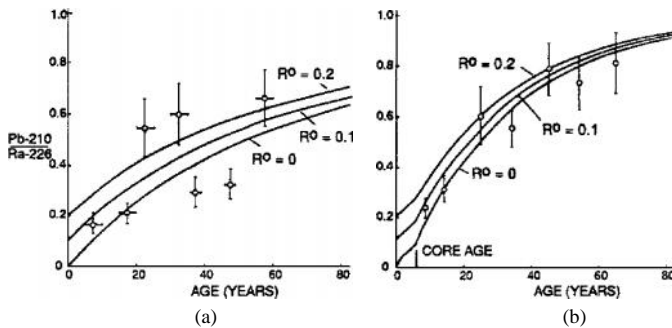
Upaya untuk menggunakan rasio $^{33}\text{P} / ^{32}\text{P}$ sebagai kronometer perputaran P telah dimulai dengan mengukur rasio hujan. Meskipun aktivitas individu (per liter hujan) ditampilkan berdasarkan urutan variasi besarnya (Lal et al., 1957, 1960; Goel et al, 1959; Lal & Peters, 1967; Waser et al., 1994; Waser & Bacon, 1995; Benitez-Nelson & Buesseler, 1999a), rasio $^{33}\text{P} / ^{32}\text{P}$ bervariasi dari ~0,6-1,6, dengan mean tahunan ~0,9. Benitez-Nelson & Buesseler (1999b) mencatat bahwa rasio $^{33}\text{P} / ^{32}\text{P}$ pada p anorganik terlarut dan plankton kecil (yaitu picoplankton) serupa dengan rasio hujan di

Teluk Maine, menunjukkan perputaran cepat P. Sebaliknya, nilai pada plankton umumnya lebih besar dari 1 (Lal & Lee, 1988; Waser et al., 1996; Benitez-Nelson & Buesseler, 1999b), dengan peningkatan tingkat trofik yang lebih tinggi (yaitu zooplankton; Waser et al., 1996). Hasilnya menunjukkan waktu perputaran P yang lebih lama pada tingkat trofik yang lebih tinggi, mulai dari beberapa minggu sampai fitoplankton sampai beberapa bulan untuk zooplankton. Benitez-Nelson & Buesseler (1999b) juga menunjukkan bahwa tingkat daur ulang P terlarut bervariasi secara signifikan dari musim ke musim. Para penulis ini menyatakan bahwa siklus cepat fosfor reaktif yang mudah larut menunjukkan bahwa konsentrasi P yang rendah dapat mendukung produksi primer tingkat tinggi, sementara bakteri mengalami remineralisasi sebagian kecil fosfor non-reaktif terlarut. Memang proses ini dapat memberikan sumber nutrisi anorganik baru kepada fitoplankton, dan dengan demikian memiliki implikasi untuk keterbatasan nutrisi.

IX.6. Perikanan: Umur dan kelas ukuran ikan

Pengelolaan perikanan yang efektif bergantung pada pengetahuan tentang komposisi stok ikan berkenaan dengan umur, atau dengan kata lain hubungan antara ukuran ikan kelas dan umur. Memang struktur umur suatu populasi sering memberikan bukti pertama penangkapan berlebih dan mungkin menyiratkan kebutuhan untuk menjerat kuota pada panen (Jennings et al., 2001). Meskipun sejumlah pendekatan digunakan untuk menentukan umur ikan,

metode yang umum adalah melalui pemeriksaan kalsium karbonat otolitik. Biasanya otolith dikeluarkan dari spesimen ikan dan dipotong. Peningkatan pertumbuhan yang diawetkan dalam otolit kemudian digunakan untuk menentukan usia. Hubungan antara jumlah kenaikan pertumbuhan dan usia dapat diketahui; Seringkali, bagaimanapun, hubungan diasumsikan, dan asumsi ini dapat menyebabkan kesalahan dan, dengan demikian, salah urus. Untuk penilaian usia yang akurat, diperlukan metode validasi usia. Radionuklida alami memberikan cara yang berguna untuk memvalidasi hubungan antara umur ikan dan peningkatan otolit.



Gambar 8. Kurva Ingrowth untuk rasio aktivitas $^{210}\text{Pb} / ^{226}\text{Ra}$ sebagai fungsi umur ikan untuk model pertumbuhan linier. Data eksperimental adalah untuk keseluruhan otolith dari kelas umur yang berbeda atau redfish (a) dan kumpulan inti otolith dari redfish pada kelas usia tertentu (b). Nilai R_0 adalah rasio aktivitas $^{210}\text{Pb} / ^{226}\text{Ra}$ awal yang digunakan untuk membangun kurva pertumbuhan.

(Dari Smith et al., 1991, dengan izin dari Kluwer Academic Publishers.)

Sebagai bentuk otolith mereka menggabungkan radionuklida alami dari air laut dimana ikan tumbuh. ^{210}Pb dan isotop Ra (^{226}Ra dan ^{228}Ra) secara khusus dapat menggantikan Ca dalam CaCO_3 dimana otolith terbentuk. Beberapa pendekatan telah diambil untuk mengambil kronologi dari otolith (Bennett et al., 1982; Fenton et al., 1990; Campana et al., 1990; Smith et al., 1991; Campana et al., 1993). Masing-masing otolith, jika cukup besar, dapat dibagi dan kelompok kenaikan pertumbuhan dianalisis, atau beberapa otolitik dari kelas ukuran tertentu dapat dianalisis bersama-sama. Dalam kasus terakhir, model pertumbuhan otolith harus diasumsikan atau ditentukan. Namun, direkomendasikan untuk membatasi pengujian terhadap inti otolith, karena ini mencerminkan waktu yang telah berlalu sejak pembentukan inti, yang pada gilirannya sangat mirip dengan umur ikan (Campana, 2001, dan referensi di dalamnya; Gambar 8).

Dalam kedua kasus tersebut, tujuannya adalah mengikuti peluruhan ^{210}Pb atau ^{228}Ra sebagai fungsi waktu. Rentang waktu yang berguna dari kronometer ini adalah sekitar lima setengah hari, atau 100 tahun untuk ^{210}Pb dan 30 tahun untuk ^{228}Ra . Setiap radionuklida juga menghasilkan melalui pertumbuhan anak perempuan yang pada gilirannya bersifat radioaktif, dan itu sendiri tidak dimasukkan ke dalam otolith selama pertumbuhan. Dengan

demikian, ingrowth ^{210}Po dan ^{228}Th dari peluruhan ^{210}Pb dan ^{228}Ra , masing-masing dapat diikuti (Gambar 8). Kesetimbangan radioaktif dicapai pada pasangan induk-anak perempuan ini dalam waktu sekitar 2 tahun dan 10 tahun, masing-masing. Dengan rangkaian radionuklida ini, kronologi dapat dikembangkan untuk pertumbuhan ikan sepanjang skala waktu <2 tahun sampai ~100 tahun.

Penentuan ikan yang akurat adalah komponen penting untuk menentukan apakah penangkapan ikan berlebihan terjadi dan dengan demikian mengarah pada pengelolaan perikanan yang lebih efektif. Contoh perikanan yang pengetahuannya akurat tentang pertumbuhan bisa bermanfaat adalah perikanan kasar oranye di lereng kontinental Selandia Baru. Ikan ini berumur panjang (mungkin sampai 150 tahun), menjadikannya target yang tepat untuk metode ^{210}Pb yang dijelaskan di atas. Kurangnya pengetahuan tentang tingkat pertumbuhan dan usia pada kematangan seksual dari timbal oranye menyebabkan penangkapan berlebih dan penurunan populasi hanya dalam beberapa tahun (GESAMP, 2001). Penerapan radionuklida untuk kalibrasi hubungan antara peningkatan pertumbuhan dan waktu pada otolit ikan mungkin paling baik diterapkan pada perikanan dalam, dimana informasi semacam itu seringkali kurang dan pengamatan langsung terhadap pertumbuhan sulit dilakukan. Namun perikanan ini sering dianggap sebagai sumber pesisir.

BAB X

APLIKASI RADIOKARBON DALAM KAJIAN KELAUTAN

X.1 Pendahuluan

Pada tahun 1934 F.N.D. Kurie di Universitas Yale memperoleh bukti pertama adanya radiokarbon (karbon-14, ^{14}C). Selama 20 tahun ke depan sebagian besar rincian untuk mengukur ^{14}C dan karena penerapannya terhadap penanggalan dilakukan oleh W.F. Libby dan rekan kerja. Libby menerima Hadiah Nobel Kimia tahun 1960 untuk penelitian ini.

Aplikasi utama dari ^{14}C adalah tanggal objek atau untuk menentukan berbagai tingkat proses lingkungan. Metode ^{14}C didasarkan pada asumsi tingkat pembentukan atmosfer konstan. Setelah diproduksi, atmosfer ^{14}C bereaksi membentuk $^{14}\text{CO}_2$, yang berpartisipasi dalam proses siklus karbon global dari fotosintesis dan respirasi serta proses fisik pembubaran, pengendapan partikel, penguapan, presipitasi, pengangkutan, dan lain-lain. Radiokarbon Atmosfer dipindahkan ke laut terutama dengan pertukaran gas udara-laut $^{14}\text{CO}_2$. Begitu berada di lautan, $^{14}\text{CO}_2$ tunduk pada proses fisik, kimia, dan biologis yang sama yang mempengaruhi CO_2 . Sementara hidup, biota membentuk konsentrasi ekolubrium radiokarbon dengan lingkungannya; Artinya, ^{14}C hilang karena pembusukan digantikan

oleh serapan dari lingkungan. Setelah jaringan mati atau dikeluarkan dari lingkungan yang mengandung ^{14}C , pembusukan tidak lagi dikompensasikan. Hilangnya ^{14}C oleh peluruhan kemudian dapat digunakan untuk menentukan waktu kematian atau pemindahan dari sumber asli ^{14}C . Setelah kematian atau pengangkatan organisme, umumnya diasumsikan bahwa tidak terjadi pertukaran antara jaringan dan sekitarnya; Artinya, sistem diasumsikan ditutup. Sebagai hasil dari tingkat peluruhan ^{14}C , berbagai ukuran reservoir yang terlibat dalam siklus karbon, dan nilai tukar antara waduk, lautan mengandung radiokarbon alami sebanyak 50 kali lebih banyak seperti halnya atmosfer.

Karbon-14 adalah satu dari tiga isotop karbon alami; ^{14}C bersifat radioaktif, memiliki waktu paruh 5730 tahun dan meluruh dengan memancarkan β -partikel dengan energi sekitar 156 keV. Di permukaan bumi, kelimpahan ^{14}C alami relatif terhadap dua isotop karbon yang terbentuk secara alami adalah ^{12}C : ^{13}C : ^{14}C = 98,9%: 1,1%: $1,2 \times 10^{-10}$ %. Radiokarbon alami dihasilkan di atmosfer, terutama oleh tumbukan sinar kosmik yang menghasilkan neutron dengan nitrogen sesuai dengan reaksi [I].

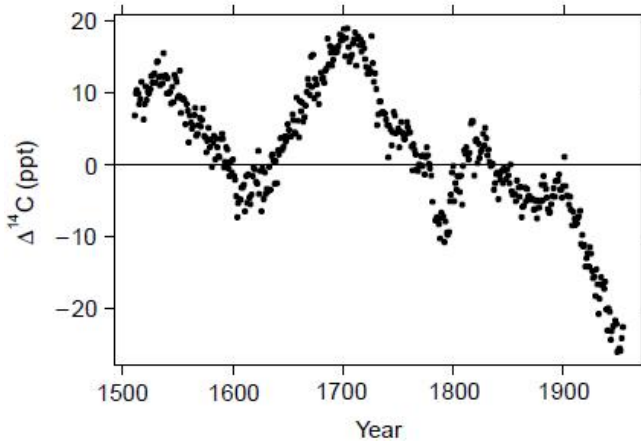


dimana n adalah neutron dan H adalah proton yang dipancarkan oleh nukleus produk. Demikian pula, peluruhan ^{14}C terjadi dengan emisi β^- -partikel dan menyebabkan nitrogen stabil sesuai reaksi (II),



Dimana $\bar{\nu}$ adalah antineutrino dan Q adalah energy peluruhan.

Tingkat produksi atmosfer agak bervariasi dan dipengaruhi oleh perubahan angin matahari dan intensitas medan geomagnetik bumi. Rata-rata $1,57 \text{ atom cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ diperkirakan berdasarkan catatan jangka panjang yang diawetkan pada cincin pohon dan model reservoir karbon. Tingkat produksi jangka panjang ini menghasilkan persediaan ^{14}C alami global sekitar 50 t ($1 \text{ t} \frac{1}{4106} \text{ g}$). Perkiraan produksi berdasarkan catatan pengukuran fluks neutron lebih akhir semakin tinggi, dengan nilai mendekati $2 \text{ atom cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Gambar 1 menunjukkan sejarah atmosfer ^{14}C dari tahun 1511 sampai tahun 1954 yang diukur oleh Minze Stuiver (Universitas Washington) dengan menggunakan cincin pertumbuhan pohon. Penurunan kuat yang terjadi setelah sekitar tahun 1880 adalah karena dilusi penambahan antropogenik CO_2 selama revolusi industri dengan pembakaran bahan bakar fosil (batubara, gas, minyak). Pengenceran ini kemudian dikenal sebagai efek suess (setelah Hans E. Suess).



Gambar 1 Riwayat atmosfer D^{14}C yang diukur oleh M. Stuiver pada cincin pohon yang mencakup AD 1511 sampai AC 1954. Sebagian besar penurunan selama seratus tahun terakhir adalah karena penambahan CO_2 antropogenik ke atmosfer selama revolusi industri oleh pembakaran fosil. bahan bakar.

Sebelum 16 Juli 1945 semua radiokarbon di permukaan bumi diproduksi secara alami. Pada tanggal tersebut, para ilmuwan AS melakukan uji bom atom atmosfer pertama, yang dikenal sebagai Test Trinity. Antara tahun 1945 dan 1963, ketika Perjanjian Pelarangan Uji Partial ditandatangani dan pengujian nuklir di atmosfer dilarang, sekitar 500 ledakan nuklir di atmosfer dilakukan oleh Amerika Serikat (215), bekas Uni Soviet (219), Inggris (21) dan Prancis (50). Setelah penandatanganan, beberapa tes atmosfer tambahan dilakukan oleh China (23) dan negara-negara lain yang tidak berpartisipasi dalam perjanjian tersebut. Efek bersih dari

pengujian ini adalah untuk secara signifikan meningkatkan tingkat ^{14}C di atmosfer dan kemudian di laut. Antropogenik ^{14}C juga telah ditambahkan ke lingkungan dari beberapa pembangkit listrik tenaga nuklir, namun input ini umumnya hanya terdeteksi di dekat reaktor.

Tidak biasa memikirkan jenis kontaminasi atmosfer - terutama oleh spesies radioaktif - bermanfaat; Namun, radiocarbon yang dihasilkan bom (dan tritium) telah terbukti sangat berharga bagi ahli kelautan. Sebagian besar pengujian atmosfer, dalam hal jumlah tes dan produksi ^{14}C , terjadi dalam interval waktu yang singkat, antara tahun 1958 dan 1963, relatif terhadap banyak proses sirkulasi laut. Sejarah waktu ini, ditambah dengan tingkat kontaminasi dan fakta bahwa ^{14}C terlibat secara intim dalam siklus karbon samudra, memungkinkan radiokarbon yang dihasilkan bom berharga sebagai pelacak untuk beberapa proses laut termasuk aktivitas biologis, pertukaran gas laut-udara, termoklin ventilasi, sirkulasi laut bagian atas, dan upwelling.

Hasil radiokarbon oseanografi umumnya dilaporkan sebagai D^{14}C , rasio aktivitas relatif terhadap standar (asam oksida NBS, 13,56 dpm per g karbon) dengan koreksi yang diterapkan untuk pengenceran radiokarbon oleh CO_2 antropogenik dengan koreksi usia bahan standar sampai AD1950. D^{14}C didefinisikan oleh eqn [1].

$$\Delta^{14}\text{C} = \delta^{14}\text{C} - 2(\delta^{13}\text{C} + 25) \left(1 + \frac{\delta^{14}\text{C}}{1000} \right) \quad (1)$$

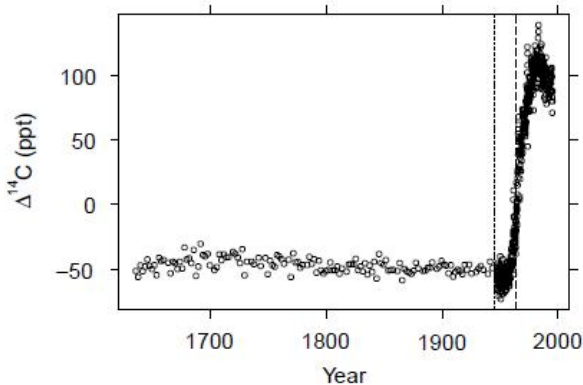
$\delta^{14}\text{C}$ diberikan oleh eqn [2] dan definisi $\delta^{13}\text{C}$ sama dengan $\delta^{14}\text{C}$.

$$\delta^{14}\text{C} = \left[\frac{{}^{14}\text{C}/\text{C}|_{\text{smp}} - {}^{14}\text{C}/\text{C}|_{\text{std}}}{{}^{14}\text{C}/\text{C}|_{\text{std}}} \right] \times 1000 \quad (2)$$

Bagian pertama dari istilah kedua di sisi kanan eqn [1] 2 ($\delta^{13}\text{C} + 25$), mengoreksi efek fraksionasi. Faktor 2 memperhitungkan fakta bahwa fraksinasi ^{14}C diperkirakan dua kali lipat lebih banyak untuk ^{13}C dan konstanta aditif 25 adalah faktor normalisasi yang secara konvensional diterapkan pada semua sampel dan berdasarkan nilai rata-rata kayu terestrial. Rincian perhitungan ^{14}C dapat secara signifikan lebih terlibat daripada yang dinyatakan dalam persamaan di atas; Namun, ada konsensus umum bahwa perhitungan dan pelaporan hasilnya dilakukan seperti yang dijelaskan oleh Minze Stuiver dan Henry Polach dalam sebuah makalah yang secara khusus ditulis untuk menghilangkan perbedaan yang ada sebelumnya. $\delta^{14}\text{C}$ memiliki satuan bagian per seribu (ppt). Artinya, 1 ppt berarti $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ untuk sampel lebih besar dari $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ untuk standar sebesar 0,001. Pada unit ini tingkat peluruhan radioaktif ^{14}C kira-kira 1 ppt per 8.1 tahun.

Jumlah pengukuran permukaan laut yang dilakukan sebelum kontaminasi yang berasal dari bom tidak cukup untuk menyediakan distribusi global sebelum masukan dari ledakan. Sekarang mungkin untuk mengukur nilai $D^{14}C$ dalam cincin pertumbuhan karang tahunan. Dengan berdirinya tahun yang tepat yang terkait dengan setiap cincin, rekonstruksi sejarah laut permukaan $D^{14}C$ dimungkinkan. Menerapkan prosedur yang sama pada kerang moluska berumur panjang memperluas metode ke lintang yang lebih tinggi daripada yang mungkin dengan karang. Apakah karang atau kerang digunakan, harus ditunjukkan bahwa karang atau cangkang menggabungkan ^{14}C dalam rasio yang sama dengan air di mana ia tumbuh atau setidaknya fraksinasi diketahui. Metode ini hanya bekerja pada rentang kedalaman di mana hewan itu hidup. Gambar 2 menunjukkan catatan $D^{14}C$ dari dua terumbu karang Pasifik yang diukur oleh Ellen Druffel. Garis vertikal menunjukkan periode uji coba nuklir di atmosfer (1945-1963). Variabilitas yang relatif kecil selama tahun B300 pertama mencatat variasi karena kejadian cuaca, perubahan iklim, sirkulasi laut, produksi atmosfer, dan lain-lain. 50 tahun terakhir dari rangkaian tersebut mencatat invasi $D^{14}C$ yang diproduksi bom. Perlu dicatat adalah fakta bahwa catatan terumbu dari sinyal bom tertinggal. Artinya, nilai karang tidak mulai meningkat segera setelah pengujian dimulai dan juga tidak akan meningkat saat pengujian atmosfer berakhir. Kelemahan ini disebabkan oleh waktu atmosfer belahan bumi utara dan selatan untuk mencampur (B1 tahun) dan waktu yang relatif lama yang diperlukan untuk permukaan laut untuk menyeimbangkan dengan

atmosfer sehubungan dengan $D^{14}C$ (B10 tahun). Karena lambatnya ekuilibrasi, permukaan laut seringkali tidak berada pada ekuilibrium dengan atmosfer. Disekuilibrium ini adalah salah satu alasan mengapa permukaan laut pra-bom muncul, bila dinyatakan sebagai usia dan bukan satuan ppt, umumnya 'tua' dan bukan 'nol' seperti yang diharapkan.

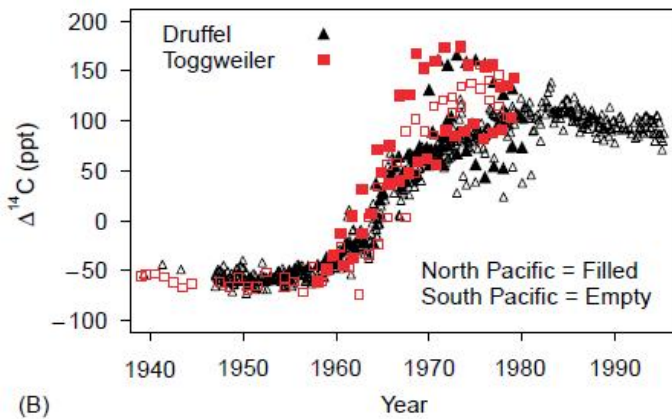
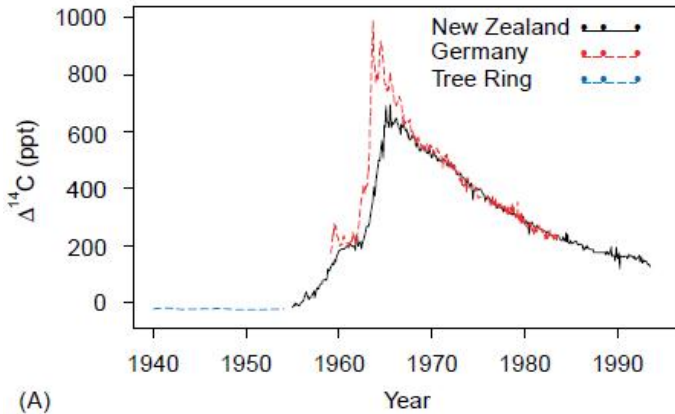


Gambar 2 Sejarah jangka panjang $D^{14}C$ di permukaan Samudra Pasifik diukur dengan E. Druffel di dua terumbu karang. Garis vertikal mengelilingi periode pengujian senjata nuklir di atmosfer. Respon samudra terhadap kontaminasi bom tertunda relatif terhadap atmosfer karena waktu ekuilibrasi yang relatif lama antara laut dan atmosfer untuk $^{14}CO_2$.

Gambar 3A menunjukkan tingkat $D^{14}C$ atmosfer yang terukur dari tahun 1955 sampai sekarang di Selandia Baru (data dari TA Rafter, MA Manning, dan rekan kerja) dan Jerman (data dari KO Munnich dan rekan kerja) serta perkiraan yang lebih tua berdasarkan cincin pohon pengukuran (data dari M. Stuiver). Awal kenaikan yang signifikan pada pertengahan 1950-an menandai pengujian bom hidrogen di atmosfer. Tingkat atmosfer meningkat dengan cepat sejak saat itu hingga pertengahan 1960an. Segera setelah larangan pengujian di atmosfer, tingkat mulai turun yang terus berlanjut hingga saat ini. Tingkat penurunan di atmosfer sekitar $0,055 \text{ y}^{-1}$. Juga jelas terlihat pada gambar tersebut bahwa pengukuran Jerman secara signifikan lebih tinggi daripada yang berasal dari Selandia Baru antara sekitar tahun 1962 dan 1970. Perbedaan tersebut mencerminkan fakta bahwa sebagian besar pengujian atmosfer dilakukan di Belahan Bumi Utara dan dibutuhkan waktu sekitar 1 tahun untuk pencampuran atmosfer di Khatulistiwa. Selama interval tersebut, beberapa di atmosfer $^{14}CO_2$ dilepas. Setelah pengujian atmosfer berhenti, kedua belahan bumi tersebut diimbangi dengan tingkat radiokarbon yang sama.

Gambar 3B menunjukkan data terumbu karang Samudera $D^{14}C$ yang rinci (J.R. Toggwelier dan E. Druffel). Rekor laut permukaan ini menunjukkan peningkatan selama tahun 1960an; Namun, puncaknya terjadi agak lambat daripada di atmosfer dan secara signifikan kurang terasa. Penyidikan data karang secara hati-hati

juga menunjukkan perbedaan utara-selatan yang terbukti dalam catatan atmosfer.



Gambar 3 (A) Detil atmosfer $D^{14}C$ historis seperti yang tercatat dalam cincin pohon untuk waktu sebelum tahun 1955 dan sampel gas di atmosfer dari Selandia Baru dan Jerman selanjutnya.

Peningkatan besar pada akhir 1950-an dan 1960-an disebabkan oleh pengujian senjata nuklir di atmosfer (terutama perangkat fusi). Perbedaan hemispheric selama tahun 1960an adalah karena sebagian besar pengujian bom di atmosfer dilakukan di utara Khatulistiwa dan ada perlawanan terhadap pencampuran atmosfer di ekuator. Tingkat atmosfer mulai menurun tak lama setelah larangan pengujian bom di atmosfer. (B) $D^{14}C$ di permukaan Samudera Pasifik seperti yang tercatat dalam cincin pertumbuhan karang tahunan. Tren umum yang sama terlihat di atmosfer hadir. Puncak pencemaran bom diperluas dan tertinggal dibandingkan dengan atmosfer akibat pencampuran dan waktu yang dibutuhkan untuk transfer dari atmosfer ke laut.

X.2 Teknik *Sampling* dan Pengukuran

Teknik pengukuran radiokarbon sudah ada hanya 50 tahun. Pengukuran ^{14}C pertama dilakukan di W.F. Laboratorium Libby's Chicago pada tahun 1949 dan daftar usia pertama diterbitkan pada tahun 1951. Diperlukan prasyarat untuk penentuan usia adalah pengukuran akurat paruh radiokarbon. Ini dilakukan pada tahun 1949 di laboratorium Antonia Engelkeimer di Laboratorium Nasional Argonne. Antara 1952 dan 1955 beberapa laboratorium penanggalan radiokarbon tambahan dibuka. Pada awal 1960an beberapa kemajuan penting telah terjadi termasuk hal-hal berikut.

Secara signifikan meningkatkan efisiensi penghitungan dan latar belakang yang lebih rendah, menghasilkan presisi pengukuran yang jauh lebih besar dan skala waktu yang lebih lama dimana teknik ini dapat diterapkan.

- Pengembangan teknik ekstraksi dan konsentrasi untuk sampel air laut
- Penentuan waktu paruh yang lebih tepat oleh tiga laboratorium berbeda
- Pengakuan oleh Hans Suess, sementara di USGS dan Scripps Institution of Oceanography, bahwa radiocarbon dalam sampel modern (sejak awal revolusi industri) diencerkan dengan penambahan CO₂ antropogenik ke atmosfer dan biosfer.
- Pengakuan bahwa tingkat atmosfer dan samudra D¹⁴C meningkat sebagai hasil pengujian senjata nuklir di atmosfer.

Selama tahun 1970 dan 1980an perubahan bertahap dalam teknik dan peralatan semakin meningkatkan ketepatan dan menurunkan latar belakang penghitungan. Sehubungan dengan lautan, ini adalah periode pengumpulan sampel, analisis, dan interpretasi. Perubahan signifikan berikutnya terjadi selama tahun 1990an dengan penerapan teknik spektrometri massa akselerator (AMS) untuk sampel laut. Teknik ini menghitung atom ¹⁴C daripada mendeteksi energi yang dilepaskan saat atom ¹⁴C meluruh. Teknik AMS memungkinkan pengurangan ukuran sampel yang dibutuhkan untuk penentuan D¹⁴C samudra dari sekitar 250 liter air menjadi 250 mililiter! Pada tahun

1995 teknik AMS menghasilkan hasil yang sama baiknya dengan teknik terbaik sebelum menggunakan sampel berukuran besar dan penghilangan pembusukan. Prosedur pengurangan ukuran dan otomatisasi bersamaan ini memiliki efek mendalam pada penentuan air laut $D^{14}C$. Banyak teknik AMS dikembangkan dan sebagian besar pengukuran AMS $D^{14}C$ oseanografi telah dilakukan di fasilitas National Ocean Sciences AMS di Woods Hole, Massachusetts, oleh Ann McNichol, Robert Schneider, dan Karl von Reden di bawah arahan awal Glenn Jones dan baru-baru ini John Hayes.

Konsentrasi alami ^{14}C di air laut sangat rendah ($B1_{4109}$ atoms kg^{-1}). Sebelum AMS, satu-satunya teknik yang tersedia untuk mengukur konsentrasi rendah ini adalah penghitungan radioaktif dengan menggunakan detektor kilau proporsional atau cairan baik gas. Sampel yang besar dibutuhkan untuk mendapatkan presisi tinggi dan terus menghitung waktu yang masuk akal. Antara tahun 1960 dan 1995 sebagian besar sampel air radiokarbon terbuka bawah laut dikumpulkan menggunakan sampler Gerard-Ewing yang biasa dikenal dengan sebutan laras Gerard. Desain terakhir laras Gerard terdiri dari silinder stainless steel dengan volume sekitar 270 liter. Sebuah sendok eksternal dan pembagi internal yang menjalankan panjang silinder menghasilkan pembilasan yang efisien sementara laras diturunkan melalui air pada tali kawat. Ketika laras dikembalikan ke dek kapal, air dipindahkan ke wadah yang ketat dan diasamkan untuk mengubah spesies karbonat menjadi CO_2 . CO_2 disapu dari air dengan aliran gas inert dan diserap dalam larutan

natrium hidroksida. Solusinya dikembalikan ke pantai dimana CO₂ diekstraksi, dimurnikan, dan dihitung. Bila dijalankan dengan hati-hati, prosedur menghasilkan hasil yang akurat sampai 2-4 ppt berdasarkan hitungan kesalahan saja. Karena biaya, waktu, dan kesulitan, sampel untuk analisis replikasi hampir tidak pernah dikumpulkan.

Dengan teknik AMS hanya dibutuhkan 0,25 liter air laut. Umumnya sampel air 0,5 liter dikumpulkan di laut dan diracuni dengan HgCl₂ untuk menghentikan semua aktivitas biologis. Air dikembalikan ke laboratorium dan diasamkan, dan CO₂ diekstraksi dan dimurnikan. Aliquot CO₂ dianalisis untuk menentukan d¹³C dan sisanya dikonversi menjadi karbida dan dihitung oleh AMS. Menghitung kesalahan untuk teknik AMS bisa jadi 0,2 ppt, namun, analisis ulangan menunjukkan total kesalahan sampel menjadi sekitar 4,5 ppt.

X. 3 Sejarah *Sampling*

Sejara setelah metode penanggalan radiokarbon dikembangkan, metode ini diterapkan pada sampel laut dan atmosfer. Selama tahun 1950an dan 1960an sebagian besar sampel oseanografi terbatas pada perairan dangkal karena sulitnya pengambilan sampel air dalam yang dikombinasikan dengan ketelitian analisis yang terbatas. Mayoritas sampel awal dikumpulkan di Samudra Atlantik dan Samudera Pasifik Barat Daya. Cakupan sampel awal tidak cukup

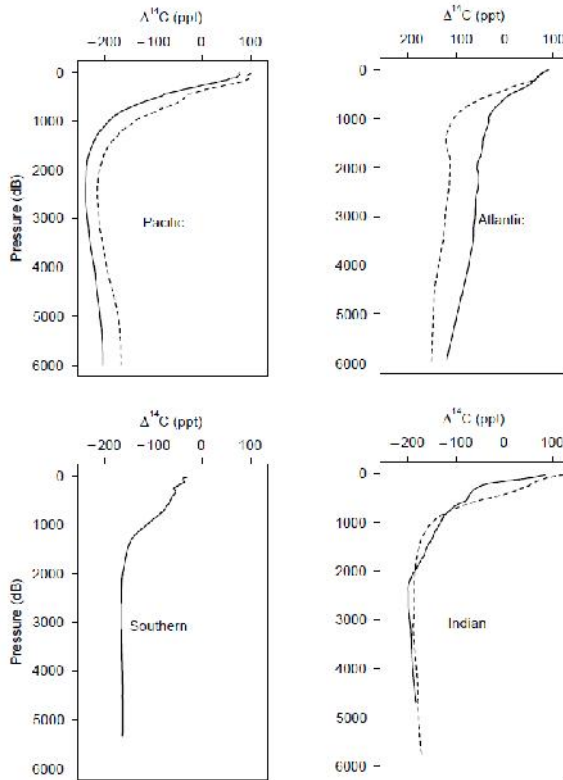
untuk memberikan gambaran yang baik tentang kandungan radiokarbon laut permukaan global sebelum terjadinya pengujian atmosfer terhadap senjata termonuklir; Namun, sampling yang diulang di lokasi yang sama cukup untuk mencatat kenaikan air permukaan karena dampak bom yang dihasilkan oleh bom. Sejarah aktivitas radiokarbon yang sangat baik, termasuk peningkatan akibat tes bom dan penurunan selanjutnya, terutama terjadi sebagai hasil kerja R. Nydal dan rekan kerja (Trondheim) dan K. Munnich dan rekan kerja (Heidelberg).

Aplikasi utama hasil radiokarbon awal adalah untuk memperkirakan fluks CO₂ antara atmosfer dan laut dan waktu tinggal rata-rata di laut. Pengukuran laut bawah permukaan yang cukup dilakukan, terutama oleh W. Broecker (Lamont-Doherty Earth Observatory LDEO) dan H. Craig (Scripps Institution of Oceanography SIO), untuk mengetahui bahwa radiokarbon berpotensi menjadi pelacak penting sirkulasi dan pencampuran laut dalam taraf.

Selama tahun 1970-an, bagian Geochemical Ocean Sections (GEOSECS) menyediakan survei global kolom air pertama secara global mengenai distribusi radiokarbon samudra. Lintasan pelayaran GEOSECS kira-kira meridional melalui pusat cekungan samudra utama. Radiokarbon diambil sampelnya dengan jarak stasiun sekitar 500km dan rata-rata 20 sampel per stasiun. Semua pengukuran GEOSECS D¹⁴C dilakukan oleh G. O' stlund (University of Miami) dan M. Stuiver (Universitas Washington) dengan menggunakan

penghitungan $\delta^{14}\text{C}$ sampel air dengan volume tinggi dengan akurasi perhitungan ± 0.1 ppt. Hasil GEOSECS merevolusi apa yang diketahui tentang distribusi $\delta^{14}\text{C}$ samudra dan aplikasi yang digunakan untuk radiokarbon.

Pada awal tahun 1980an, Samudera Atlantik kembali disurvei untuk radiokarbon sebagai bagian dari program Pelacak Transient dalam program Studi Atlantik Utara (TTO) North Atlantic Study (NAS) dan Tropical Atlantic Study (TAS) dan Percobaan Ventilasi Atlantik Selatan (SAVE). Sampling untuk program ini dirancang untuk memungkinkan pemetaan distribusi properti pada tekanan konstan atau permukaan kerapatan dengan ketidakpastian yang masuk akal. Bagian radiokarbon dari program ini diarahkan oleh W. Broecker. O'Neil membuat pengukuran $\delta^{14}\text{C}$ dengan $\delta^{13}\text{C}$ yang diberikan oleh Stuiver menggunakan prosedur GEOSECS. Perbandingan hasil TTO dengan GEOSECS memberikan bukti jelas pertama tentang penetrasi sinyal radiokarbon yang dihasilkan bom ke perairan Atlantik di bawah permukaan laut. Prancis melakukan program skala kecil (INDIGO) $\delta^{14}\text{C}$ di Samudra Hindia selama ini dengan O'Neil dan P. Quay (University of Washington) berkolaborasi. Data ini juga mengukur perubahan laut atas sejak GEOSECS dan mengandalkan teknik yang sama.



Gambar 4 Profil D^{14}C vertikal rata-rata untuk cekungan samudra utama. Kecuali Samudra Selatan garis putus-putus adalah untuk Belahan Bumi Selatan dan garis padat untuk Belahan Bumi Utara. Profil Pacific dan Southern Ocean disusun dari data WOCE; profil Atlantik dari data TTO dan SAVE; dan profil Samudera Hindia dari data GEOSECS. Di sekitar 1000 m (¼1000 dB) dari setiap profil, D^{14}C alami terkontaminasi dengan radiokarbon yang dihasilkan bom.

Survei kelautan terbaru dilakukan pada tahun 1990an sebagai bagian dari Eksperimen Sirkulasi Kelautan Dunia (WOCE). Program ini merupakan upaya multinasional. Upaya sampling ^{14}C AS sangat terfokus pada Pasifik (1991-1993) dan samudra India (1995-1996) karena TTO dan SAVE telah memberikan cakupan Atlantik yang masuk akal. R. Key (Universitas Princeton) mengarahkan usaha radiokarbon AS dengan kolaborasi dari P. Schlosser (LDEO) dan Quay. Di Pasifik dalam dimana gradien diketahui kecil, sebagian besar sampling radiokarbon dilakukan dengan teknik b-volume b terbukti. Termoklin Pasifik, bagaimanapun, diambil sampelnya dengan menggunakan teknik AMS. Teknik peralihan memungkinkan air termoklin dijadikan sampel sekitar kira-kira 2-3 kali kerapatan horizontal yang digunakan untuk pengambilan sampel volume besar. Ostlund dan Stuiver lagi mengukur sampel volume besar sementara sampel AMS diukur di fasilitas National Ocean Sciences AMS (NOSAMS) di Woods Hole Oceanographic Institution. Pada tahun 1994, ketelitian analitik di NOSAMS telah meningkat sampai pada titik dimana semua sampling US Ocean Ocean WOCE ^{14}C menggunakan teknik ini. Pengambilan sampel WOCE meningkatkan jumlah total hasil ^{14}C untuk Samudra Pasifik dan Hindia oleh kira-kira urutan besarnya. Analisis sampel Samudra Pasifik selesai pada tahun 1998. Pengambilan sampel US WOCE ^{14}C di Atlantik dibatasi pada dua bagian zonal di cekungan barat laut dengan menggunakan teknik AMS. Analisis sampel Atlantik dan Samudra Hindia diperkirakan akan selesai pada tahun 2000-2001.

⁴C Distribution and Implications for Large-scale Circulation

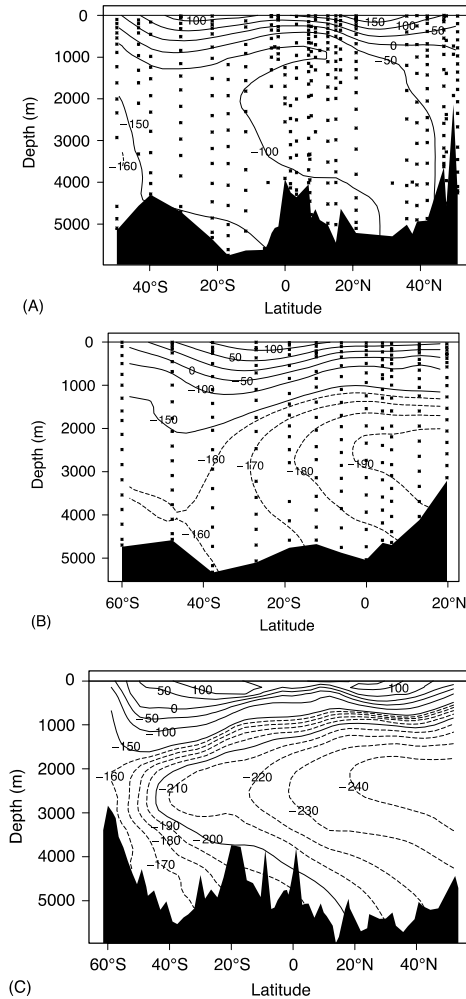
Distribusi radiokarbon di laut dikendalikan oleh tingkat produksi di atmosfer, variabilitas spasial dan besarnya fluks ¹⁴CO₂ melintasi antarmuka udara-laut, sirkulasi dan pencampuran samudera, dan siklus karbon di laut. Gambar 4 menunjukkan profil radiokarbon vertikal rata-rata untuk samudra Pasifik, Atlantik, Selatan, dan India dengan garis putus-putus menjadi cekungan selatan dan cekungan dataran tinggi padat. Semua profil memiliki D₁₄C yang lebih tinggi di perairan dangkal, yang mencerminkan jarak dengan sumber atmosfer. Waktu pengumpulan yang berbeda dikombinasikan dengan penetrasi sinyal yang dihasilkan bom ke termoklin bagian atas meniadakan kemungkinan perbandingan terperinci untuk 600-800 dB atas (lebih dalam untuk Atlantik Utara). Perbandingan terperinci dibenarkan untuk tingkat yang lebih dalam. Sinyal terkuat di perairan dalam dan bawah adalah bahwa Atlantik Utara secara signifikan lebih muda (D¹⁴C yang lebih tinggi) daripada Atlantik Selatan, sementara yang berlawanan berlaku untuk Pasifik. Kedua, usia rata-rata air dalam meningkat (penurunan D¹⁴C) dari Atlantik sampai India ke Pasifik. Ketiga, Southern Ocean D¹⁴C sangat seragam di bawah sekitar 1800 dB pada tingkat tertentu (B₁₆₀ ppt). Ini mirip dengan nilai air di dekat dasar untuk ketiga cekungan samudera selatan. Ketiga perbedaan tersebut secara langsung terkait dengan sirkulasi termohalin berskala besar.

Gambar 5 menunjukkan bagian meridional untuk samudera Atlantik, India dan Pasifik yang menggunakan himpunan bagian data dari Gambar 4. Seperti pada Gambar 4, nilai $D^{14}C$ di kolom air atas telah meningkat dengan invasi sinyal bom. Pola kontur ini, bagaimanapun, umumnya mewakili sinyal $D^{14}C$ alami. Kontur $D^{14}C$ $\frac{1}{4}$ -100% dapat diambil sebagai perkiraan demarkasi antara perairan yang terkontaminasi bom dan yang hanya memiliki radiokarbon alami. Perbandingan fitur utama di setiap bagian menunjukkan bahwa distribusi $D^{14}C$ meridional di Samudra Pasifik dan Hindia sangat mirip. Perbedaan terbesar di antara keduanya adalah bahwa perairan dalam Samudra Hindia (1500-3500 m) secara signifikan lebih muda dari perairan dalam Pasifik di kedua samudra:

- Bagian bawah air paling dekat memiliki $D^{14}C$ yang lebih tinggi dari pada air dalam yang dalam
- Perairan dalam dan bawah memiliki $D^{14}C$ yang lebih tinggi di selatan daripada utara
- Nilai $D^{14}C$ terendah ditemukan sebagai lidah yang membentang ke selatan dari ujung utara bagian pada kedalaman B2500 m.
- Air dalam dan bawah di ujung selatan setiap bagian relatif seragam dengan $D^{14}C$ $\frac{1}{4}$ -100%
- Gradien $D^{14}C$ dengan garis lintang dari selatan ke utara kira-kira sama untuk perairan dalam dan perairan bawah

- Kontur $D^{14}C$ di kantung termoklin baik di khatulistiwa dan lintang tinggi. (Fitur ini ditekan di Samudra Hindia Utara karena jangkauan geografisnya yang terbatas dan pengaruh arus melalui wilayah Laut Indonesia dan Laut Arab).

Di Samudra Atlantik, pola di perairan dangkal di bawah termoklin atas mirip dengan di lautan lainnya. Distribusi $D^{14}C$ di perairan dalam dan bawah Atlantik, bagaimanapun, sangat berbeda. Satu-satunya kesamaan dengan lautan lainnya adalah (1) nilai $D^{14}C$ untuk air and bottom dalam pada bagian selatan bagian ini, (2) lidah yang mengarah ke selatan di perairan dalam, dan (3) arus utara yang tampak ditunjukkan oleh titik -bagian lidah berbentuk kontur. Air dalam Atlantik memiliki $D^{14}C$ yang lebih tinggi daripada air bawahnya, dan perairan dalam dan bawah di ujung utara bagian ini lebih tinggi daripada $D^{14}C$ yang lebih rendah seperti yang ditemukan di India dan Pasifik. Selain itu, perairan Atlantik jauh di dalam dan bawah memiliki nilai yang relatif seragam daripada gradien vertikal yang kuat.



Gambar 5 Bagian meridional tipikal untuk masing-masing samudera yang disusun dari subkumpulan data yang digunakan untuk Gambar 4. Pola kontur air dalam terutama disebabkan oleh sirkulasi termohalin berskala besar. Nilai $D^{14}C$ air dalam yang paling tinggi

ditemukan di Atlantik Utara dan yang terendah di Pasifik Utara. $D^{14}C$ alami di laut bagian atas terkontaminasi oleh masuknya bom yang dihasilkan radiokarbon

Pembalikan gradien $D^{14}C$ Atlantik dalam dan bawah air dengan garis lintang relatif terhadap yang ada di India dan Pasifik disebabkan oleh kenyataan bahwa hanya Atlantik yang memiliki kondisi suhu dan salinitas di permukaan (di Lautan-Norwegia Laut dan Laut Labrador daerah) yang memungkinkan terbentuknya massa air dalam (biasanya disebut sebagai North Atlantic Deep Water, NADW). NADW yang terbentuk baru mengalir menuruni lereng dari daerah formasi hingga mencapai tingkat daya apung netral. Aliran kemudian ke selatan, terutama sebagai batas barat barat saat ini dibatasi oleh topografi lereng Amerika Utara. Dalam perjalanan ke selatan, NADW bertemu dan mengesampingkan perairan padat yang berasal dari dataran tinggi circumpolar. Pola sirkulasi umum ini dapat ditunjukkan dengan sangat jelas dengan membandingkan invasi sinyal tritium dan radiokarbon yang dihasilkan bom yang diperoleh selama GEOSECS dari program TTO. Pola sirkulasi yang besar ini membawa pada distribusi $D^{14}C$ yang teramati di Atlantik dalam.

Karena baik Pasifik maupun Samudra Hindia memiliki sumber belahan bumi utara yang dalam, sirkulasi besar lebih sederhana. Perairan Pasifik terpadat berasal dari Samudra Selatan dan mengalir ke utara sepanjang dasar laut (Circumpolar Deep Water, CDW). Di

Samudra Selatan, CDW sebagian berventilasi, baik dengan kontak langsung dengan atmosfer atau dengan mencampur dengan air yang telah menghubungi atmosfer, menghasilkan D14C yang agak tinggi. Saat CDW mengalir ke utara, berabad-abad, menghangat, bercampur dengan air di atasnya, dan perlahan naik ke atas. Ini upwelling, dikombinasikan dengan pencampuran dengan perairan termoklin bawah yang di atas, menghasilkan massa air yang biasa dikenal dengan Pacific Deep Water (PDW). PDW memiliki nilai D14C terendah yang ditemukan di mana saja di lautan. Pola arus rata-rata jangka panjang untuk PDW agak kontroversial; Namun, distribusi radiokarbon mendukung aliran selatan dengan inti aliran yang berpusat di sekitar 2.500 m. Hasil WOCE lebih jauh menyiratkan bahwa jika ada aliran selatan PDW yang pasti, hal itu mungkin terkonsentrasi ke arah timur dan ke barat daripada didistribusikan secara merata secara zonal. Gambar 6 menunjukkan bagian Pacific WOCE D14C zonal pada 321S berkontur pada interval yang sama seperti bagian sebelumnya. PDW diidentifikasi oleh lapisan minimum antara 2000 dan 3000 m. Inti PDW tampak terpisah menjadi dua saluran, satu di lereng Amerika Selatan dan yang lainnya di atas Palung Kermadec. Nilai minimum sebenarnya pada yang terakhir ditemukan di B1701W, yang pada dasarnya berada di dinding barat parit. CDW yang mengalir ke utara juga ditunjukkan dengan jelas di bagian ini oleh nilai D¹⁴C yang relatif tinggi di dekat bagian bawah antara 1401W dan Garis Tanggal.

Sedikit yang telah dikatakan tentang nilai $D^{14}C$ alami yang ditemukan di laut bagian atas dimana radiokarbon yang diproduksi oleh bom lazim. Sampel GEOSECS dikumpulkan hanya B10 tahun setelah maksimum di atmosfer $D^{14}C$. Pengukuran permukaan air GEOSECS hampir selalu memiliki nilai $D^{14}C$ tertinggi. Dua puluh tahun kemudian selama WOCE, $D^{14}C$ maksimum umumnya di bawah permukaan.

Broecker dan Peng (1982, hal 415, Angka 8-19) mengumpulkan beberapa pengukuran permukaan laut $D^{14}C$ yang dibuat sebelum mengotori kontaminasi bom dibandingkan dengan data permukaan laut GEOSECS. Untuk Samudera Atlantik dan Pasifik, plot mereka dari $D^{14}C$ versus garis lintang menunjukkan bentuk 'M' karakteristik dengan nilai $D^{14}C$ maksimum sekitar ~ 50 ppt yang berpusat di gyres laut utama antara garis lintang 20 $^{\circ}$ dan 40 $^{\circ}$. Masing-masing samudra memiliki nilai $D^{14}C$ relatif minimum kira-kira ~ 70 ppt di garis lintang khatulistiwa, 20 $^{\circ}$ S sampai 20 $^{\circ}$ N dan minima pada garis lintang tinggi mulai dari ~ 70 ppt untuk Atlantik Utara sampai ~ 150 ppt untuk garis lintang tinggi lainnya. Pengukuran pra-bom di Samudera Hindia sangat jarang; Namun, beberapa data yang ada menyiratkan distribusi serupa. Data permukaan laut GEOSECS memiliki bentuk 'M' yang sama; Namun, semua nilai meningkat secara signifikan karena kontaminasi yang berasal dari bom dan polanya sedikit asimetris tentang ekuator dengan Belahan Bumi Utara yang memiliki nilai lebih tinggi karena sebagian besar tes bom di atmosfer dilakukan di sana. Bentuk 'M' dari $D^{14}C$ dengan garis

lintang adalah karena pola sirkulasi, waktu tinggal air permukaan di wilayah laut, dan nilai tukar gas udara-laut. Pada pertengahan garis lintang kolom air relatif stabil dan perairan permukaan cukup lama untuk menyerap sejumlah ^{14}C dari atmosfer. Di zona khatulistiwa, upwelling perairan yang lebih dalam (dan karena itu menurunkan D^{14}C) menurunkan nilai laut permukaan. Pada garis lintang tinggi, terutama di Samudra Selatan, permukaan air dekat relatif tidak stabil, menghasilkan waktu tinggal singkat. Di daerah-daerah yang diakuisisi D^{14}C dari atmosfer lebih dari sekedar kompensasi upwelling, mixing, dan konveksi.

Perbandingan untuk data permukaan GEOSECS dan WOCE dari Samudra Pasifik juga diberikan. Nilai GEOSECS D^{14}C lebih tinggi daripada WOCE dimana saja kecuali untuk Equator. Bedanya karena dua faktor. Pertama, GEOSECS sampling terjadi sesaat setelah di atmosfer maksimum. Saat itu gradien D^{14}C udara-laut itu besar dan nilai samudra permukaan D^{14}C didominasi oleh proses pertukaran gas laut-udara. Kedua, pada tahun 1990an, tingkat atmosfer D^{14}C telah menurun secara signifikan dan waktu yang cukup telah terjadi untuk pencampuran laut untuk bersaing dengan pertukaran udara laut dalam hal mengendalikan nilai laut permukaan. Selama tahun 1990an, nilai samudra maksimum D^{14}C sering di bawah permukaan. Dekat Khatulistiwa situasinya berbeda. Upwelling signifikan terjadi di zona ini. Selama GEOSECS, perairan yang berada di dataran rendah di Pasifik belum terkontaminasi dengan bom radiokarbon. Dua puluh tahun

kemudian, perairan upwelling telah mendapatkan komponen radiokarbon bom

Sementara permukaan laut $D^{14}C$ umumnya menurun antara GEOSECS dan WOCE, nilai sepanjang kilometer atas kolom air umumnya meningkat karena pencampuran dan advokasi yang dibawa bom menghasilkan radiokarbon ke termoklin bagian atas. Hasil dari proses ini pada sinyal $D^{14}C$ yang diproduksi bom dapat divisualisasikan dengan membandingkan distribusi Gangguan Geosek dan WOCE. Gambar 8 menunjukkan perbandingan seperti itu. Untuk menghasilkan angka ini, data WOCE dari bagian P16 (1521W) digenggam (panel tengah). Data GEOSECS yang dikumpulkan di sebelah timur garis data kemudian digores ke grid yang sama (panel atas). Setelah disiapkan, kedua bagian itu hanya dikurangkan kotak grid dengan kotak grid (panel bawah). Salah satu fitur dari Gambar 8 adalah asimetri tentang Khatulistiwa. Peningkatan terbesar (sampai 60 ppt) sepanjang bagian ini ada di termoklin mid-lintang Belahan Selatan pada kedalaman 300-800 m. Perubahan konsentrasi ini menurun baik dalam kedalaman maupun besarnya menuju khatulistiwa. Semua isolat kerapatan potensial yang melewati kawasan singkapan ini meningkat secara signifikan (dashed lines in the bottom panel) di Samudera Selatan. Singkapan ini (terutama selama musim dingin di austral) memberikan jalur utama dimana radiokarbon memasuki termoklin Pasifik Selatan. Di Pasifik Utara, penurunan permukaan laut meluas sebagai gumpalan sumur ke dalam kolom air (> 200 m). Perubahan besar ini

disebabkan oleh konsentrasi permukaan yang sangat tinggi yang diukur selama GEOSECS dan proses pencampuran dan ventilasi bawah permukaan yang telah mengencerkan atau menyebarkan sinyal puncak. Nilai yang berkontur di panel bawah mewakili perubahan $D^{14}C$ antara dua survei, bukan total bom $D^{14}C$.

Distribusi $D^{14}C$ di permukaan Samudera Pasifik dicatat oleh program GEOSECS di awal tahun 1970an dan program WOCE di awal tahun 1990an. Dari Gambar 3B, GEOSECS mencatat kontaminasi bom maksimum. Selama 20 tahun memisahkan program, pencampuran dan adveksi membubarkan sinyal. Pada saat WOCE tingkat kontaminasi maksimum ditemukan di bawah permukaan di banyak lokasi. Asimetri tentang Khatulistiwa dalam data GEOSECS adalah hasil dari sebagian besar pengujian bom atmosfer yang dieksekusi di Belahan Bumi Utara.

Hasil WOCE dari Samudera Hindia belum tersedia. Begitu mereka berubah sejak GEOSECS di Samudera Hindia Selatan harus sangat mirip dengan yang ada di Pasifik Selatan karena jalur sirkulasi dan ventilasi serupa. Perubahan di Samudera Hindia Utara sulit diprediksi karena masukan air dari Laut Merah dan wilayah aliran lumpur Indonesia dan pola sirkulasi monsoonal yang berubah.

Goote Oestlund dan Claes Rooth menggambarkan perubahan radiokarbon di Samudera Atlantik Utara dengan menggunakan data dari GEOSECS (1972) dan Studi Atlantik Utara TTO (1981-1983). Pola perubahan yang mereka catat berbeda dengan yang terjadi di

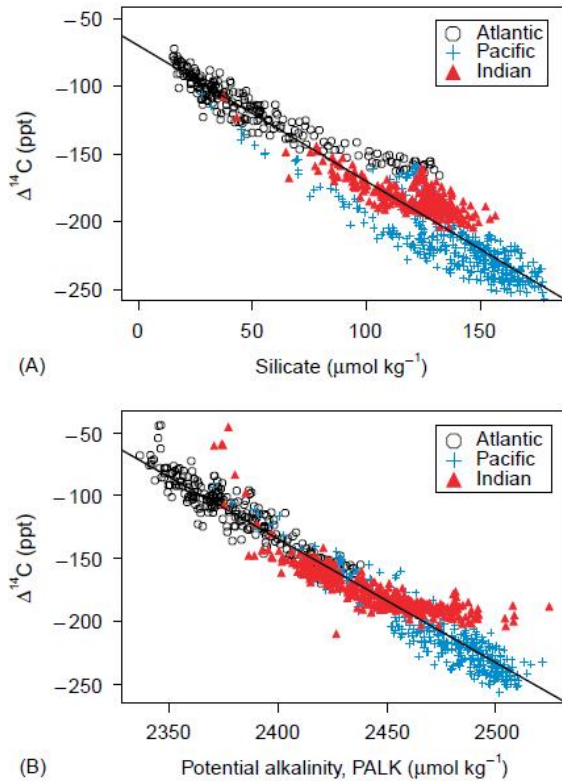
Pasifik karena perbedaan sirkulasi termohalin yang disebutkan sebelumnya. Sebelum tenggelam, air formasi untuk NADW berada di permukaan laut cukup lama untuk mengambil sejumlah besar radiokarbon bom dari atmosfer. Pola sirkulasi ditambah dengan waktu sampling GEOSECS dan TTO menghasilkan peningkatan kadar D14C selama program yang terakhir. Perubahan signifikan sebagian besar terbatas pada wilayah perairan dalam di utara lintang 401N. Ketika sampel Atlantik WOCE dianalisis, kami berharap dapat melihat perubahan yang semakin ke selatan.

X. 4 Memisahkan Komponen Alami dan Bom

Sampai saat ini pembahasannya terbatas pada perubahan distribusi radiokarbon karena serapan samudra dari radiocarbon yang dihasilkan bom. Banyak aplikasi radiokarbon, bagaimanapun, tidak memerlukan perubahan tapi distribusi bom atau radiokarbon alami. Pengukuran air laut memberikan total D14C yang mengandung bahan alami. Karena keduanya identik secara kimia dan fisik, tidak ada prosedur analitik yang dapat membedakan satu dari yang lain. Pengukuran D14C terlalu sedikit dilakukan di samudra atas sebelum terkontaminasi oleh komponen bom agar kita tahu distribusi samudra alam atas D14C.

Salah satu pendekatan pemisahan yang diturunkan oleh Broecker dan rekan kerja di LDEO menggunakan fakta bahwa D14C berkorelasi linier dengan silikat di perairan di bawah kedalaman

penetrasi bom-14C. Dengan mengasumsikan korelasi yang sama meluas ke perairan dangkal, D14C alami dapat diperkirakan untuk termoklin atas dan permukaan air dekat. Nilai pra-bom untuk permukaan laut diperkirakan dari beberapa pengukuran permukaan laut pra-bom. Metode silikat terbatas pada perairan beriklim sedang dan rendah karena korelasi gagal pada lintang tinggi, terutama untuk perairan dengan konsentrasi silikat tinggi. Pekerjaan yang lebih baru oleh S. Rubin dan R. Key menunjukkan bahwa alkalinitas potensial (alkalinitas nitrat yang dinormalisasi sampai salinitas 35) mungkin merupakan variabel yang lebih baik daripada silikat dan dapat digunakan pada semua garis lintang. Gambar 6 mengilustrasikan korelasi silikat dan PALK dengan menggunakan kumpulan data GEOSECS. Terlepas dari co-variable, korelasi tersebut digunakan untuk memperkirakan pre-bomb D14C di daerah yang terkontaminasi. Perbedaan antara D14C alami yang diukur dan diperkirakan adalah D14C yang diproduksi bom.



Gambar 6 Perbandingan korelasi $\Delta^{14}\text{C}$ alami dengan silikat (A) dan alkalinitas potensial (PALK $\frac{1}{4}$ [alkalinitas nitrate] $\frac{1}{35}$ / salinitas) (B) menggunakan data global GEOSECS. Sampel dari lintang selatan tinggi dikecualikan dari relasi silikat. Kehadiran tritium digunakan untuk menduga adanya bom- $\Delta^{14}\text{C}$. Nilai PALK yang agak anomali tinggi dari Samudra Hindia berasal dari zona produktivitas tinggi dan mungkin dipengaruhi oleh fiksasi nitrogen dan / atau fluks partikel.

Metode silikat dan potensi alkalinitas (PALK) diilustrasikan dan dibandingkan. Panel atas (A) menunjukkan D14C yang diukur dan perkiraan D14C alami menggunakan kedua metode. Bom D14C kemudian hanya selisih antara nilai terukur dan perkiraan nilai alami (B). Untuk contoh ini, diambil dari garis tengah Pasifik, dua perkiraan cukup dekat; Namun hal ini tidak selalu benar.

Pada bagian atas 1000m dari bagian Pacific WOCE D14C yang ditunjukkan pada Gambar 5C direproduksi. Hal ini menunjukkan perkiraan D14C alami dengan menggunakan metode alkalinitas potensial. Bentuk dua set kontur sangat mirip; Namun, nilai kontur dan gradien vertikal sangat berbeda, menggambarkan pengaruh kuat bom yang dihasilkan radiokarbon di laut bagian atas. Perbedaan terpadu antara kedua bagian ini akan menghasilkan perkiraan persediaan D14C yang diproduksi bom untuk bagian tersebut.

X.5 Aplikasi Oseanografi

Seperti yang digambarkan, distribusi D14C dapat digunakan untuk menyimpulkan pola sirkulasi berskala besar secara umum. Aplikasi yang paling berharga untuk radiokarbon berasal dari fakta bahwa radioaktif dan memiliki waktu paruh yang sesuai untuk mempelajari proses samudra dalam dan bahwa komponen bom bersifat sementara dan berguna sebagai pelacak untuk proses laut atas. Beberapa penggunaan yang lebih umum dijelaskan di bawah ini.

X.6 Ventilasi dan Pencampuran Laut Dalam

X.6.1 Laju dan Waktu tinggal

Karena pengukuran radiokarbon bawah permukaan pertama, salah satu aplikasi utama adalah penentuan tingkat ventilasi laut dalam. Sebagian besar perhitungan ini menggunakan model kotak untuk mendekati sistem samudra. Perkiraan pertama tersebut menghasilkan waktu tinggal rata-rata untuk berbagai lembah laut dalam dan abyssal 350-900 tahun. Solusi dari model ini umumnya mengasumsikan sirkulasi steady-state, sumber air yang dapat diidentifikasi dengan $D^{14}C$ yang diketahui, tidak ada pencampuran antara massa air, dan tidak ada sumber biologis atau sink yang signifikan. Pendekatan awal lainnya mengasumsikan bahwa distribusi vertikal radiokarbon di laut dalam dan abyssal dapat digambarkan dengan persamaan difusi vertikal. Jenis perhitungan ini menghasilkan perkiraan pengaruh fluks dan pelarutan partikel biologis dan tingkat upwelling dan difusi vertikal. Pendekatan difusi vertikal 1D telah ditinggalkan untuk kalkulasi 2D dan 3D sebagai data yang tersedia dan pengetahuan kita tentang proses samudra telah meningkat.

Ketika data GEOSECS tersedia, model kotak digunakan lagi untuk memperkirakan waktu tinggal dan fluks massa untuk samudra abyssal. Dalam hal ini model hanya memiliki empat kotak, satu untuk wilayah dalam (41500 m) dari setiap lautan. Formasi air bawah yang baru (NADW dan Antartika Bottom Water, AABW)

dimasukkan sebagai masukan ke kotak Atlantik dan Sirkumpolar. Upwelling diizinkan di kotak Atlantik, Pasifik, dan India dan pertukaran dipertimbangkan di antara kotak Circumpolar dan masing-masing dari tiga kotak samudra lainnya. Hasil dari perhitungan ini memberi waktu penggantian rata-rata 510, 250, 275, dan 85 tahun untuk Pasifik dalam, India, Atlantik, dan Samudra Selatan, masing-masing, dan 500 tahun untuk perairan dalam di seluruh dunia. Tingkat kenaikan diperkirakan 4-5my₁ dan transportasi umum umumnya disepakati dengan perhitungan geostropika kontemporer. Menerapkan model yang sama ke kumpulan data yang lebih baru akan menghasilkan hasil yang sama.

X.6.2 Laju penggunaan oksigen

Radiokarbon dapat digunakan untuk menentukan tingkat proses biologis atau geokimia seperti tingkat di mana oksigen dikonsumsi di perairan laut dalam. Contoh paling sederhana dari hal ini adalah kasus massa air yang bergerak menjauh dari daerah sumber pada tingkat yang stabil, menjalani pengambilan oksigen biologis konstan dan tidak mengalami pencampuran. Dalam situasi seperti itu tingkat pemanfaatan oksigen dapat diperoleh dari kemiringan oksigen versus ¹⁴C di unit yang sesuai. Perkiraan terdekat dengan situasi ini adalah pengangkutan CDW ke utara dari Pasifik Utara, walaupun persyaratan pencampuran hanya perkiraan. Plot semacam itu untuk sampel Samudra Pasifik WOCE dari kedalaman lebih dari 4000m dan utara 40^oS dapat diambil. Dalam hal ini, pemanfaatan oksigen

yang nyata (konsentrasi oksigen jenuh pada suhu ekuilibrasi - konsentrasi oksigen yang diukur) daripada konsentrasi oksigen diplot, untuk menghilangkan efek suhu pada kelarutan oksigen. Kemiringan kuadrat terkecil 0,83 mmol kg₋₁ per ppt berpindah menjadi 0,1 mmol kg₋₁ y₋₁ untuk tingkat pemanfaatan oksigen. Umumnya, pencampuran dengan massa air lainnya harus dipertanggungjawabkan sebelum mengevaluasi gradien. Dengan perkiraan bervariasi atau tambahan, perhitungan yang sangat mirip telah digunakan untuk memperkirakan tingkat pembentukan rata-rata berbagai massa air dalam.

X.6.3 Model Kalibrasi Sirkulasi Samudera

Oceanographic data are seldom of value for prediction. Additionally, the effect of a changing oceanographic parameter on another parameter can be difficult to discern directly from data. These research questions are better investigated with numerical ocean models. Before an ocean model result can be taken seriously, however, the model must demonstrate reasonable ability to simulate current conditions. This generally requires that various model inputs or variables be 'tuned' or calibrated to match measured distributions and rates. Radiocarbon is the only common measurement that can be used to calibrate the various rates of abyssal processes in general circulation models. M. Fiadeiro carried out the first numerical simulation for the abyssal Pacific and used the GEOSECS ¹⁴C data

to calibrate the model. J.R. Toggweiler extended this study using a global model.

Data oseanografi jarang bernilai untuk prediksi. Selain itu, pengaruh parameter oseanografi yang berubah pada parameter lain dapat sulit dilihat secara langsung dari data. Pertanyaan penelitian ini lebih baik diselidiki dengan model samudra numerik. Sebelum hasil model samudra dapat dianggap serius, bagaimanapun, model tersebut harus menunjukkan kemampuan yang masuk akal untuk mensimulasikan kondisi saat ini. Ini umumnya mensyaratkan bahwa berbagai input model atau variabel 'disetel' atau dikalibrasi agar sesuai dengan distribusi dan tarif yang terukur. Radiokarbon adalah satu-satunya pengukuran umum yang dapat digunakan untuk mengkalibrasi berbagai tingkat proses abyssal pada model sirkulasi umum. M. Fiadeiro melakukan simulasi numerik pertama untuk abyssal Pacific dan menggunakan data GEOSECS ^{14}C untuk mengkalibrasi model. J.R. Toggweiler memperluas penelitian ini dengan menggunakan model global.

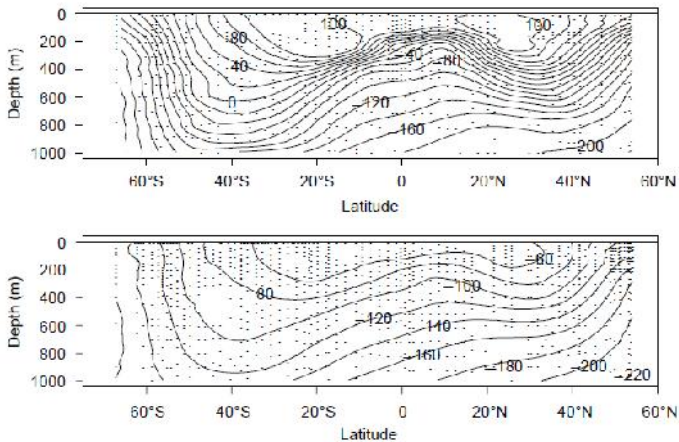


Figure 7 Upper thermocline meridional sections along 1521 W in the central Pacific. (A) The same measured data as in Figure 5C (B) An estimate of thermocline $D^{14}C$ values prior to the invasion of bomb-produced radiocarbon.

Bagian meridional termoklin atas sepanjang 1521 W di Pasifik tengah. (A) Data pengukuran yang sama seperti pada Gambar 5C (B) Perkiraan nilai $D^{14}C$ termoklin sebelum invasi radiokarbon yang dihasilkan bom

Pemanfaatan oksigen yang jelas diplot terhadap $D^{14}C$ yang diukur untuk sampel Samudera Pasifik WOCE yang diambil pada kedalaman lebih dari 4000m dan utara 401S. Kemiringan garis (0.8317; 0.015) dapat digunakan untuk memperkirakan perkiraan tingkat pemanfaatan oksigen 0,1 mmol kg₋₁ y₋₁ jika kondisi mapan dan tidak ada pencampuran dengan massa air lainnya. Both the

Fiadeiro and Toggweiler models, and all subsequent models that include the deep water $D^{14}C$, are of coarse resolution owing to current computer limitations. As the much larger WOCE 14C data set becomes available, the failure of these models, especially in detail, becomes more evident. Toggweiler's model, for example, has advective mixing in the Southern Ocean that is significantly greater than supported by data. Additionally, the coarse resolution of the model prevents the formation of, or at least retards the importance of, deep western boundary currents. Significant model deficiencies appear when the bomb- ^{14}C distribution and integrals at the time of GEOSECS and WOCE are compared with data.

Model Fiadeiro dan Toggweiler, dan semua model berikutnya yang mencakup $D^{14}C$ dalam air, memiliki resolusi kasar karena keterbatasan komputer saat ini. Karena kumpulan data WOCE ^{14}C yang jauh lebih besar tersedia, kegagalan model ini, terutama secara rinci, menjadi lebih jelas. Model Toggweiler, misalnya, memiliki pencampuran advectif di Samudera Selatan yang secara signifikan lebih besar daripada didukung oleh data. Selain itu, resolusi kasar model mencegah pembentukan, atau paling tidak menghambat pentingnya, arus batas barat yang dalam. Defisiensi model yang signifikan muncul saat distribusi dan integral bom- ^{14}C pada saat GEOSECS dan WOCE dibandingkan dengan data.

Selama 10 tahun terakhir jumlah dan variasi model samudra numerik telah berkembang pesat, sebagian besar karena ketersediaan

dan kecepatan komputer modern. Model Intercomparison Ocean Carbon Model (OCMIP) membawa pemodel laut bersama dengan pakar data dalam upaya terorganisir pertama untuk membandingkan hasil model dengan data, dengan tujuan jangka panjang untuk memahami proses yang menyebabkan perbedaan model dan meningkatkan kemampuan prediksi dari model. Aspek unik dari penelitian ini adalah bahwa setiap kelompok peserta pada dasarnya 'membekukan' pengembangan fisika dasar dalam model mereka dan kemudian menggunakan kondisi batas dan pemaksaan yang sama untuk menghilangkan sebanyak mungkin variabel potensial. Radiokarbon, yang berasal dari bom dan alami, digunakan sebagai pelacak di setiap model untuk memeriksa pertukaran gas laut-udara dan sirkulasi jangka panjang. Tag di sudut kiri atas setiap panel mengidentifikasi institusi kelompok pemodelan. Semua hasil model dan data berwarna dan diskalakan secara identik dan bagian dari bagian yang mengandung bom radiokarbon telah ditutupi. Sementara semua model mendapatkan bentuk umum dari kontur, konsentrasinya sangat bervariasi. Perbandingan terperinci saat ini sedang berlangsung, namun pemeriksaan sepintas menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam semua hasil model dan perbedaan model-ke-model yang luar biasa. Perbandingan serupa dapat dilakukan dengan fokus pada komponen bom. Hasil radiokarbon ini belum dipublikasikan, namun gambaran umum program OCMIP-2 dapat ditemukan dalam karya Dutay pada chlorofluorocarbon pada model yang sama (lihat Bacaan Lebih Lanjut).

X.6.4 Pertukaran Udara-Gas Laut dan Tingkat Ventilasi Termoklin

Radiokarbon telah digunakan untuk memperkirakan nilai tukar gas laut-udara hampir selama pengukuran di atmosfer dan lautan. Umumnya, perhitungan ini didasarkan pada model kotak, yang keduanya termasuk dan mengecualikan pengaruh kontaminasi bom. W. Broecker dan T.-H. Peng meringkas upaya untuk memperkirakan tingkat transfer udara-laut sampai 1974 dan memberikan contoh berdasarkan hasil GEOSECS menggunakan model bom alami dan bom-¹⁴C dan stagnan. Dalam hal ini, langkah pembatas laju transfer dianggap sebagai difusi molekuler gas melintasi lapisan tipis yang memisahkan lapisan campuran lautan dari atmosfer. Dalam model ini, jika seseorang mengasumsikan steady state untuk distribusi ¹⁴C dan ¹²C dan seragam ¹⁴C/¹²C untuk atmosfer dan permukaan laut maka jumlah ¹⁴C yang masuk ke laut harus diimbangi dengan pembusukan. Untuk model ini solusinya diberikan oleh eqn [3].

$$\frac{D}{z} = \frac{\sum [\text{CO}_2]_{\text{ocean}} V}{\sum [\text{CO}_2]_{\text{mix}} A} \frac{\left[\frac{^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{ocean}}}{^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{mix}}} \right] \frac{\alpha_{^{14}\text{CO}_2}}{\alpha_{\text{CO}_2}}}{1 - \left[\frac{^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{mix}}}{^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{atm}}} \right] \frac{\alpha_{^{14}\text{CO}_2}}{\alpha_{\text{CO}_2}}} \quad (3)$$

Di sini D adalah difusivitas molekuler CO₂, z adalah ketebalan film, ai adalah kelarutan i, Vand A adalah volume dan luas permukaan laut, dan l adalah koefisien peluruhan ¹⁴C. Penggunaan konsentrasi

rata-rata pra-industri memberi ketebalan lapisan batas global kecepatan 30 mm ($D / zB1800m \ y\Delta1^{1/4}piston$). Ketebalan film kemudian digunakan untuk memperkirakan waktu tinggal gas baik di atmosfer atau di lapisan campuran lautan. Untuk pertimbangan khusus CO_2 harus dibuat untuk spesiasi kimia di lautan, dan untuk $^{14}CO_2$ modifikasi lebih lanjut diperlukan untuk efek isotop. Waktu ekuilibrisasi untuk CO_2 berkenaan dengan pertukaran gas, kimia, dan isotop masing-masing sekitar 1 bulan, 1 tahun, dan 10 tahun.

Radiokarbon telah digunakan untuk mempelajari ventilasi termoklin dengan menggunakan alat mulai dari model 3 kotak sederhana hingga model sirkulasi samudra 3D lengkap. Banyak model 1D dan 2D didasarkan pada kerja W. Jenkins menggunakan tritium di Atlantik Utara. Dalam contoh baru-baru ini, R. Sonnerup dan rekan kerja di University of Washington menggunakan data chlorofluorocarbon untuk mengkalibrasi model difusi advokasi sepanjang tahun dengan metode WIFI. [4] adalah persamaan dasar untuk model.

$$\frac{dC}{dt} = -v\frac{dC}{dx} + K\frac{d^2C}{dx^2} \quad (4)$$

Dalam persamaan [4] C adalah konsentrasi, K adalah diffusivity eddy sepanjang-isopycnal, -v adalah komponen selatan sepanjang kecepatan isopycnal, t adalah waktu, dan x adalah jarak meridional. Permukaan permukaan atas areopycnal di permukaan. Setelah model

dikalibrasi, nilai yang dihasilkan digunakan untuk menyelidiki distribusi parameter lainnya.

X.7 Kesimpulan

Sejak pengukuran yang paling awal, radiokarbon telah terbukti menjadi pelacak yang sangat kuat, dan terkadang hanya pelacak yang tersedia, untuk mempelajari banyak proses oseanografi. Mungkin yang paling penting saat ini adalah proses pencampuran dan ventilasi laut dalam skala besar dan kalibrasi model samudra numerik. Survei global pertama mengenai distribusi radiokarbon yang dikumpulkan pada program GEOSECS mengakibatkan perubahan radikal seperti laut abyssal dilihat. Survei WOCE yang lebih baru dan jauh lebih padat pasti akan menambah detail dan ketepatan yang signifikan terhadap apa yang diketahui dan mungkin akan menghasilkan temuan lain yang berbeda, jika tidak begitu banyak, sama sekali baru. Kemajuan dengan pelacak ini hari ini sebagian besar disebabkan oleh penurunan ukuran sampel yang dibutuhkan dari B250 liter sampai 250 mililiter dan ketersediaan dan penerapan komputer cepat dan murah.

X.8 Senarai

Dpm disintegrasi per menit: ukuran aktivitas bahan radioaktif yang sering digunakan disbanding konsentrasi

$t_{1/2}$: waktu paruh: waktu yang dibutuhkan untuk satu setengah atom dari spesies radioaktif untuk meluruh

λ : konstanta peluruhan untuk spesies radioaktif = $\ln(2)/t_{1/2}$

Waktu rata-rata (λ^{-1}), waktu rata-rata yang diekspektasi untuk suatu nuklida meluruh

Abyssal : lautan sangat dalam, dekat dengan dasar laut

Steady state (keadaan tunak): Keadaan tak berubah selama interval waktu yang lama relatif terhadap proses yang dikaji; kadang dianggap keadaan untuk laut dalam dan laut sangat dalam (abyssal) dengan memperhatikan banyak parameter

DAFTAR PUSTAKA

- A.J. Swallow 1973. Radiation Chemistry, An Introduction. Longman
- Alfian Noor 2009. Kamus Saku Kimia Radiasi, Inggris-Indonesia dan Indonesia-Inggris. Yayasan Mitra Sains
- Al-Mashri & Blackburn, 1996. Radioanalytical Methods for Determination of Alpha Emitters in the Environment. Elsevier
- L'Annunziata, M.F 1987. Radionuclide Tracers, Academic Press
- L'Annunziata, M.F 1998. Handbook of Radioactivity Analysis. Academic Press
- Aries Setyarto 2008. Membangun Pemahaman Nuklir Untuk Kesejahteraan. Titik Terang
- Atkins. P & L. Jones 1999. Chemical Principles, The Quest for Insight. W.H. Freeman and Company
- B. Pullman 2001. The Atom in the History of Human Thought. Oxford University Press (Asli bahasa Perancis, diterjemahkan oleh Axel Reisinger
- B.T. Kelly 1966. Irradiation Damage to Solids. Pergamon Press
- Bjorn Wahlstrom (diterjemahkan oleh BATAN) 1996. Radiasi dalam Bahasa Sehari-hari. BATAN
- DA. Strickland 1968. Scientists in Politics : Atomic Scientists Movement, 1945-46. Purdue U. niversity Studies
- E. Rutherford 1905. Radio-Activity. Cambridge

Else L. Sisworo, K. Idris, A. Citraresmini, & I. Sugoro 2006. Teknik Nuklir Untuk Penelitian Hubungan Tanah – Tanaman. Perhitungan dan Interpretasi Data. BATAN

G. Hughes 1973. Radiation Chemistry, Clarendon

H. Brown (Ed.) 2003. Radiation. Science World

H.A.C. McKay 1971. Principles of Radiochemistry. Butterwoths

J.J. Ermenc 1989. Atomic Bomb Scientists: Memoir 1939-1945. Meckler

Ladd M.F.C & W.H. Lee 1964. Elementary Practical Radiochemistry. Cleaver Hume, London

Maire J.C & B. Waegell 1971. Structures, Mechanisms, and Spectroscopy : 120 Problems, 60 Solutions. Gordon & Breach
Mann, W.B, R.L. Ayres & S.B. Garfinkel 1980. Radioactivity and Its Measurement. Pergamon Press

McCarthy, I.E 1970. Nuclear Reactions. Pergamon Press

Overman & Clark 1960. Radioisotope Techniques. Elsevier

P. Ausloos (Ed.) 1968. Fundamental Processes in Radiation Chemistry. John Wiley

R.J. Blin-Stoyle 1973. Fundamental Interactions and the Nucleus. North Hollands

Slater 1990. Radioisotopes in Biology. Elsevier

Sobelman, I.I , L.A. Vainshtein & E.A. Yukov 1981. Excitation of Atoms and Broadening of Spectral Lines. Springer Verlag

Wang 1975. Radiotracer Methodology in Physical Sciences. Wiley

W. J. Price 1964. Nuclear Radiation Detection. McGraw-Hill

W.H. Brock (Ed.) 1967. The Atomic Debates : Brodie and the Rejection of the Atomic Theory. Leicester University Press

Wishart, J.F & Rao, BSM (Eds.) 2010. The Recent Trends in Radiation Chemistry. Pergamon

Wisnu A. Wardhana 1994. Teknik Analisis Radioaktivitas Lingkungan. Andi Offset

Wisnu A. Wardhana 1994. Radioekologi. Andi Offset

GLOSARIUM (ISTILAH PENTING)

A

ADC (*Analog to Digital Converter*)

Perlatan yang mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital

Aktivitas spesifik

Aktivitas radioisotop per satuan massa contoh

Alfa (α)

Partikel inti yang terdiri dari 2 proton dan 2 neutron

Amplifier

Mengandakan sinyal yang masuk kedalam processor

Analisa aktivasi neutron

Analisis unsur berdasarkan reaksi neutron dengan contoh dan pola pelepasan energinya yang khas untuk setiap unsur

Analisa pengenceran isotop

Analisis kimia dengan memanfaatkan isotop

Analisisator saluran ganda

Pemisah berbagai pulsa yang masuk melalui sistem berganda

Analisisator tinggi pulsa

Pemisah berbagai pulsa yang masuk melalui sistem tunggal

Atom

Bagian terkecil suatu unsur

B

Beta (β)

Partikel inti bermuatan negatif atau positif dan tidak bermassa

Bremstrahlung

Energi yang dihasilkan karena elektron berenergi tinggi melewati inti bermuatan positif (*breaking radiation*)

D

Detektor

Alat yang mendeteksi radiasi dan jenis-jenisnya

Detektor sintilasi padat

Alat yang mendeteksi proses sintilasi padat

Detektor sintilasi cair

Alat yang mendeteksi proses sintilasi cair
detektor semi konduktor

E

Efek fotolistrik

Lepasnya elektron dari permukaan logam akibat energi kinetik

Efek Compton

Tumbukan elastis dengan elektron orbital dan terlepas sedangkan sebagian energi- dibelokkan arahnya disebut energi recoil

G

Gamma (γ)

Partikel inti berupa gelombang elektromagnetik dan massa nol dalam keadaan diam

I

Inti

Bagian dari atom yang mengandung proton dan neutron, sebagian besar massa atom terletak pada inti

Ionisasi gas

Gas yang terionisasi akibat interaksi dengan radiasi yang masuk

Isotop

Nuklida dengan jumlah proton tertentu dan jumlah neutron dapat bervariasi

Isobar

Nuklida dengan nomor massa yang sama

Isoton

Nuklida dengan jumlah neutron sama

K

Konsep tebal setengah

Tebal material yang mereduksi intensitas sinar - menjadi setengahnya

L

Laju peluruhan

Kecepatan perubahan inti radioaktif menjadi inti stabil

N

Neutron

Partikel inti bermuatan netral

Nuklida

Inti dengan jumlah proton dan neutron tertentu

P

Pemilih tinggi pulsa

Memilih tinggi pulsa untuk diproses lebih lanjut

Pengskala (*Scaler*)

Alat yang mengatur skala suatu sinyal masuk

Pita konduksi

Kumpulan tingkat energi eksitasi suatu kristal padat

Pita valensi

Kumpulan tingkat energi dasar suatu kristal padat

Positron

Partikel beta bermuatan positif

Produksi pasangan

Konversi foton sinar- menjadi elektron dan positron

Proton

Partikel inti bermuatan positif

R

Radiasi Cerenkov

Radiasi yang mengalami perpindahan medium dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya

Radioisotop

Isotop yang memancarkan radiasi

Rekorder

Pencatat sinyal yang dihasilkan

S

Sirkuit koinsidens

Suatu sirkuit yang memungkinkan pencatatan dua sinyal yang sama energi dan intensitasnya

Statistika nuklir

Mempelajari karakter dan sifat statistik suatu fenomena nuklir

Sumur energi

Konsep mekanika kuantum tentang kelebihan potensial penghalang. Kalau besar waktu paruh makin panjang

W

Waktu paruh

Waktu yang diperlukan suatu inti radioaktif untuk meluruh sampai setengahnya

Tentang Pengarang

Alfian Noor adalah Guru Besar Kimia Analitik dan Radiasi di Departemen Kimia FMIPA Unhas, Makassar. Setelah memperoleh sarjana muda Ilmu Kimia Di Unhas, melanjutkan studi tingkat sarjana di Institut Teknologi Bandung (ITB). Tahun 1982 memperoleh gelar Master of Science (Msc) in Chemistry di Washington State University, Pullman, Amerika Serikat, lalu gelar Doktor Ilmu Kimia (Doctor en Science) dari Universite d'Aix Marseille, Marseille, Prancis pada tahun 1988. Beberapa Kunjungan ilmiah telah dilakukan antara lain di Museum Sejarah Alam, Leiden, Belanda (3 Bulan), kemudian Laboratorium Kimia Laut di Universitas Bremen (3 Bulan), Jerman, Guru Besar Tamu di Fakultas Ilmu-ilmu Perikanan Universitas Kitasato (2 bulan), Iwate, Jepang, Ilmuan senior di Laboratorium Lingkungan Laut (2 minggu) di Monako, Guru Besar Tamu di Universitas Griffith (4 bulan), Australia. Selama di Amerika serikat bekerja di Nuclear Radiation Center, Pullman. Alfian Noor adalah koordinator program Buginesia yaitu kerjasama Unhas dengan 7 Universitas/Institut di Belanda dalam Bidang riset ilmu Kelautan dan juga counter part kerjasama Unhas dengan Badan Tenaga Nuklir Nasional dan IAEA (International Atomic Energy Agency). dalam rangka pemanfaatan tenaga nuklir bidang pertanian dan sains. Saat ini menjadi Kepala Laboratorium Kimia Radiasi setelah sebelumnya pernah menjadi Ketua Jurusan Kimia Unhas (1990-1993) serta ketua program studi Magister kimia (2003-2005) dan Dekan FMIPA Unhas (2005-2008). Profesor Alfian Noor telah menghasilkan 163 publikasi baik berskala nasional maupun internasional.

Muhammad ZAKIR, S.Si, M.Si, D.Sc. lahir tanggal 3 November 1970 di Kota Sungguminasa, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Menyelesaikan pendidikan dasar (SD Negeri Bontomaero II) di Limbung, Kabupaten Gowa dan menengah (SMP Negei 1 Sungguminasa dan SMA Negeri 159 Sungguminasa) di Kabupaten Gowa. Pendidikan Srata-1 pada Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin diselesaikan pada tahun 1994 dengan tugas akhir analisis sulfur-35 dengan Pencacah Sintilasi Cair dibawah bimbingan Professor Alfian Noor. "To say it very frankly, this is the most memorable educational phase". Pendapat itu juga dibenarkan oleh kebanyakan orang bahwa pendidikan yang paling berkesan adalah pada saat S-1. Pendidikan magister pada Program Pascasarjana (Pps) Universitas Hasanuddin Makassar Program Studi Ilmu Kimia diselesaikan pada tahun 1999. Pendidikan doktoral diselesaikan di 東北大学大学院理学研究科化学専攻 (Baca: Tohoku Daigaku, Daigakuin Rigaku Kenkyuka, Kagaku Senko) pada tahun 2006 dengan gelar 博士理学 (Baca: hakushi rigaku, English: Doctor of Science (D.Sc)). Tema besar pekerjaan riset doktoral adalah tentang radiation induced nanocolloid. Saat ini bertugas sebagai Staf Pengajar aktif di Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin Makassar.

ISBN 978-602-60206-97



9

786026

020697



Radiation Chemistry Laboratory
Jalan Perintis Kemerdekaan Km 10
Universitas Hasanuddin, Makassar