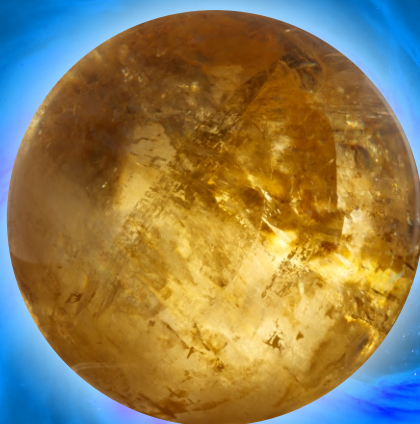




BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

PENANGGALAN RADIOAKTIF

Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi
dengan Teknik Nuklir



Mukhlis Akhadi

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PENANGGALAN RADIOAKTIF

Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi
dengan Teknik Nuklir

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2022 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PENANGGALAN RADIOAKTIF

Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi
dengan Teknik Nuklir

Mukhlis Akhadi

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2023 Mukhlis Akhadi

Penanggalan Radioaktif: Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi dengan Teknik Nuklir/
Mukhlis Akhadi–Jakarta: Penerbit BRIN, 2023.

xv + 160 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-979-8500-75-6 (cetak)
978-979-8500-82-4 (e-book)
978-623-8052-48-6 (e-book)

- | | |
|-------------------|-----------------|
| 1. Radioaktif | 4. Fisika |
| 2. Teknik Nuklir | 5. Sejarah Bumi |
| 3. Peradaban Bumi | |

539.752




Copy editor : Mayasuri Presilla dan Rina Kamila
Proofreader : Emsa Ayudia Putri dan Meita Safitri
Penata Isi : Hilda Yunita
Desainer Sampul : Dhevi E.I.R. Mahelingga

Cetakan pertama : Januari 2018
Cetakan edisi revisi : Januari 2023

Diterbitkan oleh:



Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN
 Penerbit_BRIN
 penerbit_brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR ISI

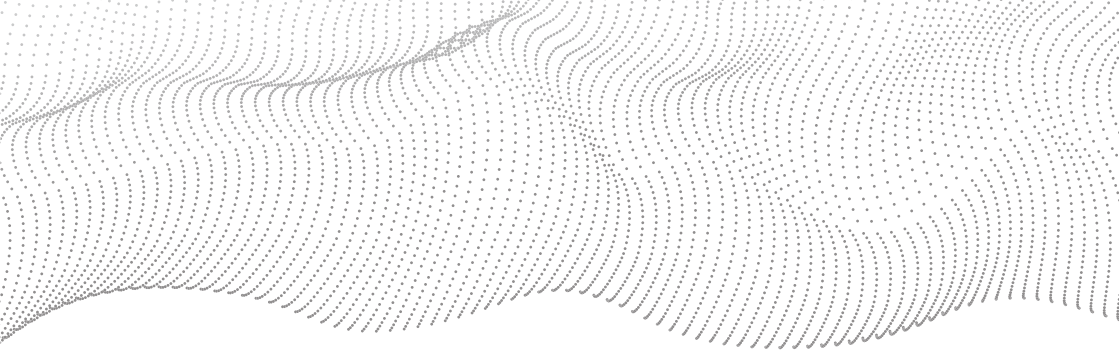
Daftar Gambar vii
Pengantar Penerbit ix
Prakata..... xi

Bab 1 Pendahuluan1
Bab 2 Mengenal Radionuklida9
 2.1 Struktur Atom 11
 2.2 Inti Atom 16
 2.3 Isotop dan Nuklida 21
 2.4 Penemuan Radionuklida..... 27
 2.5 Radionuklida Primordial..... 32

BAB 3 Peluruhan Radionuklida 37
 3.1 Pancaran Radiasi 39
 3.2 Aktivitas Radionuklida 47
 3.3 Deret Peluruhan 51

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB 4	Radionuklida Kosmogenik	59
	4.1 Radiasi Kosmis	61
	4.2 Produksi Radiokarbon	67
BAB 5	Penanggalan Geologi	73
	5.1 Kelahiran Alam Semesta	74
	5.2 Pembentukan Planet Bumi	75
	5.3 Waktu Geologi	77
	5.4 Penanggalan Uranium-Timbal	83
	5.5 Penanggalan Kalium-Argon	90
	5.6 Perkiraan Usia Bumi	91
BAB 6	Penanggalan Tembikar	97
	6.1 Fenomena Termoluminesens	99
	6.2 Teknik Penanggalan TL	103
	6.3 Penanggalan Arkeologi	110
BAB 7	Penanggalan Radiokarbon	113
	7.1 Teknik Penanggalan	114
	7.2 Temuan Arkeologi	122
	7.3 Arang Sisa Pembakaran	126
	7.4 Manuskrip Tua	127
	7.5 Fenomena Gunung Kapur	130
BAB 8	Penutup	133
	Daftar Referensi	137
	Daftar Istilah	145
	Indeks	155
	Biodata Penulis	159



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model Atom Rutherford-Bohr 15

Gambar 2.2 Struktur atom dengan inti yang tersusun atas proton dan neutron serta kulit atom yang berisi elektron..... 19

Gambar 2.3 Struktur atom isotop-isotop ^{12}C dengan 6 proton dan 6 neutron, ^{13}C dengan 6 proton dan 7 neutron, ^{14}C dengan 6 proton dan 8 neutron..... 22

Gambar 3.1 Pancaran Radiasi oleh Radionuklida..... 45

Gambar 3.2 Kondisi Atom yang Tereksitasi 46

Gambar 3.3 Diagram penurunan aktivitas radionuklida karena peluruhan..... 50

Gambar 3.4 Skema Peluruhan Deret Uranium 54

Gambar 3.5 Skema Peluruhan Deret torium 56

Gambar 3.6 Skema Peluruhan Deret Actinium 57

Gambar 4.1 Pembentukan dan Perjalanan Radionuklida ^{14}C di Lingkungan 71

Gambar 5.1 Prinsip Dasar Penanggalan Geologi Uranium-Timbal..... 89

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 5.2 Prinsip Dasar Penanggalan Geologi Kalium-Argon 91
Gambar 5.3 Metode Penanggalan Radiokarbon.....117
Gambar 5.4 Proses Nuklir Pembentukan ^{10}Be dari ^{10}B 121



PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku berjudul *Penanggulangan Radioaktif–Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi dengan Teknik Nuklir* ini membahas detail manfaat radiasi dalam kehidupan sehari-hari. Karena selama ini masyarakat awam menggambarkan radiasi sebagai suatu hal yang negatif.

Nyatanya radiasi banyak dimanfaatkan dalam kehidupan, terutama peran teknik nuklir dalam studi geologi dan arkeologi yang mampu mengungkap peristiwa-peristiwa yang pernah terjadi di muka Bumi, sejarah peradaban penduduknya dengan mengandalkan keberadaan unsur radioaktif alamiah yang berperan sebagai penunjuk waktu geologi. Peran teknik nuklir dapat menjelaskan suatu peristiwa

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan data terukur yang dapat diperoleh secara ilmiah di laboratorium oleh para peneliti.

Kami berharap, hadirnya buku ini dapat bermanfaat bagi para pegiat, peneliti, pengajar, pemerhati, praktisi, dan masyarakat umum lainnya yang ingin memperkaya wawasan terkait Penanganan Radioaktif. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA



"Apa yang Saudara ketahui tentang radiasi?" Jika pertanyaan itu ditujukan kepada masyarakat awam, memori kolektif mereka akan langsung tertuju pada kejadian Three Mile Island, Chernobyl, atau Fukushima Dai-ichi. Di tempat-tempat itulah kecelakaan radiologik pernah terjadi dan ternyata berdampak sangat dalam secara psikologis bagi masyarakat dunia. Sangat wajar jika gambaran menakutkan tentang radiasi tersebut sulit dihapus dari memori kolektif masyarakat.

Di sisi lain, apakah masyarakat awam juga memiliki gambaran tentang sisi ramah dari radiasi? Mungkin hanya sebagian kecil dari mereka yang memiliki gambaran demikian. Dibanding dengan teknologi lain, teknologi nuklir merupakan teknologi yang oleh sebagian besar masyarakat awam, dirasa paling jarang atau bahkan tidak pernah bersinggungan dengan berbagai masalah di kehidupan manusia sehari-hari. Masyarakat awam lebih banyak mengenal risiko atau bahaya dibandingkan manfaat yang dapat diperoleh dari radiasi atau teknologi nuklir pada umumnya.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Faktanya, teknologi nuklir selalu dikampanyekan oleh Badan Tenaga Atom Internasional atau International Atomic Energy Agency (IAEA) untuk tujuan damai. IAEA merupakan suatu organisasi antar pemerintah yang didirikan pada tahun 1957 dan bernaung di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). Organisasi tersebut dibentuk dalam rangka mempercepat dan memperluas kontribusi tenaga nuklir untuk berbagai tujuan damai, kesehatan, dan kesejahteraan bangsa-bangsa di seluruh dunia. Terdapat beberapa manfaat yang bisa dinikmati oleh seluruh manusia jika teknologi nuklir digunakan secara tepat. Oleh karena itu, kesalahan persepsi masyarakat awam terhadap radiasi perlu diluruskan dengan memberikan informasi menyeluruh mengenai keuntungan yang dapat diperoleh umat manusia, berkaitan dengan pemanfaatan radiasi atau teknologi nuklir dalam kehidupan sehari-hari.

Untuk mengeliminasi gambaran negatif tentang radiasi, pengenalan manfaat radiasi secara komprehensif sangat diperlukan agar memori kolektif masyarakat tentang radiasi dapat diluruskan. Buku yang sedang dibaca oleh pembaca saat ini hadir dalam rangka memperkenalkan salah satu pemanfaatan teknik nuklir untuk penanggalan radioaktif (*radioactive dating*) dengan memanfaatkan keberadaan sumber-sumber radiasi alam. Radionuklida alamiah serta radiasi yang dipancarkannya bukanlah barang asing dalam kehidupan. Keberadaan radionuklida alamiah di lingkungan dapat ditemukan dari dua sumber utama, yaitu radionuklida primordial yang terbentuk secara alamiah di dalam perut bumi dan radionuklida kosmogenik yang terbentuk secara alamiah di atmosfer.

Perkenalan antara umat manusia dengan radionuklida alamiah beserta radiasi yang dipancarkannya memiliki arti penting dalam bidang geologi maupun arkeologi. Teknik penanggalan dengan memanfaatkan radionuklida alamiah ternyata dapat membantu para ilmuwan dalam mengungkap berbagai misteri yang ditemukan dalam kehidupan di dunia. Penanggalan dengan memanfaatkan keberadaan radionuklida primordial dalam bidang geologi mampu memberikan data terukur yang lebih tepat mengenai jam geologi, sedangkan pe-

manfaat radionuklida kosmogenik dalam bidang arkeologi dapat dipakai untuk mengungkap sejarah perjalanan dan perkembangan peradaban penduduk Bumi.

Melalui buku ini, pembaca diharapkan akan memperoleh gambaran tentang salah satu manfaat radiasi dalam kehidupan sehari-hari. Di dalam buku ini, dibahas secara komprehensif pengertian radionuklida, baik dalam kelompok primordial maupun kosmogenik. Pembahasan mengenai teknik penanggalan radioaktif meliputi penanggalan untuk studi geologi, penanggalan termoluminesens (TL) untuk tembikar, dan penanggalan radiokarbon untuk fosil organik. Peran teknik nuklir dalam studi geologi dan arkeologi, terutama dalam penanggalan radioaktif, memberikan titik terang terhadap suatu peristiwa dengan data terukur yang diperoleh secara ilmiah di laboratorium.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa pembahasan dalam buku ini tidak terlepas dari adanya kekurangan karena terbatasnya pengetahuan dan kemampuan dalam diri penulis. Oleh sebab itu, kritik dan saran dari pembaca dalam rangka perbaikan dan penyempurnaan isi buku ini sangatlah terbuka. Semoga kehadiran buku ini dapat memberi pencerahan dan memperkaya khazanah pengetahuan tentang manfaat teknologi nuklir dalam kehidupan sehari-hari bagi masyarakat luas.

Tangerang Selatan, Mei 2022

Penulis

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Pendahuluan

Berbagai pertanyaan sederhana hingga masalah pelik tentang jagat raya telah merasuki alam pikiran manusia sejak lama, baik dari kalangan filsuf maupun ilmuwan (Haramundanis, 1997). Pada umumnya, para pemikir Yunani tertarik pada pengembangan teori yang dapat menerangkan jagat raya. Dalam melihat alam semesta, mereka menganut teori geosentris yang menyatakan bahwa pusat dari jagat raya adalah Bumi (Bacon & Seymour, 2003). Matahari, Bulan, bintang-bintang, serta benda langit lainnya bergerak mengelilingi Bumi. Anggapan tersebut muncul karena penampakan serta pengalaman seperti itulah yang dialami penduduk Bumi dalam menjalani kehidupan sehari-hari.

Pada abad ke-5 sebelum masehi (SM), ahli ilmu perbintangan Yunani, Anaxagoras, menyatakan bahwa Matahari dan benda-benda langit lainnya bukanlah sekedar cahaya di langit, melainkan benda padat seperti Bumi. Seabad kemudian, seorang pemikir Yunani, Heraclides, menyatakan bahwa Bumi tidak hanya diam pada suatu posisi, melainkan berputar seperti sebuah gasing (Santoso, 1977).

Pada Abad Pertengahan, teori jagat raya versi Ptolemeus mendapatkan tantangan dari ahli perbintangan Polandia yang hidup pada abad ke-15, Nicolaus Copernicus. Copernicus menyatakan bahwa Bumi bergerak mengarungi ruang angkasa mengelilingi Matahari, sekaligus menyatakan bahwa Matahari merupakan pusat jagat raya (Goldstein, 2002). Dalam perkembangan berikutnya, teori Copernicus ini dikenal sebagai teori Heliosentris. Didukung oleh berbagai penemuan ilmiah di bidang astronomi, kelahiran teori Heliosentris akhirnya menggeser teori Geosentris yang dianut para astronom sebelumnya (Santoso, 1977).

Pengamatan terhadap jagat raya terus dilakukan oleh kalangan astronom. Berbagai planet lainnya, yaitu Merkurius, Venus, Mars, Yupiter, Saturnus, Uranus, dan Neptunus, yang bergerak mengelilingi Matahari seperti Bumi, akhirnya ditemukan satu-persatu. Di sisi lain, Matahari sendiri hanyalah salah satu bintang dari kumpulan miliaran gugus bintang lainnya yang membentuk sebuah galaksi bernama Bimasakti (*The Milky Way*) (Chiappini, 2001).

Dibandingkan dengan ukuran alam semesta, Bumi hanyalah setitik debu yang terbang melayang-layang di ruang jagat raya. Meskipun demikian, ternyata Bumi memiliki arti yang sangat penting bagi kehidupan karena di planet inilah kehidupan dapat ditemukan. Bumi merupakan planet yang dapat mendukung kehidupan karena memiliki suhu yang relatif konstan. Suhu Bumi menjamin persediaan air dalam bentuk cair dan dapat menjaga organisme penghasil oksigen tetap hidup. Lebih dari 70 persen permukaan Bumi adalah air, dan sisanya berupa daratan. Tebal dari atmosfer Bumi mencapai 700 km, sebagian besar terdiri dari nitrogen dan oksigen yang berperan penting dalam menopang dan mempertahankan kehidupan yang ada di permukaannya (Penelaahan tentang Bumi, 1997).

Sebagai tempat tinggal makhluk hidup, Bumi tersusun atas beberapa lapisan. Berbagai bahan material pembentuk Bumi dan seluruh kekayaan alam terkandung di dalamnya. Permukaan Bumi memiliki bentuk yang bermacam-macam, mulai dari daratan, lautan, pegunungan, perbukitan, danau, lembah, dan sebagainya. Bumi, sebagai salah

satu planet dalam tata surya di alam semesta, tidak diam melainkan berputar pada porosnya (rotasi) dengan periode 23 jam 57 menit, serta bergerak mengelilingi Matahari (revolusi) sebagai pusat sistem tata surya dengan periode 365,242 hari. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya pergantian antara siang-malam serta pasang-surut air laut. Bumi, dengan diameter 12.756,3 km, memiliki jarak rata-rata dengan Matahari sejauh 149, 6 juta km (Parkinson dkk., 2006).

Bumi merupakan jenis planet yang terus-menerus mengalami perubahan. Seiring berjalannya waktu, kerak bumi selalu mengalami pembentukan, modifikasi, dan penghancuran oleh kekuatannya sendiri. Peristiwa-peristiwa ekstrem yang menimpa Bumi, seperti letusan gunung berapi, badai, gempa bumi, banjir, tsunami, dan tanah longsor, menyebabkan terjadinya perubahan formasi batuan-batuan penyusun kerak bumi (Quirke, 1997). Dalam perjalanan waktu, pasir maupun lumpur, yang sering disebut sedimen, mengeras menjadi hamparan batuan sedimen suatu lapisan, di mana lapisan yang lebih muda berada di atas lapisan yang lebih tua. Adakalanya berbagai peristiwa yang terjadi di Bumi hanya berpengaruh terhadap kondisi planet itu sendiri, namun tidak jarang pula suatu peristiwa berpengaruh terhadap jalannya kehidupan di muka Bumi.

Akibat berbagai gerakan Bumi, dasar batuan dapat terbalik sehingga lapisan yang lebih tua menempati posisi di atas lapisan yang lebih muda (Branley, 1997). Selain itu, batuan sering muncul sebagai singkapan terpecah dan terpecah-pecah pada permukaan Bumi. Dengan demikian, banyak batuan yang tidak saling berhubungan sehingga batuan-batuan yang merekam sejarah paling awal pembentukan Bumi tidak dapat ditemukan, bahkan mungkin sudah tidak ada lagi (Branley, 1997). Oleh karena itu, para ahli geologi memiliki peran penting dalam merekonstruksi ulang sejarah Bumi untuk keperluan ilmu pengetahuan.

Berbagai peristiwa pernah terjadi di Bumi dan memengaruhi kehidupan di permukaannya, salah satunya kepunahan dinosaurus, yaitu kelompok hewan purbakala jenis vertebrata yang pertama kali muncul pada sekitar 230 juta tahun yang lalu. Selama 160 juta tahun,

dinosaur berhasil mempertahankan eksistensinya di muka Bumi, namun mengalami kepunahan massal kira-kira 65,5 juta tahun silam. Banyak kalangan ilmuwan yang menduga bahwa kepunahan tersebut berhubungan dengan jatuhnya sebuah asteroid di muka Bumi yang memicu kebakaran sangat besar, gempa bumi dengan ukuran lebih dari 10 skala Richter, dan tanah longsor seluas benua (Asteroids and dinosaurs, 2007). Asteroid itu diduga telah menghantam Bumi dengan kekuatan satu miliar kali lebih kuat dari bom atom di Hiroshima.

Akibat benturan asteroid tersebut, bahan ledakan beterbangan di atmosfer, menyelimuti Bumi dalam kegelapan sehingga memicu musim dingin global dan membunuh banyak spesies yang tidak dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan yang berubah drastis. Catatan geologi memperlihatkan bahwa peristiwa itulah yang memicu kepunahan dinosaur (Asteroids and dinosaurs, 2007). Peter Schulte dari *University of Erlangen* di Jerman menyatakan bahwa dampak asteroid diduga telah mengeluarkan sejumlah besar sulfur, debu, dan jelaga dalam waktu lebih singkat dibandingkan dengan ledakan gunung berapi sehingga mengakibatkan kegelapan dan udara dingin yang sangat ekstrem (Asteroids and dinosaurs, 2007).

Kemunculan peristiwa-peristiwa besar, baik yang hanya berpengaruh terhadap kondisi Bumi ataupun melibatkan dan memengaruhi kehidupan yang ada di muka Bumi, menyebabkan Bumi memiliki catatan sejarah yang sangat banyak dan beragam. Bumi, di mana manusia menjalani kehidupan dan mengukir sejarah peradaban, merupakan planet yang terus-menerus berubah sehingga ada begitu banyak informasi ilmiah yang dapat digali darinya (Quirke, 1997). Penelaahan Bumi dilakukan melalui disiplin ilmu yang disebut geologi. Bidang ini mempelajari proses-proses yang berbeda tentang terjadinya struktur batuan, lanskap Bumi, dan komposisi Bumi saat ini, meliputi bagian dalam dan luar Bumi (Branley, 1997).

Geologi juga menyusun kembali urutan perubahan struktur Bumi dari zaman ke zaman. Lingkup kajiannya bukan hanya tentang sejarah Bumi, tetapi juga bentuk kehidupan berbeda yang pernah mendiami Bumi pada zaman dahulu. Berbagai metode telah dikembangkan

untuk menetapkan kronologi mutlak sejarah Bumi. Metode-metode tersebut dapat dipakai untuk menentukan kapan terjadinya peristiwa-peristiwa geologi tertentu dimasa lampau.

Terkait dengan studi geologi, teknik nuklir menawarkan suatu metode penanggalan yang dapat dipakai untuk mengungkap sejarah Bumi, peristiwa-peristiwa yang pernah terjadi di muka Bumi, serta sejarah peradaban penduduknya. Teknik penanggalan tersebut mengandalkan keberadaan unsur radioaktif alamiah yang dapat berperan sebagai penunjuk waktu geologi, yaitu skala waktu yang meliputi seluruh sejarah geologi Bumi dari mulai terbentuk hingga saat ini (Arnika, 1996). Metode penanggalan ini terus mengalami perbaikan dan penyempurnaan. Metode ini ternyata mampu membantu para ilmuwan untuk memahami sejarah Bumi dalam urutan waktu yang cukup teratur.

Skala waktu geologi dikembangkan sejak awal abad ke-20, ketika ahli radiokimia dari Universitas Yale, BB. Boltwood, memprakarsai penggunaan metode penanggalan radioaktif pada tahun 1907 (Friedlander dkk., 1981). Penentuan skala waktu geologi dengan teknik nuklir dapat memberikan gambaran yang cukup baik tentang rangkaian peristiwa-peristiwa dalam sejarah Bumi. Dengan skala waktu geologi, para ilmuwan dapat mengetahui apakah suatu peristiwa terjadi sebelum, pada saat yang sama, atau sesudah kejadian peristiwa lainnya.

Penemuan unsur radioaktif alamiah ternyata dapat mengubah cara pandang dalam penentuan waktu geologi. Keradioaktifan secara erat dikaitkan dengan perkembangan dalam fisika nuklir karena studi dan penggunaan unsur-unsur radioaktif merupakan bagian yang sangat penting dalam bidang tersebut. Ada banyak manfaat yang diperoleh para ilmuwan, berkenaan dengan penemuan unsur radioaktif alamiah dalam berbagai jenis batuan penyusun kerak bumi. Radiasi yang dipancarkan oleh unsur radioaktif alam ternyata dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dalam bidang penelitian, salah satunya adalah untuk penanggalan (Krane, 1992). Penunjuk

waktu atau jam geologi yang berbasis pada peluruhan bahan radioaktif membuat suatu peristiwa dapat diidentifikasi secara lebih akurat.

Buku ini ditulis dalam rangka mengkaji pemanfaatan unsur radioaktif alam untuk mengungkap sejarah perjalanan planet Bumi serta peradaban yang pernah dilalui oleh para penghuninya. Setelah Pendahuluan pada Bab 1, pembahasan dalam buku ini dilanjutkan dengan menguraikan masalah radionuklida yang ditulis pada Bab 2. Melalui bab tersebut, pembaca diperkenalkan dengan atom serta struktur intinya, di mana sifat keradioaktifan suatu atom terjadi. Akibat adanya atom yang bersifat radioaktif itulah muncul sebutan radionuklida. Pada bab 2, dibahas pula sejarah awal pengenalan manusia dengan radionuklida melalui penemuan beberapa jenis radionuklida alam di dalam perut bumi sehingga muncul istilah yang disebut radionuklida primordial. Pemahaman mengenai radionuklida primordial merupakan bekal penting bagi pembaca sebelum masuk ke pembahasan inti dari buku ini.

Pada bab 3, pembaca perlu diperkenalkan dengan karakteristik fisika paling utama dari suatu radionuklida, yaitu peluruhan radionuklida. Peristiwa peluruhan ini memungkinkan suatu radionuklida dapat dimanfaatkan untuk penanggalan. Di dalamnya dibahas mengenai pancaran radiasi dari suatu inti atom radioaktif yang menyertai proses peluruhan itu. Pada bab ini pula dibahas besaran fisika berupa aktivitas radionuklida sebagai suatu besaran yang dapat diukur dari adanya peluruhan dan menjadi andalan utama dalam kegiatan penanggalan radioaktif. Pembahasannya dilengkapi pula dengan penyajian tiga jenis deret peluruhan radionuklida primordial yang menjadi dasar metode penanggalan geologi dan arkeologi.

Bab 4 menguraikan masalah radionuklida jenis lainnya, yaitu radionuklida kosmogenik. Berbeda dengan radionuklida primordial yang ditemukan di dalam perut bumi dan proses terbentuknya berkaitan langsung dengan kelahiran alam semesta, radionuklida kosmogenik merupakan radionuklida alam yang terbentuk di atmosfer dan berkaitan langsung dengan aktivitas radiasi kosmis dari ruang angkasa. Dari sinilah istilah radionuklida kosmogenik berasal. Jika

radionuklida primordial memiliki peran penting dalam penanggalan di bidang geologi dan tembikar, radionuklida kosmogenik mempunyai peran penting dalam penanggalan arkeologi dengan mengandalkan keberadaan unsur radioaktif karbon-14. Dari sinilah istilah penanggalan radiokarbon muncul.

Bab 5, 6, dan 7 berisi pembahasan inti dari buku ini, yaitu pemanfaatan radionuklida alam untuk penanggalan radioaktif. Pembahasan pada Bab 5 mencakup pengertian waktu geologi yang berorde miliaran tahun dan teknik penanggalan Bumi serta alam semesta dengan mengandalkan peluruhan radionuklida primordial yang berperan sebagai jam geologi dengan umur paronya juga berorde miliaran tahun. Bab 5 juga dilengkapi dengan uraian prestasi nyata teknik penanggalan radioaktif dalam memperkirakan kelahiran Bumi, pembentukan alam semesta, serta peristiwa geologi lainnya yang pernah berlangsung di muka Bumi miliaran tahun silam.

Bab 6 membahas teknik penanggalan tembikar dengan mengandalkan radiasi dari radionuklida primordial yang disimpan secara akumulatif sebagai sinyal termoluminesens (TL) oleh kristal-kristal tertentu yang terdapat dalam tembikar. Sinyal tersebut tersimpan aman dalam kristal dan hanya akan lepas dari ikatan kristal bila bahannya mendapatkan pemanasan suhu tinggi dari luar. Di bab 6, disajikan pula prestasi teknik penanggalan TL dalam memperkirakan usia temuan-temuan tembikar kuno di berbagai tempat.

Bab 7 menjelaskan teknik penanggalan radiokarbon di bidang arkeologi serta prestasi nyata dalam mendata temuan-temuan arkeologis berupa fosil, lukisan kuno, bangunan kuno, naskah tua, dan sebagainya di berbagai penjuru dunia. Selain itu, teknik tersebut juga dapat digunakan untuk penanggalan stalaktit dan stalagmit di dalam gua-gua gunung kapur.

Pembahasan buku ini diakhiri dengan penutup di Bab 8 yang merangkum dan menegaskan peran penting keberadaan radionuklida alam dalam mengungkap berbagai misteri dalam kehidupan. Keberadaan radionuklida alam serta radiasi yang dipancarkannya ternyata telah menghadirkan laboratorium alam bagi para ilmuwan. Melalui

laboratorium alam, manusia berhasil merunut kembali berbagai peristiwa yang pernah terjadi di masa lalu. Teknik nuklir memiliki peran yang cukup penting dalam mengungkap sejarah perjalanan planet Bumi serta peristiwa-peristiwa yang menyertai perjalanannya, termasuk peradaban penghuninya di masa lampau.



Mengenal Radionuklida

Istilah atom berasal dari kata *atomos* yang dalam terminologi filsafat Yunani Kuno berarti tidak dapat dibagi-bagi lagi. Dari sejarah Yunani kuno, kita mengenal adanya konsep dasar tentang atom yang dikemukakan oleh Demokritos (460–370 SM). Menurut Demokritos, jika sebuah benda, misal batu, dibelah dua, kemudian setiap hasil pembelahan tersebut dibelah lagi menjadi dua, demikian seterusnya sehingga benda itu tidak dapat dibelah-belah lagi, setiap hasil belahan mempunyai sifat yang sama seperti benda asal (Santoso, 1977). Dari contoh tersebut, Demokritos menggambarkan atom sebagai materi terkecil yang sedemikian kecilnya sehingga tidak dapat dibagi-bagi lagi. Inilah konsep pertama tentang atom yang tercatat oleh sejarah ilmu pengetahuan. Konsep tersebut lahir murni dari hasil pemikiran, bukan merupakan hasil percobaan (Wospakrik, 2005).

Dalam perkembangan berikutnya, istilah atom digunakan untuk menerangkan bagian terkecil dari suatu benda yang tidak dapat dibagi-bagi lagi. Meskipun demikian, pengetahuan manusia mengenai ukuran dan sifat-sifat alamiah dari atom tersebut berkembang sangat

lambat selama berabad-abad sehingga konsep tentang atom tidak terdefiniskan secara pasti. Pada saat itu, manusia hanya berspekulasi mengenai keberadaan suatu atom (Santoso, 1977).

John Dalton (1766–1844) merupakan ilmuwan pertama yang mengemukakan teori tentang atom secara ilmiah berdasarkan hasil percobaan di laboratorium. Sejarah perkembangan ilmu pengetahuan mencatat bahwa teori itu dikemukakan pertama kali pada tahun 1804. Dalam teori atomnya, Dalton mengemukakan bahwa atom merupakan partikel terkecil yang tidak dapat dibagi lagi. Semua atom suatu unsur adalah serupa. Di sisi lain, unsur-unsur dengan komposisi atom-atom tertentu tidak akan pernah dapat berubah menjadi unsur lain. Berbagai jenis atom dari unsur-unsur berlainan dapat saling berikatan membentuk molekul. Dalam proses yang melibatkan terjadinya reaksi kimia, atom-atom yang semula menyatu dapat berpisah, kemudian bergabung kembali dengan atom-atom lainnya sehingga menghasilkan susunan yang berbeda dengan massa keseluruhan yang tetap sama dengan massa semula. Dalam reaksi kimia, atom-atom bergabung menurut perbandingan tertentu. Reaksi kimia tidak mengubah atom itu sendiri, melainkan hanya mengubah komposisi atom dalam materi baru yang dihasilkan. Dalton juga percaya bahwa atom-atom dalam suatu unsur itu benar-benar sama, tetapi berbeda dengan setiap atom dari unsur lain (Young & Freedman, 1998).

Teori atom Dalton mampu memberikan gambaran secara jernih dan jelas tentang atom sehingga teorinya digunakan untuk menerangkan proses-proses kimia yang ditemukan para ilmuwan di laboratorium. Temuan-temuan baru para ahli kimia, pada permulaan abad ke-19, akhirnya melengkapi dasar teori atom Dalton tersebut. Teori ini terus dimanfaatkan untuk menerangkan penemuan-penemuan baru di bidang kimia (Santoso, 1977). Penemuan sintesis urea pada tahun 1828 oleh Friedrich Wohler (1800-1882) berhasil diterangkan dengan menggunakan teori atom Dalton. Penemuan-penemuan lain dalam bidang kimia yang berlangsung pada abad ke-18 akhirnya memperkokoh kebenaran teori atom Dalton. Dalton berhasil menyuguhkan teori atomnya secara cermat sehingga dalam kurun

waktu sekitar 20 tahun, teori itu diterima oleh kalangan ilmuwan. Para ilmuwan mempercayai keberadaan suatu atom, sekalipun mereka sama sekali belum pernah melihat bentuk dari atom tersebut (Wospakrik, 2005).

Setelah masa Dalton dan seterusnya, banyak atom baru ditemukan dan dipelajari oleh para ilmuwan. Terdapat 92 jenis atom yang dapat ditemukan di alam, namun para ilmuwan berhasil menghadirkan atom-atom buatan sehingga jumlah atom kini mencapai lebih dari 100 jenis dengan sifat-sifat yang sangat berbeda (Standen, 1997). Perbedaan yang jelas antara atom-atom, yaitu 20 di antaranya dikelompokkan sebagai bukan logam, sebagian besar sisanya adalah logam, sedangkan sebagian lainnya termasuk dalam keadaan antara logam dan bukan logam yang terkadang disebut sebagai metaloid.

2.1 STRUKTUR ATOM

Penemuan-penemuan baru dalam bidang fisika ternyata mampu membuka cakrawala baru tentang pemahaman atom oleh manusia. Penemuan-penemuan tersebut dimulai dari pengamatan sinar katoda, penemuan elektron oleh Joseph J. Thomson, dan keberhasilan Robert A. Millikan dalam mengukur muatan elektron. Penelitian sinar katoda menjadi titik awal penyingkapan rahasia sinar aneh yang akhirnya diberi nama sinar-X oleh Wilhelm C. Roentgen pada tahun 1895, selanjutnya menjadi perintis jalan menuju penemuan elektron oleh Joseph J. Thomson pada tahun 1897. Penemuan-penemuan tersebut ternyata sangat membantu dalam memahami sifat-sifat atom serta gejala-gejala yang ditimbulkannya (Kaplan, 1979). Penelitian fundamental di bidang fisika tersebut akhirnya melahirkan disiplin ilmu baru dalam kerangka fisika-kimia yang memandang atom tidak hanya dari sudut pandang reaksi-reaksi kimia yang dapat dihasilkannya, melainkan juga dari sifat-sifat fisika atom itu sendiri (Wospakrik, 2005).

Dengan mempelajari sifat-sifat elektron, ternyata Thomson sangat terbantu dalam mengenali sifat-sifat atom atau gejala-gejala yang ditimbulkannya. Penemuan elektron oleh Thomson menyebabkan

teori yang menyatakan bahwa atom merupakan materi terkecil yang tidak dapat dibagi-bagi lagi, sebagaimana dikemukakan Dalton, terpatahkan. Penemuan tersebut meruntuhkan pendapat dan aksioma yang menyatakan bahwa atom adalah unsur terkecil yang tidak dapat berubah dan bersifat kekal. Temuan elektron pada tahun 1897 telah memberi landasan yang kuat untuk merekonstruksi model atom dengan melibatkan elektron (Sutton, 1987).

Pada tahun 1904, Thomson mengemukakan teori atom berdasarkan hasil temuannya. Dalam teorinya, Thomson tetap berpegang pada pendapat bahwa atom tak dapat dibelah lagi, namun kemudian maju selangkah dengan mencirikan sifat kelistrikan suatu atom. Menurut Thomson, atom mempunyai bentuk seperti bola yang muatan positifnya terbagi rata ke seluruh isi atom. Di dalam bola tersebut tertanam elektron-elektron bermuatan negatif. Jumlah elektron selalu sama dengan jumlah muatan positif atom sehingga atom secara keseluruhan berada dalam keadaan netral. Apabila atom itu kehilangan satu atau lebih elektron, atom menjadi bermuatan positif yang disebut ion positif (Sutton, 1987).

Ernest Rutherford, dari Universitas Manchester, Inggris, tertarik pada model atom Thomson yang dinilainya sangat sederhana sehingga ia menguji model atom Thomson tersebut. Pada tahun 1909, dengan dibantu oleh dua orang asistennya, yaitu Hans Geiger dan Ernest Marsden, Rutherford merancang suatu percobaan dengan memanfaatkan lempeng emas dan partikel alfa. Partikel alfa merupakan jenis partikel sub atomik yang dipancarkan oleh inti atom radioaktif alam yang saat itu sudah dikenal luas oleh kalangan ilmuwan. Oleh tim peneliti tersebut, pengujian teori atom Dalton dilakukan dengan cara menembakkan partikel alfa terhadap lempengan emas yang sangat tipis dengan ketebalan 0,01 mm. Rutherford berasumsi, apabila model atom yang dikemukakan oleh Thomson itu benar, arah perjalanan partikel alfa tidak akan dibelokkan sewaktu bertumbukan dengan lempengan emas sangat tipis karena partikel alfa memiliki energi yang sangat besar dan massa yang jauh lebih berat dari massa elektron. Oleh karena itu, partikel alfa diharapkan dapat

bergerak lurus, tanpa terganggu oleh elektron dan muatan positif dari atom emas yang tersebar mengisi seluruh permukaan lempeng emas (Halliday & Resnic, 1990).

Hasil percobaan Geiger dan Marsden menunjukkan bahwa partikel alfa yang menembaki lempeng emas ternyata tidak seluruhnya mampu menembus lempeng emas dengan lintasan garis lurus. Beberapa partikel alfa mengalami pembelokan arah gerak dan sebagian lainnya mengalami pemantulan kembali. Laporan hasil pengamatan kedua asisten tersebut memberi kesan kepada Rutherford, bahwa model atom Thomson tidak dapat diterima. Berdasarkan hasil pengamatan Geiger dan Marsden, ada indikasi bahwa muatan positif dari atom tidak menyebar, melainkan mengumpul pada suatu titik di dalam setiap atom. Oleh karena itu, muatan positif yang terkumpul di suatu titik mampu membelokkan arah dan bahkan memantulkan kembali partikel alfa yang menumbuknya (Taylor & Zafiratos, 1991).

Berdasarkan hasil pengamatan di laboratorium tersebut, Rutherford menyimpulkan bahwa sebagian partikel alfa dipantulkan kembali karena bertumbukan dengan bagian sangat keras dari atom, yang ia sebut sebagai inti atom, sedangkan partikel alfa lainnya dapat bergerak menerobos lempeng emas tipis karena melewati ruang kosong antara inti atom dan elektron-elektron. Melalui celah-celah kosong, partikel alfa mudah menembus lempengan emas tanpa terhalang apapun. Dengan demikian, model atom Thomson yang menyatakan bahwa massa atom tersebar merata di seluruh isi atom tidak dapat diterima, di mana sebelumnya telah tersebar secara luas oleh kalangan ilmuwan hingga akhir abad ke-18. Dengan gugurnya teori atom Thomson, pada tahun 1911 Rutherford mengusulkan model atom baru sebagai berikut (Taylor & Zafiratos, 1991).

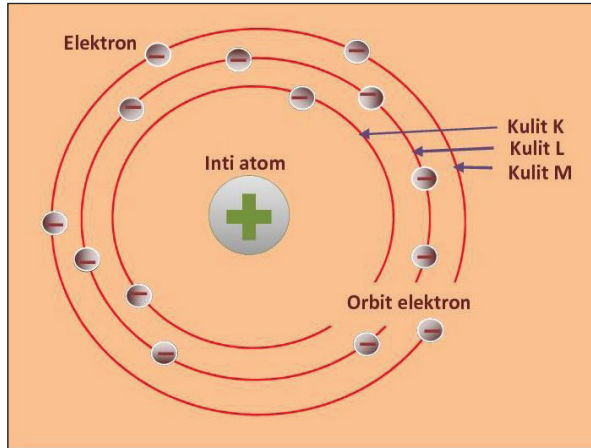
- 1) Atom tersusun atas muatan positif dan negatif, di mana sebagian besar massa atom dan muatan positifnya berkumpul pada suatu titik di tengah-tengah bola atom yang disebut inti atom.
- 2) Inti atom yang bermuatan positif dikelilingi oleh elektron-elektron bermuatan negatif yang berada pada jarak relatif jauh dari inti, di

mana elektron-elektron berputar pada lintasan-lintasan, seperti planet-planet yang bergerak mengelilingi Matahari dalam sistem tata surya.

Model atom Rutherford juga perlu diuji untuk membuktikan apakah teori tersebut sesuai dengan kaidah-kaidah fisika yang ada. Berdasarkan hasil pengujian dengan memanfaatkan kaidah-kaidah fisika yang sudah dipahami oleh kalangan ilmuwan pada saat itu, diketahui bahwa kelemahan utama dari model atom Rutherford terletak pada masalah kestabilan atom. Ketika bergerak mengelilingi inti atom yang berlangsung terus-menerus, elektron juga akan kehilangan energinya. Jika model atom Rutherford diikuti, elektron yang kehilangan energi sedikit demi sedikit itu akan bergerak mengelilingi inti atom dengan jari-jari lintasan yang semakin kecil. Hal itu disebabkan oleh berkurangnya energi elektron sehingga lama-kelamaan elektron tersebut akan kehabisan energi dan akhirnya menempel pada permukaan inti atom (Gautreau & Savin, 1995).

Model atom Rutherford masih memiliki kelemahan jika dikaitkan dengan uji spektroskopi warna pancaran cahaya dari atom. Meskipun demikian, keberhasilan Rutherford dalam menjelaskan gejala hamburan partikel alfa menunjukkan bahwa model atom tersebut sudah mendekati kebenaran. Model atom yang dikemukakan oleh Rutherford perlu penyempurnaan agar mendekati model struktur atom yang lebih tepat. Guna mengatasi masalah kestabilan, fisikawan teori Denmark, Niels Henrik David Bohr (1885–1962), akhirnya memberikan sumbangan pemikiran dalam rangka menyempurnakan model atom Rutherford. Kelemahan model atom Rutherford disempurnakan Bohr dengan teori atomnya yang dikemukakan pada tahun 1913. Bohr sebetulnya tidak mengemukakan teori atomnya sendiri. Ia hanya menambahkan postulat terhadap teori atom Rutherford dengan bunyi sebagai berikut (Gautreau & Savin, 1995).

- 1) Elektron yang berputar mengelilingi inti atom tidak melalui sembarang lintasan, melainkan melalui lintasan-lintasan tertentu tanpa mengalami pembebasan energi. Lintasan-lintasan yang dilalui



Sumber: Gautreau & Savin (1995)

Gambar 2.1 Model Atom Rutherford-Bohr

elektron ini disebut lintasan stasioner dan elektron-elektron yang melintas di dalamnya memiliki energi tertentu.

- 2) Elektron yang berpindah dari lintasan lebih luar menuju ke lintasan yang lebih dalam akan disertai dengan pelepasan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Sebaliknya, jika elektron itu pindah dari lintasan sebelah dalam menuju ke lintasan yang lebih luar, akan terjadi penyerapan energi elektromagnetik.

Dewasa ini, model atom Rutherford-Bohr telah diterima secara luas oleh kalangan ilmuwan. Dalam model ini digambarkan bahwa atom terdiri atas inti atom yang bermuatan positif dan kulit atom dengan sejumlah elektron bermuatan negatif yang mengitari inti atom melalui lintasan-lintasan tertentu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Oleh Bohr, lintasan-lintasan elektron dimulai dari lintasan terdalam yang dinamai kulit K, kulit L, kulit M, dan seterusnya. Pada kesempatan lain, Bohr juga menemukan persamaan matematis yang dapat digunakan untuk menghitung panjang gelombang garis-garis spektrum yang muncul dari atom hidrogen. Hasil perhitungan Bohr ternyata bersesuaian dengan nilai yang diperoleh dari percobaan

langsung. Hal ini membuktikan bahwa teori Bohr tentang spektrum atom adalah benar (Krane, 1992).

2.2 INTI ATOM

Terdapat penemuan penting terkait dengan rahasia di dalam inti atom. Temuan tersebut menunjukkan bahwa massa atau berat dari semua jenis atom hampir merupakan kelipatan bulat dari berat satu atom hidrogen (H). Temuan itu memberi kesan bahwa semua jenis atom yang ditemukan di alam ini seakan-akan dibangun dari satu jenis atom saja, yaitu H. Oleh karena itu, inti atom H dianggap berperan sebagai satuan massa terkecil suatu atom (Kaplan, 1979). Temuan ini menjadikan inti atom H menempati posisi sangat penting untuk memahami inti atom. Oleh Rutherford, inti atom H selanjutnya diberi nama proton (p), suatu kosakata Yunani yang berarti “yang pertama”. Partikel penyusun inti atom ini pertama kali ditemukan oleh Carl D. Anderson melalui eksperimen pada tahun 1932. Melalui penelitiannya, Anderson mengidentifikasi bahwa proton merupakan partikel bermuatan listrik positif (+). Besarnya muatan listrik sama dengan muatan sebuah elektron, hanya tandanya saja yang berlawanan.

Rutherford merupakan orang pertama yang mengemukakan suatu teori bahwa inti atom tersusun atas proton dan elektron (e). Hipotesis proton-elektron sebagai penyusun inti dihubungkan dengan sifat-sifat elektron bebas. Dalam teorinya, Rutherford mengemukakan bahwa di dalam inti atom, elektron diikat oleh partikel bermuatan positif dan tidak memiliki sifat independen. Pada awal tahun 1920, Rutherford menduga terdapat kemungkinan di mana elektron dan proton bergabung dalam jarak yang sangat dekat sehingga keduanya membentuk partikel netral. Partikel hipotetis ini selanjutnya diberi nama neutron (Kaplan, 1979).

Meskipun demikian, studi intensif yang detail tentang garis-garis spektrum dari suatu atom ternyata menggagalkan asumsi proton-elektron yang digagas oleh Rutherford. Selain itu, pada awal abad 20, semua metode untuk mendeteksi partikel penyusun inti masih mengandalkan pada efek muatan listrik yang ditimbulkan oleh

partikel tersebut, seperti pembelokan partikel oleh medan magnet atau medan listrik serta proses pengionan. Keberadaan neutron yang tidak bermuatan listrik belum bisa dideteksi kala itu. Di sisi lain, beberapa upaya yang telah dilakukan para ilmuwan juga gagal untuk mendeteksi keberadaan neutron tersebut.

Upaya pencarian neutron oleh para ilmuwan akhirnya mulai menampakkan hasil setelah melalui deretan panjang percobaan di laboratorium. Langkah awal pendeteksian neutron dirintis melalui eksperimen yang digagas oleh dua fisikawan Jerman, Walther Wilhelm Georg Bothe (1891–1957) dan Herbert Becker, pada tahun 1930. Dari hasil kerja mereka, diketahui apabila partikel alfa yang dipancarkan dari unsur polonium (Po) ditembakkan kepada unsur-unsur ringan seperti lithium (Li), beryllium (Be), dan boron (B), akan teramati adanya pancaran radiasi dengan daya tembus sangat tinggi (Wospakrik, 2005).

Belum lengkapnya dasar teori yang bisa dipakai untuk menerangkan hasil eksperimen Bothe dan Becker saat itu menyebabkan dugaan bahwa radiasi yang terpancar dari unsur-unsur ringan tersebut adalah sinar gamma berenergi tinggi. Dua tahun kemudian, penelitian serupa juga dilakukan oleh Jean Frederic Joliot (1900–1958) bersama istrinya, Irene Joliot-Curie (1897–1956). Hasil kerja pasangan suami-istri tersebut memperlihatkan apabila radiasi yang diamati oleh Bothe dan Becker dijatuhkan pada selembar layar yang banyak mengandung atom H seperti lilin parafin, radiasi berdaya tembus tinggi yang semula diduga sebagai sinar gamma berenergi tinggi itu ternyata dapat mementalkan proton sehingga keluar dari parafin. Proton yang terpentil bergerak dengan kecepatan tinggi (Cohen, 1982).

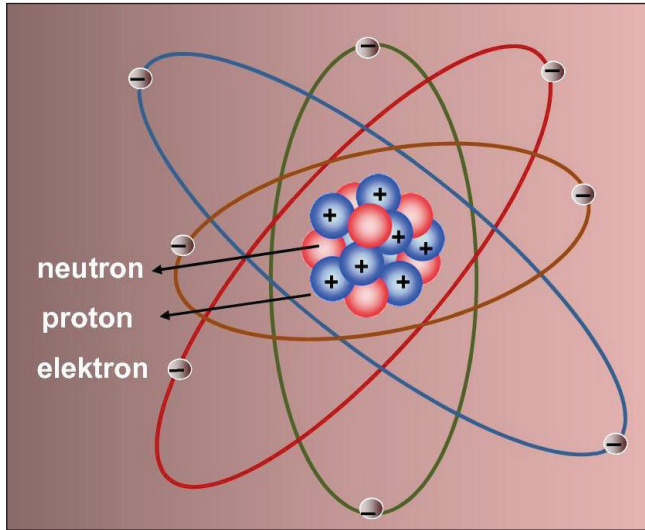
Pada tahun yang sama, yaitu 1932, percobaan Joliot-Curie diulang kembali oleh Sir James Chadwick. Dalam percobaannya, Chadwick mengukur secara lebih teliti kecepatan gerak proton yang terpentil dari permukaan parafin. Chadwick kemudian membandingkannya dengan massa partikel alfa yang ditembakkan. Dari sini disimpulkan bahwa dugaan adanya pancaran radiasi gamma oleh Bothe dan Becker ternyata tidak cocok dengan hasil pengamatan yang dilakukan

Chadwick. Radiasi yang diamati oleh Bothe dan Becker bukanlah radiasi gamma, melainkan berkas partikel tak bermuatan listrik dengan massa sama dengan proton (Wospakrik, 2005). Partikel netral itu kemudian dinamai neutron (n).

Partikel neutron tidak menghasilkan jejak di dalam detektor kamar kabut. Partikel tersebut juga tidak menghasilkan pengionan di dalam detektor kamar pengion. Neutron ternyata sangat berbeda dengan proton yang sudah dikenal sebelumnya. Akibat tidak timbulnya jejak apapun pada kedua sistem pemantau radiasi itu, Chadwick menyimpulkan bahwa muatan partikel neutron yang diamatinya adalah nol. Chadwick juga mengamati bahwa massa dari neutron ternyata hampir sama dengan massa proton.

Laporan temuan neutron oleh Chadwick dipublikasikan dalam Jurnal Ilmiah Inggris *Nature* pada tahun 1932. Terdapat kecocokan antara penjelasan teoritis dengan data hasil percobaan di laboratorium. Keberhasilan itu akhirnya menempatkan Chadwick sebagai ilmuwan yang berhasil menemukan keberadaan neutron (Balchin, 2012). Sebagai bentuk penghargaan atas hasil jerih payahnya dalam mengungkap jati diri neutron, Chadwick dinobatkan sebagai peraih Nobel Fisika pada tahun 1935.

Pengenalan secara detail tentang karakteristik neutron akhirnya membuka pintu gerbang baru bagi pengembangan fisika nuklir modern. Para ilmuwan sangat tertolong, terutama dalam upaya mendefinisikan inti atom. Tanggapan serius datang dari para fisikawan teori. Penemuan Chadwick berhasil membuka cakrawala baru dan membekali teori untuk penelitian berikutnya. Para ilmuwan mulai mencoba menyusun model inti atom dengan melibatkan neutron. Berdasarkan sejumlah pengamatan yang telah mereka lakukan, mereka terdorong untuk menyusun hipotesis bahwa setiap inti atom hanya tersusun atas proton dan neutron saja. Sebagai partikel penyusun inti atom, kesatuan dari proton dan neutron dalam inti atom ini disebut nukleon. Hipotesis proton-neutron ini digunakan pertama kalinya oleh Heisenberg pada tahun 1932 sebagai dasar teori untuk menggambarkan suatu inti atom yang lebih detail (Kaplan, 1979).



Sumber: Diadaptasi dari Kaplan (1979)

Gambar 2.2 Struktur atom dengan inti yang tersusun atas proton dan neutron serta kulit atom yang berisi elektron

Berbagai penemuan baru terkait dengan inti atom terus bermunculan. Dari penemuan-penemuan itu, para ilmuwan akhirnya menyimpulkan bahwa setiap atom dapat diuraikan lagi menjadi dua bagian utama, yaitu kulit atom dan inti atom. Pada bagian kulit atom terdapat elektron yang bergerak mengelilingi inti, sedangkan pada bagian intinya terdapat proton dan neutron, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Pada atom yang netral, jumlah proton dalam inti sama dengan jumlah elektron pada kulit atom. Berat suatu atom ditentukan oleh jumlah proton dan neutron yang terdapat di dalam inti atom tersebut.

Sampai di sini, gambaran tentang inti atom sudah cukup jelas. Untuk memperoleh informasi yang jelas tentang identitas suatu atom, para ilmuwan bersepakat membuat suatu aturan penulisan bagi inti atom suatu unsur yang dapat menggambarkan keadaan intinya, yaitu jumlah proton dan neutron yang terkandung di dalamnya. Dalam beberapa kondisi tertentu, penulisan suatu atom seringkali menyertakan

data nuklir paling sederhana dari atom tersebut (Walker dkk., 1989). Data nuklir yang biasa disertai dalam penulisan suatu atom adalah nomor atom (Z) dan nomor massa (A). Nomor atom menunjukkan jumlah proton dalam inti, sedangkan nomor massa menunjukkan jumlah proton dan neutron dalam inti atom. Pada atom yang netral, jumlah elektron pada kulit sama dengan jumlah proton dalam inti sehingga Z juga menunjukkan jumlah elektron pada kulit atom. Jumlah neutron (N) dalam inti suatu atom adalah: $A - Z$.

Untuk mempermudah dalam mendapatkan informasi dari suatu atom, baik dalam fisika maupun kimia, inti atom sering kali ditulis dengan lambang sebagai berikut:



Nama suatu atom (X) dapat dikenali dari simbol kimianya, sebagaimana disajikan dalam tabel berkala (skala periodik) atom-atom yang disusun oleh Dmitri Ivanovic Mendeleev pada tahun 1869. Setiap atom memiliki simbol kimia masing-masing, seperti atom nitrogen dengan simbol N, kalium dengan simbol K, dan karbon dengan simbol C.

Massa suatu atom, inti atom, dan partikel-partikel penyusunnya sangatlah kecil. Dalam studi kimia maupun fisika, untuk menyatakan massa selevel atom tersebut digunakan besaran *satuan massa atom* yang disingkat sma ($amu = \text{atomic mass unit}$). Nomor massa suatu atom (A) juga menunjukkan massa atom tersebut dalam sma. Sebagai contoh, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ berarti massa satu atom plutonium (Pu) adalah 239 sma, ${}^{214}_{82}\text{Pb}$ berarti massa satu atom timbal (Pb) adalah 214 sma, dan sebagainya.

Berikut ini diberikan contoh lebih lanjut untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas mengenai penggunaan Z dan A suatu inti, contohnya pada atom ${}^{222}_{86}\text{Rn}$. Dari tabel berkala unsur-unsur, kita dapat mengetahui bahwa nama atom dengan simbol Rn adalah gas radon dengan $Z = 86$ dan $A = 222$. Berdasarkan informasi data nuklir

tersebut, dapat ditentukan jumlah elektron, proton, dan neutron dalam atom Rn sebagai berikut:

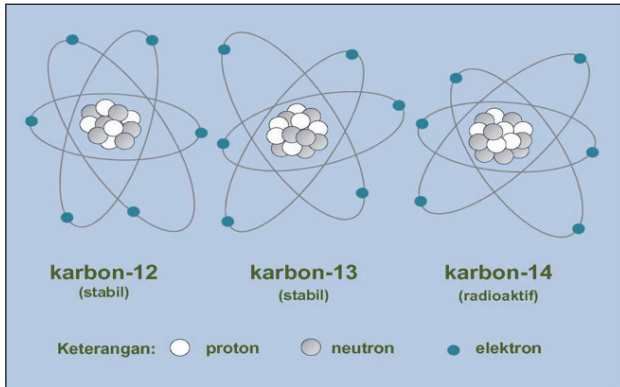
- Jumlah elektron (Z) = 86
- Jumlah proton (Z) = 86
- Jumlah neutron (N) = $A - Z = 222 - 86 = 136$

2.3 ISOTOP DAN NUKLIDA

Penyelidikan atom dengan memanfaatkan spektrograf massa akhirnya membuat para ilmuwan mengenali adanya beberapa unsur kimia dengan dua atau lebih komponen, masing-masing memiliki massa yang berbeda-beda. Perbedaan itu muncul karena adanya perbedaan jumlah neutron yang terkandung di dalam inti atom. Atom karbon (C), misalnya, dapat membentuk tiga jenis inti, yaitu inti dengan enam, tujuh, dan delapan buah neutron di dalamnya. Nomor massa dari ketiga jenis inti C tersebut masing-masing adalah 12, 13, dan 14. Terkait dengan penemuan tiga jenis inti dari atom C ini, para ilmuwan menyatakan bahwa atom C dapat membentuk tiga macam isotop (Walker dkk., 1989)

Isotop adalah unsur-unsur sejenis atau yang memiliki nomor atom (Z) sama tetapi nomor massanya (A) berbeda. Jika Z nya sama, berarti inti atom tersebut mengandung proton dengan jumlah yang sama. Perbedaan nomor massa terjadi karena perbedaan jumlah neutron (N) dalam inti atomnya. Jadi, isotop terbentuk karena perbedaan kandungan jumlah neutron dalam inti suatu atom. Sebagai contoh, pada Gambar 2.3 disajikan struktur inti atom 3 jenis isotop karbon, yaitu C-12, C-13, dan C-14 dengan kandungan di dalam inti masing-masing sebanyak 6, 7, dan 8 buah neutron. Sebagian besar unsur-unsur kimia yang ada di alam ini dapat membentuk beberapa isotop. Namun, antar isotop-isotop ini tidak dapat dibedakan secara kimia karena mereka mempunyai struktur elektron yang sama sehingga mengalami reaksi kimia yang sama pula.

Sudah sejak lama istilah nuklida (*nuclide*) diterima secara luas untuk menyatakan jenis atom yang dicirikan dari keadaan intinya,



Sumber: diadaptasi dari Walker dkk. (1989)

Gambar 2.3 Struktur atom isotop-isotop ^{12}C dengan 6 proton dan 6 neutron, ^{13}C dengan 6 proton dan 7 neutron, ^{14}C dengan 6 proton dan 8 neutron

yaitu disertakannya data nuklir Z dan A pada penulisan lambang atom tersebut. Cara penulisan ini dinilai cukup informatif karena banyaknya atom-atom yang telah diketahui ternyata dapat membentuk isotop, baik secara alamiah maupun setelah melalui proses reaksi nuklir di laboratorium. Dengan penyertaan data nuklir Z dan A maka antara isotop yang satu dengan isotop yang lainnya dapat dibedakan.

Ketiga jenis isotop C, sebagaimana dijelaskan sebelumnya, hanya dapat dibedakan apabila penulisannya menyertakan data Z dan A yang dimiliki unsur tersebut, yaitu $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$, dan $^{14}_6\text{C}$. Berikut diberikan contoh lain dari isotop, yaitu isotop yang terbentuk dari atom-atom timbal (Pb). Di alam, Pb dapat membentuk tiga macam isotop. Dalam setiap inti isotop Pb terdapat 124, 125, dan 126 buah neutron, sedangkan jumlah proton dalam ketiga inti isotop itu sama, yaitu 82. Ketiga isotop Pb tersebut dapat dibedakan dari cara penulisan data nuklirnya, yaitu $^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{207}_{82}\text{Pb}$, dan $^{208}_{82}\text{Pb}$. Namun, dalam kasus tertentu, sering kali dalam penulisan lambang atom suatu nuklida hanya disertakan penulisan nomor massanya saja, tanpa disertai penulisan nomor atomnya (Kaplan, 1979). Pada nuklida torium (Th) misalnya, biasanya cukup ditulis dengan lambang ^{233}Th , ^{234}Th , dan ^{235}Th

Buku ini tidak diperjualbelikan.

atau Th-233, Th-234, dan Th-235. Penulisan dengan cara demikian memberikan pengertian bahwa setiap nuklida Th bernomor atom 90.

Isotop merupakan suatu kelompok atom yang terdiri dari dua atau lebih nuklida dengan nomor atom sama. Di alam, dapat ditemukan suatu unsur yang mempunyai isotop sangat banyak, seperti timah atau stannum (Sn). Unsur kimia dengan nomor atom 50 ini dapat membentuk 10 jenis isotop alamiah dengan nilai A bervariasi, yaitu 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, dan 124. Meskipun masing-masing isotop mengandung 50 proton dan 50 elektron, antara satu dengan yang lainnya memiliki kandungan neutron berbeda. Kandungan neutron dalam masing-masing intinya bervariasi, dari 62–74 (Walker dkk., 1989). Dengan penyertaan penulisan data nuklir, yaitu nilai A untuk masing-masing isotop, kita dapat membedakan ke 10 isotop Sn tersebut berdasarkan perbedaan nomor massanya, yaitu ^{112}Sn , ^{113}Sn , sampai dengan ^{124}Sn . Hal yang sama juga berlaku untuk isotop-isotop lainnya.

Dengan memanfaatkan spektrograf massa, Walker Aston berhasil memastikan informasi tentang atom neon (Ne) yang sebelumnya diragukan oleh kalangan ilmuwan. Atom tersebut mempunyai dua isotop dengan massa masing-masing mendekati 20 dan 22 (Kaplan, 1979). Dari hasil penelitiannya, Aston mendapatkan informasi bahwa spektrum massa dari atom clour (Cl) ternyata tidak ada yang bersesuaian dengan berat atom Cl, yang nilainya sebesar 35,46 sma. Selanjutnya, melalui analisisnya, Aston berhasil mendapatkan dua spektrum massa yang masing-masing terlihat sangat dekat dengan massa atom 35 dan 37. Spektrum yang pertama memberikan garis lebih tebal. Dari hal tersebut dapat disimpulkan bahwa atom Cl dapat membentuk dua jenis isotop, masing-masing dengan massa atom yang bulat. Sementara itu, atom Cl yang ditemukan umumnya merupakan kombinasi antara dua jenis isotop yang terbentuk secara alamiah, yaitu ^{35}Cl dan ^{37}Cl dengan kelimpahan di alam masing-masing sebesar 75,4% dan 24,6%. Komposisi kedua isotop itulah yang akhirnya menghasilkan massa atom Cl berupa bilangan pecahan yang nilainya 35,46 sma.

Di alam, tidak semua isotop mempunyai kelimpahan yang sama, contoh pertama yaitu isotop oksigen. Sebesar 99,975% atom yang terbentuk secara alamiah adalah ^{16}O , sementara ^{17}O dan ^{18}O hanya terbentuk di alam dengan kelimpahan masing-masing sebesar 0,037% dan 0,204%. Contoh lainnya yaitu pada atom hidrogen (H) yang sebagian besar di alam berada dalam bentuk ^1H , namun dalam fraksi yang sangat kecil (kira-kira 0,015%) ditemukan dalam bentuk ^2H (hidrogen berat atau deuterium). Pada unsur yang lain, distribusi isotopnya mungkin sangat berbeda (Walker dkk., 1989).

Atom C dapat ditemukan dalam batu kapur, kelimpahannya sering dinyatakan dalam bentuk rasio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ dengan nilai 89,2, sedangkan rasionya di dalam batu bara sebesar 91,8. Secara umum, material tanaman memiliki kandungan relatif ^{12}C dengan angka yang lebih tinggi dibandingkan dalam batu kapur. Namun, secara keseluruhan, semua karbon yang ada di alam, 98,89% isotop C berada dalam bentuk ^{12}C (Arnika, 1996). Variasi kelimpahan yang cukup lebar ditemukan juga pada sebaran isotop timbal (Pb). Tingkat variasi sebaran isotop Pb biasanya dihubungkan dengan sumber dari mana sampel Pb tersebut diperoleh. Secara umum, kita tidak mungkin mendapatkan kelimpahan isotop secara pasti tanpa menentukan asal sumber bahan Pb tersebut.

Terdapat 20 unsur di alam (kira-kira seperempat dari seluruh unsur yang terbentuk secara alamiah) yang memiliki satu bentuk inti saja, seperti aluminium (Al), cobalt (Co), dan emas (Au). Akibat hanya dapat membentuk satu jenis inti atom, ke-20 unsur tersebut tidak membentuk isotop, atau dengan kata lain, ke-20 unsur tersebut tidak dapat membentuk satu isotop stabil. Dari 20 unsur tersebut, hanya Be yang memiliki Z genap, sedangkan 19 unsur lainnya memiliki Z ganjil.

Sebagian besar unsur yang ada di alam ini dapat membentuk dua atau lebih isotop. Amirudin (2009) menyampaikan bahwa untuk mengenali isotop secara lebih detail maka diperlukan informasi sebaran isotop di alam berdasarkan nilai Z dan N dalam inti atomnya, yaitu:

1. Unsur-unsur dengan nilai Z ganjil umumnya hanya mempunyai satu inti stabil, sedangkan unsur dengan nilai Z genap umumnya

mempunyai lebih dari satu isotop stabil. Sebagai contoh, $^{12}_6\text{C}$ (Karbon) yang terdapat dalam jumlah banyak dan mudah ditemukan di alam. Karbon memiliki Z genap, yaitu 6.

2. Unsur dengan nilai Z dan A genap (berarti nilai N nya juga genap) umumnya banyak terdapat di alam dan mengisi formasi kulit atau kerak bumi. Contoh unsur-unsur jenis ini adalah $^{28}_{14}\text{Si}$ dan $^{40}_{20}\text{Ca}$.
3. Unsur dengan nilai Z dan A ganjil (berarti nilai N nya genap) atau sebaliknya (Z genap, N ganjil dan A ganjil) terdapat di alam dengan kelimpahan cukup.
4. Unsur-unsur dengan nilai Z maupun N ganjil (berarti nilai A nya pasti genap) ditemukan di alam dengan kelimpahan sangat jarang. Contohnya adalah ^2_1H (Deuterium, isotop Hidrogen, dengan N = 1), ^3_3Li (Lithium, dengan N = 3), $^{10}_5\text{B}$ (Boron, dengan N = 5), dan $^{14}_7\text{N}$ (Nitrogen, dengan N = 7).

Terkait dengan keberadaan unsur-unsur di alam, selain istilah isotop, sering juga dijumpai istilah isoton dan isobar (Amirudin, 2009). Isoton adalah unsur-unsur dengan nilai N sama, tetapi nilai Z berbeda. Dalam satu kelompok isoton, atom-atomnya memiliki nilai yang berbeda. Oleh karena itu, isoton terbentuk bukan oleh nuklida-nuklida sejenis, melainkan oleh nuklida-nuklida yang tak sejenis. Beberapa contoh isoton, yaitu ^4_2He , ^4_3Li , ^4_4Be , ^4_5B , $^{10}_5\text{B}$, dan $^{10}_6\text{C}$ dengan nilai N pada masing-masing unsur tersebut adalah 4 buah. Contoh lainnya adalah ^7_3Li , ^7_4Be , ^7_5B , dan ^7_6C yang mempunyai N di dalam inti masing-masing sebanyak dua buah.

Selanjutnya, isobar adalah unsur-unsur dengan nilai A sama, tetapi nilai Z berbeda, demikian pula dengan nilai N dalam intinya. Seperti halnya isoton, kelompok isobar juga tersusun oleh nuklida-nuklida yang berlainan. Beberapa contoh isobar adalah $^{11}_3\text{Li}$, $^{11}_4\text{Be}$, $^{11}_5\text{B}$, $^{11}_6\text{C}$, dan $^{11}_7\text{N}$, masing-masing unsur memiliki A yang sama, yaitu 11. Contoh lain atom-atom yang membentuk isobar adalah $^{14}_6\text{C}$ dan $^{14}_7\text{N}$, di mana masing-masing unsur mempunyai A sama, yaitu 14.

Dari segi kestabilan inti atom, kita dapat menemukan dua jenis kestabilan inti dari atom-atom yang membentuk isotop. Pertama adalah inti atom yang sifatnya stabil dan tidak mampu memancarkan radiasi. Inti atom isotop jenis ini tidak bersifat radioaktif. Kedua adalah inti atom yang sifatnya tidak stabil dan mampu memancarkan radiasi. Inti atom isotop jenis ini bersifat radioaktif. Isotop dengan inti tidak stabil disebut isotop radioaktif atau radioisotop (Glosarium Ilmu dan Teknologi Nuklir, 2009). Radioisotop ini dapat terbentuk secara alamiah ataupun melalui intervensi manusia dalam suatu reaktor nuklir, akselerator, maupun irradiator.

Penyebutan suatu unsur sebagai nuklida selalu disertai dengan pencantuman data nilai A unsur tersebut. Dalam kehidupan sehari-hari, kita dapat menemukan kelompok unsur yang terjadi secara alamiah maupun buatan. Unsur kelompok pertama disebut sebagai nuklida alam, sedangkan unsur kelompok kedua disebut nuklida buatan. Nuklida buatan dapat dihasilkan dengan akselerator maupun reaktor nuklir (Radiasi dalam bahasa sehari-hari, 1996). Bismuth (^{208}Bi) merupakan unsur alamiah dengan A paling berat dan masih termasuk sebagai nuklida stabil, sedangkan unsur-unsur dengan A lebih besar dari 208 umumnya merupakan nuklida radioaktif. Untuk membedakan dengan nuklida yang stabil, sering digunakan istilah radionuklida untuk menyatakan isotop atau nuklida yang bersifat radioaktif (Kaplan, 1979).

Meskipun di alam hanya dapat ditemukan 92 jenis unsur yang terbentuk secara alamiah dan lebih dari 13 jenis merupakan unsur buatan, terdapat sekitar 1.440 macam isotop yang saat ini dikenal, 340 di antaranya terdapat di alam dan sekitar 1.100 diproduksi di laboratorium, reaktor nuklir, dan ledakan senjata nuklir (Walker dkk., 1989). Sebagian besar dari isotop-isotop tersebut bersifat radioaktif, namun beberapa diantaranya (284 jenis) merupakan isotop stabil. Ledakan senjata nuklir yang terjadi di Hiroshima dan Nagasaki pada tahun 1945 mengeluarkan sekitar 30–40 unsur baru yang semula belum dikenal. Unsur-unsur baru tersebut masih meluruh sehingga menyebabkan unsur-unsur lain juga bersifat radioaktif. Oleh sebab itu,

jumlah unsur yang keluar dari ledakan senjata nuklir dalam bentuk debu-debu radioaktif dapat mencapai sekitar 200 jenis radionuklida (Cook, 1986).

2.4 PENEMUAN RADIONUKLIDA

Radioaktivitas adalah fenomena fisika berupa pancaran radiasi dari inti atom suatu radionuklida. Selain radionuklida buatan, baik yang sengaja dibuat manusia untuk maksud-maksud tertentu maupun tidak sengaja dibuat karena hanya hasil samping dari kegiatan nuklir yang kemunculannya tidak disengaja atau bahkan tidak dikehendaki, gejala radioaktivitas ternyata dapat ditemukan pada radionuklida yang terbentuk secara alamiah. Akibat proses terbentuknya yang berlangsung secara alamiah, bersamaan dengan proses kelahiran maupun aktivitas alam semesta, radionuklida ini sering disebut sebagai radionuklida alam. Radionuklida alam sudah terbentuk semenjak alam ini lahir. Proses terbentuknya diperkirakan bersamaan dengan proses terbentuknya Bumi, bahkan mungkin lebih tua lagi (Aryawardhana, 1996).

Perkenalan umat manusia dengan radionuklida alamiah bermula ketika Antoine Henri Becquerel (1852–1908), seorang fisikawan berkebangsaan Prancis, mengamati gejala aneh pada garam uranium (U) yang belum pernah diketahui sebelumnya. Dalam kegiatan ilmiahnya, Becquerel banyak mengamati dan mempelajari masalah fosforesensi dan fluoresens bahan-bahan, salah satunya adalah garam uranium. Fluoresens adalah sifat fisik suatu bahan yang dapat berpendar ketika disinari, sedangkan fosforesensi adalah sifat fisik dari bahan yang dapat terus berpendar meskipun tidak sedang disinari. Suatu bahan dapat menunjukkan gejala fosforesensi ketika mendapat sorotan cahaya. Fosforesensi muncul karena sebelumnya bahan itu telah menerima energi sinar Matahari (A brief history of radiation, 1995).

Ide penelitian yang dilakukan oleh Becquerel terinspirasi dari penemuan sinar-X oleh Wilhelm Conrad Roentgen (1845–1923) pada tahun 1895. Setelah penemuan sinar-X itu dipublikasikan, Becquerel merupakan salah satu ilmuwan yang membacanya dan akhirnya ter-

tarik dengan penemuan tersebut. Selang satu tahun dari penemuan sinar-X, tepatnya pada tahun 1896, Becquerel memutuskan untuk mempelajari kemungkinan adanya hubungan antara fluoresens yang terjadi secara alamiah dengan sinar-X yang baru saja ditemukan.

Becquerel menduga adanya hubungan antara peristiwa fluoresens dengan kemunculan sinar-X. Oleh karena itu, ia berasumsi bahwa sinar-X juga bisa dibangkitkan dengan melibatkan aktivitas sinar matahari melalui peristiwa fluoresens bahan. Langkah pertama yang ditempuh Becquerel adalah mempelajari tabung sinar katoda secara saksama. Dari studi ini, Becquerel cenderung percaya bahwa peristiwa fluoresenlah yang menjadi penyebab pancaran sinar-X itu. Menurutnya, apabila suatu bahan menerima paparan sinar Matahari, semua bahan fluoresens dapat memancarkan kembali energi cahaya yang diterima sebelumnya serta memancarkan energi dalam bentuk sinar-X (Wospakrik, 2005). Becquerel akhirnya memutuskan untuk merancang suatu penelitian dalam rangka membuktikan rasa penasarannya. Saat itu, ia memiliki suatu campuran bahan non-metal berupa kristal garam uranium-natrium-sulfat yang diwarisi dari orang tuanya di laboratorium.

Langkah pertama, Becquerel membungkus rapat-rapat lembaran film fotografi dengan kertas hitam yang bertujuan untuk memastikan tidak ada sinar Matahari yang dapat masuk dan menyinari permukaan lembaran film tersebut. Langkah kedua, yaitu meletakkan bahan fluoresens kristal garam uranium-natrium-sulfat di atas film terbungkus tersebut. Apabila terpapar oleh cahaya Matahari, garam U dapat memperlihatkan sifat fluoresens yang sangat kuat. Namun, sinar fluoresens itu tidak akan mampu masuk dan menyinari permukaan film fotografi karena terhalang oleh pembungkus kertas hitam. Sementara itu, sinar-X yang memiliki daya tembus tinggi tetap mampu melewati penghalang kertas hitam sehingga dapat menyinari permukaan film. Langkah selanjutnya yang dilakukan oleh Becquerel adalah mencuci lembaran film fotografi beberapa jam kemudian. Hasil eksperimennya ternyata sesuai dengan asumsinya semula. Becquerel mendapatkan gambar berupa bayangan hitam kristal tercetak pada lembaran film fotografi dengan tingkat kerapatan optis tinggi.

Pada mulanya, dari hasil penelitian yang diperoleh dalam penelitian pertama, Becquerel yakin telah berhasil membuktikan asumsinya. Ia berhasil menemukan sumber sinar-X baru berupa bahan fluoresens, namun ia masih belum merasa puas. Ada saat-saat di mana Becquerel merasa bimbang dengan hasil eksperimennya. Untuk meyakinkannya, di bulan Februari tahun 1896, Becquerel bermaksud mengulang kembali eksperimen pertamanya. Ketika eksperimen kedua akan dilakukan, Matahari tidak bersinar terang sehingga rencana pun diurungkan. Becquerel akhirnya menyimpan kembali lembaran film fotografi yang telah terbungkus kertas hitam itu di dalam laci lemari. Tempat penyimpanannya tetap terlindung rapat dari paparan sinar Matahari. Di luar skenario eksperimennya, secara kebetulan ia meletakkan kristal uranium-natrium-sulfat di atas film yang disimpan dalam laci tersebut.

Dua hari selanjutnya, kondisi cuaca belum juga berubah sehingga pada hari keempat Becquerel memutuskan untuk mencuci film fotografi yang sebelumnya tersimpan dalam laci. Harapannya, karena kristal garam U itu tidak pernah mendapatkan paparan sinar Matahari selama disimpan di dalam lemari, ia akan mendapatkan hasil cetak bayangan hitam kristal dengan tingkat kerapatan optis rendah. Namun, ternyata hasil yang diperoleh Becquerel di luar dugaan semula. Dari eksperimen kedua yang gagal tersebut menunjukkan bahwa garam U memiliki gejala radiasi tertentu dengan daya tembus yang sangat kuat. Daya tembusnya sama seperti yang dimiliki sinar-X. Tingkat kerapatan optis bayangan hitam dari kristal yang tercetak pada permukaan film fotografi itu ternyata tidak beda dengan yang diperolehnya dari eksperimen yang pertama. Dari penemuan yang tidak sengaja itu, Becquerel akhirnya menyadari, ada sejenis sinar aneh yang tidak kasat mata telah menyinari film tersebut. Sumbernya tentu bukan peristiwa fluoresens dari garam U, yang selama disimpan dalam laci tidak pernah terpapar sinar Matahari. Oleh karena itu, ia menduga, satu-satunya sumber sinar aneh yang menyinari film tersebut adalah garam uranium-natrium-sulfat.

Penyelidikan terhadap sinar aneh yang dipancarkan oleh garam U terus dilakukan. Dari penyelidikan tersebut, akhirnya Becquerel mengetahui bahwa sinar aneh yang dipancarkan garam U memiliki banyak kesamaan dengan sinar-X. Salah satu sifat yang paling menonjol adalah daya tembusnya yang tinggi. Becquerel juga memperoleh informasi bahwa sinar dari garam U tidak bergantung sama sekali pada bentuk senyawa kimia bahan. Akhirnya, ia menyadari bahwa gejala radiasi tersebut tidak berasal dari struktur kimia bahan, melainkan dari sifat fisika bahan U itu sendiri. Namun, karena saat itu pengetahuan tentang sinar ini masih sangat terbatas, untuk sementara, sinar aneh yang terpancarkan dari garam U diberi nama sinar Becquerel. Gejala pancaran radiasi secara spontan oleh suatu bahan disebut gejala radioaktivitas, sedangkan bahan yang mampu memancarkan radiasi secara spontan diberi nama bahan radioaktif.

Penemuan gejala radioaktivitas pada bahan radioaktif merupakan salah satu pondasi untuk melangkah lebih lanjut ke perkembangan fisika modern melalui pemahaman struktur inti atom yang lebih detail (Kaplan, 1979). Sebelum tahun 1895, tidak ada pandangan teoritis dari para ilmuwan yang menyatakan bahwa gejala pancaran radiasi secara spontan dari suatu bahan dapat terjadi dan ditemukan di alam. Namun, ketika rahasia keradioaktifan itu ditemukan, penemuan-penemuan baru berikutnya di bidang ini menjadi terbuka lebar (Wospakrik, 2005).

Beberapa kertas kerja ilmiah tentang fenomena keradioaktifan yang ditemukan Becquerel diterbitkan pada tahun 1896. Namun, publikasi ilmiah tersebut pada mulanya kurang mendapatkan perhatian dari kalangan fisikawan. Sekitar setahun kemudian, penemuan gejala radiasi dari U baru mulai dipelajari secara intensif oleh peneliti lain. Beberapa peneliti yang membaca laporan penemuan gejala radioaktivitas bahan menjadi tertarik dan melakukan penelitian serupa.

Pada akhir tahun 1897, Maria Sklodowska (1867–1934), seorang mahasiswi dari Polandia, menjadi salah satu ilmuwan yang tertarik pada temuan Becquerel. Mahasiswi yang saat itu sedang menempuh program doktor itu mencari topik penelitian untuk menyelesaikan

disertasi doktornya di Universitas Sorbonne, Paris (Birch, 1993). Subjek penelitian yang dicarinya harus merupakan terobosan dan bisa menjadi pijakan baru dalam dunia ilmu pengetahuan. Dalam perjalanan hidupnya, setelah menikah dengan Pierre Curie (1859–1905), mahasiswi itu dikenal dengan nama Marie Curie. Dengan bantuan dan bimbingan suaminya, Marie Curie memutuskan untuk menyelidiki sinar Becquerel dari garam U secara lebih detail.

Dalam penelitiannya, langkah pertama yang dilakukan Marie adalah menemukan cara untuk mengukur kekuatan sinar-sinar Becquerel dari garam U. Marie mencari instrumen ukur yang sangat baik untuk melakukan penelitiannya. Jika Becquerel memanfaatkan film fotografi dalam penelitian gejala radioaktivitas, Marie memilih menggunakan elektroskop untuk menyelidiki sinar-sinar Becquerel yang dipancarkan bahan. Alat ukur radiasi ini ditemukan oleh Pierre Curie dan saudaranya, Jacques Curie. Alat itu mampu mengukur arus listrik di udara dalam intensitas yang sangat rendah. Dari penelitian yang telah dilakukan, Becquerel berhasil mengungkap bahwa sinar yang dipancarkan garam U mampu mengionkan udara yang gejalanya dapat diamati menggunakan elektroskop. Pengamatan dengan cara serupa juga digunakan oleh Marie Curie untuk menyelidiki berbagai jenis bahan yang mampu memancarkan sinar Becquerel (Birch, 1993).

Selama melakukan kegiatan penelitian, Marie juga tertarik menyelidiki kemungkinan adanya bahan-bahan alamiah lainnya yang dapat menunjukkan gejala radioaktivitas, seperti yang ditunjukkan oleh garam U. Dengan memanfaatkan elektroskop, Marie berhasil mengetahui kekuatan sinar-sinar Becquerel melalui pengukuran kuat arus listrik yang ditimbulkannya di medium udara. Ia mengumpulkan sebanyak-banyaknya jenis sampel logam dan mineral, lalu mengujinya.

Hasil kegiatan penelitian yang dinilai cukup penting bagi perkembangan ilmu pengetahuan adalah ditemukannya unsur lain yang mampu menunjukkan gejala radioaktivitas, yaitu torium (Th). Bahan ini ternyata mampu memancarkan sinar-sinar Becquerel, sama seperti yang dipancarkan U. Ketika diukur dengan elektroskop, sinar yang dipancarkan Th ternyata memiliki kekuatan yang hampir sama

dengan U (Birch, 1993). Dari penemuan Th, Marie akhirnya berhasil menjawab pertanyaan dasar paling penting dari para peneliti, yaitu adanya bahan selain U yang mampu menunjukkan gejala sama.

Setelah berhasil menemukan Th, Marie merasa perlunya sebutan umum untuk bahan-bahan yang mampu memancarkan sinar-sinar Becquerel. Marie mengusulkan istilah radioaktivitas untuk menyebut gejala pemancaran radiasi secara spontan dari bahan. Bahan yang memiliki sifat radioaktivitas disebut bahan radioaktif, sedangkan radiasi yang dipancarkannya disebut sinar radioaktif. Dengan semakin berkembangnya pengetahuan tentang inti atom, serta banyaknya bahan-bahan radioaktif yang kini dikenal manusia, untuk kajian-kajian yang lebih spesifik, sebutan radionuklida juga sering dipakai untuk menyebut bahan radioaktif.

2.5 RADIONUKLIDA PRIMORDIAL

Pada masa-masa awal studi radioaktivitas, para ilmuwan baru mengenal adanya dua jenis radionuklida di alam, yaitu U dan Th. Tantangan berikutnya kala itu adalah menjawab pertanyaan “masih adakah radionuklida alamiah lainnya selain kedua bahan yang sudah ditemukan itu?”. Ketika pasangan suami-istri Marie dan Pierre menguji sejenis mineral yang disebut *pitchblende*, bahan itu ternyata menunjukkan tanda-tanda kekuatan pancaran radiasi hingga empat kali lebih kuat dibandingkan bahan kimia lain yang hanya mengandung U dengan jumlah yang sama. Permasalahan ilmiah muncul untuk menjelaskan fenomena tersebut.

Fenomena *pitchblende* ternyata sangat menarik bagi pasangan Marie dan Pierre Curie. Sayangnya, saat itu belum ada satupun teori yang mampu menjelaskan fenomena tersebut dari sudut pandang fisika. Satu-satunya dugaan yang paling mungkin untuk menjawab masalah itu adalah adanya sesuatu yang lain dalam *pitchblende*. Sesuatu itu bersifat jauh lebih radioaktif dibandingkan U dan Th. Dengan mempelajari fenomena yang ditunjukkan oleh *pitchblende*, selang dua tahun dari penemuan U, tepatnya pada tahun 1898, pasangan suami-istri ilmuwan berkebangsaan Prancis itu berhasil

menemukan dua radionuklida baru yang dapat menunjukkan gejala sama seperti U (Birch, 1993), yang dinamai Polonium (Po), dalam rangka menghargai tanah air Marie Curie, yaitu Polandia, dan Radium (Ra).

Berkat ketekukan para ilmuwan dalam mempelajari gejala radioaktivitas alam, dalam kurun waktu berikutnya, puluhan bahan lain yang mampu menunjukkan gejala radioaktivitas berhasil ditemukan. Unsur-unsur radioaktif yang ditemukan oleh Becquerel, Curie, maupun peneliti-peneliti lainnya merupakan radionuklida alam. Unsur-unsur ini diduga kuat terbentuk bersamaan dengan proses kelahiran alam. Atas jasanya dalam menemukan, mempelajari, dan mengungkap rahasia sifat-sifat keradioaktifan suatu bahan, pada tahun 1903, Becquerel dianugerahi hadiah Nobel Fisika bersama-sama Pierre Curie dan Marie Curie (Wilopo, 2002)

Radionuklida alam yang ditemukan berada di dalam perut bumi sering disebut sebagai radionuklida primordial. Induk bahan radioaktif ini mulanya ditemukan dalam lapisan tanah atau batuan, namun ada pula yang terlarut dalam air tanah serta bisa juga menghasilkan anak luruh berupa gas yang akhirnya diemisikan ke udara. Hampir semua sumber air yang terdapat di permukaan Bumi mengandung radionuklida alam dalam jumlah tertentu.

Jenis dan jumlah zat radioaktif kelompok radionuklida primordial sangat banyak, beberapa diantaranya merupakan kelompok unsur yang tergolong sangat tua. Unsur-undur itu memiliki umur paro sangat panjang, mencapai di atas 100 juta tahun (Kaplan, 1979). Umur paro ($T_{1/2}$) adalah waktu yang diperlukan oleh radionuklida untuk melakukan proses peluruhan inti sehingga jumlahnya berkurang menjadi setengah dari jumlah semula. Pada tahun 1906, fisikawan Inggris bernama Norman Robert Campbell (1880–1949) dan A. Wood menemukan sifat keradioaktifan dalam bentuk pemancaran sinar beta lemah pada unsur kalium dan rubidium. Kalium-40 (^{40}K) dengan $T_{1/2} = 1,28 \times 10^9$ tahun, meluruh menjadi Argon-40 (^{40}Ar), sedangkan Rubidium-87 (^{87}Rb) dengan $T_{1/2} = 4,8 \times 10^{10}$ tahun, dalam peluruhannya menghasilkan strontium-87 (^{87}Sr). Mineral dengan kandungan

^{40}K cukup banyak, baik dalam bentuk pasir maupun batuan, misalnya muscovite, biotite, hornblende, glauconite, sanidine, serta semua jenis batuan yang berasal dari gunung berapi. Air laut banyak mengandung ^{40}K , sedangkan tempat-tempat sumber air panas mengandung sejumlah U, Th, dan Ra.

Radionuklida primordial berbentuk gas yang terlarut dalam udara dan cukup menarik perhatian para ahli kesehatan lingkungan adalah gas radon-222 (^{222}Rn). Pada temperatur ruang, ^{222}Rn selalu berada dalam fase gas yang tidak berwarna dan tidak berbau dengan kerapatan 10 gram/liter. Keberadaannya di lingkungan tidak dapat dikenali secara langsung oleh sistem panca indera manusia (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiations [UNSCEAR], 2000).

Dalam kurun waktu selama 25 tahun, baru ditemukan dua jenis radionuklida, yaitu ^{40}K dan ^{87}Rb , yang diketahui sebagai radionuklida primordial di luar kelompok anggota keluarga anak luruh deret U dan Th (Arnika, 1996). Selanjutnya, pada tahun 1932, G. Harvesy dan M. Pahl menemukan sifat keradioaktifan pada unsur samarium (Sm). Setelah itu, dalam beberapa tahun berikutnya, beberapa jenis radionuklida alamiah di luar anggota keluarga deret U dan Th menyusul ditemukan. Jenis radionuklida alamiah lain, dengan umur paro yang jauh lebih panjang dari unsur-unsur yang terbentuk sebelum masa Kriptozoik, akhirnya juga ditemukan. Unsur-unsur tersebut adalah indium-115 (^{115}In) dengan umur paro 5×10^{14} tahun, hafnium-174 (^{174}Hf) dengan umur paro 2×10^{15} tahun, cerium-142 (^{142}Ce) dengan umur paro 5×10^{16} tahun, serta dysprosium-156 (^{156}Dy) dengan umur paro paling panjang, yaitu 4×10^{18} tahun.

Radionuklida primordial yang terdapat dalam udara utamanya berasal dari gas radon dan thoron yang masing-masing merupakan radionuklida anak luruh dalam deret U dan Th. ^{238}U dalam deret peluruhannya menghasilkan ^{226}Ra , sedangkan ^{226}Ra dalam peluruhannya menghasilkan ^{222}Rn (gas radon). Dalam deret Th, peluruhan ^{232}Th menghasilkan ^{220}Rn (gas thoron). U dan Th terdapat di dalam hampir semua lapisan kerak bumi sehingga gas ^{222}Rn dan ^{220}Rn akan selalu

terbentuk setiap saat (Hipkin & Payter, 1991). ^{222}Rn dan ^{220}Rn yang berbentuk gas menyebabkan kedua radionuklida tersebut cenderung berdifusi menerobos menuju permukaan Bumi dan terlarut dalam udara. Selanjutnya, anak luruh dari kedua gas radioaktif tersebut dapat menempelkan diri pada debu-debu dalam udara. Kadar gas ^{222}Rn dan ^{220}Rn di dalam udara bergantung pada kadar U dan Th di suatu tempat. Di daerah pertambangan dan gua-gua di bawah tanah, kandungan kedua radionuklida tersebut ditemukan cukup tinggi dibandingkan pada kondisi normal.

Dengan memperhatikan umur paro radionuklida alam, terdapat beberapa radionuklida yang umur paronya amat sangat panjang, melebihi perkiraan umur Bumi. Radionuklida kelompok ini diduga sudah terbentuk jauh sebelum Bumi terbentuk, yaitu pada saat masih berupa nebula (bagian dari Matahari) atau bahkan saat masih dalam keadaan proto planet yang kemudian dingin dan melahirkan planet Bumi sesuai dengan hipotesis mengenai teori terbentuknya Bumi (Arnika, 1996)

Radionuklida primordial sering kali disebut dengan istilah NORM, singkatan dari *naturally occurring radioactive materials*. Radionuklida, terutama yang berbentuk padat, biasanya terikat kuat dalam suatu batuan atau terkubur jauh di kedalaman di bawah permukaan tanah. Pada industri minyak dan gas, NORM pertama kali dideteksi pada tahun 1904 di Kanada. Di lapangan pertambangan gas alam banyak ditemukan gas radon yang merupakan anak luruh NORM radium-226 (Ra-226). Deposif fosfat alam biasanya mengandung radionuklida alamiah seperti U-238, Th-232, Ra-226, dan K-40 dengan konsentrasi yang relatif tinggi. Dalam batu bara ditemukan U-238, Ra-226, Th-232, dan sejumlah K-40. Dari hasil pengamatan, diketahui bahwa dalam minyak bumi terdapat U-238 dan Ra-226 (UNSCEAR, 2000).

Umat manusia telah menempuh perjalanan yang begitu panjang untuk memahami gejala radioaktivitas. Pemahaman terhadap gejala tersebut menjadi makin baik dengan berkembangnya pengetahuan manusia mengenai struktur inti atom. Penelitian mengenai fenomena

radioaktivitas suatu bahan yang telah dilakukan dalam kurun waktu cukup lama akhirnya berhasil mengungkap fenomena fisika yang dapat terjadi dalam level inti atom. Diketahui bahwa pancaran radiasi secara spontan dari bahan radioaktif berhubungan sangat erat dengan peristiwa-peristiwa yang terjadi di dalam inti atom (Taylor & Zafiratos, 1991)

Selain radionuklida primordial yang terbentuk secara alamiah di dalam perut bumi, ada juga radionuklida alamiah yang terbentuk secara alamiah di atmosfer dan diberi nama radionuklida kosmogenik (Fujitaka, t.t.). Radionuklida jenis ini merupakan hasil dari interaksi antara radiasi kosmis primer yang datang dari ruang angkasa dengan unsur-unsur kimia penyusun atmosfer Bumi. Radiasi kosmis primer yang lolos dari medan magnet Bumi, dalam perjalanannya menuju Bumi, akan kehilangan energinya karena berinteraksi dengan molekul-molekul penyusun atmosfer. Radiasi yang lolos itu dapat memicu terjadinya reaksi nuklir antara partikel-partikel kosmis dengan inti atom unsur-unsur yang ada di dalam atmosfer Bumi, seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), dan nitrogen (N). Reaksi nuklir yang terjadi dapat menghasilkan radiasi kosmis sekunder seperti neutron, proton, pion, dan kaon serta beberapa jenis radionuklida kosmogenik. Radionuklida kosmogenik yang terbentuk di atmosfer akan jatuh ke Bumi bersama angin, hujan, maupun salju (Fujitaka, t.t.).



Peluruhan Radionuklida

Radionuklida primordial yang pertama kali dikenal manusia adalah uranium (U). Unsur ini bukan merupakan logam yang jarang karena keberadaannya di alam mencapai 50 kali lebih banyak dibandingkan dengan air raksa (Hg) yang sudah dikenal sejak lama. Pada masa Kriптоzoik, zaman geologi Pra Kambrium, yang terjadi pada 3.900 juta tahun silam, mineral U telah terbentuk. Uranium sebagai mineral terdapat dalam kerak bumi, juga dalam air laut, air sungai, minyak bumi, batu bara, dan lain-lain. Berbagai peristiwa alam dan proses geologi membentuk U sebagai mineral, yang terdapat dalam kerak bumi pada hampir semua jenis batuan, terutama batuan asam seperti granit, dengan kadar 3–4 gram dalam satu ton batuan (Suprpto, 1991). Bersamaan dengan terbentuknya U, terbentuk juga unsur-unsur radioaktif alam seperti torium (Th), actinium (Ac), dan kalium (K).

Di alam, dapat ditemukan berbagai jenis mineral U, ada yang diberi nama autanit, pikblenda, gumit, dan uranofan. Kadar U dalam batuan granit relatif paling tinggi bila dibandingkan dengan kadarnya dalam batuan beku lainnya (Suprpto, 1991). Ada tiga jenis isotop U

yang dapat ditemukan di alam, yaitu U-234 dengan kelimpahan yang sangat kecil (kira-kira 0,005%), U-235 dengan kelimpahan 0,715%, dan U-238 dengan kelimpahan 99,825% (Knief, 1981). Radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida primordial sering disebut sebagai radiasi terestrial, yaitu radiasi yang berasal dari permukaan Bumi.

Radiasi dari mineral-mineral yang ada dalam bebatuan maupun di dalam tanah sering kali dinamakan radiogeologi. Diberi nama demikian karena radiasi yang dipancarkannya dapat dimanfaatkan untuk studi-studi geologi. Mineral U yang terdapat dalam batuan mudah dikenali karena sifat-sifat fisiknya yang khas sebagai berikut (Tsoulfanidis, 1983).

- 1) Uranium bersifat radioaktif yang mampu memancarkan radiasi alfa, beta, dan gamma sehingga keberadaannya dapat dipantau menggunakan alat ukur radiasi.
- 2) Dalam deret peluruhannya, U menghasilkan gas radon yang terlepas ke udara. Oleh sebab itu, udara di atas wilayah yang mengandung U terdapat gas radon-222 dengan kadar yang relatif lebih tinggi dibandingkan udara pada umumnya. Keberadaan gas radon-222 ini sangat mudah dikenali menggunakan alat ukur radiasi.
- 3) Oksidasi alam dari uranium mempunyai warna hijau kekuning-kuningan dan coklat tua yang mencolok sehingga mudah dikenali dengan mata telanjang.
- 4) Apabila disinari dengan cahaya ultra ungu, uranium akan mengeluarkan cahaya fluoresens yang sangat indah dan mudah dikenal.

Keberadaan radionuklida U dalam berbagai jenis mineral dalam perut bumi ternyata memberi manfaat yang sangat besar bagi dunia sains. Radionuklida tersebut memiliki umur paro yang sangat panjang dan melakukan peluruhan dengan laju konstan. Peluruhan merupakan proses yang berlangsung di dalam inti atom suatu radionuklida sehingga laju peluruhan tidak pernah terpengaruh dan terganggu oleh perubahan kondisi fisika maupun kimia lingkungan. Oleh karena

itu, keberadaan radionuklida U dalam berbagai jenis mineral dapat dimanfaatkan sebagai jam geologi bagi perjalanan planet Bumi (Arnikar, 1996).

3.1 PANCARAN RADIASI

Inti suatu atom tersusun atas proton (p) dan neutron (n). Keduanya merupakan partikel nuklir penyusun inti dengan massa yang hampir sama, yaitu 1 satuan massa atom (sma) atau 1 *atomic mass unit* yang lazim ditulis dengan 1u. Perbedaan antara proton dan neutron terletak pada jenis muatan listriknya, di mana proton bermuatan listrik positif, sedangkan neutron tidak bermuatan listrik atau netral. Gejala radioaktivitas merupakan manifestasi dari ketidakstabilan inti atom yang ditunjukkan dengan kemampuan memancarkan radiasi secara spontan dari intinya. Ketidakstabilan inti atom timbul sebagai akibat dari terjadinya penyusunan kembali energi dan konfigurasi nukleon (komposisi jumlah proton dan neutron) dalam inti, sedemikian rupa sehingga dicapai konfigurasi nukleon baru dan inti mencapai kestabilan.

Radionuklida memiliki kecenderungan untuk menjadi atom berinti stabil dengan cara melakukan peluruhan sehingga berubah menjadi inti baru sambil melepaskan kelebihan energi intinya dalam bentuk pancaran radiasi nuklir. Jadi, gejala radioaktivitas pada prinsipnya adalah proses peluruhan (*decay*) suatu inti atom yang tidak stabil menjadi inti atom baru yang stabil disertai pemancaran radiasi. Jenis radiasi yang dipancarkan dipengaruhi oleh komposisi jumlah proton dan neutron dalam inti suatu radionuklida.

Dari hasil pengamatan, diketahui bahwa radiasi yang dipancarkan suatu radionuklida dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu radiasi partikel bermuatan dan radiasi elektromagnetik (Martin & Harbinson, 1986). Radiasi yang dipancarkan suatu radionuklida membawa energi yang cukup tinggi dan bersifat mengionkan materi yang dilewatinya sehingga radiasi ini lazim disebut sebagai radiasi pengion. Akibat bersifat pengion, pada materi yang dilalui radiasi ini akan terbentuk

pasangan-pasangan ion positif (+) dan negatif (-) akibat terjadinya pengalihan energi dari radiasi kepada materi.

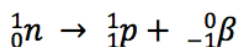
Jika berkas radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida alam dilewatkan dalam daerah bermedan listrik atau bermedan magnet, akan diperoleh tiga jenis sinar radioaktif dari berkas tersebut (Kaplan, 1979). Dengan menganalisis ketiga jenis sinar tersebut, didapatkan sinar-sinar radioaktif dengan karakteristik sebagai berikut.

- 1) Sinar alfa (α) yang dibelokkan oleh medan magnet ke arah kutub negatif. Dari hasil penyelidikan, diketahui bahwa sinar alfa merupakan partikel dengan muatan listrik $+2e$ (e adalah muatan elementer sebuah elektron yang nilainya $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb) dan massanya 4 satuan massa atom ($4u$). Dari penelitian berikutnya, diketahui bahwa partikel alfa ini tidak lain dari inti atom Helium-4 sehingga diberi lambang ${}^4_2\alpha$ atau ${}^4_2\text{He}$.
- 2) Sinar beta (β) yang dibelokkan oleh medan magnet ke arah kutub positif, berlawanan dengan arah pembelokan sinar alfa. Sinar beta merupakan partikel dengan muatan listrik $-1e$ dan tidak bermassa. Dari hasil penelitian, diketahui bahwa partikel beta ini tidak lain dari elektron sehingga diberi lambang ${}^0_{-1}\beta$ atau ${}^0_{-1}\text{e}$.
- 3) Sinar gamma (γ) yang tidak dibelokkan, baik oleh medan listrik maupun medan magnet. Dari penyelidikan, diketahui bahwa sinar gamma merupakan radiasi elektromagnetik yang tidak bermassa dan tidak bermuatan sehingga biasa ditulis dengan lambang ${}^0_0\gamma$.

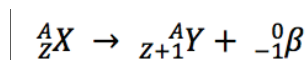
Tingkat kestabilan inti atom sangat dipengaruhi oleh nilai perbandingan antara jumlah neutron (N) dan jumlah proton (Z) yang ada dalam inti atom tersebut. Untuk atom-atom ringan dengan nomor atom di bawah 20 ($Z < 20$), jika nilai perbandingan antara $N/Z = 1$, inti atom tersebut bersifat stabil. Sementara itu, jika nilai N/Z tidak sama dengan satu, dalam hal ini bisa lebih kecil atau lebih besar dari satu ($N/Z < 1$ atau $N/Z > 1$), ada kemungkinan inti atomnya tidak stabil atau bersifat radioaktif (Amirudin, 2009).

Jenis radiasi yang dipancarkan dari inti atom juga dipengaruhi oleh nilai N/Z dalam inti atom bersangkutan. Neutron merupakan

partikel yang tidak bermuatan listrik dengan massa 1u sehingga diberi notasi 1_0n . Proton merupakan partikel bermuatan listrik +1e dengan massa 1u sehingga diberi notasi 1_1p . Inti-inti ringan dengan $N/Z > 1$, berarti jumlah neutron lebih banyak dibandingkan jumlah proton. Untuk mencapai keadaan inti yang stabil, dalam inti atom itu akan terjadi perubahan neutron menjadi proton disertai pemancaran elektron atau radiasi beta negatif (Kaplan, 1979). Inti atom dengan $N/Z > 1$ sering pula dikatakan sebagai atom yang kelebihan elektron. Proses perubahan neutron menjadi proton berlangsung dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut (Friedlander dkk., 1981):



Jika suatu inti meluruh sambil memancarkan sinar ${}^0_{-1}\beta$, akan dihasilkan inti baru dengan nomor atom (Z) bertambah satu dan nomor massa (A) tetap. Pemancaran sinar ${}^0_{-1}\beta$ berlangsung melalui perubahan neutron menjadi proton sehingga sering pula dikatakan bahwa inti baru yang dihasilkan dari proses peluruhan ${}^0_{-1}\beta$ mengalami penambahan satu buah proton dan pengurangan satu buah neutron dibandingkan inti asalnya. Massa neutron dan proton masing-masing adalah 1u sehingga inti yang melakukan peluruhan (induk) dan inti hasil peluruhan (anak) tidak mengalami perubahan massa inti. Inti induk dan inti hasil peluruhan keduanya membentuk isobar, yaitu atom-atom dengan A sama namun Z berbeda. Persamaan umum yang menggambarkan proses peluruhan ${}^0_{-1}\beta$ adalah sebagai berikut:



Dari persamaan tersebut, terlihat bahwa inti yang melakukan peluruhan (X) dan inti hasil peluruhan (Y) keduanya memiliki massa sama, yaitu A. Meskipun terjadi pemancaran elektron, namun muatan total sebelum dan setelah proses peluruhan tidak mengalami perubahan. Total muatan dari inti induk X yang berada di sebelah kiri tanda panah adalah Ze, sedangkan muatan total seluruh hasil

peluruhan yang berada di sebelah kanan tanda panah adalah sama, yaitu $(Z+1)e - 1e = Ze$.

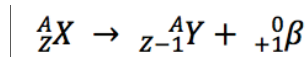
Inti atom dengan nilai $N/Z < 1$ memiliki jumlah neutron lebih kecil dibandingkan jumlah proton. Untuk mencapai keadaan inti yang stabil, inti atom jenis ini akan menjalani peluruhan dengan mengubah proton menjadi neutron. Proses peluruhan itu disertai pemancaran positron atau radiasi beta positif (Gautreau & Savin, 1995). Positron, sering juga disebut sebagai sinar beta positif, merupakan partikel bermuatan listrik $+1e$ yang tidak bermassa sehingga diberi notasi ${}^0_{+1}e$ atau ${}^0_{+1}\beta$. Pemancaran positron ini dapat berlangsung apabila massa inti yang meluruh (inti induk) lebih besar dibandingkan dengan massa inti hasil peluruhan (inti turunan), sekurang-kurangnya selisih dua kali massa elektron (e). Jika persyaratan itu tidak terpenuhi, yang akan terjadi dalam inti adalah proses penangkapan elektron.

Proses tangkapan elektron (*electron capture*) adalah proses di mana salah satu elektron orbital ditangkap oleh inti atomnya sendiri. Elektron yang tertangkap adalah elektron yang berada pada lintasan kulit K. Elektron dalam orbit ini berada dalam jarak yang sangat dekat dengan inti sehingga mempunyai peluang paling besar untuk ditangkap inti atom dibandingkan dengan elektron yang berada di lintasan-lintasan lainnya. Oleh karena itu, proses penangkapan elektron oleh inti atom juga sering disebut sebagai penangkapan K. Elektron yang ditangkap selanjutnya akan menyatu dengan proton sehingga membentuk neutron baru dalam inti (Gautreau & Savin, 1995).

Atom dengan nilai $N/Z < 1$ merupakan atom yang mempunyai kelebihan proton (bermuatan $+1e$). Untuk mencapai kondisi inti yang stabil, selain menjalani peluruhan dengan mengubah proton menjadi neutron seperti yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya, inti atom dapat menyerap elektron yang bermuatan $-1e$. Penyerapan elektron oleh inti suatu atom akan memberikan hasil yang sama apabila atom tersebut memancarkan positron (Halliday & Resnic, 1990). Proses peluruhan inti yang mengubah proton menjadi neutron dapat dijelaskan dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut:



Ketika para ilmuwan mulai mempelajari sifat keradioaktifan pada radionuklida alam, keberadaan radionuklida pemancar positron belum diketahui. Keberadaan positron pertama kali diramalkan oleh Paul AM. Dirac (1902–1984) pada tahun 1927 dan diamati untuk pertama kalinya pada sinar kosmis dari angkasa luar oleh Carl D. Anderson (1905–1991) pada tahun 1932. Inti yang melakukan proses peluruhan disertai dengan pemancaran positron akan menghasilkan inti baru dengan nilai Z berkurang satu dan A tetap. Inti induk yang melakukan peluruhan dan inti anak hasil peluruhan membentuk isobar. Persamaan untuk menggambarkan proses peluruhan inti yang disertai dengan pancaran positron adalah sebagai berikut:

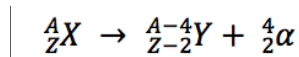


Dari persamaan tersebut, terlihat bahwa inti induk (X) dan inti hasil peluruhan (Y) memiliki massa sama, masing-masing A. Pemancaran positron tidak mengakibatkan perubahan muatan. Total muatan setelah peluruhan sama dengan total muatan sebelum peluruhan. Muatan dari inti induk X yang berada di sebelah kiri tanda panah adalah Ze, sedang muatan total seluruh hasil peluruhan yang berada di sebelah kanan tanda panah adalah $(Z-1)e + 1e = Ze$. Unsur-unsur radioaktif buatan dengan Z rendah umumnya berperan sebagai pemancar positron.

Akibat dari proses penangkapan atau penyerapan elektron dari kulit K oleh inti atom, tempat kulit K yang semula berisi elektron menjadi kosong. Kekosongan ini akan diisi oleh elektron lain yang berasal dari kulit dengan level energi lebih tinggi, yaitu elektron yang mengisi orbit lebih luar dari kulit K. Karena berasal dari orbit dengan level energi yang lebih tinggi, perpindahan elektron akan disertai dengan terjadinya pancaran sinar-X yang besar energi fotonnya merupakan selisih antara level energi kulit K dengan level energi kulit

asal elektron tersebut. Selisih energinya begitu spesifik, bergantung pada jenis atomnya, sehingga setiap proses penangkapan elektron akan selalu diikuti oleh terjadinya pancaran energi foton yang disebut sinar-X karakteristik (Young & Freedman, 1998).

Kelompok atom-atom berat dengan Z tinggi dan nilai N/Z lebih besar dari 1,6, dalam proses peluruhannya akan selalu disertai pemancaran partikel alfa atau inti atom helium (He). Apabila inti atom memancarkan partikel alfa, maka nilai Z inti atomnya berkurang dua dan nilai A berkurang empat. Proses peluruhan inti yang disertai dengan pemancaran partikel alfa dapat dijelaskan dengan persamaan reaksi inti sebagai berikut:



Inti-inti berat bernomor atom tinggi dengan nilai $N/Z > 1,6$ merupakan inti yang muncul pada akhir tabel periodik. Peluruhan inti atom berat umumnya berlangsung melalui pemancaran radiasi alfa (Friedlander dkk., 1981). Sebagian besar inti berat dengan $A > 150$ merupakan pemancar alfa dan sebagian besar radionuklida pemancar alfa mempunyai $A > 200$. Sementara itu, di alam ditemukan pula inti lebih ringan yang memancarkan sinar alfa. Inti tersebut memiliki umur paro yang sangat panjang, namun model peluruhannya sulit untuk diamati.

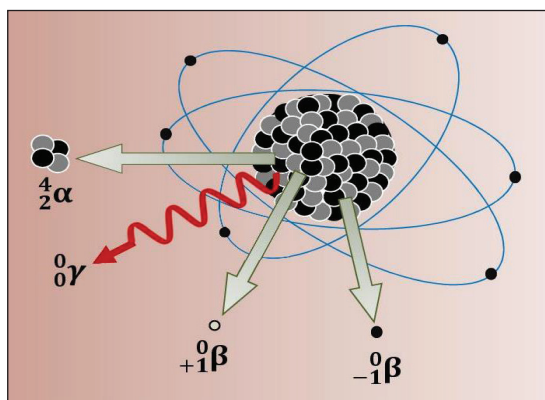
Partikel alfa yang terpancar dari inti tidak berada dalam suatu inti atom, namun dapat terbentuk sebagai kesatuan nukleon dalam inti yang tersusun atas 2 neutron dan 2 proton. Partikel alfa ini memiliki kestabilan inti yang sangat tinggi sehingga dalam beberapa kasus dapat berperan sebagai partikel tunggal. Jika kesatuan nukleon itu berada sangat dekat dengan permukaan inti atom, ada kemungkinan ia lepas dari ikatan inti dalam bentuk partikel alfa. Partikel itu bermuatan listrik $+2e$ yang berasal dari 2 proton dan bermassa $4u$ karena mengandung 2 buah neutron dan 2 buah proton (Kaplan, 1979).

Jenis-jenis radiasi yang dapat dipancarkan oleh inti atom radioaktif diilustrasikan pada Gambar 3.1. Ketika para ilmuwan baru

mengenal atom radioaktif alam, jenis radiasi yang diketahui saat itu hanyalah sinar α , sinar β negatif atau elektron, dan sinar γ . Namun, ketika para ilmuwan berhasil menghadirkan unsur-unsur radioaktif buatan, mereka juga mengamati adanya unsur-unsur radioaktif dengan nomor atom ringan yang dapat memancarkan sinar b positif atau positron, yang setelah diselidiki ternyata merupakan elektron bermuatan listrik positif.

Radionuklida yang memancarkan sinar gamma tidak akan mengalami pengurangan Z maupun A, hanya intinya saja yang berada dalam keadaan tereksitasi kembali ke keadaan dasar. Inti dalam keadaan tereksitasi adalah inti yang memiliki tingkat energi di atas tingkat terendahnya atau tingkat dasar (*ground state*). Sementara itu, tingkat energi dasar suatu inti adalah energi ikat inti total dari inti stabil (Halliday & Resnic, 1990).

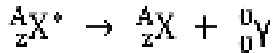
Atom yang tereksitasi biasanya terjadi pada atom yang melakukan peluruhan dengan memancarkan sinar alfa maupun beta, dan untuk mencapai tingkat energi dasar atau keadaan stabil, atom tersebut melakukan pelepasan energi melalui pancaran sinar gamma. Oleh sebab itu, pemancaran sinar gamma biasanya menyertai peluruhan inti yang



Sumber: Friedlander dkk. (1981)

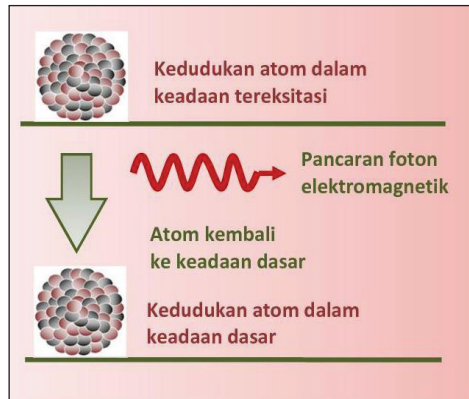
Gambar 3.1 Pancaran Radiasi oleh Radionuklida

memancarkan sinar alfa maupun beta. Pemancaran sinar gamma tidak menyebabkan terjadinya perubahan Z maupun N, melainkan hanya terjadi perubahan energi intinya saja. Proses pemancaran energi gamma ditunjukkan pada Gambar 3.2. Persamaan peluruhan inti radioaktif yang memancarkan sinar gamma dapat digambarkan melalui persamaan perubahan kondisi inti sebagai berikut:



Tanda (*) dipakai untuk menyatakan bahwa suatu inti berada dalam keadaan tereksitasi.

Selain memancarkan sinar gamma, terdapat cara lain agar inti yang tereksitasi dapat kembali ke keadaan dasarnya. Energi gamma yang dipancarkan inti tereksitasi dapat langsung diserap oleh elektron yang mengisi orbit bagian dalam atom itu sendiri, seperti elektron yang mengisi kulit K dan L. Elektron yang telah memperoleh energi itu mampu melepaskan diri dari ikatan intinya dan terpental dengan membawa sejumlah energi kinetik. Energi gamma, yang diserap elektron, dipakai untuk melawan energi ikat inti dan sisa energinya diubah menjadi energi kinetik elektron. Proses seperti ini disebut sebagai pengubahan diri (Gautreau & Savin, 1995). Kekosongan elektron pada kulit K dan L akibat berlangsungnya pengubahan diri itu akan segera



Sumber: Krane (1992)

Gambar 3.2 Kondisi Atom yang Tereksitasi

diisi oleh elektron-elektron lainnya dari kulit yang lebih luar, diikuti dengan terjadinya pancaran sinar-X karakteristik.

3.2 AKTIVITAS RADIONUKLIDA

Pemancaran radiasi yang terjadi secara terus-menerus dan berlangsung sepanjang waktu akan mengakibatkan berkurangnya jumlah radionuklida. Peristiwa penyusutan jumlah radionuklida ini disebut sebagai pelapukan atau peluruhan. Berkurangnya jumlah radionuklida juga akan disertai dengan berkurangnya jumlah radiasi yang dipancarkan. Laju peluruhan setiap radionuklida bergantung pada jenis nuklidanya. Jumlah peluruhan yang terjadi setiap saat juga bergantung pada jumlah radionuklida awal. Dalam hal ini, setiap jenis radionuklida mempunyai konstanta peluruhan (λ) masing-masing. Konstanta peluruhan didefinisikan sebagai fraksi radionuklida yang meluruh ($\frac{\Delta N}{N}$) tiap satuan waktu ($\Delta\tau$) yang dapat ditulis dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Young & Freedman, 1998):

$$\frac{\Delta N}{N} = -\lambda \quad \text{atau} \quad \frac{\Delta N}{N} = -\lambda \Delta t \quad (1)$$

Tanda minus (-) di depan λ ($-\lambda$) menunjukkan bahwa dalam peluruhan ini terjadi pengurangan jumlah radionuklida. Dengan mengintegrasikan persamaan (1) akan diperoleh persamaan yang menyatakan kondisi jumlah radionuklida setiap saat,

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t \quad \text{atau} \quad N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

dengan N_t adalah jumlah radionuklida setiap saat, N_0 adalah jumlah radionuklida mula-mula, λ adalah konstanta peluruhan, dan t adalah jangka waktu peluruhan yang telah berlangsung. Satuan untuk λ dan t harus disesuaikan, misalnya jika t dalam detik atau sekon (s),

λ harus dalam s^{-1} ; jika t dalam menit, λ harus dalam min^{-1} ; dan jika t dalam tahun (th), λ harus dalam th^{-1} .

Persamaan (1) maupun (2) diperoleh melalui eksperimen berdasarkan tingkat kebolehjadian berlangsungnya proses peluruhan atas sejumlah radionuklida pada selang waktu tertentu. Peluruhan merupakan peristiwa statistik sehingga persamaan tersebut hanya berlaku apabila jumlah awal radionuklida yang melakukan proses peluruhan (N_0) sangat banyak.

Setiap jenis radionuklida juga memiliki umur paro ($T_{1/2}$) masing-masing. Umur paro adalah waktu yang diperlukan oleh radionuklida untuk meluruh sehingga jumlahnya menjadi setengah dari jumlah semula. Umur paro merupakan salah satu jenis data nuklir yang hanya melekat pada radionuklida. Makin pendek umur paro, makin cepat radionuklida tersebut meluruh sehingga kemampuannya memancarkan radiasi berkurang dengan cepat pula. Sebaliknya, makin panjang umur paronya, makin lambat radionuklida melakukan peluruhan (Walker dkk., 1989).

Berdasarkan definisi $T_{1/2}$ di atas, jika saat awal ($t = 0$) terdapat radionuklida dengan jumlah N_0 , saat radionuklida telah meluruh selama $t = T_{1/2}$ akan tersisa radionuklida sebanyak $N_1 = \frac{1}{2} N_0$. Jika saat telah melakukan peluruhan selama $t = 2 \times T_{1/2}$, akan tersisa radionuklida sebanyak $N_2 = \frac{1}{4} N_0$. Jika saat telah melakukan peluruhan selama $t = 3 \times T_{1/2}$, akan tersisa radionuklida sebanyak $N_3 = \frac{1}{8} N_0$, dan seterusnya. Dari penjelasan di atas, dapat diperoleh persamaan matematis yang menunjukkan hubungan antara λ dan $T_{1/2}$ melalui penurunan persamaan (2) sebagai berikut:

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

Ambil salah satu kasus, yaitu setelah radionuklida meluruh selama $t = T_{1/2}$ dan jumlah radionuklida yang tersisa adalah $N_1 = \frac{1}{2} N_0$, maka:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \text{ atau } \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2} \ln(e) \text{ atau } -0,693 = -\lambda T_{1/2}$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \text{ atau } \lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (3)$$

Setiap radionuklida memiliki $T_{1/2}$ masing-masing, nilainya bervariasi antara yang satu dengan lainnya, mulai dari orde mikro detik (μs) hingga jutaan tahun. Radionuklida ^8Be , misalnya, merupakan radionuklida pemancar alfa dengan $T_{1/2}$ nya berorde 10^{-16} s, sedangkan radionuklida pemancar alfa lainnya seperti ^{209}Bi memiliki $T_{1/2}$ yang nilainya 2×10^{18} tahun, dan radionuklida pemancar beta ^{115}In mempunyai $T_{1/2}$ yang nilainya 6×10^{14} tahun. Mengingat peluruhan radionuklida merupakan peristiwa statistik, maka persamaan-persamaan yang berkaitan dengan peristiwa peluruhan hanya berlaku untuk radionuklida dengan jumlah (N) besar (Walker dkk., 1989).

Seperti besaran fisika lainnya, peluruhan radionuklida juga merupakan suatu besaran fisika yang memiliki satuan. Untuk peluruhan, dikenal adanya besaran aktivitas radionuklida. Besaran ini digunakan untuk menyatakan jumlah inti radionuklida yang melakukan peluruhan per satuan waktu, satuan waktu yang lazim digunakan adalah detik atau sekon (s). Untuk menyatakan besaran aktivitas radionuklida digunakan satuan Becquerel, disingkat Bq. Suatu radionuklida dinyatakan memiliki aktivitas satu Bq apabila radionuklida itu melakukan satu kali peluruhan (disintegrasi) setiap detiknya, biasanya disingkat dengan dps (disintegrasi per sekon, dimana $1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$) (Martin & Harbinson, 1986). Satuan Bq dipakai sebagai Satuan Internasional (SI) sejak tahun 1976.

Mengingat aktivitas radionuklida (A) menyatakan jumlah inti radionuklida yang melakukan peluruhan (ΔN) per satuan waktu (Δt), maka dari persamaan (1) diperoleh persamaan baru yang dipakai untuk menyatakan aktivitas suatu radionuklida sebagai berikut:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad (4)$$

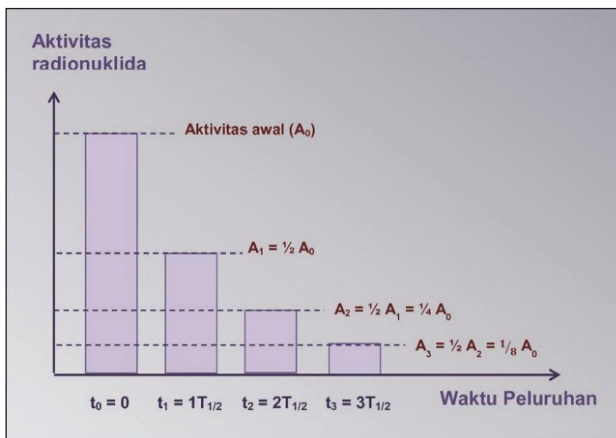
Jumlah inti radionuklida akan terus berkurang setiap saat karena terjadinya peluruhan. Dengan demikian, aktivitas suatu radionuklida juga akan terus menyusut setiap saat seiring berjalannya waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dari persamaan (2) dapat diturunkan suatu persamaan untuk menyatakan aktivitas radionuklida sebagai berikut:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \text{ atau } \lambda N_t = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Berdasarkan persamaan (4), $A = \lambda N$, maka aktivitas radionuklida setiap saat memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

dengan A_t adalah aktivitas radionuklida setiap saat dan A_0 adalah aktivitas radionuklida awal. Pengukuran aktivitas radionuklida dilakukan dengan cara mengukur radiasi yang dipancarkan dan besar aktivitas setiap saat sebanding dengan jumlah radionuklidanya.



Sumber: Kaplan (1979)

Gambar 3.3 Diagram penurunan aktivitas radionuklida karena peluruhan

3.3 DERET PELURUHAN

Beberapa jenis radionuklida alam selalu meluruh menghasilkan radionuklida baru yang disebut radionuklida anak. Radionuklida anak juga dapat meluruh dan menghasilkan radionuklida lainnya sehingga membentuk suatu deret peluruhan yang sangat panjang. Deret peluruhan dari radionuklida alam dapat dibagi menjadi 3 kelompok sebagai berikut (Kaplan, 1979).

- a. Deret uranium (U), dimulai dari ^{238}U dan berakhir pada timah hitam (^{206}Pb) yang stabil. Deret ini juga disebut deret $(4n + 2)$ karena A dari radionuklida anggota yang terdapat dalam deret ini habis dibagi 4 dengan sisa 2. Anak luruh radionuklida yang menjadi anggota deret ini disajikan pada Tabel 3.1, sedangkan skema proses rantai peluruhannya ditunjukkan pada Gambar 3.3.
- b. Deret torium (Th), dimulai dari ^{232}Th dan berakhir pada ^{208}Pb yang stabil. Deret ini juga disebut juga deret $4n$ karena A dari radionuklida anggota yang terdapat dalam deret ini selalu habis dibagi 4. Anak luruh radionuklida yang menjadi anggota deret ini disajikan pada Tabel 3.2, sedangkan skema proses rantai peluruhannya adalah ditunjukkan pada Gambar 3.4.
- c. Deret actinium, dimulai dari ^{235}U dan berakhir pada ^{207}Pb yang stabil. Deret ini juga disebut deret $(4n + 3)$ karena radionuklida anggota yang terdapat dalam deret yang dihasilkannya memiliki A yang habis dibagi 4 dengan sisa 3. Anak luruh radionuklida yang menjadi anggota deret ini disajikan pada Tabel 3.3, sedangkan skema proses rantai peluruhannya ditunjukkan pada Gambar 3.6.

Chember & Johnson (2009) menyampaikan ketiga deret radioaktif alam tersebut mempunyai karakteristik umum yang mirip antara satu dengan lainnya sebagai berikut:

- a. Radionuklida induk (radionuklida anggota pertama) pada masing-masing deret mempunyai umur paro yang sangat panjang dan dapat dinyatakan dalam satuan waktu geologi. Dalam deret uranium, radionuklida induknya adalah $^{238}_{92}\text{U}$ dengan $T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ tahun; dalam deret torium, radionuklida induknya adalah

${}_{90}^{231}\text{Th}$ dengan $T_{1/2} = 1,39 \times 10^{10}$ tahun; dan dalam deret actinium, radionuklida induknya adalah ${}_{88}^{227}\text{U}$ dengan $T_{1/2} = 7,10 \times 10^8$ tahun.

- b. Masing-masing deret mempunyai anak luruh radionuklida berbentuk gas berupa isotop yang berbeda dari gas radon. Dalam deret uranium, gas yang terbentuk adalah ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ (${}_{86}^{222}\text{Etn}$) yang disebut radon (Rn); dalam deret torium, gas yang terbentuk adalah ${}_{86}^{220}\text{Rn}$ (${}_{86}^{220}\text{Etn}$) yang disebut thoron (Tn); dan dalam deret actinium, gas yang terbentuk adalah ${}_{85}^{219}\text{Rn}$ (${}_{85}^{219}\text{Etn}$) yang disebut actinon (An).
- c. Produk akhir dari ketiga deret radionuklida alam adalah isotop timbal (Pb) yang stabil. Dalam deret uranium, produk akhirnya adalah ${}_{82}^{206}\text{Pb}$; dalam deret torium, produk akhirnya adalah ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ dan dalam deret actinium, produk akhirnya adalah ${}_{82}^{207}\text{Pb}$.

Tabel 3.1 Radionuklida Anggota Deret Uranium (deret $4n + 2$)

Nama Radionuklida	Lambang	Peluruhan	Umur Paro ($T_{1/2}$)
Uranium I (UI)	${}_{92}^{238}\text{U}$	α	$4,5 \times 10^9$ tahun
Uranium X1 (UX1)	${}_{90}^{234}\text{Th}$	β	24,1 hari
Uranium X2 (UX2)	${}_{91}^{234\text{m}}\text{Pa}$	β	1,18 menit
Uranium Z (UZ)	${}_{91}^{234\text{g}}\text{Pa}$	β	6,7 jam
Uranium II (UII)	${}_{92}^{234}\text{U}$	α	$2,5 \times 10^5$ tahun
Ionium (Io)	${}_{90}^{230}\text{Th}$	α	$8,0 \times 10^4$ tahun
Radium (Ra)	${}_{88}^{226}\text{Ra}$	α	1620 tahun
Ra Emanation (Rn)	${}_{86}^{222}\text{Etn}$	α	3,82 hari
Radium A (RaA)	${}_{84}^{218}\text{Po}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	3,20 menit
Radium B (RaB)	${}_{82}^{214}\text{Pb}$	β	26,8 menit
Astatine 218	${}_{85}^{218}\text{At}$	α	1,5 detik

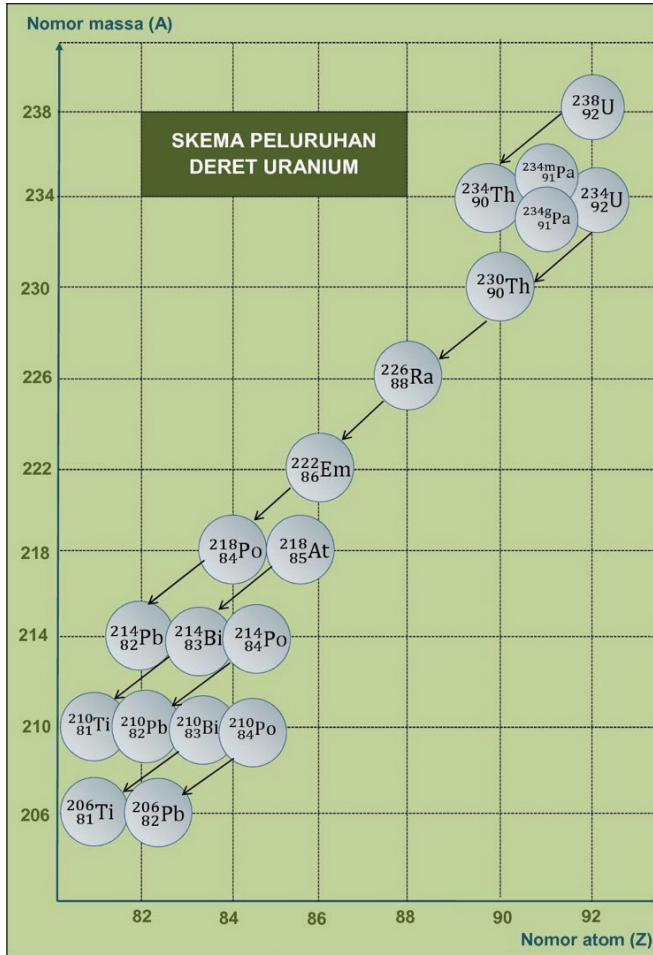
Nama Radionuklida	Lambang	Peluruhan	Umur Paro ($T_{1/2}$)
Radium C (RaC)	$^{214}_{82}\text{Bi}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	19,7 menit
Radium C' (RaC')	$^{214}_{84}\text{Po}$	α	1,64 xx 10-4 detik
Radium C'' (RaC'')	$^{210}_{81}\text{Tl}$	β	1,32 menit
Radium D (RaD)	$^{210}_{82}\text{Pb}$	β	19,4 tahun
Radium E (RaE)	$^{210}_{83}\text{Bi}$	β	5 hari
Radium F (RaF)	$^{210}_{84}\text{Po}$	α	138,3 hari
Thalium 206	$^{206}_{81}\text{Tl}$	β	4,2 menit
Radium G (RaG)	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$\sigma \alpha \beta \gamma \lambda$	---

Sumber: Arnikar (1996)

Tabel 3.2 Radionuklida Anggota Deret Thorium (deret 4n)

Nama Radionuklida	Lambang	Peluruhan	Umur Paro ($T_{1/2}$)
Torium (Th)	$^{232}_{90}\text{Th}$	a	$1,39 \times 10^{10}$ tahun
Mesotorium 1 (MsTh1)	$^{228}_{88}\text{Ra}$	b	6,7 tahun
Mesotorium 2 (MsTh2)	$^{228}_{84}\text{Ac}$	b	6,13 jam
Radiotorium (RdTh)	$^{228}_{90}\text{Th}$	a	1,91 tahun
Torium X (ThX)	$^{224}_{88}\text{Ra}$	a	3,64 hari
Th Emanation (Tn)	$^{220}_{86}\text{Rn}$	a	51,5 detik
Torium A (ThA)	$^{216}_{84}\text{Po}$	a dan b	0,16 detik
Torium B (ThB)	$^{212}_{82}\text{Pb}$	b	10,6 jam
Astatine 216	$^{216}_{85}\text{At}$	a	3×10^{-4} detik
Torium C (ThC)	$^{212}_{83}\text{Bi}$	a dan b	60,5 menit
Torium C' (ThC')	$^{212}_{84}\text{Po}$	a	3×10^{-7} detik
Torium C'' (ThC'')	$^{208}_{81}\text{Tl}$	b	3,10 menit
Torium D (ThD)	$^{208}_{82}\text{Pb}$	stabil	---

Sumber: Arnikar (1996)



Sumber: Kaplan (1979)

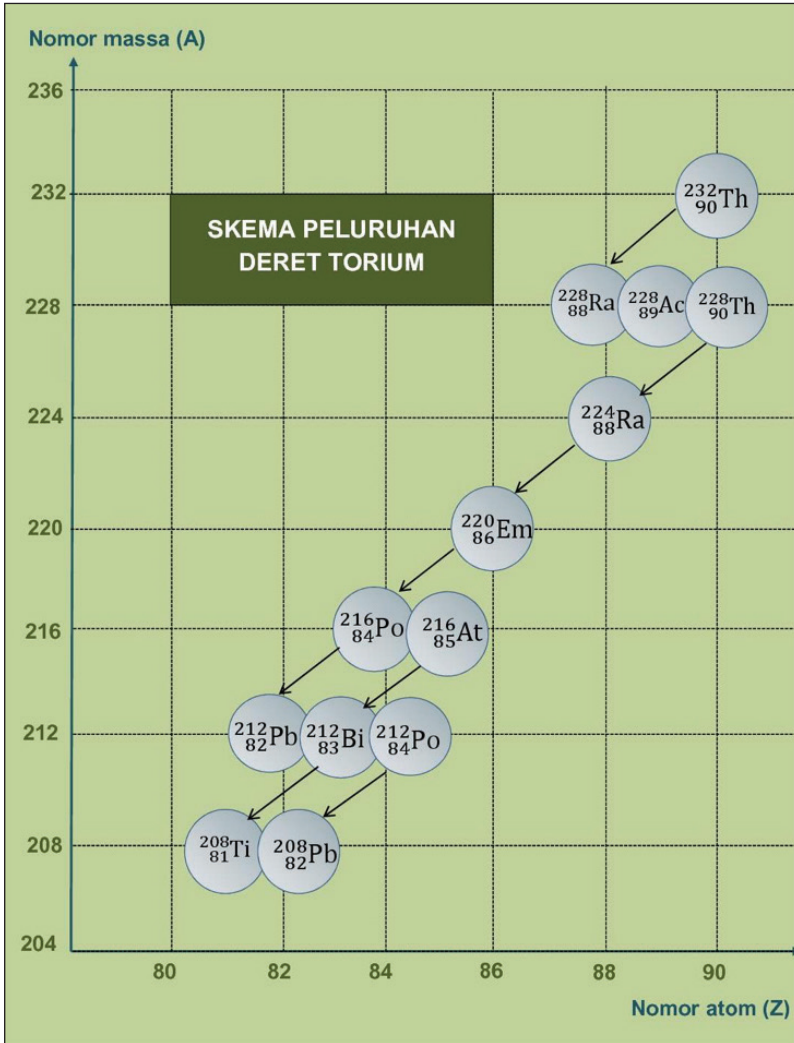
Gambar 3.4 Skema Peluruhan Deret Uranium

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 3.3 Radionuklida Anggota Deret actinium (deret $4n + 3$)

Nama Radionuklida	Lambang	Peluruhan	Umur Paro ($T_{1/2}$)
Actinouranium (AcU)	$^{235}_{92}\text{U}$	α	$7,10 \times 10^8$ tahun
Uranium Y (UY)	$^{231}_{90}\text{Th}$	β	25,6 jam
Protactinium (Pa)	$^{231}_{91}\text{Pa}$	α	$3,43 \times 10^4$ tahun
Actinium (Ac)	$^{227}_{89}\text{Ac}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	21,6 tahun
Radioactinium (RdAc)	$^{227}_{90}\text{Th}$	α	18,17 hari
Actinium K (AcK)	$^{227}_{87}\text{Fr}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	22 menit
Actinium X (AcX)	$^{223}_{88}\text{Ra}$	α	11,68 hari
Astatine 219	$^{219}_{85}\text{At}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	0,9 menit
Ac Emanation (An)	$^{219}_{86}\text{Cm}$	α	3,92 detik
Bismuth 215	$^{215}_{83}\text{Bi}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	8 menit
Actinium A (AcA)	$^{215}_{84}\text{Po}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	$1,83 \times 10^{-3}$ detik
Actinium B (AcB)	$^{211}_{82}\text{Pb}$	β	36,1 menit
Astatine 215	$^{215}_{85}\text{At}$	α	10^{-4} detik
Actinium C (AcC)	$^{211}_{83}\text{Bi}$	$\alpha \delta \alpha \nu \beta$	2,15 menit
Actinium C' (AcC')	$^{211}_{84}\text{Po}$	α	0,52 detik
Actinium C'' (AcC'')	$^{207}_{81}\text{Tl}$	α	4,79 menit
Actinium D (AcD)	$^{207}_{82}\text{Pb}$	$\sigma \tau \alpha \beta \gamma$	---

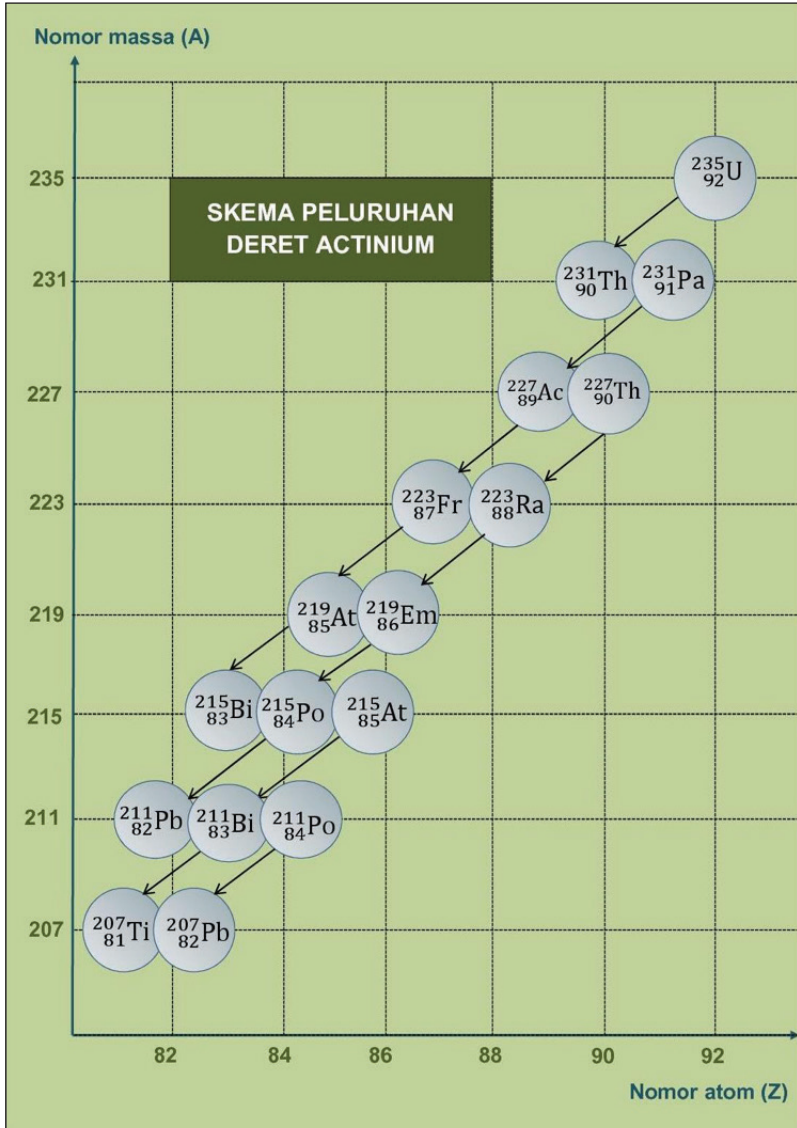
Sumber: Arnikar (1996)



Sumber: Friedlander dkk. (1981)

Gambar 3.5 Skema Peluruhan Deret Torium

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Kaplan (1979)

Gambar 3.6 Skema Peluruhan Deret Actinium

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Radionuklida Kosmogenik

Tidak berselang lama dari penemuan sinar-X oleh Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1895 dan penemuan radionuklida primordial uranium oleh Anthony Henry Becquerel pada tahun 1896, sekitar permulaan abad ke-20, para fisikawan mulai menyadari bahwa elektroskop yang sedang dioperasikan ternyata dapat menangkap sinar-sinar misterius yang terdapat di atmosfer (C. V. Wilson, 1997). Elektroskop yang ditemukan oleh A. Bennet dari Inggris pada tahun 1787 semula dirancang untuk mendeteksi keberadaan muatan listrik. Alat tersebut berfungsi mengukur besar kecilnya muatan listrik dan jenis kelistrikan, positif atau negatif, dari bahan listrik gosokan. Radiasi dapat mengionkan medium yang dilaluinya sehingga pasangan ion yang dihasilkan oleh radiasi tersebut akhirnya tertangkap oleh elektroskop yang sedang beroperasi.

Selain elektroskop, pada permulaan abad ke-20, para ilmuwan juga sudah berhasil menghadirkan instrumen pemantau radiasi yang diberi nama kamar pengionan. Alat ini dapat dipakai untuk memantau dan mengukur intensitas radiasi pengion. Sama seperti

yang terjadi pada elektroskop, kamar pengionan yang sedang diope-
rasikan ternyata juga dapat mendeteksi adanya sinar-sinar misterius
di atmosfer. Sinar misterius tadi mempunyai daya tembus yang jauh
lebih kuat dibandingkan sinar-X atau radiasi lainnya yang sudah
diketahui pada saat itu. Para peneliti memperoleh hasil bahwa sinar-X
energi tinggi dapat ditahan dengan lempeng timbal setebal 1,6 mm.
Sementara itu, lempeng timbal setebal 10 cm hanya mampu menyerap
80 % sinar misterius yang datang dari atmosfer.

Pada tahun 1909, para fisikawan mulai giat melakukan penelitian
menggunakan kamar pengionan yang dinaikkan dengan balon udara.
Mereka mendapatkan data bahwa sinar yang saat itu masih misterius
ternyata datang dari ruang angkasa (C. V. Wilson, 1997). Mereka juga
memperoleh hasil bahwa intensitas sinar bertambah kuat pada tempat-
tempat yang lebih tinggi. Di tahun 1910–1914, Victor F. Hess dari
Austria dan Werner Kolhoster dari Jerman melakukan pengukuran
intensitas radiasi pada ketinggian 9.000 meter. Mereka mendapatkan
bahwa intensitas sinar dari ruang angkasa pada ketinggian itu menca-
pai 10 kali lebih tinggi dibandingkan intensitasnya di permukaan
laut. Hess akhirnya menyimpulkan bahwa sinar-sinar itu berasal dari
angkasa luar.

Serangkaian percobaan yang dilakukan oleh tim fisikawan yang
dikomandoi oleh Robert A. Millikan dari Institut Teknologi California
pada tahun 1925 memperkuat kesimpulan Hess. Millikan bersama
kelompoknya melakukan penelitian dengan cara menurunkan kamar
pengionan ke dalam dua danau yang penuh dengan salju. Dengan
mengukur intensitas sinar pada kedalaman air yang berbeda-beda,
mereka memperoleh kesimpulan bahwa sinar-sinar itu berasal dari
luar atmosfer. Untuk pertama kalinya, istilah *sinar kosmis* dipakai
dalam laporan hasil penelitian Millikan dan kawan-kawan untuk
menamai sinar misterius yang datang dari angkasa luar tadi.

Serbuan radiasi dari ruang angkasa itu ternyata dapat memicu
terjadinya reaksi nuklir yang menghasilkan radionuklida alamiah di
atmosfer Bumi (Cosmic rays, 2003). Jadi, selain radionuklida primor-
dial yang ditemukan di dalam perut bumi sebagaimana telah dibahas

pada Bab 2, para ilmuwan juga mengenal adanya radionuklida jenis lain yang terjadi secara alamiah di ruang angkasa. Akibat proses terbentuknya radionuklida itu melibatkan radiasi kosmis, radionuklida yang dihasilkan dikenal sebagai radionuklida kosmogenik. Jika keberadaan radionuklida primordial dapat dimanfaatkan untuk penanggalan geologi dan penanggalan tembikar, yang akan dibahas lebih spesifik pada Bab 5 dan 6, radionuklida kosmogenikpun dapat dimanfaatkan untuk penanggalan fosil di bidang arkeologi, yang akan dijelaskan lebih detail pada Bab 7.

4.1 RADIASI KOSMIS

Pada tahun 1927, fisikawan Rusia, D.V Sobelstyn, mengubah pemantau radiasi kamar kabut Wilson untuk memantau sinar kosmis. Dengan alat itu, jejak radiasi kosmis yang mengionkan kabut dapat diamati seperti aliran tetes air. Pada tahun 1928–1929, Werner Kolhorster dan ilmuwan lainnya dari Jerman, Walther Bothe, mengembangkan teknik pengukuran radiasi kosmis menggunakan pencacah *Geiger-Muller*. Melalui berbagai metode pemantauan radiasi, mereka sepakat bahwa sebagian besar radiasi kosmis adalah partikel-partikel bermuatan listrik yang berenergi tinggi (Walker dkk., 1989).

Radiasi dari angkasa luar, dalam bentuk radiasi kosmis, bergerak dengan kecepatan hampir sama dengan kecepatan cahaya. Banyak penelitian telah dilakukan dalam rangka mempelajari radiasi kosmis. Penelitian lanjutan berhasil mengungkap adanya radiasi berenergi tinggi yang datang dari angkasa luar, beberapa diantaranya mempunyai energi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan energi yang dapat dihasilkan oleh pemercepat partikel paling kuat di muka Bumi saat ini (Fujitaka, t.t.)

Pada tahun 1930, Arthur H. Compton dari Universitas Chicago memimpin tim survei radiasi kosmis di seluruh dunia. Survei ini bertujuan untuk mendapatkan intensitas radiasi kosmis di permukaan Bumi pada garis lintang dan ketinggian yang berbeda-beda. Laporan survei yang diterbitkan pada tahun 1933 menunjukkan bahwa pada daerah garis lintang geomagnet 50° utara maupun selatan sampai

ekuator, intensitas radiasi kosmis pada permukaan laut turun kira-kira 10%. Hal ini menunjukkan kuatnya medan magnet Bumi dalam memantulkan partikel-partikel kosmis yang datang. Sebaliknya, di daerah kutub utara dan selatan, intensitas radiasi kosmis relatif lebih tinggi karena lemahnya medan magnet Bumi di daerah itu. Data ini juga membuktikan bahwa sinar kosmis primer merupakan partikel bermuatan listrik yang dapat melakukan interaksi dengan medan magnet Bumi (C. V. Wilson, 1997).

Di atas permukaan Bumi, terdapat perbedaan kuat medan magnet Bumi yang bersifat lokal karena pengaruh kandungan mineral-mineral besi pada kulit bumi. Komponen vertikal medan magnet Bumi maksimal terdapat di kutub-kutub magnet Bumi yang terukur mencapai 67 mikro Tesla (μT) dan menjadi nol pada khatulistiwa magnet. Komponen medan magnet horizontal maksimal terdapat pada khatulistiwa magnet yang terukur sebesar 33 mT dan mencapai nol pada kutub-kutub magnet. Sumbu magnet Bumi membentuk $11,5^\circ$ dengan sumbu rotasi bumi. Sumbu magnet ini dapat berubah-ubah dengan waktu (Wospakrik, 2005).

Pada tahun 1927, ilmuwan Belanda Jacob Clay menemukan bukti bahwa radiasi kosmis primer dipengaruhi oleh bidang magnet Bumi. Dalam perjalanan udara dari Amsterdam menuju Indonesia, Clay menemukan bahwa intensitas radiasi kosmis berkurang saat mendekati ekuator magnet dari garis-garis yang lebih tinggi. Efek garis lintang ini juga memperkuat anggapan bahwa radiasi kosmis primer merupakan partikel bermuatan listrik. Bidang magnet Bumi sangat lemah, tetapi membentang ribuan kilometer memasuki ruang angkasa. Partikel bermuatan jenis apapun yang bergerak mendekati Bumi akan dibelokkan oleh kekuatan magnet Bumi yang membentuk kurva (Wilson, 1997).

Akibat pengaruh medan magnet Bumi, intensitas radiasi kosmis di suatu tempat bervariasi dengan posisi lintang tempat itu. Energi yang diperlukan oleh partikel bermuatan untuk mencapai atmosfer Bumi pada ekuator medan magnet Bumi lebih besar dibandingkan dengan posisi lintang lainnya. Oleh sebab itu, intensitas radiasi kosmis

terendah terletak pada ekuator medan magnet Bumi. Ada dua faktor yang memengaruhi intensitas radiasi kosmis, yaitu letak ketinggian pengukuran dari permukaan laut dan letak geografis tempat pengukuran yang berhubungan dengan letak lintang suatu tempat. Hal ini berarti meskipun pengukuran dilakukan pada ketinggian dari permukaan laut yang sama, namun jika letak lintangnya berbeda maka intensitas radiasi kosmis yang terukur juga berbeda. Sebaliknya, meskipun radiasi kosmis itu diukur di tempat yang sama, namun jika ketinggiannya berbeda akan menghasilkan intensitas yang berbeda. Pengukuran intensitas radiasi kosmis di daerah khatulistiwa pada ketinggian sekitar 12.000 m, misalnya, besarnya 1/2 kali intensitas pada tempat bergaris lintang 40° dengan letak ketinggian yang sama (Fujitaka, t.t.).

Radiasi kosmis primer, berdasarkan sumbernya, dapat dibedakan menjadi tiga kelompok, yaitu radiasi kosmis galaksi, radiasi kosmis dari Matahari, dan radiasi yang terperangkap dalam medan magnet Bumi. Radiasi kosmis galaksi terbentuk dalam ruang antara galaksi di luar sistem tata surya dan sebagian besar berupa partikel bermuatan positif. Radiasi kosmis galaksi ini berasal dari energi yang dipancarkan oleh bintang-bintang yang ada di alam raya. Radiasi kosmis galaksi juga dapat berasal dari ledakan supernova yang terjadi di angkasa luar yang jaraknya puluhan tahun cahaya dari Bumi (Chember & Johnson, 2009).

Matahari juga berperan sebagai sumber radiasi kosmis primer karena secara terus-menerus memancarkan sejumlah besar proton dengan kecepatan sekitar 1.600 km/s, yang lebih sering disebut sebagai angin Matahari (White, 1997). Partikel yang terpancar langsung dari permukaan matahari terdiri atas 91% proton, 8% partikel alfa, dan 1% inti-inti atom yang lebih berat, seperti lithium, berilium, boron, oksigen, dan besi. Partikel tersebut dapat dideteksi menggunakan film emulsi fotografi maupun pemantau lainnya yang dipasang pada balon-balon udara dan diterbangkan hingga mencapai tempat yang tinggi.

Ledakan supernova dalam skala yang lebih kecil dapat terjadi pada Matahari dalam sistem Tata Surya (White, 1997). Matahari

adalah suatu bintang yang memiliki besar rata-rata seperti ukuran bintang-bintang lainnya. Peristiwa-peristiwa yang terjadi di Matahari sering kali diikuti dengan semburan partikel sub-atomik yang dapat mencapai atmosfer Bumi. Partikel sub-atomik yang dipancarkan dari permukaan Matahari bertambah banyak pada saat Matahari bersinar terang. Pancaran radiasi kosmis mengikuti siklus 11 tahunan dari aktivitas Matahari yang mencapai maksimum dengan bertambah aktifnya Matahari dan mencapai minimum selama periode Matahari dalam keadaan tenang.

Tidak semua radiasi kosmis primer dapat mencapai Bumi. Pada saat partikel bermuatan listrik itu mendekati Bumi, sebagian dari sinar ada yang terperangkap oleh medan magnet Bumi (Fujitaka, t.t.). Sekitar 30% radiasi kosmis primer yang datang dari ruang angkasa terperangkap oleh medan magnet Bumi. Partikel bermuatan yang terperangkap tersebut akhirnya membentuk dua sabuk radiasi yang terdiri atas proton dan elektron. Sabuk radiasi dapat diamati pada tempat yang sangat tinggi, terletak di antara 1,2 hingga 8 kali radius Bumi di atas khatulistiwa. Sabuk itu dinamai Sabuk Radiasi van Allen karena pertama kali ditemukan dan diamati oleh ahli astronomi, van Allen.

Sabuk pertama dari Sabuk Radiasi van Allen berada di bagian dalam dan didominasi oleh proton, terjadi kira-kira pada ketinggian 1.000 km dan membentang dari 30° lintang utara hingga 30° lintang selatan. Intensitas radiasi pada sabuk meningkat dengan bertambahnya ketinggian hingga mencapai maksimum pada ketinggian kira-kira 3.000 km dari permukaan Bumi. Sabuk kedua berada di sebelah luar, terbentuk mulai ketinggian 12.000 km dan mencapai maksimum pada 19.000 km. Sabuk kedua ini didominasi oleh elektron, membentang dari 60° lintang utara hingga 60° lintang selatan. Diperkirakan bahwa intensitas radiasi pada sabuk sebelah luar ini lebih tinggi dibandingkan dengan sabuk di sebelah dalam.

Garis-garis gaya magnet Bumi yang membentang jauh ke angkasa, menangkap partikel-partikel bermuatan yang bergerak melingkari garis-garis gaya magnet. Garis-garis ini berada paling banyak di

daerah kutub sehingga pada daerah tersebut, partikel bermuatan listrik menembus ke dalam atmosfer Bumi dan menyebabkan suatu peristiwa alam yang disebut cahaya kutub atau aurora. Fenomena tersebut timbul karena adanya tahanan yang diberikan terhadap partikel-partikel bermuatan listrik oleh atmosfer Bumi sehingga partikel tersebut berkilaunan. Cahaya kutub dikenal sebagai cahaya langit utara (*aurora borealis*) dan cahaya langit selatan (*aurora australis*) (Wilson, 1997).

Hasil studi menunjukkan bahwa di luar atmosfer Bumi, sinar kosmis primer terdiri atas radiasi dalam bentuk proton (87%), partikel alfa (12%) dan yang lainnya, termasuk sinar-X (1%). Sebagian besar radiasi kosmis primer diserap oleh 1/10 atmosfer bagian atas. Sekitar 20 km di bawahnya, radiasi kosmis hampir semuanya merupakan radiasi kosmis sekunder. Di permukaan Bumi, radiasi kosmis sekunder terdiri atas komponen keras, komponen lunak (elektron dan proton), serta komponen nukleon (kesatuan antara neutron dan proton). Intensitas komponen lunak cukup tinggi di atmosfer bagian atas, namun akan menurun pada ketinggian kira-kira 17 km di atas permukaan laut menjadi sekitar $\frac{1}{4}$ dari total radiasi di permukaan laut. Di atas permukaan laut, sekitar $\frac{3}{4}$ dari intensitas radiasi kosmis merupakan radiasi kosmis dalam bentuk komponen keras (Cosmic rays, 2003).

Radiasi kosmis komponen keras mempunyai daya tembus yang sangat tinggi karena dapat menembus pelat timbal setebal 13 cm, hampir tanpa hambatan. Radiasi kosmis komponen keras yang dapat mencapai permukaan laut, kira-kira setengahnya masih mampu menembus pelat timbal setebal 38 cm. Partikel berdaya tembus sangat tinggi ini ditemukan oleh tim peneliti C.D. Anderson dan S.H. Neddermeyer dari Institut Teknologi California dan tim peneliti J.C. Street dan E.C. Stevenson dari Universitas Harvard. Kedua tim tersebut bekerja secara terpisah pada tahun 1936. Semula partikel fundamental berdaya tembus tinggi itu dinamai mesotron dengan massa di antara proton dan elektron, namun saat ini para ilmuwan menyebutnya meson (C. V. Wilson, 1997).

Radiasi kosmis ternyata masih dapat menembus lapisan bawah tanah hingga kedalaman 200 meter. Valney C. Wilson telah melakukan pengukuran daya tembus radiasi kosmis di bawah permukaan tanah, yaitu di sebuah pertambangan tembaga, Michigan Utara. Valney C. Wilson melaporkan bahwa beberapa radiasi kosmis dapat menembus batuan setebal 500 meter. Partikel kosmis yang ditemukan di kedalaman 500 meter bawah tanah itu ternyata berjenis meson. Valney C. Wilson beserta peneliti lainnya akhirnya menyimpulkan bahwa meson merupakan jenis radiasi kosmis dengan energi terbesar di antara komponen keras radiasi kosmis sekunder (Cosmic rays, 2003).

Radiasi kosmis dalam bentuk partikel sub-atomik, baik yang berasal dari galaksi maupun Matahari, dapat memicu terjadinya reaksi inti dalam atmosfer. Pada saat radiasi kosmis primer berenergi tinggi memasuki atmosfer Bumi, akan terjadi reaksi inti antara partikel-partikel kosmis itu dengan inti atom unsur-unsur yang ada di dalam atmosfer Bumi, seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan lain-lain (Dunai, 2010). Reaksi nuklir yang terjadi dapat menghasilkan sinar kosmis sekunder yang terdiri atas meson, elektron, foton, neutron, proton, dan lain-lain. Partikel tersebut selanjutnya dapat menghasilkan sinar kosmis sekunder lainnya pada saat bertumbukan dengan unsur-unsur di atmosfer atau meluruh dalam perjalanannya menuju permukaan Bumi.

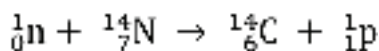
Selain memicu terjadinya reaksi nuklir dalam atmosfer Bumi, radiasi kosmis juga mengionkan gas-gas yang ada di lapisan atmosfer tinggi sehingga menghasilkan suatu lapisan bermuatan listrik yang disebut lapisan ionosfer. Lapisan ini selanjutnya dapat menjadi pelindung Bumi terhadap radiasi ultra violet (UV) yang membahayakan. Dalam interaksi itu, dihasilkan pula berbagai macam unsur radioaktif yang disebut radionuklida kosmogenik (Darvill, 2013), seperti tritium (^3H) dengan umur paroh ($T_{1/2}$) 12,3 tahun, berillium-7 (^7Be , $T_{1/2} = 53,28$ hari), berillium-8 (^8Be , $T_{1/2} = 10^{-16}$ detik), berillium-10 (^{10}Be , $T_{1/2} = 1,6 \times 10^6$ tahun), natrium-22 (^{22}Na , $T_{1/2} = 2,61$ tahun), natrium-24 (^{24}Na , $T_{1/2} = 15$ jam), karbon-14 (^{14}C , $T_{1/2} = 5730$ tahun), sulfur-35 (^{35}S , $T_{1/2} = 86$ hari), sulfur-38 (^{38}S , $T_{1/2} =$

2,87 jam), calcium-41 (^{41}Ca , $T_{1/2} = 1,1 \times 10^5$ tahun), clour-34 (^{34}Cl , $T_{1/2} = 32$ menit), clour-36 (^{36}Cl , $T_{1/2} = 3,08 \times 10^5$ tahun), clour-38 (^{38}Cl , $T_{1/2} = 37,3$ menit), clour-39 (^{39}Cl , $T_{1/2} = 56$ menit), dan lain-lain. Radionuklida kosmogenik yang terbentuk dalam atmosfer Bumi dapat jatuh ke Bumi bersama-sama dengan angin, hujan, maupun salju.

4.2 PRODUKSI RADIOKARBON

Penduduk Bumi selalu dihujani radiasi kosmis, baik yang berasal dari bintang-bintang di galaksi kita sendiri (galaksi Bimasakti), gugus bintang pada galaksi-galaksi lain di luar Bimasakti, serta dari Matahari yang merupakan bintang terdekat dengan Bumi. Sekitar satu persen dari radiasi kosmis sekunder dapat menembus lapisan atmosfer bagian bawah dan mencapai permukaan Bumi. Kecilnya dosis radiasi kosmis dari ruang angkasa tersebut disebabkan oleh medan magnet Bumi yang mampu memantulkan partikel-partikel bermuatan dari ruang angkasa yang memasuki atmosfer Bumi. Dalam hal ini, dapat dikatakan bahwa medan magnet Bumi berperan sebagai pelindung radiasi bagi penduduk Bumi. Di sisi lain, hujan radiasi kosmis dari ruang angkasa ini justru memberikan suatu laboratorium alam bagi para peneliti fisika nuklir.

Radionuklida kosmogenik, yang berperan cukup penting untuk berbagai keperluan dalam berbagai bidang kehidupan, adalah radiokarbon dalam bentuk radioisotop karbon-14 (^{14}C). Radionuklida ini terbentuk melalui proses nuklir di ruang angkasa. Neutron (n) dari radiasi kosmis primer akan kehilangan sebagian besar energinya akibat bertumbukan dengan inti-inti atom di atmosfer. Neutron yang telah mencapai energi termal dapat ditangkap oleh unsur nitrogen-14 (^{14}N) yang mengisi kira-kira 78% komponen atmosfer Bumi (Dunai, 2010). Penangkapan tersebut mendorong terjadinya reaksi nuklir sehingga terbentuk ^{14}C melalui proses sebagai berikut:



Produksi ^{14}C berlangsung terus-menerus di atmosfer bagian atas. Namun, karena bersifat radioaktif, ^{14}C juga terus meluruh sehingga jumlahnya di atmosfer selalu konstan. Jumlah yang terbentuk setiap saat akan diimbangi dengan jumlah yang meluruh setiap saat. Para ilmuwan memperkirakan bahwa di Bumi ini terdapat sekitar 50 metrik ton ^{14}C sepanjang waktu. Total perkiraan jumlah ^{14}C yang terbentuk secara alamiah melalui aktivasi ^{14}N oleh neutron (radiasi kosmis primer) sebelum adanya percobaan senjata nuklir adalah sekitar $1,5 \times 10^{11}$ Mega Becquerel (MBq) atau setara dengan 4 Mega Curie (MCi) di atmosfer, $4,8 \times 10^{11}$ MBq (13 MCi) dalam tanaman, dan 9×10^{12} MBq (240 MCi) di lautan (Arnika, 1996). Setiap detik, pada tiap sentimeter persegi di permukaan Bumi, rata-rata terdapat 2–3 atom ^{14}C yang terbentuk, sama besarnya dengan jumlah ^{14}C yang meluruh. Dalam perjalanan berikutnya, ^{14}C ini akan menjadi bagian atau penyusun tubuh tumbuh-tumbuhan, hewan, maupun manusia.

Di alam, atom C dapat membentuk dua macam isotop, yaitu karbon-12 (^{12}C) dengan enam buah proton dan enam buah neutron dalam intinya yang bersifat stabil, dan ^{14}C dengan enam buah proton dan delapan buah neutron dalam intinya yang bersifat radioaktif. Kedua isotop C tersebut memiliki sifat kimia yang sama, namun sifat fisika yang berbeda. Di alam, sebagian besar atom C (98,89%) berada dalam bentuk ^{12}C . Sifat kimia yang sama menyebabkan baik ^{12}C maupun ^{14}C dapat membentuk senyawa kimia tertentu di atmosfer (Arnika, 1996).

Apabila masuk ke atmosfer Bumi, ^{14}C dapat melakukan reaksi kimiawi dengan oksigen dan membentuk $^{14}\text{CO}_2$. Hal yang sama juga terjadi pada ^{12}C yang membentuk $^{12}\text{CO}_2$. Di atmosfer, kedua senyawa tersebut tercampur secara merata. Intensitas sinar kosmis tidak pernah berubah selama 30.000 tahun terakhir perjalanan planet Bumi sehingga kadar ^{14}C yang terbentuk di atmosfer dianggap selalu konstan sepanjang masa. Radionuklida ^{14}C dapat jatuh ke Bumi bersama-sama dengan angin, hujan, maupun salju. Selanjutnya, melalui proses fotosintesis dan bantuan klorofil daun pada tanaman akan dihasilkan

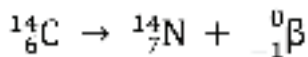
karbohidrat atau glukosa ($C_6H_{12}O_6$) melalui persamaan reaksi sebagai berikut (White, 1997):



Dengan C^* adalah ^{14}C yang dapat masuk ke dalam tubuh makhluk hidup melalui rantai makanan, baik secara langsung seperti manusia yang mengkonsumsi karbohidrat atau produk-produk turunannya, maupun secara tidak langsung seperti melalui konsumsi ternak atau produk-produk turunannya. Radionuklida ini umumnya terikat pada jaringan lunak makhluk hidup.

Perbedaan sifat fisika antara ^{12}C dan ^{14}C terletak pada kemampuannya dalam memancarkan radiasi pengion dari dalam inti atom isotop tersebut. Inti ^{12}C bersifat stabil sehingga tidak melakukan peluruhan inti dan tidak memancarkan radiasi pengion, sedangkan inti ^{14}C bersifat radioaktif sehingga selalu melakukan peluruhan inti disertai dengan pemancaran radiasi pengion dari intinya. Peluruhan merupakan peristiwa yang terjadi di dalam inti atom sehingga tidak terpengaruh oleh faktor-faktor fisika maupun kimia di sekelilingnya, seperti perubahan suhu, tekanan udara, dan kelembaban. Perbedaan sifat fisika tersebut ternyata dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dalam ilmu pengetahuan dan kehidupan.

Peluruhan inti radioaktif selalu disertai dengan pelepasan radiasi yang membawa sejumlah energi. Inti ^{14}C meluruh menjadi inti atom nitrogen-14 (^{14}N) yang sekaligus memancarkan radiasi beta murni berenergi rendah (E_b : 0,115 MeV) dengan persamaan reaksi intinya sebagai berikut (Walker dkk., 1989):



Sebagai radionuklida, ^{14}C memiliki umur paro 5.730 tahun. Hingga kini telah banyak instrumentasi radiasi yang dapat dipakai untuk mengukur radiasi dengan intensitas yang sangat rendah. Oleh sebab itu, pemantauan kadar ^{14}C di dalam suatu sampel arkeologi

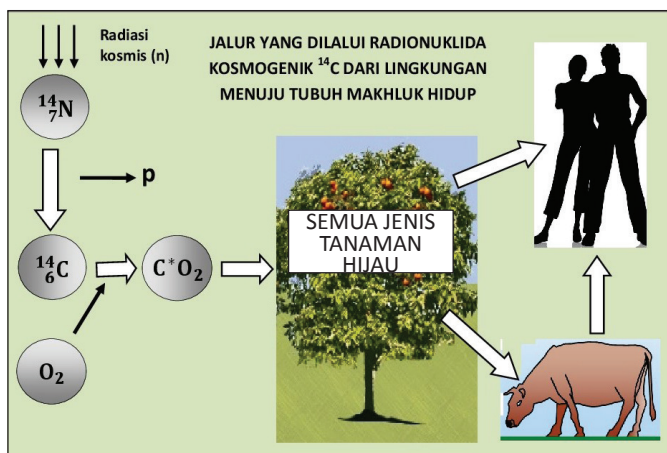
dapat dilakukan dengan hasil yang sangat teliti sehingga usia sampel tersebut dapat ditentukan secara akurat.

Di alam, sebagian besar unsur karbon (98,89%) berada dalam bentuk ^{12}C . Akan tetapi, karena terdapat radionuklida kosmogenik dalam bentuk ^{14}C yang bercampur dengan ^{12}C secara merata di udara, salah satu atau lebih atom C dalam molekul karbohidrat dapat berupa ^{14}C . Sebagai pengonsumsi karbohidrat, semua makhluk hidup selalu mengandung unsur karbon di dalam tubuhnya. Kandungan ^{12}C dalam tubuh manusia rata-rata sekitar 18% dari berat tubuh (Chember & Johnson, 2009), sedangkan radionuklida ^{14}C terdapat dalam kelimpahan yang sangat kecil. Di dalam tubuh manusia, nilai perbandingan antara ^{14}C dan ^{12}C kira-kira satu berbanding satu trilyun ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \approx 10^{-12}$). ^{12}C dan ^{14}C memiliki sifat kimia yang sama, meskipun sifat fisiknya berbeda. Sifat kimia yang sama antara ^{12}C dan ^{14}C menyebabkan keduanya diperlakukan sama di dalam tubuh makhluk hidup.

Tanaman hijau memperoleh unsur C dari udara. Karbohidrat yang dihasilkan tanaman merupakan sumber makanan sehingga tanaman berperan sebagai sumber C bagi makhluk hidup lainnya. Selanjutnya, karbohidrat akan dikonsumsi oleh makhluk hidup (manusia dan hewan), baik secara langsung maupun tidak langsung, melalui rantai makanan yang panjang, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Kayu dan tulang binatang sering kali dijadikan sebagai alat-alat rumah tangga maupun hiasan rumah oleh manusia. Oleh karena itu, ^{14}C dapat ditemukan pada hampir semua benda yang mengandung senyawa organik, seperti perahu yang dibuat dari kayu, rumah, perkakas (lemari, tempat tidur, dan kursi) dan hiasan (patung dan bingkai lukisan) yang terbuat dari kayu, pakaian katun dan linen yang bahan bakunya dari tanaman, sepatu dan tas dari kulit binatang, alat-alat rumah tangga dari tulang binatang, dan lain-lainnya.

Jumlah radionuklida kosmogenik ^{14}C dalam tubuh makhluk hidup (manusia, hewan, serta tumbuh-tumbuhan) selalu tetap karena saat terjadi pemasukan juga terjadi pengeluaran maupun peluruhan secara kontinyu (Chember & Johnson, 2009). Namun, setelah kematian makhluk hidup, pemasukan ^{14}C ke dalam tubuhnya tidak lagi

terjadi. Di sisi lain, karena ^{14}C ini bersifat radioaktif, radionuklida tersebut akan meluruh sehingga jumlahnya terus berkurang secara eksponensial oleh waktu (Arnika, 1996). Apabila pada suatu saat jasad makhluk hidup tersebut ditemukan dalam bentuk fosil, usia dari fosil dapat diketahui melalui pengukuran kadar ^{14}C yang masih tertinggal di dalam fosil tersebut. Cara penentuan umur fosil melalui kandungan radionuklida ini disebut penanggalan radioaktif (*radioactive dating*). Penanggalan dengan radionuklida ^{14}C ini sering disebut dengan istilah penanggalan radiokarbon (*radiokarbon dating*) (Libby, 1997).



Sumber: Libby (1997)

Gambar 4.1 Pembentukan dan Perjalanan Radionuklida ^{14}C di Lingkungan

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Penanggalan Geologi

Berbagai informasi dalam menelaah planet Bumi telah berhasil dikumpulkan oleh para ilmuwan. Dari berbagai sumber informasi tersebut, para ilmuwan memiliki landasan yang kuat untuk menganalisis struktur dan komposisi planet Bumi. Bahkan, para ilmuwan dapat mengamati secara langsung berbagai informasi cukup akurat tentang bagian luar lapisan Bumi yang cukup tipis dan sering disebut sebagai kerak bumi. Bagian ini tersusun oleh batuan yang terdiri atas bermacam-macam mineral. Ada berbagai jenis batuan yang secara umum dapat dikelompokkan ke dalam tiga tipe dasar, yaitu batuan gunung berapi, batuan endapan, dan batuan berubah bentuk (J. T. Wilson, 1997). Dengan mempelajari fakta-fakta ilmiah yang tersimpan dalam ketiga tipe batuan itulah para ilmuwan berusaha untuk merekonstruksi sejarah Bumi.

Bumi merupakan planet dinamis yang sepanjang sejarah perjalanannya terus mengalami perubahan-perubahan, baik oleh kekuatannya sendiri maupun oleh energi makrokosmos dari luar. Melalui berbagai studi yang telah dilakukan, didukung oleh pene-

muan-penemuan ilmiah yang sangat menakjubkan, kini para ilmuwan berhasil merekonstruksi sejarah planet Bumi, mulai dari penyusunan teori untuk menggambarkan pembentukannya, pembagian interval waktu geologi dan peristiwa-peristiwa besar yang diikuti kepunahan spesies penghuninya, hingga ke sejarah kehidupan yang pernah berlangsung di permukaan Bumi serta peradaban yang ditinggalkan penghuninya (Blyth & de Freitas, 1984).

5.1 KELAHIRAN ALAM SEMESTA

Pembentukan planet Bumi tidak dapat dipisahkan dari proses kelahiran alam semesta. Oleh karena itu, untuk memahami pembentukan Bumi dapat dilakukan tiga tahap pembahasan, yaitu diawali dengan pembahasan tentang proses kelahiran alam semesta, diikuti dengan pembahasan tentang kelahiran sistem tata surya, dan diakhiri dengan pembahasan tentang pembentukan Bumi.

Disiplin ilmu yang berkaitan erat dengan masalah alam semesta adalah kosmologi (Field, 1997). Kosmologi merupakan studi tentang alam semesta dan manusia yang hidup di dalamnya. Sejak beberapa ratus tahun terakhir, studi kosmologi didominasi oleh pendekatan fisika dan astrofisika (Darmawan, 2017). Meskipun demikian, konsepsi ilmiah tentang kosmologi yang disepakati oleh mayoritas ilmuwan saat ini bukanlah sesuatu yang absolut benar (Supelli, 2017).

Teori ilmiah untuk menggambarkan proses kelahiran alam semesta dikenal sebagai Teori Dentuman Besar (*Big Bang Theory*). Teori ini menyatakan bahwa proses terbentuknya alam semesta berawal dari suatu peristiwa dentuman besar yang terjadi miliaran tahun silam (Setiawan, 1994). Teori Dentuman Besar kini banyak dianut oleh kalangan ilmuwan. Bukti penting yang mendukung teori ini ialah keberadaan hidrogen dan helium di ruang angkasa. Dalam berbagai penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa konsentrasi hidrogen-helium di alam semesta sesuai dengan perhitungan teoritis konsentrasi hidrogen-helium sisa peninggalan peristiwa Dentuman Besar yang menyebabkan Teori Dentuman Besar diterima oleh masyarakat ilmiah (Cosmic background explorer, 2001).

Bukti radiasi sisa peristiwa Dentuman Besar akhirnya berhasil ditemukan. Kosmologi modern berhasil memperoleh bukti kuat berupa penemuan radiasi latar dalam bentuk gelombang mikro kosmis bersuhu 3 Kelvin yang diduga kuat berasal dari peristiwa Dentuman Besar. Bukti ilmiah tersebut berhasil dideteksi tanpa sengaja pada tahun 1965 oleh Arno A. Penzias dan Robert W. Wilson dari Laboratorium Telefon Bell (Wilopo, 2002). Gelombang itu tersebar secara merata dan dapat dideteksi ke arah manapun antena radio pendeteksi diarahkan. Temuan ini menjadi landasan kuat dan meyakinkan untuk ketepatan model Dentuman Besar yang menandai masa muda alam semesta. Atas jasanya dalam mengungkap radiasi latar kosmis itu, Penzias dan Wilson dianugerahi hadiah Nobel bidang Fisika pada 1978 (Wilopo, 2002).

5.2 PEMBENTUKAN PLANET BUMI

Setelah pembahasan secara singkat tentang teori kelahiran tata surya, selanjutnya dibahas salah satu hasil dari kelahiran tersebut, yaitu planet Bumi. Bumi tidak muncul di jagat raya dengan sendirinya dalam bentuk langsung sempurna, melainkan melalui proses yang panjang dan terus berkembang hingga mencapai bentuknya seperti sekarang. Pada saat awal terbentuk, rupa Bumi masih seperti bola pijar yang sangat panas. Lama kelamaan, secara berangsur-angsur suhu Bumi menurun sehingga bagian luar Bumi yang membeku membentuk lapisan kerak bumi yang disebut litosfer (Anderson, 1989).

Para ilmuwan telah berhasil merunut sebagian sejarah perjalanan planet Bumi. Sekitar 250 juta tahun silam, sebagian besar kerak benua di Bumi merupakan satu massa daratan berbentuk superbenua atau benua raksasa, dikenal sebagai Pangea. Sekitar 135 juta tahun silam, superbenua itu pecah menjadi dua benua besar sebelum akhirnya berpisah membentuk konfigurasi masing-masing seperti yang ditemui saat ini (Torsvik & Cocks, 2013).

Pecahan benua besar di sebelah utara dinamakan Laurasia dan di bagian selatan dinamakan Gondwana. Baik Laurasia maupun Gondwana kemudian terpecah-pecah lagi menjadi daratan yang lebih

kecil dan bergerak secara tidak beraturan dengan kecepatan antara 1–10 cm per tahun. Saat ini, Laurasia terdiri atas Amerika Utara, Eropa, serta sebagian Asia Tengah dan Asia Timur, sedangkan Gondwana terdiri atas Amerika Selatan, Afrika, India, Australia, dan bagian Asia lainnya. Dalam sejarah perkembangan planet Bumi, pergerakan kedua benua besar itu sudah dimulai sejak sekitar 65 juta tahun silam (Skala waktu geologi, 1997).

Berdasarkan hasil studi dengan memanfaatkan gelombang seismik, struktur internal Bumi dapat dibedakan menjadi tiga komponen utama, yaitu inti (*core*), mantel (*mantle*), dan kerak (*crust*). Inti Bumi berada di pusat Bumi dengan kedalaman 2.900–6.371 km dari permukaan Bumi. Inti Bumi terbagi menjadi dua macam, yaitu inti luar dan inti dalam. Inti Bumi bagian dalam merupakan bagian Bumi paling dalam dengan kedalaman 5.100–6.371 km dari permukaan Bumi, ketebalan rata-rata 1.200 km, dan diameter maksimal mencapai 2.600 km. Inti Bumi bagian dalam juga sering disebut sebagai inti Bumi. Inti Bumi tersusun atas besi dan nikel yang berada dalam fasa padat dengan temperatur mencapai 4.800 °C. Dari data geofisika, diketahui bahwa material inti Bumi memiliki massa jenis yang sama dengan massa jenis meteorit logam yang terdiri atas besi dan nikel. Atas dasar ini, para ilmuwan percaya bahwa inti Bumi tersusun atas senyawa besi dan nikel (J. T. Wilson, 1997).

Antara inti bagian dalam dan luar Bumi dipisahkan oleh *Lehman Discontinuity*. Inti Bumi bagian luar merupakan salah satu bagian dalam Bumi yang melapisi inti Bumi bagian dalamnya. Inti luar ini berupa zat cair yang memiliki ketebalan 2.250 km dan menempati posisi kedalaman antara 2.900–4.980 km dari permukaan Bumi. Inti Bumi bagian luar terdiri atas besi dan nikel cair dengan suhu 3.900 °C (Wilson, 1997).

Keseluruhan inti Bumi dibungkus oleh mantel berkomposisi kaya magnesium. Antara inti Bumi dan matelnya dibatasi oleh *Gutenberg Discontinuity*. Mantel Bumi terbagi menjadi dua bagian, yaitu mantel atas dengan sifat plastis hingga semiplastis yang berada pada kedalaman mencapai 400 km, dan mantel bawah berbentuk padat yang

berada pada kedalaman mencapai 2.900 km. Mantel atas bagian atas yang melapisi kerak bumi berbentuk padat, bersama dengan kerak membentuk satu kesatuan yang dinamakan litosfer. Mantel atas bagian bawah yang bersifat plastis hingga semiplastis disebut sebagai astenosfer. Suhu pada mantel bagian atas berkisar antara 1.300–1.500 °C, sedangkan mantel dalamnya 1.500–3.000 °C (J. T. Wilson, 1997).

Kerak bumi merupakan bagian terluar lapisan Bumi dengan ketebalan antara 5–80 km dari permukaan Bumi. Antara kerak dengan mantel dibatasi oleh *Mohorovicic Discontinuity*. Kerak bumi secara dominan tersusun oleh felspar dan mineral silikat lainnya. Kerak bumi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu kerak samudra dan kerak benua. Kerak samudra tersusun oleh mineral kaya silikon, besi, dan mangan yang biasa disebut sima. Ketebalan kerak samudra berkisar antara 5–15 km dengan massa jenis rata-ratanya 3 gram/cm³. Kerak samudra biasanya disebut lapisan basalit karena batuan penyusun utamanya ialah basal (J. T. Wilson, 1997).

Kerak benua tersusun oleh mineral kaya silikon dan aluminium sehingga sering disebut dengan istilah “sial”. Ketebalan kerak benua berkisar antara 30–80 km dengan rata-rata sekitar 35 km. Massa jenis rata-ratanya sekitar 2,85 gram/cm³. Kerak benua biasanya disebut sebagai lapisan granitis karena batuan penyusun utamanya terdiri atas batuan berkomposisi granit. Di samping perbedaan ketebalan dan massa jenis, umur kerak benua umumnya lebih tua dibandingkan kerak samudra. Batuan kerak samudra diketahui berumur sekitar 200 juta tahun atau terbentuk pada masa Jura. Umur ini sangat muda bila dibandingkan kerak benua tertua yang diketahui berumur sekitar 3.800 juta tahun (J. T. Wilson, 1997).

5.3 WAKTU GEOLOGI

Waktu geologi adalah skala waktu yang meliputi seluruh sejarah geologi Bumi dari mulai terbentuknya hingga saat ini. Istilah jam atau waktu geologi sering digunakan untuk catatan periode sejarah Bumi yang sangat panjang, berorde hingga ratusan juta tahun (Newman, t.t.). Skala waktu geologi digunakan oleh para ahli geologi dan

ilmuwan untuk menjelaskan waktu dan hubungan antar peristiwa yang terjadi sepanjang sejarah Bumi. Masing-masing zaman pada skala waktu biasanya ditandai dengan peristiwa besar geologi atau paleontologi, seperti kepunahan masal suatu organisme. Skala waktu yang digunakan saat ini dikembangkan sejak awal abad ke-19 dan terus mengalami penyempurnaan. Pemakaian skala waktu ini ternyata cukup membantu para ilmuwan dalam memahami sejarah Bumi melalui urutan-urutan waktu yang cukup teratur.

Selama abad ke-19, para ahli geologi telah berhasil mengumpulkan berbagai informasi yang berkaitan dengan jam atau waktu geologi, namun mereka masih mengalami kesulitan dalam menentukan usia Bumi karena belum adanya metode penentuan umur secara absolut. Para ahli geologi telah mendapatkan informasi mengenai laju sedimentasi dan ketebalan batuan hasil sedimentasi. Data itu dapat dipakai untuk memperkirakan waktu yang diperlukan dalam pembentukan batuan, sekaligus menentukan umur batuan. Walaupun demikian, hasil yang diperoleh ternyata bervariasi sangat lebar (Branley, 1997). Sebelum dimulainya penggunaan skala waktu geologi pada awal abad ke-19, para ahli sejarah sebenarnya telah mengetahui bahwa Bumi memiliki sejarah yang panjang. Perkiraan para ilmuwan mengenai umur Bumi cukup variatif, berkisar dari 4.000 tahun hingga ratusan juta tahun.

Sebagian besar batas pembagian skala waktu geologi yang dikenal saat ini berhubungan dengan periode kepunahan spesies lama dan kemunculan spesies baru. Dengan bantuan geologi, perkembangan Bumi dari awal terbentuknya sampai sekarang dibagi menjadi beberapa skala waktu. Para ilmuwan membagi waktu geologi menjadi beberapa interval. Unit-unit besarnya adalah era, periode, dan zaman (Newman, t.t.). Masing-masing interval dicirikan oleh kondisi geografi, iklim, dan bentuk kehidupan yang khas pada zamannya. Nama unit-unit waktu geologi yang besar dapat berasal dari tempat-tempat ditemukannya suatu batuan.

Bagian terluas dari waktu geologi adalah masa. Di sini dikenal Masa Azoikum atau masa tanpa kehidupan. Era ini berlangsung seki-

tar 2.500 juta tahun silam, di mana keadaan Bumi belum stabil dan masih panas karena sedang dalam pembentukan. Oleh karena itu, pada masa ini tidak ada tanda-tanda kehidupan. Selanjutnya ialah Masa Paleozoikum atau kehidupan tertua yang berlangsung antara 300–600 juta tahun silam. Pada masa ini keadaan Bumi masih belum stabil dan terus mengalami perubahan. Akan tetapi, menjelang akhir dari masa ini mulai ada tanda-tanda kehidupan berupa kemunculan hewan bersel satu, hewan kecil yang tidak bertulang belakang, jenis ikan, amfibi, reptil, dan beberapa jenis tumbuhan ganggang. Oleh karena itu, zaman di masa ini dinamakan pula dengan zaman primer atau zaman kehidupan pertama (Rozamski & Froehlich, 1996).

Selanjutnya, Era Mesozoikum atau kehidupan pertengahan yang berlangsung antara 100–200 juta tahun silam. Pada era ini, terdapat zaman di mana kehidupan telah mengalami perkembangan yang sangat pesat. Pohon-pohon besar mulai muncul, amfibi berkembang, bahkan jenis reptil mencapai bentuk yang sangat besar, seperti dinosaurus, tyrannosaurus, brontosaurus, dan atlantosaurus. Ada pula jenis reptil yang memiliki sayap dan dapat terbang selama berjam-jam, jenis ini dinamakan dengan pterodon. Di era Mesozoikum, zaman ini dinamakan zaman sekunder (kehidupan ke-2) atau zaman reptil karena jenis hewan didominasi oleh reptil dengan bentuk yang sangat besar. Pada akhir zaman ini mulai muncul jenis mamalia (Rozamski & Froehlich, 1996).

Terakhir ialah Era Kenozoikum atau kehidupan muda yang berlangsung setelah Era Mesozoikum hingga sekarang. Era ini diperkirakan telah berlangsung sekitar 60 juta tahun silam, terbagi menjadi zaman tersier (kehidupan ke-3) dan kuartar (kehidupan ke-4). Pada era ini keadaan Bumi telah membaik, perubahan cuaca tidak berlangsung terlalu ekstrem, dan kehidupan berkembang dengan pesat (Rozamski & Froehlich, 1996).

Setiap era dibagi lagi menjadi sejumlah periode. Era Paleozoikum misalnya, dibagi menjadi Periode Kambium (500–600 juta tahun silam), Periode Ordovician (425–500 juta tahun silam), Periode Silur (405–425 juta tahun silam), Periode Devon (345–405 juta tahun

silam), Periode Mississippi (320–345 juta tahun silam), Periode Pennsylvania (280–320 juta tahun silam) dan Periode Perm (230–280 juta tahun silam). Suatu periode dapat dinamakan berdasarkan nama kelompok bangsa yang dahulu mendiami suatu daerah, tempat dimana batuan periode itu pertama kali ditelaah atau diketahui. Nama periode Ordovician berasal dari kata *Ordovices*, yaitu suatu suku bangsa purba yang hidup di daerah Wales antara 425–500 tahun silam. Di tempat inilah batuan Ordovician berada, ditemukan dan dipelajari oleh para ilmuwan (Rozamski & Froehlich, 1996).

Terlihat bahwa perjalanan planet Bumi serta kejadian-kejadian yang menyertainya telah menorehkan catatan sejarah yang demikian panjang. Penentuan waktu geologi secara akurat menjadi bagian penting dalam mempelajari dinamika Bumi pada umumnya dan mengungkap sejarah Bumi pada khususnya. Terkait dengan masalah ini, para ahli geologi berusaha mengungkap kapan berlangsungnya peristiwa-peristiwa penting yang mengiringi perjalanan planet Bumi.

Ahli geologi dapat menentukan umur lapisan batuan dalam bentuk umur absolut atau umur relatif. Dalam penentuan umur relatif lapisan batuan, para ilmuwan menggunakan tiga prinsip sederhana. Prinsip pertama ialah **Hukum Superposisi**. Hukum ini menyatakan bahwa pada perlapisan batuan yang tidak terganggu, lapisan batuan yang lebih muda akan berada di atas lapisan batuan yang lebih tua. Prinsip kedua ialah **Hukum Hubungan Potong-memotong**. Hukum ini menyatakan bahwa setiap penampakan batuan atau struktur yang memotong dan mengganggu lapisan batuan lain selalu lebih muda daripada lapisan batuan yang dipotong tersebut. Prinsip ketiga ialah **suksesi fosil**, berhubungan dengan fosil yang terekam di dalam batuan sedimen (Rozamski & Froehlich, 1996).

Berbagai survei yang telah dilakukan di berbagai penjuru dunia menunjukkan bahwa batuan yang terbentuk pada interval waktu tertentu mengandung kombinasi fosil tertentu pula. Batuan Paleozoikum mengandung fosil trilobita dan graptolit, batuan Mesozoikum mengandung fosil sisa-sisa dinosaurus dan ammonite, dan batuan Kenozoikum mengandung fosil sisa-sisa tumbuhan bunga dan banyak

fosil mamalia. Dengan menggunakan petunjuk kandungan fosil di dalam batuan tersebut, meskipun berbeda letak geografisnya, ahli paleontologi menyimpulkan bahwa sampel batuan yang mengandung jenis fosil yang sama kemungkinan besar juga memiliki umur yang sama (Gradstein dkk., 2017).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menetapkan kronologi mutlak sejarah Bumi. Metode itu dapat dipakai untuk menentukan kapan terjadinya peristiwa-peristiwa geologi tertentu di masa lampau. Selain metode relatif, ada juga metode penanggalan yang dikenal sebagai analisis varve, dendrokronologi, dan paleomagnetisme yang dapat digunakan untuk penentuan umur secara absolut. Varve adalah lapisan sedimen yang terendapkan setiap tahun pada danau glasial. Lapisan tebal dari sedimen berukuran kasar terendapkan selama musim semi oleh aliran air permukaan, sedangkan lapisan sedimen halus yang lebih tipis terendapkan selama musim dingin. Keduanya membentuk lapisan yang disebut varve. Para ahli kebumiharian akan mengekstrak inti sedimen dari danau glasial itu dan menghitung berapa banyak varve pada sedimen tersebut. Setiap satu varve menunjukkan umur satu tahun (Uranium/lead dating, 2004).

Dendrokronologi merupakan teknik yang memanfaatkan lingkaran tahunan pada batang pohon pada iklim yang hangat untuk menentukan umur batang pohon tersebut. Beberapa pohon dapat hidup hingga ribuan tahun, sehingga teknik ini berguna untuk menentukan umur pohon yang mulai tumbuh berkisar antara 3.000–4.000 tahun yang lalu. Teknik ini juga dimanfaatkan untuk penanggalan fosil pohon oleh Kala Holosen (Rozamski & Froehlich, 1996).

Paleomagnetisme melibatkan pengukuran sudut molekul magnetik pada batuan. Ketika lava masih panas, mineral magnetik di dalamnya berorientasi kepada medan magnetik Bumi. Ketika lava mendingin hingga pada titik tertentu, mineral magnetik ini akan terkunci di tempatnya dalam batuan. Karena orientasi medan magnetik Bumi selalu berubah sepanjang sejarah Bumi, orientasi magnetik dari batuan yang membeku pada waktu yang berbeda juga akan berbeda. Ilmuwan mengetahui waktu pembalikan magnetik sehingga orientasi

magnetik dari sampel batuan dapat menunjukkan estimasi umur batuan tersebut (Rozamski & Froehlich, 1996).

Ahli geologi juga memiliki metode lain untuk menentukan umur absolut dari suatu lapisan batuan. Skala waktu geologi saat ini dibuat berdasarkan pada penanggalan radiometri dan rekaman kehidupan purba yang terawetkan di dalam lapisan batuan. Sebagian besar batas pada skala waktu geologi sekarang berhubungan dengan periode kepunahan spesies lama dan kemunculan spesies baru. Salah satu metode yang dapat memberikan hasil paling memuaskan untuk tujuan ini ialah penentuan waktu geologi yang didasarkan pada perubahan tingkat radioaktivitas suatu radionuklida alamiah yang ditemukan di dalam suatu batuan (Cross dkk., 2012). Pada Tabel 5.1 disajikan berbagai jenis induk radionuklida primordial berumur paro sangat panjang dengan ukuran skala waktu geologi. Dalam peluruhannya, radionuklida-radionuklida tersebut memproduksi unsur-unsur stabil yang mampu dideteksi keberadaannya dan diukur jumlahnya sehingga dapat dimanfaatkan untuk penanggalan geologi.

Jam geologi berbasis peluruhan radionuklida primordial membuat semuanya dapat diidentifikasi secara lebih akurat. Pada umumnya, penentuan skala waktu geologi dengan teknik nuklir tersebut dapat memberikan gambaran yang cukup baik tentang rangkaian

Tabel 5.1 Data radionuklida primordial yang banyak dimanfaatkan sebagai jam geologi

No.	Radionuklida Induk	Produk Turunan Stabil	Umur Paro (Miliar Tahun)
1.	Uranium-238 (^{238}U)	Timbal-206 (^{206}Pb)	4,5
2.	Uranium-235 (^{235}U)	Timbal-207 (^{207}Pb)	0,713
3.	Uranium-232 (^{232}Th)	Timbal-208 (^{208}Pb)	14,1
4.	Rubidium-87 (^{87}Rb)	Strontium-87 (^{87}Sr)	50,0
5.	Kalium-40 (^{40}K)	Argon-40 (^{40}Ar)	1,3

Catatan :

Hubungan antara konstanta peluruhan (λ) dengan umur paro ($T_{1/2}$) ialah $\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$

Sumber : Quirke (1997)

peristiwa-peristiwa dalam sejarah Bumi. Dengan skala waktu geologi ini memungkinkan para ilmuwan mengetahui apakah suatu peristiwa terjadi sebelum, pada saat yang sama, atau sesudah peristiwa lainnya. Penentuan skala waktu geologi dengan teknik nuklir ini mampu menetapkan kronologi berbagai periode yang berbeda-beda dalam sejarah Bumi (Cross dkk., 2012)

5.4 PENANGGALAN URANIUM-TIMBAL

Planet Bumi serta penghuninya telah memiliki catatan sejarah sangat panjang yang sebagian informasinya tersimpan dalam lapisan-lapisan batuan kerak bumi. Dengan memperhatikan nilai umur paro radionuklida primordial, ada beberapa jenis radionuklida yang nilai umur paronya amat sangat panjang, melebihi perkiraan umur Bumi. Radionuklida kelompok ini diduga sudah terbentuk jauh sebelum Bumi sendiri terbentuk, yaitu pada saat masih berupa nebula (bagian dari Matahari) atau bahkan saat Bumi masih berupa proto planet yang akhirnya mendingin sehingga terbentuklah planet Bumi (Kaplan, 1979).

Salah satu metode penanggalan dengan hasil paling memuaskan untuk tujuan penanggalan Bumi ialah melalui penentuan waktu geologi yang didasarkan pada telaah tentang perubahan tingkat radioaktivitas dari suatu radionuklida primordial di dalam suatu batuan (Arnika, 1996). Alam semesta telah menyediakan begitu banyak bahan radioaktif alamiah dalam bentuk radionuklida primordial yang tersebar dan tersimpan di berbagai tempat. Inti atom bahan radioaktif itu bersifat tidak stabil sehingga terus-menerus melakukan peluruhan dengan laju konstan sepanjang waktu. Peluruhan radionuklida induk menghasilkan anak dengan inti atom yang stabil. Umur paro radionuklida yang sangat panjang mengindikasikan bahwa inti atom radioaktif itu meluruh dengan laju yang sangat lambat.

Keberadaan radionuklida primordial dalam lapisan-lapisan kerak bumi seusia dengan keberadaan planet Bumi sehingga perjalanan waktu peluruhan radionuklida itu juga sudah dimulai sejak keduanya terbentuk. Oleh karena itu, para ahli geologi dapat memanfaatkan

keberadaan radionuklida primordial sebagai jam atau penunjuk waktu geologi untuk memperkirakan kapan lapisan suatu batuan itu terbentuk dan memperkirakan usia fosil yang ditemukan di dalamnya (Krane, 1992).

Radionuklida primordial meluruh secara kontinyu dengan laju konstan tertentu dalam waktu sangat lama tanpa terpengaruh oleh faktor-faktor maupun kejadian-kejadian luar, seperti perubahan temperatur, tekanan, maupun kimia lingkungan. Dengan demikian, radionuklida itu dapat dipakai sebagai jam geologi yang disediakan oleh alam dan hingga saat ini diakui sebagai metode untuk penentuan waktu geologi yang paling objektif (Arnika, 1996). Penemuan beberapa jenis radionuklida primordial secara radikal telah mengubah pandangan manusia tentang sejarah Bumi. Melalui penelaahan terhadap kandungan radionuklida primordial dalam berbagai jenis lapisan batuan penyusun kerak bumi, para ahli geologi dapat menentukan secara lebih tepat urutan susunan batuan yang disebut lajur geologi atau lajur stratigrafi (Rozamski & Froehlich, 1996). Skala waktu geologi merupakan hasil kerja keras hampir dua abad dalam studi stratigrafi. Skala waktu geologi ini diterima dengan syarat-syarat tertentu oleh para ahli stratigrafi yang sudah berpengalaman.

Ketika lava suatu batuan mendingin, peristiwa itu akan diikuti dengan pembentukan batuan beku dan radionuklida primordial akan terperangkap di dalamnya (Arnika, 1996). Setelah itu, inti atom unsur radioaktif itu langsung mengalami peluruhan inti dengan laju yang dapat diukur. Mulai saat itulah jam geologi sudah dan akan terus bekerja. Melalui pengukuran jumlah radionuklida yang tersisa (yang belum melakukan peluruhan) dan membandingkannya dengan jumlah atom anak stabil yang terbentuk dalam batuan, para ilmuwan dapat memperkirakan jangka waktu sejak kapan batuan itu terbentuk.

Selain batuan beku, pada kerak bumi juga terdapat lapisan batuan hasil sedimentasi yang posisinya diapit oleh lapisan-lapisan batuan beku. Fosil binatang maupun tumbuhan purba tidak ditemukan dalam batuan beku, namun biasanya ditemukan dalam batuan-batuan hasil sedimentasi ini (Debaene, 2003). Untuk keperluan penanggalan fosil,

para ilmuwan biasanya mempelajari batuan beku atau abu vulkanik yang berada di atas maupun di bawah batuan sedimentasi. Melalui penanggalan lapisan batuan di sekitarnya, para ilmuwan dapat memperoleh gambaran mengenai usia batuan yang lebih muda maupun lebih tua sehingga usia fosil yang terperangkap di antara kedua batuan itu dapat diperkirakan.

Ernest Rutherford, fisikawan asal Inggris, ialah orang pertama yang menduga bahwa peluruhan alfa dari radionuklida alamiah isotop-isotop uranium menyebabkan terbentuknya unsur helium (He) di dalam mineral-mineral uranium (Friedlander dkk., 1981). Dengan demikian, jumlah unsur He yang terdapat di dalam mineral itu dapat digunakan sebagai petunjuk untuk menentukan jangka waktu kapan dimulai proses pembentukan unsur tersebut sehingga umur mineral dapat diperkirakan. Pada tahun 1905, Rutherford telah memanfaatkan metode ini untuk mempelajari umur mineral. Tidak lama setelah itu, diketahui bahwa unsur timbal (Pb) merupakan produk akhir dari proses peluruhan uranium. Dengan demikian, kandungan Pb dalam mineral uranium dapat dimanfaatkan untuk menentukan umur mineral (Kaplan, 1979).

Ahli radiokimia dari Universitas Yale, B.B. Boltwood, ialah orang pertama yang memprakarsai penggunaan metode penanggalan radioaktif pada tahun 1907 untuk penentuan waktu geologi. Penemuan spektrometer massa setelah usainya Perang Dunia Pertama mengantarkan ke arah penemuan isotop serta perhitungan yang teliti mengenai laju peluruhan radionuklida. Menurut pengamatan Boltwood, rasio timbal/uranium di dalam mineral-mineral uranium akan meningkat dengan bertambah besarnya usia batuan sehingga dapat dimanfaatkan sebagai alat untuk penanggalan geologi terhadap batuan tersebut (Friedlander dkk., 1981).

Metodologi serta peralatan untuk penanggalan radioaktif terus dikembangkan. Sebelum tahun 1950, teknik penanggalan dengan ketelitian tinggi telah ditemukan dan diterima secara luas oleh kalangan ilmuwan. Dalam kurun waktu yang tidak terlalu lama, teknik penanggalan geologi yang sangat teliti dapat dilakukan. Boltwood

menyimpulkan bahwa waktu geologi telah dimulai sejak miliaran tahun silam. Hal ini sangat jauh berbeda dengan pendapat sebelumnya yang menyatakan bahwa waktu geologi baru dimulai sejak 20–40 juta tahun silam (Friedlander dkk., 1981). Sejak tahun 1950-an, metode ini akhirnya secara luas diterapkan untuk penanggalan berbagai jenis batuan.

Semua jenis batuan dan mineral mengandung radionuklida primordial berumur paro sangat panjang yang menyatu dengan Bumi ketika sistem tata surya terbentuk (Kaplan, 1979). Radionuklida alamiah itu berperan sebagai pengukur waktu independen sehingga para pakar geologi mampu menentukan usia suatu batuan di mana radionuklida itu ditemukan. Jam geologi otomatis mulai bekerja bersamaan dengan peluruhan suatu radionuklida. Peluruhan itu bisa saja dimulai bersamaan dengan pembekuan magma, proses terjadinya sedimentasi suatu lapisan batuan, ataupun proses-proses geologi lainnya, yang berlangsung pada waktu-waktu berbeda sepanjang sejarah perjalanan planet Bumi. Metode penanggalan radioaktif dengan memanfaatkan radionuklida primordial ini pada prinsipnya cukup sederhana, meskipun teknis pelaksanaannya cukup kompleks. Kini beberapa metode penanggalan dengan memanfaatkan radionuklida primordial untuk merunut sejarah Bumi telah dikembangkan.

Ketika radionuklida induk melakukan peluruhan untuk berubah menjadi atom lain (disebut sebagai anak hasil peluruhan) yang stabil, setiap peluruhan itu akan disertai dengan berkurangnya jumlah atom induk dan meningkatnya jumlah atom anak. Oleh karena itu, semua metode penanggalan radioaktif bertumpu pada prinsip dasar yang sama, yaitu peluruhan radionuklida induk (P , singkatan dari parent yang berarti induk) menjadi unsur anak yang stabil (D , singkatan dari daughter yang berarti anak) (Arnika, 1996). Identik dengan persamaan (2) pada bab 3, jika ada radionuklida induk sebanyak P_0 dengan konstanta peluruhannya λ_p , jumlah radionuklida induk setelah menjalani proses peluruhan selama jangka waktu t (P_t) dirumuskan dengan persamaan:

$$P_t = P_u e^{-\lambda \pi t} \text{ atau } \Pi_u = \Pi_t e^{\lambda \pi t} \quad (6)$$

Peluruhan P berakhir dengan terbentuknya unsur stabil D yang jumlahnya selalu bertambah seiring dengan perjalanan waktu. Jumlah unsur D yang terbentuk dari proses peluruhan P adalah $(P_0 - P_t)$ sehingga jumlah unsur stabil D setiap saat dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$D_t = P_u - P_t \quad (7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (6) ke persamaan (7) diperoleh:

$$D_t = P_t [e^{\lambda_p t} - 1] \text{ atau } \frac{D_t}{P_t} = e^{\lambda_p t} - 1 \quad (8)$$

Persamaan (8) hanya berlaku jika tidak ada penambahan dan pengurangan radionuklida induk maupun unsur anak, kecuali dari peluruhan radionuklida induk itu sendiri. Kondisi seperti itu dapat dikatakan sebagai sampel geologi dengan sistem tertutup. Untuk menyatakan usia sampel (t) dari persamaan (8) dapat diselesaikan dengan persamaan:

$$t = \frac{1}{\lambda_p} \ln \left(1 + \frac{D_t}{P_t} \right) \quad (9)$$

Persamaan (9) berlaku untuk semua jenis radionuklida primordial, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.1. Prinsipnya cukup sederhana, yaitu menghitung nisbah atau rasio jumlah produk turunan stabil yang dihasilkan terhadap radionuklida induk (D_t/P_t) yang ditemukan dalam suatu sampel geologi.

Salah satu metode penanggalan radioaktif untuk penentuan umur Bumi yang cukup banyak digunakan ialah dengan memanfaatkan rasio kemunculan unsur anak dalam bentuk ^{206}Pb sebagai hasil dari peluruhan radionuklida induk ^{238}U ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) (Arnika, 1996). Dengan mengukur rasio $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dan memasukkan data λ_p ke persamaan (9), dapat diperoleh hasil perhitungan yang menyatakan

usia sampel geologi yang diukur. Untuk ^{238}U , nilai λ_p adalah $1,54 \times 10^{-10}$ /tahun, dihitung menggunakan persamaan (3) dengan data nilai $T_{1/2}$ seperti disajikan pada Tabel 5.1 Sebagai contoh, jika rasio jumlah unsur ^{206}Pb terhadap ^{238}U dari suatu sampel batuan adalah 1 ($\text{Dt/Pt} = 1$ atau $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$), usia sampel tersebut adalah $4,5 \times 10^9$ tahun. Jika rasio $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0,5$, usia sampel batuan adalah $2,6 \times 10^9$ tahun, dan seterusnya.

Metode penanggalan radioaktif lainnya untuk penentuan umur Bumi adalah memanfaatkan keberadaan unsur stabil ^{206}Pb dan ^{207}Pb secara bersamaan (Friedlander dkk., 1996). Batuan yang mengandung radionuklida induk dalam bentuk ^{238}U dan ^{235}U dapat ditentukan umurnya secara langsung dengan mengukur rasio $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Metode ini dinilai dapat memberikan data hasil perhitungan yang lebih akurat karena memanfaatkan dua deret peluruhan U yang berlangsung di dalam sampel, yaitu peluruhan yang terjadi melalui deret ^{238}U dan deret ^{235}U . Para ilmuwan telah mengetahui bahwa ^{238}U , dalam rantai peluruhannya, menghasilkan unsur stabil ^{206}Pb (perhatikan Tabel 3.1 atau Gambar 7), sedangkan ^{235}U menghasilkan unsur stabil ^{207}Pb (perhatikan Tabel 3.3 atau Gambar 9).

Unsur Pb diyakini hanya berasal dari proses peluruhan U sehingga Pb awal tidak eksis selama tidak ada peluruhan U, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.1. Jika sampel berupa batuan beku, unsur Pb yang sebelumnya ada di dalam magma cair sudah menguap karena tingginya suhu magma tersebut. Ketika magma membeku, unsur radionuklida yang terdapat di batuan itu hanyalah radionuklida induk U. Unsur Pb perlahan-lahan terbentuk bersamaan dengan peluruhan U. Dari kedua peluruhan tersebut, hubungan antara radionuklida induk (U) dan unsur stabil yang dihasilkannya (Pb) dapat dirumuskan dengan menurunkan persamaan (8) sebagai berikut:

$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U}[e^{\lambda_{st}t} - 1] \quad (10)$$

$$^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U}[e^{\lambda_{st}t} - 1] \quad (11)$$

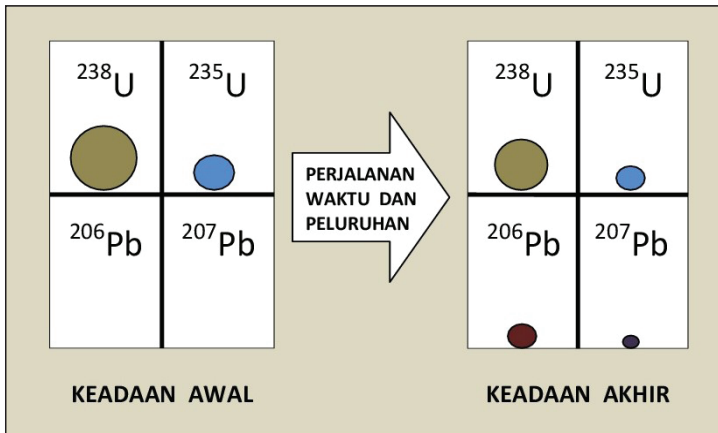
Jika persamaan (10) dibagi dengan persamaan (11), diperoleh:

$$\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{207}\text{Pb}} = \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{235}\text{U}} \times \frac{[e^{\lambda_8 t} - 1]}{[e^{\lambda_5 t} - 1]} \quad (12)$$

dengan λ_8 dan λ_5 adalah konstanta peluruhan untuk ${}^{238}\text{U}$ dan ${}^{235}\text{U}$ yang bernilai $1,54 \times 10^{-10}$ /tahun dan $9,8 \times 10^{-10}$ /tahun (Kaplan, 1979)

Ada tiga jenis isotop uranium yang dapat ditemukan di alam, yaitu ${}^{235}\text{U}$ dengan kelimpahan 0,715%, ${}^{238}\text{U}$ dengan kelimpahan 99,825%, dan ${}^{234}\text{U}$ dengan kelimpahan yang sangat kecil (kira-kira 0,005%) sehingga dapat diabaikan. Untuk kondisi planet Bumi seperti saat ini, dari beberapa hasil pengukuran kelimpahan isotop uranium yang telah dilakukan menyatakan nilai rasio (${}^{238}\text{U}/{}^{235}\text{U}$) adalah 137,8 (Friedlander, 1981). Dengan memasukkan nilai tersebut ke persamaan (12), diperoleh:

$$\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{207}\text{Pb}} = 137,8 \times \frac{[e^{\lambda_8 t} - 1]}{[e^{\lambda_5 t} - 1]} \quad (13)$$



Sumber: Arnikar (1996)

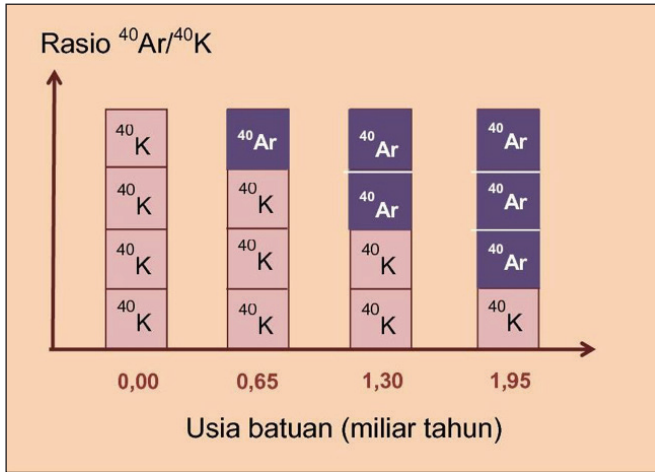
Gambar 5.1 Prinsip Dasar Penanggalan Geologi Uranium-Timbal

Pengukuran rasio kelimpahan $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ dapat dilakukan dengan hasil yang sangat akurat sehingga metode penanggalan geologi tersebut dapat memberikan hasil yang sangat baik untuk menentukan umur dari suatu sampel batuan yang sangat tua ($t \gg 10^8$ tahun) yang di dalamnya terdapat mineral-mineral uranium.

5.5 PENANGGALAN KALIUM-ARGON

Penentuan waktu geologi juga dapat dilakukan dengan dasar peluruhan radionuklida induk kalium-40 (^{40}K). Radionuklida ini memiliki umur paro 1,3 miliar tahun, meluruh menghasilkan unsur anak yang stabil berupa gas argon-40 (^{40}Ar). Peluruhan berlangsung di dalam batuan sehingga meskipun berupa gas, unsur anak dapat terperangkap dan menetap di dalam batuan selama batuan tersebut tidak mengalami proses metamorfosis (Arnika, 1996). Radionuklida induk ^{40}K meluruh dan jumlahnya terus berkurang, sementara unsur stabil anak ^{40}Ar terbentuk dan jumlahnya terus bertambah seiring berjalannya waktu.

Metode penanggalan kalium-argon mulai dikembangkan sejak tahun 1966. Penentuan waktu geologi dilakukan dengan cara mengukur jumlah pertumbuhan ^{40}Ar dari hasil peluruhan ^{40}K dan membandingkannya dengan jumlah ^{40}K yang masih tersisa dalam sampel batuan. Dari perbandingan ini, waktu dimulainya pembentukan suatu batuan dapat diperkirakan. Prinsip dasar penanggalan geologi kalium-argon diilustrasikan pada Gambar 5.2. Jika dalam sampel batuan terdapat tiga atom ^{40}K untuk setiap satu atom ^{40}Ar , batuan tersebut berumur sekitar 650 juta atau 0,65 miliar tahun. Jika dalam sampel suatu batuan mengandung ^{40}K dengan jumlah yang sama dengan ^{40}Ar atau dengan kata lain setengah dari jumlah radionuklida induk awal sudah meluruh, berarti batuan tersebut telah berumur sama dengan umur paronya, yaitu 1,3 miliar tahun. Sebaliknya, jika dalam sampel batuan itu tinggal terdapat satu atom ^{40}K untuk setiap tiga atom ^{40}Ar , berarti usia batumannya adalah 1,95 miliar tahun.



Sumber: Arnikar (1996)

Gambar 5.2 Prinsip Dasar Penanggalan Geologi Kalium-Argon

Dalam batuan beku, jam kalium-argon ini mulai bekerja pada saat batuan pertama kali mengkristal dari cairan magma. Pada kondisi tersebut, yang ada dalam magma hanyalah ^{40}K , sementara gas ^{40}Ar yang terbentuk dari hasil peluruhan sebelumnya habis menguap ketika magma masih dalam keadaan cair (Arnikar, 1996). Pengukuran yang teliti terhadap jumlah ^{40}K relatif terhadap ^{40}Ar di dalam batuan beku dapat menginformasikan mulai kapan batuan itu mengkristal. Jika batuan beku atau jenis batuan lainnya mengalami metamorfosis dan berubah menjadi jenis batuan lain, jam geologinya otomatis mengalami penyetelan ulang. Melalui peristiwa ini, ^{40}K tetap tinggal bersama dengan batuan, sementara gas ^{40}Ar lepas dari ikatan batuan. Jika peristiwa ini terjadi, jam kalium-argon dapat memberikan informasi kepada para ahli geologi mengenai kapan waktu metamorfosis itu berlangsung.

5.6 PERKIRAAN USIA BUMI

Metode penanggalan radioaktif seperti diuraikan di atas telah digunakan secara luas untuk mempelajari masalah-masalah geologi. Melalui

studi ini, pengetahuan lebih detail mengenai sejarah permukaan Bumi, Bulan, batuan meteorit lainnya, serta galaksi berkembang pesat. Batuan terbawah yang ditemukan di Grand Canyon, Amerika Serikat, diketahui telah ada sejak waktu Pra Kambrium, lebih dari 600 juta tahun silam. Dari beberapa pengukuran yang pernah dilakukan, diketahui bahwa umur batuan permukaan Bumi yang paling tua ditemukan di Kanada bagian utara dengan usia sekitar 4 miliar tahun (Krymsky dkk., 2007). Batuan dengan usia lebih dari 3 miliar tahun telah ditemukan di beberapa tempat bagian planet Bumi. Di Greenland bagian barat ditemukan batuan dengan usia sekitar 3,7– 3,8 miliar tahun. Batuan berusia antara 3,4–3,8 miliar tahun ditemukan di Afrika bagian selatan, Australia bagian barat, dan daerah Great Lake di Amerika Utara. Mineral uraninit yang ditemukan di Huron Claim, bagian tenggara Manitoba, Kanada, diketahui berusia 2,3 miliar tahun (Krymsky dkk., 2007).

Batuan-batuan tertua yang berhasil didata usianya tersebut umumnya merupakan batuan metamorfis yang aslinya berasal dari aliran larva dan batuan sedimentasi. Sementara itu, sumber material pembentuk batuan sedimentasi sendiri pasti berasal dari kerak batuan yang usianya lebih tua. Mineral-mineral tertua yang berhasil didata usianya ialah kristal zircon lembut yang berusia antara 4,0–4,2 miliar tahun, ditemukan sebagai batuan sedimentasi di Australia bagian barat. Penentuan usia Bumi dengan hasil paling baik diperoleh menggunakan metode waktu peluruhan isotop-isotop timbal yang dilakukan terhadap empat jenis bijih timbal paling tua (galena). Bijih tersebut diyakini berasal dari sumber primer atom timbal yang terbentuk bersamaan dengan kelahiran sistem tata surya. Keempat jenis bijih timbal tersebut diperoleh dari meteorit besi Canyon Diablo dengan usia yang terukur 4,54 miliar tahun (Friedlander dkk., 1981).

Batuan tertua dari Bulan terbentuk ketika kerak bulan paling awal, sebagian atau seluruhnya, masih dalam keadaan meleleh. Batuan sistem lunar yang diambil melalui misi penerbangan ruang angkasa menggunakan pesawat Apollo itu diketahui berumur antara 4,4–4,5 miliar tahun (Arnika, 1996). Sementara itu, sebagian besar dari hasil

pendataan terhadap 70 jenis batuan meteorit yang pernah dilakukan, diketahui berumur antara 4,4–4,6 miliar tahun. Batuan-batuan meteorit merupakan pecahan dari asteroid yang mewakili material paling primitif dalam sistem tata surya. Batuan-batuan meteorit tersebut didata menggunakan lima metode penanggalan radioaktif yang berbeda-beda.

Dari berbagai penelitian menggunakan beberapa metode penanggalan radioaktif, akhirnya ditemukan bukti-bukti meyakinkan bahwa planet Bumi serta benda-benda lain dalam sistem tata surya berusia antara 4,5–4,6 miliar tahun, sedangkan galaksi Bimasakti dan jagat raya berusia lebih tua lagi. Dengan menggabungkan beberapa data, para ilmuwan menyimpulkan bahwa Bumi sebagai sistem tertutup terbentuk sejak kira-kira 4,57 miliar tahun yang lalu. Cukup banyak bukti yang mendukung bahwa seluruh sistem tata surya terbentuk kira-kira 4,6 miliar tahun yang lalu. Usia galaksi kita, yaitu galaksi Bimasakti, juga berhasil diperkirakan berdasarkan penanggalan radioaktif. Dengan memanfaatkan peluruhan uranium dan torium, galaksi kita diperkirakan berusia sekitar 10 miliar tahun. Sementara itu, alam semesta berumur lebih tua dibandingkan galaksi, yaitu sekitar 14 miliar tahun (Friedlander dkk., 1981).

Selain untuk memperkirakan usia Bumi serta benda-benda lain dalam sistem tata surya, metode penanggalan radioaktif juga dapat dan sudah dimanfaatkan untuk penanggalan fosil, termasuk para penghuni Bumi paling awal, waktu-waktu terjadinya pencairan es di kutub, usia endapan-endapan mineral, tingkat kekuatan gempa bumi dan semburan vulkanik, serta proses-proses dan kejadian-kejadian yang berhubungan dengan aktivitas geologi lainnya. Pemanfaatan teknik nuklir dalam bidang geologi ternyata mampu memberikan data-data terukur dan tepat mengenai jam geologi. Dengan data tersebut, rekonstruksi sejarah perjalanan planet Bumi dapat diketahui lebih pasti.

Etiopia, salah satu kawasan atau negara di Benua Afrika, diduga kuat merupakan tempat asal mula penyebaran umat manusia. Dari tempat itulah nenek moyang manusia modern generasi pertama

menyebarkan ke benua-benua lain di luar Afrika (Anatole dkk., 2012). Dugaan ini mendapatkan dukungan yang kuat berkat hasil penanggalan radioaktif dan analisis genetik ulang terhadap fosil-fosil yang ditemukan pada tahun 1967. Fosil dan tengkorak yang ditemukan oleh Richard Leakey dari Kenya di formasi Kibish, dekat sungai Ono di bagian selatan Etiopia, diberi nama Omo 1 dan Omo 2. Kala itu, Leakey menyadari bahwa Omo 1 termasuk *Homo Sapiens*. Karakteristik Omo 1 tetap memperlihatkan ciri-ciri manusia modern. Begitu pula Omo 2 yang ditemukan hanya bagian puncak kepala tanpa wajah dengan fitur yang lebih primitif dibanding Omo 1. Setelah dilakukan penanggalan dengan memanfaatkan radionuklida uranium dan torium terhadap cangkang-cangkang moluska yang ditemukan bersama dengan tulang-tulang manusia purba itu, diketahui umur fosil Omo 1 adalah 130 ribu tahun.

Meskipun demikian, setelah dilakukan penanggalan ulang terhadap fosil dari Etiopia tersebut oleh John Fleagle dari *Stony Brook University* di New York, Amerika Serikat, bersama Ian McGougall dari *Australian National University* di Canberra, Australia, dan Frank Brown dari *University of Utah College of Mines and Earth Sciences*, ditemukan bahwa spesimen tulang Omo 1 telah berumur 195 ribu tahun atau sekitar 65 ribu tahun lebih tua dibandingkan perkiraan semula (Anatole dkk., 2012). Perbedaan itu disebabkan oleh perbedaan teknik penanggalan yang digunakan. Dalam revisi umur digunakan metode penanggalan kalium-argon yang lebih akurat.

John Fleagle dan tim penelitiannya mengumpulkan sampel bebatuan di lokasi fosil Omo ditemukan. Mereka juga berhasil menemukan tulang lengan, tungkai, kaki, dan pelvis yang dipastikan milik Omo 1. Langkah selanjutnya ialah melakukan uji penanggalan menggunakan metode mutakhir berbasis peluruhan radionuklida ^{40}K menjadi ^{40}Ar (metode kalium-argon). Fleagle dan tim mendapatkan bahwa batuan yang berada tepat di bawah fosil itu berumur 196 ribu tahun. Lapisan batuan itu terbentuk dalam kecepatan penuh, berkaitan dengan periode basah selama terkumpulnya bahan organik dalam jumlah besar di wilayah itu oleh aliran sungai Nil. Jadi, usia fosil itu hanya

berselisih sedikit lebih muda dibandingkan dengan usia batuan yang ditidurinya (Anatole dkk., 2012).

Selama ini ada teori yang banyak dianut ilmuwan tentang asal-usul manusia modern, yaitu teori *Out of Africa*. Teori ini menyatakan bahwa manusia menghabiskan kebanyakan hidupnya di Afrika, sebelum bermigrasi ke seluruh dunia selama 40 ribu tahun terakhir (Quamrul & Galor, 2012). Teori ini didukung oleh penemuan-penemuan fosil tengkorak manusia purba yang semakin ke Afrika ternyata usianya semakin tua. Afrika Timur, khususnya Etiopia, diduga sebagai tempat asal mula manusia karena ditemukannya fosil yang diyakini sebagai nenek moyang manusia modern paling awal. Temuan dua fosil tengkorak Omo 1 dan Omo 2 dari Etiopia tadi akhirnya dikukuhkan sebagai fosil *Homo Sapiens* tertua yang diketahui hingga saat ini, setelah umurnya direvisi menjadi 195 ribu tahun. Usia ini mengalahkan usia fosil tengkorak manusia purba yang ditemukan pada tahun 2003 di desa Herto, di wilayah Afar, Etiopia sebelah timur, yang sebelumnya dianggap sebagai fosil tertua dengan usia berkisar antara 154–160 ribu tahun.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Penanggalan Tembikar

Dalam kehidupan sehari-hari, sering dijumpai perkakas-perkakas yang terbuat dari bahan dasar tanah liat melalui pembakaran, seperti tembikar, gerabah, porselen, dan keramik. Sering kali orang membeda-bedakan keempat jenis perkakas tersebut, namun tidak jarang juga orang yang menganggap keempatnya adalah sama. Istilah tembikar dan gerabah biasanya merujuk pada pengertian dan benda yang sama, yaitu perkakas yang dibuat dengan membentuk tanah liat menjadi suatu obyek. Sebagai produk dari peradaban penghuni planet Bumi, kerajinan tembikar atau gerabah sudah mulai dikenal dan digunakan manusia sekitar akhir masa Paleolitikum atau awal Neolitikum, yaitu ketika manusia telah hidup menetap dan melakukan kegiatan hortikultura (Dimitrova, 2008).

Gerabah merupakan perkakas dari tanah liat yang dibentuk lalu dibakar dan dijadikan alat-alat yang berfungsi sebagai perkakas atau alat-alat rumah tangga, biasanya dalam bentuk periuk, belanga, tempat air, dan lain-lain. Gerabah termasuk keramik golongan tembikar yang matang pada temperatur pembakaran di bawah 1200° C (Delgado,

1995). Namun, terdapat kalangan masyarakat yang membedakan antara gerabah dan keramik. Dibanding keramik, kekuatan badan gerabah lebih rendah, kurang padat, dan tembus air. Umumnya gerabah tampil tanpa lapisan glazur, meski ada juga badan gerabah yang diberi lapisan glazur dengan suhu disesuaikan dengan tingkat pembakarannya.

Di Indonesia, istilah gerabah juga dikenal dengan sebutan keramik tradisional sebagai hasil dari kegiatan masyarakat pedesaan. Kerajinan ini ditekuni dan diwariskan secara turun temurun. Gerabah juga disebut keramik rakyat karena mempunyai ciri pemakaian tanah liat bakaran suhu rendah dan teknik pembakaran sederhana. Dalam disiplin ilmu kepurbakalaan (arkeologi), istilah lain gerabah atau keramik tradisional adalah kereweng dan tembikar. Istilah tersebut digunakan untuk menyebut pecahan-pecahan periuk dan alat lainnya yang dibuat dari tanah liat dan sering ditemukan di tempat-tempat pemakaman zaman prasejarah (Delgado, 1995).

Tembikar, atau yang lebih dikenal dengan nama gerabah, menjadi salah satu bentuk buah karya sekaligus tradisi nenek moyang turun-temurun dan dipertahankan hingga saat ini sebagai sebuah keahlian penduduk setempat yang telah diakui dunia (Dimitrova, 2008). Perkakas itu dibuat dan dikembangkan manusia secara independen di kalangan masyarakat Barat maupun Timur. Namun, ada juga kelompok masyarakat yang tidak mengenal atau menggunakan perkakas gerabah dalam kehidupan mereka, misalnya penduduk Polinesia. Bahan baku berupa tanah liat yang dapat dipakai sebagai bahan dasar pembuatan gerabah tidak ditemukan di daerah tempat tinggal mereka.

Selain dimanfaatkan untuk penanggalan geologi yang mampu mengungkap berbagai peristiwa yang pernah terjadi pada planet Bumi, keberadaan radionuklida primordial ternyata juga dapat dimanfaatkan untuk mengungkap perjalanan sejarah peradaban penduduk Bumi. Salah satu produk peradaban nenek moyang manusia yang tergolong tua ialah kerajinan tembikar. Penanggalan tembikar dengan teknik nuklir dapat dilakukan karena adanya kristal-kristal di dalam bahan dasar pembuatan tembikar alam yang mampu menyimpan radiasi yang

dipancarkan oleh radionuklida primordial. Keberadaan radionuklida primordial sebagai sumber radiasi alam dan kristal sebagai penyimpan energi radiasi ternyata dapat dimanfaatkan sebagai pencatat waktu dari saat tembikar itu dibuat.

6.1 FENOMENA TERMOLUMINESENS

Luminesens merupakan fenomena fisika berupa pancaran cahaya dari suatu bahan yang dipanaskan, yang sebelumnya mendapatkan paparan radiasi pengion. Peristiwa ini terjadi karena adanya elektron-elektron yang menyerap energi radiasi dan berpindah ke orbit yang lebih tinggi sehingga bahan berada dalam keadaan tereksitasi. Pancaran cahayanya baru berakhir beberapa saat setelah proses eksitasi pada bahan berakhir. Bahan yang mampu memperlihatkan gejala ini disebut fosfor (Hufton, 1984).

Ada kalanya proses luminesens baru terjadi jika suatu bahan mendapatkan pemanasan dari luar, peristiwa ini disebut termoluminesens. Pancaran cahaya termoluminesens (TL) didefinisikan sebagai pancaran cahaya dari benda padat dengan struktur kristal akibat proses eksitasi yang disebabkan oleh radiasi pengion. Fenomena TL dapat terjadi karena adanya kerusakan kisi-kisi pada kristal. Zat padat dengan struktur kristal memiliki berbagai macam kerusakan kisi-kisi di dalamnya, di antaranya disebabkan oleh hilangnya atom-atom atau ion-ion dari bahan, struktur bidang kristal yang terputus, atau adanya bahan-bahan asing (pengotor) yang terdapat dalam kristal. Pada daerah di sekitar terjadinya kerusakan kisi-kisi tersebut sering kali terbentuk pusat-pusat muatan listrik yang berperan sebagai perangkap dan dapat menarik muatan listrik tak sejenis lainnya (Furetta, 1995).

Energi radiasi yang diserap oleh atom-atom bahan kristal dapat menyebabkan terjadinya proses pengionan sehingga terbentuklah pasangan elektron-lubang (*hole*) dalam kristal tersebut. Elektron yang bermuatan listrik negatif (-) maupun lubang yang bermuatan listrik positif (+) dapat bergerak bebas di dalam bahan. Oleh sebab itu, jika elektron bergerak memasuki daerah kerusakan, di mana terdapat pusat muatan positif, elektron akan tertarik oleh pusat muatan

tersebut. Sebaliknya, lubang yang berperan sebagai ion positif dapat tertarik memasuki daerah kerusakan kisi-kisi, dimana terdapat pusat muatan negatif (Scharmann, 1995).

Banyak perangkap yang tidak stabil secara termal sehingga tidak cukup kuat dalam mengikat tangkapannya. Pemudaran intensitas TL pada kristal dapat terjadi karena adanya perangkap-reperangkap dalam kristal yang tidak stabil secara termal (perangkap dangkal) sehingga akan melepaskan tangkapan elektronnya pada suhu lingkungan. Jika jangka waktu antara terjadinya penyinaran dan pembacaan respon intensitas TL relatif lama, banyak elektron-elektron dalam perangkap metastabil yang akan terlepas dari perangkap. Peristiwa ini disebut pemudaran yang mengakibatkan berkurangnya hasil bacaan tanggapan kristal terhadap radiasi sehingga hasil bacaan intensitas TL yang diperoleh lebih rendah dibandingkan dengan energi radiasi yang sebelumnya diterima oleh kristal.

Di sisi lain, jika pusat-pusat muatan yang terbentuk cukup kuat, pusat muatan itu mampu mengikat ion yang tertarik padanya secara permanen. Pusat-pusat muatan yang cukup kuat ini berperan sebagai perangkap stabil. Kemampuan perangkap dalam mengikat ion disebut kedalaman perangkap. Tingkat kedalaman perangkap tersebut bergantung pada jenis kerusakan kisi-kisi yang terjadi. Setiap jenis zat padat dapat memiliki berbagai macam perangkap, masing-masing dengan kedalaman yang berbeda. Jika pada suatu kristal terdapat bahan pengotor tertentu, dapat diperoleh kristal dengan satu jenis perangkap (McKinlay, 1981).

Pada perangkap yang stabil, elektron maupun lubang akan tetap terperangkap karena tidak mampu melepaskan diri untuk keluar dari perangkap-perangkap tersebut. Elektron-elektron yang terperangkap dapat keluar apabila mendapatkan energi yang cukup untuk melepaskan diri dari ikatan perangkap. Cara paling umum untuk melepaskan elektron tersebut ialah dengan memberi energi termal pada elektron melalui pemanasan dari luar (Scharmann, 1995). Elektron dan lubang yang terlepas dari perangkap selanjutnya akan melakukan rekombinasi dengan pasangannya semula di pusat luminesens.

Penggabungan kembali pasangan elektron dan lubang itu akan disertai dengan terjadinya pancaran cahaya tampak yang disebut cahaya TL dan intensitasnya dapat diukur dengan alat baca TL (Nieto, 1990).

Pancaran cahaya TL dapat terjadi pada benda padat dengan struktur kristal, baik berupa bahan isolator maupun semikonduktor. Bahan yang mampu memperlihatkan fenomena TL mencapai lebih dari 2.000 jenis mineral alam, mulai dari bahan kristal dan gelas anorganik, barang tembikar dan batu api yang digunakan untuk penanggalan arkeologi, sampai dengan bahan-bahan organik yang berpendar pada suhu rendah (Furetta, 1995).

Pancaran cahaya TL dari berbagai jenis mineral telah diketahui dan dipelajari sejak awal abad ke-19. Namun, saat itu belum sepenuhnya diketahui bahwa fenomena ini dapat dikembangkan untuk tujuan pemantauan radiasi. Pada tahun 1905, barulah manusia mengetahui bahwa pancaran TL tadi disebabkan oleh radiasi dari sumber-sumber alamiah. Beberapa laboratorium tertarik pada fenomena pancaran cahaya TL dari kristal sehingga pada awal tahun 1960-an muncul beberapa publikasi ilmiah tentang penanggalan TL. Sejak saat itu, fenomena TL banyak diterapkan dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan. Sebagian besar studi fenomena TL hingga tahun 1966 dikaitkan dengan pemanfaatannya untuk penanggalan dalam bidang geologi dan arkeologi (Dimitrova, 2008). Kini bahan yang mampu memperlihatkan fenomena TL telah dimanfaatkan, salah satunya untuk bahan dasar pembuatan dosimeter dalam pemantauan radiasi (Mahesh, 1989).

Sebagian besar batuan mengandung paling tidak satu jenis material yang dapat memancarkan cahaya TL ketika dipanasi. Banyak temuan benda-benda arkeologi yang dibuat dari tanah liat, seperti tembikar. Bahan itu kini diketahui dapat memperlihatkan gejala TL yang artinya mampu menyimpan informasi berupa penerimaan dosis radiasi dari sumber-sumber alamiah, baik yang terdapat di dalam bahan tembikar itu sendiri maupun sumber-sumber radiasi yang ada di sekitar tempat terkuburnya benda arkeologi tersebut. Informasi penerimaan energi radiasi itu tetap tersimpan dengan aman dalam

kristal dan baru akan keluar dalam bentuk pancaran cahaya TL apabila tembikar mendapatkan pemanasan yang cukup tinggi ($\sim 200\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$) dari luar (McKinlay, 1981).

Selain dalam bidang geologi, keberadaan radionuklida primordial juga dimanfaatkan dalam bidang arkeologi, terutama untuk penanggalan temuan-temuan bahan tembikar kuno. Aplikasi fenomena TL untuk penanggalan temuan arkeologi tersebut dapat memberikan keuntungan tersendiri. Metode ini dapat memberikan perkiraan umur melalui pengukuran fisika yang lebih tepat dan teliti karena informasi umur dalam bentuk penumpukan sinyal TL di dalam benda-benda arkeologi tersimpan dengan aman. Informasi itu tidak akan keluar atau hilang tanpa adanya pemanasan pada suhu tinggi dari luar (Yigal, 1983).

Hampir semua metode penanggalan TL pada temuan-temuan benda arkeologi didasarkan pada peningkatan sinyal TL terhadap waktu setelah benda tersebut mengalami pengosongan TL melalui pembakaran saat pembuatannya (Mahesh, 1989). Selanjutnya, pembangkitan dan penumpukan sinyal TL pada benda dapat terjadi karena paparan radiasi hasil peluruhan radionuklida alamiah di sekelilingnya. Oleh sebab itu, jumlah sinyal TL yang tersimpan akan sebanding dengan dosis radiasi yang diterima benda, dengan asumsi respon itu linier. Sifat linier respon kristal yang terdapat di dalam bahan tembikar dapat diuji melalui iradiasi dan pembacaan respon TL di laboratorium.

Bahan dasar untuk pembuatan keramik ialah sejenis tanah liat. Bahan keramik merupakan bahan nonmetal, tersusun atas senyawa anorganik, terutama dalam bentuk carbida, nitrida, barida, dan silisida. Macam-macam yang termasuk dalam lingkup pembuatan keramik ialah pembuatan barang tembikar (dari tanah), porselen, batu bata porselen, beberapa jenis ubin maupun atap rumah, serta periuk-belanga. Pada umumnya, kita mengenal pemanfaatan keramik yang dapat ditemukan di sekitar kita sebagai barang-barang artistik, barang-barang pecah belah untuk perabot rumah tangga, juga sebagai bahan bangunan (lantai, atap, dinding dan lain-lain).

Proses pembuatan tembikar ialah melalui pembakaran atau pemanasan pada suhu tinggi sehingga semua informasi TL yang tersimpan dalam bahan dasar pembuatan tembikar akan keluar dan informasi TL sama sekali tidak tersimpan. Namun, dengan berjalannya waktu, sumber-sumber radiasi alamiah akan memberikan penyinaran radiasi sedikit demi sedikit. Seiring dengan bertambahnya penerimaan dosis radiasi, maka informasi TL yang tersimpan di dalam tembikar juga meningkat.

6.2 TEKNIK PENANGGALAN TL

Kuarsa yang menempel pada matriks tanah liat mempunyai kepekaan TL yang relatif tinggi, namun bahan ini tidak mengandung unsur-unsur radioaktif. Oleh sebab itu, informasi TL yang tersimpan di dalam kuarsa berasal dari penyinaran radiasi alfa, beta, dan gamma dari matriks tanah liat dan sinar gamma dari batuan di sekitarnya dalam radius sekitar 30 cm. Terbatasnya daya tembus sinar alfa (umumnya hanya sampai jarak 25–40 mikron) dan sinar beta (sampai jarak 500 mikron) ke dalam partikel kuarsa menyebabkan distribusi dosis serap di dalam kuarsa tersebut tidak merata dan sangat bergantung pada ukuran partikel. Zirkon, yang juga menempel pada tanah liat, berjumlah sangat sedikit, tetapi mengandung radionuklida alamiah dengan kadar relatif tinggi (umumnya sekitar 50–300 ppm uranium) dan mempunyai kepekaan TL yang relatif tinggi, meskipun cukup bervariasi antara satu butir dengan butir lainnya (Delgado, 1995).

Tembikar bukan merupakan bahan yang homogen, baik secara fisik maupun kepekaannya terhadap radiasi. Pada umumnya, tembikar tersusun atas matriks tanah liat dengan diameter kurang dari 10 mikron yang ditempeli banyak kuarsa dan sedikit zirkon dengan ukuran hingga beberapa milimeter. Matriks tanah liat merupakan bahan dengan kandungan radionuklida alamiah terbesar (umumnya 3 bagian-persejuta/ppm uranium, 12 ppm torium dan 2 ppm kalium). Oleh karena itu, butiran tanah liat berukuran sangat kecil akan teradiasi secara merata oleh sinar alfa, beta, dan gamma dari sumber-sumber alamiah (Hufton, 1984). Namun, butiran tanah liat

itu ternyata mempunyai kepekaan TL yang sangat rendah. Melalui pemisahan komponen butiran-butiran tanah liat, kuarsa dan zirkon, diperoleh tiga metode yang dapat dipakai untuk memperkirakan umur suatu tembikar, sebagai berikut (Mahesh, 1989).

- 1) Pemisahan butiran-butiran tanah liat yang halus (diameter kurang dari 8 mikron). Di sini dapat diasumsikan bahwa dosis serap pada butiran-butiran itu cukup merata dan umumnya berasal dari iradiasi sinar alfa, beta, dan gamma. Kontribusi dosis serap yang berasal dari uranium dan torium dapat diukur menggunakan pencacah radiasi alfa dan dosis radiasi dari sumber 40K dihitung melalui penentuan kadar K dengan analisis kimia.
- 2) Pemisahan butiran-butiran kuarsa berukuran besar yang umumnya berdiameter 100–150 mikron, jauh lebih besar dibandingkan jangkauan maksimum sinar alfa. Butiran kuarsa praktis tidak mengandung radionuklida alamiah sehingga total dosis serap dari sinar alfa hanya berasal dari matriks tanah liat di sekelilingnya. Terbatasnya daya tembus sinar alfa menyebabkan dosis serap ini hanya terdeposisi pada permukaan lapisan tipis kuarsa. Pengelupasan lapisan permukaan kuarsa melalui etsa kimia asam *hydrogen fluoride* (HF) akan menghilangkan informasi TL dari penyinaran alfa di permukaan kristal. Dengan demikian, dosis serap yang diterima kuarsa setelah proses etsa tadi seluruhnya hanya berasal dari sinar beta dan gamma sehingga pengukuran dosis dari penyinaran alfa tidak diperlukan lagi.
- 3) Pemisahan butiran-butiran zirkon karena bahan ini mengandung radionuklida alamiah dengan kadar relatif tinggi dan merupakan media yang efektif dalam menyerap dosis radiasi. Demikian besarnya kemampuan menyerap dosis radiasi itu, kontribusi dosis serap dari batuan sekelilingnya dapat diabaikan. Namun, karena kepekaan TL dan kadar kandungan radionuklida alamiahnya cukup bervariasi antara satu butiran dengan butiran lainnya, metode pengukuran TL harus dilakukan untuk masing-masing butiran. Hampir seluruh dosis serap total dalam satu butiran berasal dari radiasi alfa yang dipancarkan radionuklida di dalam

butiran. Metode pencacahan dan spektroskopi sinar alfa dapat dipakai untuk mengukur kandungan uranium dan torium secara akurat di dalam zirkon.

Umur suatu temuan benda arkeologi dapat ditentukan dengan menghitung total akumulasi dosis radiasi yang tersimpan dalam benda (dinyatakan dalam satuan dosis Gray, disingkat Gy) dan mengukur laju dosis radiasi alamiah tahunan (dinyatakan dalam Gy pertahun) pada lokasi di mana benda itu ditemukan. Umur benda arkeologi dapat diperkirakan melalui perhitungan pada persamaan (14).

$$\text{Umur (tahun)} = \frac{\text{dosis radiasi(Gy)}}{\text{laju dosis tahunan } \left(\frac{\text{Gy}}{\text{tahun}}\right)} \quad (14)$$

Persamaan (14) yang cukup sederhana tersebut dapat dimodifikasi dan disesuaikan dengan jenis material (tanah liat, kuarsa, atau zirkon) yang sedang dipelajari. Dalam praktiknya, pengukuran TL dan proses-proses yang menyertainya untuk penanggalan arkeologi ini cukup kompleks dan harus mempertimbangkan berbagai faktor, seperti jenis kristal yang diukur, jenis sumber radiasi yang paling dominan, dan lingkungan di mana benda arkeologi itu ditemukan.

Dari persamaan (14) terlihat ada dua besaran yang harus diukur dalam penanggalan TL, yaitu pengukuran dosis total (dalam Gy) dan laju dosis tahunan (dalam Gy/tahun) yang diterima tembikar. Untuk pengukuran dosis total dapat diperoleh dengan cara membaca intensitas TL melalui pemanasan tembikar. Cahaya TL dapat keluar akibat pemanasan luar sehingga sistem instrumen pembaca intensitas TL dirancang agar mampu memberikan pemanasan pada tembikar sekaligus mendeteksi cahaya tampak yang dipancarkannya.

Sistem pada alat baca yang dipakai untuk mendeteksi cahaya TL menggunakan tabung pengganda cahaya (*photomultiplier*) dan memiliki puncak kepekaan terhadap spektrum akhir warna biru cahaya tampak. Oleh sebab itu, benda yang memancarkan cahaya

TL pada daerah warna biru atau ultra violet memiliki kepekaan yang tinggi terhadap radiasi. Kerusakan intrinsik seperti kekosongan atom pada kristal sangat berpengaruh terhadap proses termoluminesens (Yigal, 1983).

Pemanasan terhadap sampel tembikar menyebabkan terjadinya pancaran cahaya TL yang ditangkap oleh foto katoda sehingga terjadi pelepasan elektron dari permukaan foto katoda itu. Selanjutnya, elektron-elektron yang dilepaskan ini diarahkan ke tabung pengganda cahaya yang di dalamnya terdapat dinoda-dinoda. Setiap kali elektron menumbuk dinoda akan menyebabkan terlepasnya elektron-elektron lain dari dinoda tersebut. Dengan demikian, terjadi pelipatgandaan jumlah elektron di dalam tabung pengganda cahaya. Elektron-elektron itu dapat menghasilkan pulsa listrik yang akan diproses lebih lanjut oleh sistem rangkaian alat pencacah sehingga diperoleh data hasil cacahan radiasi dari sampel dalam bentuk intensitas TL (Furetta, 1995).

Hasil bacaan intensitas TL dapat dikonversi menjadi dosis radiasi total yang diterima sampel apabila kepekaan sampel terhadap radiasi diketahui. Kepekaan (S) didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas TL (I_{TL}) per dosis radiasi (D) yang diterima sebelumnya, atau secara matematis ditulis pada persamaan (15).

$$S = \frac{I_{TL}}{D} \quad (15)$$

Penyinaran di laboratorium dapat dimanfaatkan untuk menentukan kepekaan kristal terhadap radiasi. Apabila kristal disinari dengan dosis yang telah ditentukan harganya dan intensitas TL hasil penyinaran dibaca dengan *TL-Reader*, kepekaan kristal terhadap radiasi dapat secara langsung dihitung menggunakan persamaan (15). Sebaliknya, dengan mengetahui nilai S suatu kristal yang diperoleh melalui penelitian di laboratorium, persamaan (15) dapat pula dipakai untuk menghitung dosis total yang diterima oleh sampel arkeologi ($D_{total} = I_{total}/S$).

Kepekaan suatu kristal terhadap radiasi bergantung pada jenis dan energi radiasi. Oleh sebab itu, perlu adanya identifikasi jenis radiasi yang diterima sampel (Delgado, 1995). Untuk perhitungan dosis pada sampel arkeologi yang hanya menerima penyinaran sinar alfa (D_a), harus digunakan kepekaan sampel terhadap sinar alfa (S_a) sehingga $D_a = I_{\text{total}}/S_a$. Persamaan ini dapat dipakai untuk menghitung dosis radiasi total pada sampel arkeologi berupa zirkon. Untuk penyederhanaan dalam penanggalan TL, kepekaan sampel arkeologi terhadap sinar beta dan gamma biasanya dianggap sama sehingga $S_b = S_g$. Dengan demikian, $D_{\text{total}} = I_{\text{total}}/S_b = I_{\text{total}}/S_g$. Persamaan tersebut dapat dipakai untuk menghitung dosis radiasi total pada sampel arkeologi berupa kuarsa.

Selain data dosis total pada setiap sampel arkeologi, dalam penanggalan TL juga diperlukan adanya data mengenai laju dosis tahunan yang diterima sampel. Dengan metode pemisahan jenis-jenis mineral yang terdapat dalam benda arkeologi (tanah liat, kuarsa, dan zirkon), penentuan laju dosis tahunan dapat dilakukan dengan metode yang relatif sederhana. Untuk sampel zirkon yang dianggap hanya menerima dosis sinar alfa, penentuan laju dosis tahunannya dapat dilakukan melalui pencacahan maupun spektrometri alfa. Dari pengukuran ini, dapat diperoleh data mengenai aktivitas radionuklida pemancar alfa dalam sampel. Dengan demikian, laju dosis tahunannya dapat diperkirakan.

Dari perhitungan, diperoleh data laju dosis sinar alfa dari 1 ppm ^{232}Th dengan asumsi tidak ada gas radon yang hilang (sampel tidak berpori) sebesar 738 mikro Gray per tahun (mGy/tahun). Radionuklida anak luruh dalam deret torium ini juga dapat memberikan dosis beta dan gamma, masing-masing 28,6 dan 51,4 mGy/tahun (Mahesh, 1989). Data tersebut menunjukkan bahwa dosis beta dan gamma dari anak luruh deret torium hanya sebesar 4% dan 6% dari total dosis yang diterima sampel. Sementara itu, 1 ppm ^{238}U (tidak ada gas radon yang hilang) dapat memberikan dosis alfa dengan laju 2.783 mGy/tahun dan anak luruhnya juga memberikan dosis beta dan gamma dengan laju masing-masing 146,2 dan 114,8 mGy/tahun, yang artinya menempati porsi masing-masing 5% dan 4% dari total dosis.

Sering kali kadar radionuklida primordial dalam jenis-jenis tembikar tertentu sudah diketahui, misalnya tembikar yang ditemukan di Skandinavia umumnya mengandung 10 ppm torium, 3 ppm uranium, 2,5 ppm kalium dan 200 ppm Rb. Dengan komposisi tersebut, bahan tembikar akan menerima laju dosis dari sumber pemancar alfa sebesar 2.359 mGy/tahun (35%), sumber pemancar beta sebesar 2.894 mGy/tahun (43%), sumber pemancar gamma sebesar 1.481 mGy/tahun (22%), dan laju dosis efektif seluruhnya sebesar 6.734 mGy/tahun (Hufton, 1984).

Dalam penanggalan TL dengan sampel berupa kuarsa, radiasi yang berperan dalam pembangkitan TL adalah sinar beta dan gamma. Untuk butiran kuarsa dengan diameter lebih besar dari 0,1 mm, kontribusi dosis dari sinar beta dapat mencapai 60–80%. Namun, karena jangkauan sinar beta di dalam batuan sangat pendek (hanya sekitar 1–2 mm), dapat dipastikan bahwa dosis beta yang diterima sampel hanya berasal dari sumber pemancar beta yang ada di dalam matriks sampel itu sendiri. Tidak adanya pengaruh sinar beta dari lingkungan sekitar menyebabkan penentuan laju dosis beta dapat dilakukan dengan cara yang relatif sederhana di laboratorium. Dalam penanggalan TL ini, efek sinar beta batuan sekitar dapat dihilangkan dengan cara mengelupas bagian luar sampel setebal 1–2 mm.

Ada dua metode yang dapat dipakai untuk menentukan laju dosis beta dan gamma dalam matriks sampel arkeologi. Metode pertama ialah menentukan kandungan radionuklida pemancar beta dan gamma di dalam sampel, diikuti dengan perhitungan laju dosis dengan asumsi laju dosis yang dipancarkan sumber sama dengan laju dosis yang diserap sampel. Dari perhitungan, diperoleh data bahwa 1% kalium dapat memberikan dosis beta dan gamma masing-masing dengan laju 830,3 dan 241 mGy/tahun. Apabila kalium dalam bentuk senyawa K_2O , artinya 1% senyawa itu dapat memberikan laju dosis beta dan gamma sebesar 689,3 dan 200 mGy/tahun. Sementara itu, sumber beta ^{87}Rb dengan kadar 100 ppm memberikan dosis beta sebesar 46,4 mGy/tahun (Mahesh, 1989).

Metode penentuan laju dosis beta dan gamma yang kedua ialah melalui pengukuran langsung menggunakan dosimeter. Dalam metode ini, dosimeter dikubur di tempat ditemukannya benda arkeologi dalam jangka waktu beberapa bulan hingga satu tahun dengan situasi penguburan diusahakan menyerupai situs di mana benda arkeologi tadi ditemukan. Informasi laju dosis di tempat tersebut dapat diketahui dengan membaca respon TL pada dosimeter. Dengan diperolehnya data dosis total yang diterima sampel dan data laju dosis di tempat ditemukannya sampel, umur temuan sampel arkeologi itu dapat diperkirakan secara langsung melalui perhitungan menggunakan persamaan (14).

Hingga pertengahan tahun 1960-an, para peneliti menganggap bahwa partikel alfa merupakan sumber terbesar dosis radiasi pada benda-benda arkeologi dan otomatis dianggap sebagai penyebab pancaran TL terbesar karena alih energi partikel alfa persatuan massa mineral jauh lebih besar dibandingkan dengan yang berasal dari sinar beta dan gamma alamiah. Namun, dalam perkembangan penelitian berikutnya, diketahui bahwa partikel alfa mempunyai efisiensi yang rendah dalam membangkitkan TL dibandingkan sinar beta maupun gamma. Oleh sebab itu, dalam memperkirakan dosis radiasi yang diterima tembikar, semua sumber yang ada dan berpotensi memberikan dosis radiasi harus disertakan dalam perhitungan (Yigal, 1983).

Dengan menganggap tidak ada radiasi dari sumber-sumber buatan, semua informasi TL dalam tembikar hanya berasal dari radionuklida alamiah serta radiasi kosmis dengan jumlah sangat sedikit yang datang dari ruang angkasa. Namun, apabila tembikar terkubur di dalam tanah kedalaman, radiasi alamiah yang diterima umumnya berupa sinar alfa yang berasal dari unsur-unsur anggota deret uranium dan torium serta sinar beta dan gamma dari sumber ^{40}K dan ^{87}Rb yang ada di dalam matriks tembikar. Tambahan dosis radiasi dapat pula datang dari sumber-sumber pemancar sinar beta dan gamma dalam batuan yang ada dalam radius ± 30 cm di sekitar tembikar. Radiasi kosmis mempunyai kontribusi sekitar 5% dari total dosis temuan arkeologi pada umumnya, namun untuk jenis tembikar

yang terkubur di kedalaman Bumi (misalnya temuan dari dalam gua) atau di dasar laut, kontribusi radiasi kosmis tersebut bisa lebih kecil (Nieto, 1990).

6.3 PENANGGALAN ARKEOLOGI

Keramik berasal dari kata Yunani *keramikos* yang berarti tanah liat atau lempung pengrajin tembikar (potter's clay). Keramik sebagai suatu istilah yang sejak semula diterapkan pada karya yang terbuat dari tanah liat alami dan telah melalui pemanasan pada suhu tinggi sehingga menjadi keras secara permanen. Pada mulanya, produksi keramik dikaitkan dengan seni membuat barang-barang tembikar (Ingpen & Wilkinson 1995). Menurut kamus dan ensiklopedia yang terbit sekitar tahun 1950-an, keramik didefinisikan sebagai suatu hasil seni dan teknologi untuk menghasilkan barang dari tanah liat yang dibakar, seperti gerabah, genteng, dan porselin. Namun, saat ini tidak semua keramik berasal dari tanah liat sehingga pengertian keramik terbaru mencakup semua bahan bukan logam dan anorganik yang berbentuk padat. Istilah bahan-bahan keramik digunakan untuk semua bahan anorganik yang dibakar pada pembakaran suhu tinggi sehingga bahan asli berubah substansinya (Dimitrova, 2008).

Keramik telah menjadi bagian dari kebudayaan nenek moyang kita. Pembuatan perkakas dari tanah liat ini merupakan salah satu karya seni tertua di dunia (Historic England, 2015). Usia keramik tertua dikenal dari masa Paleolitikum, yaitu 27.000 tahun lalu. Di gua Fukui, Kyushu, Jepang, ditemukan kerajinan keramik yang dibuat kira-kira pada tahun 10.000–10.500 sebelum masehi (SM). Keramik juga diproduksi di Tiongkok dan Indo-Tiongkok tidak lama setelah Jepang. Di Afrika dan Timur Tengah, para pengrajin keramik sudah ada sejak milenium 8 SM. Di kawasan Timur Tengah, kerajinan membuat perkakas keramik diperkirakan sudah dimulai oleh masyarakat Sumeria Kuno di Lembah Sungai Eufrat sejak 6.500 SM dan di Mesir Kuno sejak 4.500 SM. Di kawasan Eropa, keramik sudah dikenal kira-kira sejak milenium 7 SM, sedangkan keramik tertua di Amerika diperkirakan dibuat pada milenium 4 SM (Ingpen & Wilkinson 1995).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Para arkeolog sudah sejak lama tertarik pada penanggalan barang-barang artefak berupa tembikar yang begitu umum dan paling banyak ditemukan di situs-situs arkeologi di berbagai penjuru dunia. Analisis terhadap temuan-temuan arkeologi tersebut dapat memberikan informasi tambahan terhadap dokumen-dokumen tertulis untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik mengenai alur perdagangan yang menghubungkan penduduk di berbagai lokasi yang berbeda. Pada saat mulai dikembangkan, metode TL telah dipakai untuk melacak jejak perdagangan penduduk asli bangsa Indian di Amerika Utara dan studi pelacakan sumber-sumber batuan sedimen di Belgia (Yigal, 1983).

Sebagai salah satu teknik penanggalan, metode TL telah menunjukkan hasil yang memuaskan dan menuai banyak kesuksesan melalui aplikasinya di bidang arkeologi. Banyak institusi mengandalkan metode penanggalan TL ini dalam memperkirakan usia temuan-temuan arkeologi. Beberapa laboratorium telah merintis pengembangan metode ini, seperti Research Laboratory of Archeology and the History of Art di Oxford University, University of Wisconsin, University of Pennsylvania di Amerika Serikat, Kyoto University di Jepang, dan Riso National Laboratory di Denmark. Di Tiongkok, studi penanggalan TL pertama kali dilakukan oleh Institute of Geology of the Chinese Academy of Sciences.

Teknik penanggalan TL telah digunakan untuk mempelajari temuan arkeologi berupa pecahan-pecahan tembikar dari situs Tell Saka yang berlokasi 25 km sebelah barat daya kota Damascus di Suriah (Mahesh, 1989). Hasil studi itu ternyata sangat bersesuaian dengan data-data arkeologi tentang kehidupan kuno di lokasi tersebut. Di Jerman, metode ini telah digunakan untuk penanggalan tembikar yang terkubur di daerah Lubeck. Melalui pengukuran TL dalam sampel kuarsa, diperkirakan tembikar tersebut dibuat pada tahun 1244 (± 26 tahun) M.

Penanggalan temuan tembikar kuno yang terkubur di Lejre, Denmark, juga dilakukan menggunakan metode TL (Hufton, 1984). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa benda tersebut diperkirakan

dibuat pada tahun 1030 (\pm 25 tahun) M. Hasil ini sangat cocok dengan catatan arkeologi yang memperkirakan pembuatan benda antara tahun 950–1050 M. Tembikar yang ditemukan di situs Sringaverapura di India dapat diketahui usianya dan diperkirakan dibuat antara 2660–3015 SM, setelah dilakukan analisis menggunakan metode penanggalan TL. Tembikar kuno yang ditemukan di sebuah gua di gurun pasir bagian barat Mesir telah di data menggunakan metode TL oleh sebuah laboratorium nuklir di Prancis. Hasil analisis menunjukkan bahwa benda arkeologi tersebut sudah berumur sekitar 3230 tahun atau dibuat sekitar 1230 SM.

Dari uraian mengenai aplikasi teknik nuklir dalam bentuk pemanfaatan radionuklida primordial untuk penanggalan arkeologi serta beberapa contoh aplikasinya yang cukup luas, terlihat bahwa teknik nuklir memiliki peran yang cukup penting dalam membantu mengungkap sejarah perjalanan planet Bumi serta buah karya kehidupan penduduknya di masa lampau. Data yang dihasilkan dari penggunaan teknik nuklir ini bukan sekedar perkiraan-perkiraan dengan asumsi-asumsi yang sulit dibuktikan, melainkan data terukur dengan akurasi tinggi yang dapat dibuktikan secara ilmiah.



Penanggalan Radiokarbon

Dalam bidang arkeologi, menentukan usia benda purba merupakan salah satu kegiatan yang sangat penting, namun sering kali sulit untuk dilakukan, terutama bila tidak cukup atau bahkan tidak ada sama sekali bukti-bukti sejarah yang mendukung padahal temuan benda purba memiliki arti penting apabila usia atau tahun pembuatan benda itu diketahui. Benda-benda inilah yang saat ini diburu dan dikoleksi, baik oleh pemburu atau kolektor barang antik untuk keperluan memenuhi hobi dan motif ekonomi, maupun oleh para arkeolog untuk keperluan ilmiah, terutama untuk dianalisis mengenai usia pembuatannya dan dipelajari karakteristik budayanya.

Telah banyak metode konvensional dikenalkan dan dicoba untuk mempelajari zaman prasejarah. Metode kronometri berdasar pada perhitungan susunan lapisan-lapisan sedimen tahunan di dalam danau-danau yang dikenal sebagai Verne Chronologis. Metode ini dapat membantu melengkapi data geologi selama 10.000 tahun silam di Skandinavia (Uranium/lead dating, 2004). Zaman prasejarah umumnya diteliti dengan data-data skematik yang sulit untuk disetarakan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan skala kronometri. Metode konvensional itu memiliki beberapa kelemahan, misalnya hanya cocok untuk digunakan pada daerah-daerah geologi tertentu dan hanya dapat digunakan untuk rentang umur benda yang sangat terbatas.

Perkenalan manusia dengan radionuklida kosmogenik ternyata dapat merubah cara pandang dalam penanggalan arkeologi (Hajdas, 2008). Sampai saat ini, metode ini masih terus dipakai dan dikembangkan. Para arkeolog dan paleoantropolog sejak beberapa dekade lalu telah melakukan kerja sama dengan para saintis teknik nuklir dalam rangka mengembangkan metode penanggalan benda-benda purbakala dengan teknik nuklir.

Salah satu metode yang sering dimanfaatkan untuk penentuan usia temuan benda kuno dalam bidang arkeologi adalah penanggalan radiokarbon. Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Willard F. Libby yang bekerja sama dengan James Arnold dan Ernest C. Anderson pada tahun 1940 di *Institute for Nuclear Studies*, Universitas California. Penanggalan radiokarbon bertumpu pada peluruhan radionuklida kosmogenik ^{14}C . Karena dapat memberikan hasil yang sangat memuaskan, metode tersebut hingga kini masih tetap digunakan secara luas untuk penanggalan temuan-temuan arkeologi (Hajdas, 2008). Penemuan metode ini merupakan sumbangan yang sangat berharga dalam rangka penelusuran benda-benda peninggalan bersejarah. Oleh karena itu, dari penemuan metode ini akhirnya mengantarkan Libby meraih Hadiah Nobel Bidang Kimia tahun 1960.

7.1 TEKNIK PENANGGALAN

Banyak temuan arkeologi yang dapat didata menggunakan penanggalan radiokarbon, seperti semua jenis fosil (tumbuhan, hewan, maupun manusia), arang sisa pengapian, tanah gambut, potongan kain, kulit, kerang, tanduk, tulang, bulu binatang, rambut, lumut, serta bahan-bahan organik lainnya (Libby, t.t.). Penanggalan fosil (tengkorak dan kerangka manusia maupun binatang) dapat pula didata secara tidak langsung, yaitu melalui penanggalan arang sisa pengapian maupun bahan organik lainnya yang ditemukan pada lapisan di mana fosil

itu ditemukan. Melalui teknik ini, penanggalan fosil dapat dilakukan tanpa merusak fosil itu sendiri.

Sejak beberapa dasawarsa silam, metode penanggalan radiokarbon telah mencapai puncak kemasyhuran yang mengagumkan. Metode ini dinilai sangat memadai untuk menganalisis benda-benda purbakala dan peninggalan-peninggalan kerangka manusia purba. Perkembangannya ini menggambarkan suatu kemajuan besar di bidang arkeologi dan paleoantropologi modern yang melibatkan beberapa disiplin ilmu pengetahuan (Libby, 1960). Sampai saat ini, metode penanggalan radiokarbon telah dipakai untuk memperkirakan umur lebih dari 100.000 buah sampel organik yang berumur *quaternary* (satu juta tahun silam sampai sekarang).

Begitu pentingnya arti penemuan metode penanggalan radiokarbon ini bagi perkembangan ilmu pengetahuan sehingga pengaruh penemuan teknik ini terhadap perkembangan di bidang arkeologi sama seperti pengaruh penemuan tabel periodik oleh Mendeleev terhadap perkembangan ilmu kimia (Taylor, 2005). Arkeolog senior dari Inggris mengatakan bahwa penemuan metode penanggalan radiokarbon merupakan penemuan besar abad 20 karena dengan penemuan ini para arkeolog dapat mengidentifikasi spesies manusia purba. Kini, penggunaan metode radiokarbon ditujukan untuk penanggalan benda-benda yang terbentuk pada bagian akhir prasejarah era Pleistosen ($1,8 \times 10^6 - 1,0 \times 10^4$ tahun lalu) dan Holosen atau zaman akhir (10.000 tahun lalu).

Apabila suatu saat jasad ditemukan dalam bentuk fosil, usia fosil tersebut dapat diketahui menggunakan data pendukung dalam bentuk kandungan ^{14}C yang terkandung dalam fosil tadi (Hajdas, 2008). Dengan membandingkan kadar ^{14}C dalam sampel organisme sejenis yang masih hidup, jumlah ^{14}C yang sudah meluruh dalam sampel arkeologi dapat diketahui. Setelah mengetahui jumlah ^{14}C yang sudah meluruh atau sisa yang masih tertinggal dalam sampel, para ilmuwan dapat memperkirakan secara lebih akurat sejak kapan organisme itu mati. Jika A_t menyatakan jumlah atau aktivitas ^{14}C dalam sampel fosil pada saat ditemukan dan A_0 menyatakan jumlah

^{14}C standar dalam makhluk hidup dari fosil tersebut, antara kedua besaran tersebut mempunyai hubungan yang memenuhi persamaan (5) sebagai berikut:

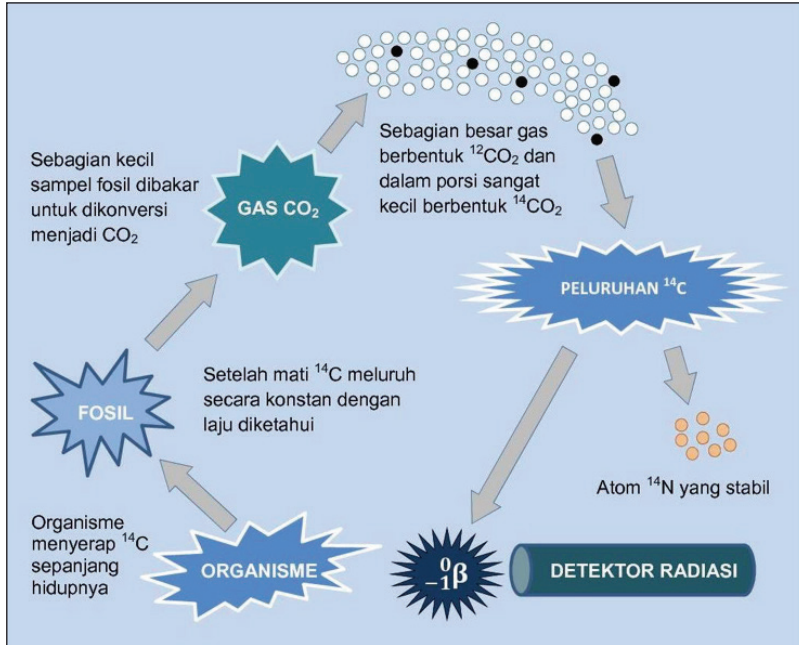
$$A_t = A_u e^{\lambda t} \text{ atau } A_t = A_t e^{\lambda t} \quad (*)$$

dengan λ adalah konstanta peluruhan untuk ^{14}C yang nilainya $1,21 \times 10^{-4}$ /tahun. Oleh sebab itu, dengan mendapatkan data A_t dan A_0 , dari persamaan (*) dapat diperoleh persamaan baru untuk menyatakan usia fosil (t) sebagai berikut:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A_t} \quad (16)$$

Pengukuran kadar ^{14}C dalam benda arkeologi ditunjukkan pada Gambar 5.3. Diawali dengan membakar sekitar 30 gram sampel dalam tabung tertutup berisi oksigen. Gas yang keluar dari proses pembakaran tersebut terdiri atas gas karbon dioksida (CO_2) dan senyawa-senyawa gas lainnya. Senyawa selain CO_2 dikeluarkan dari tabung dan gas CO_2 yang telah bersih diukur kadar ^{14}C nya melalui pengukuran radiasi yang dipancarkannya. Aktivitas dari radionuklida tersebut dapat diukur dalam bentuk CO_2 murni maupun diubah terlebih dahulu ke dalam senyawa benzene (Arnikar, 1996). Hingga kini telah banyak dikembangkan berbagai jenis instrumentasi radiasi yang dapat dipakai untuk mengukur radiasi dengan intensitas yang sangat rendah. Oleh sebab itu, penanggalan dengan teknik radiokarbon ini mampu memberikan hasil pengukuran yang paling akurat dibandingkan metode penanggalan non-nuklir lainnya.

Jika pengukuran kadar ^{14}C dalam sampel dilakukan dalam bentuk gas CO_2 murni, aktivitas standarnya dapat mengacu pada kadar ^{14}C dalam udara normal. Sebagai contoh, suatu sampel gas CO_2 dari atmosfer dimasukkan ke dalam bejana tertutup dengan volume 200 cm^3 ($2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$) hingga mencapai tekanan $2,00 \times 10^4$ Pascal (Pa, dimana $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \approx 10^{-5}$ atmosfer), pada suhu 295 Kelvin (K). Dari sini dapat dihitung jumlah peluruhan atau disintegrasi ^{14}C setiap



Sumber: Libby (1997)

Gambar 5.3 Metode Penanggalan Radiokarbon

waktu dengan satuan dps (disintegrasi per sekon, di mana 1 dps = 1 Bq). Langkah pertama ialah menghitung terlebih dahulu jumlah mol gas CO₂ (n dalam mol) yang terdapat dalam bejana menggunakan persamaan umum gas ideal. Dengan mengambil nilai tetapan gas ideal R = 8,314 Joule.mol⁻¹.K⁻¹, nilai n dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut (Krane, 1992):

$$n = \frac{PV}{RT} = \ln \frac{(2,00 \times 10^4 \text{ N/m}^2) (2 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8,314 \text{ l/mol. K})(295 \text{ K})} = 1,64 \times 10^{-3}$$

Tiap mol suatu senyawa, dalam hal ini gas CO₂, mengandung jumlah molekul sebanyak A₀, dengan A₀ adalah bilangan Avogadro

yang nilainya $6,02 \times 10^{23}$ molekul/mol sehingga jumlah molekul (N) gas CO_2 yang terdapat di dalam bejana ialah

$$\begin{aligned} N &= n \times A_u = (1,63 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (6,02 \times 10^{23} \frac{\text{molekul}}{\text{mol}}) \\ &= 9,82 \times 10^{20} \text{ molekul} \end{aligned}$$

Mengingat tiap molekul gas CO_2 tersusun atas satu atom karbon (C) dan dua atom oksigen (O), dalam bejana terdapat $9,82 \times 10^{20}$ atom C yang terdiri atas ^{12}C dan ^{14}C . Jika rasio atom ^{14}C terhadap ^{12}C adalah 10^{-12} , dalam bejana ada $9,82 \times 10^8$ buah atom ^{14}C . Berdasarkan data ini, aktivitas atau jumlah atom ^{14}C yang melakukan peluruhan dalam bejana dapat dihitung menggunakan persamaan (4) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A &= \lambda \times N = \lambda \times \frac{1,21 \times 10^{-4}}{\text{tahun}} \times \frac{1 \text{ tahun}}{3,16 \times 10^{-7} \text{ s}} \times 9,82 \times 10^8 \\ &= 3,76 \times 10^{-3} \text{ dps} \end{aligned}$$

Nilai $A = 3,76 \times 10^{-3}$ dps, hasil perhitungan aktivitas ^{14}C dalam sampel udara tersebut dipakai sebagai standar aktivitas awal kadar ^{14}C dalam setiap sampel berbentuk CO_2 ($A_0 = 3,76 \times 10^{-3}$ dps). Jika bejana yang sama pada kondisi yang sama dipakai untuk menampung gas CO_2 hasil pembakaran sampel arkeologi yang akan ditentukan usianya dan dari pengukuran diperoleh hasil pencacahan aktivitas ^{14}C sebesar $2,31 \times 10^{-3}$ dps, usia sampel arkeologi tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan (16) sebagai berikut:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \times \frac{A_u}{A_0} = \frac{1}{1,21 \times 10^{-7} / \text{tahun}} \ln \frac{3,76 \times 10^{-3} \text{ dps}}{2,31 \times 10^{-3} \text{ dps}} = 3.920 \text{ tahun}$$

Jika usia fosil dinyatakan dalam satuan kelipatan umur paro ^{14}C (n), di mana $n = t/T_{1/2}$, persamaan (16) dapat ditulis dalam bentuk:

$$A_t = A_u \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

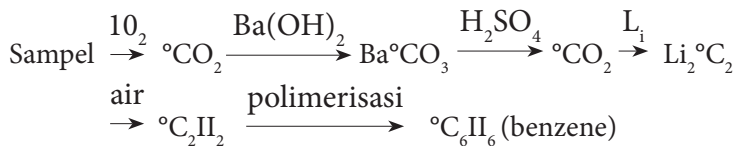
Perbandingan massa dari $^{14}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ dalam atmosfer Bumi cenderung konstan sepanjang waktu, dengan rasio $\approx 10^{-12}$ sehingga semua makhluk hidup, baik tanaman maupun hewan, jika dianalisis akan memberikan data yang konstan mengenai kandungan ^{14}C di dalam tubuhnya (Chamber & Johnson, 2009). Pengukuran yang teliti mengenai laju disintegrasi spesifik (disintegrasi per satuan massa) dari ^{14}C yang sering digunakan bervariasi, dari 14 hingga 16 disintegrasi per menit untuk setiap gram (dpm/g) sampel C. Nilai yang sering digunakan dalam praktik ialah nilai rata-rata yang berkisar antara $(15,8 \pm 0,3)$ dpm/gram dari total C (Arnika, 1996). Hasil pengukuran terbaru yang diperoleh oleh peneliti asal Swedia mendekati nilai 13,6. Angka tersebut menunjukkan jumlah sebenarnya dari atom ^{14}C yang meluruh setiap menit (dpm) dalam setiap satu gram unsur karbon.

Dengan mengambil nilai rata-rata disintegrasi spesifik untuk sampel karbon ($A_0 = 15,8$ dpm/gram), persamaan (16) dapat ditulis menjadi:

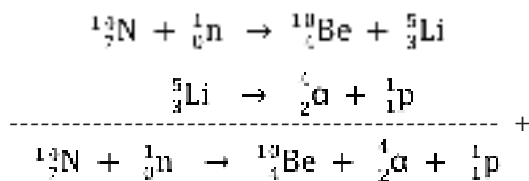
$$A_t = 15,8 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (17)$$

dengan A_t adalah aktivitas ^{14}C dalam sampel organik yang diukur setelah n kali umur paro ^{14}C ($T_{1/2} = 5.730$ tahun). Berdasarkan persamaan (17), usia fosil cukup dinyatakan dengan n kali 5.730 tahun. Sebagai contoh, ketika kandungan ^{14}C pada potongan kain dari karung yang ditemukan pada tahun 1990 di sebuah gua kuno, memberikan data hasil cacahan sebesar 11,1 dpm. Dengan memasukkan nilai tersebut ke persamaan (17) akan diperoleh nilai $n = 0,509$. Dari sini dapat disimpulkan bahwa sampel tadi telah bertahan atau berusia selama $t = 0,509 \times 5.730$ tahun atau 2.919 tahun terhitung sejak sebelum 1990. Dengan kata lain, sampel tersebut dibuat kira-kira pada 930 Sebelum Masehi.

Pencacahan ^{14}C juga dapat dilakukan dalam bentuk senyawa benzene. Untuk keperluan ini, sampel arkeologi yang mengandung bahan-bahan organik akan menjalani proses dengan perlakuan sebagai berikut (Arnika, 1996):

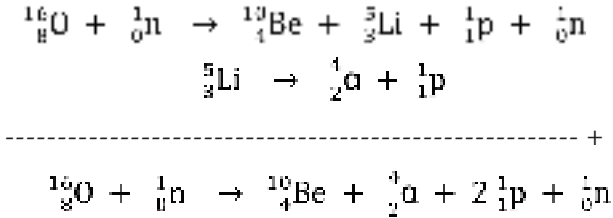


Selain memanfaatkan keberadaan radionuklida kosmogenik ^{14}C , penanggalan arkeologi juga dapat dilakukan dengan memanfaatkan keberadaan radionuklida kosmogenik jenis lainnya, terutama yang saat ini banyak dimanfaatkan ialah beryllium-10 (^{10}Be) dan aluminium-26 (^{26}Al). Keduanya disukai oleh para ilmuwan karena memiliki umur paro yang relatif panjang (Dunai, 2010). Radionuklida ^{10}Be memiliki umur paro $1,6 \times 10^6$ tahun, terbentuk di ruang angkasa sebagai hasil pemecahan (*spallation*) yang dipicu oleh penembakan radiasi kosmis sekunder berupa neutron terhadap inti atom nitrogen-14 (^{14}N) maupun oksigen-16 (^{16}O). Ketika ditabrak neutron, inti atom ^{14}N akan pecah menghasilkan dua inti baru, masing-masing inti ^{10}Be dan lithium-5 (^5Li). Dalam waktu yang sangat singkat, yaitu sekitar 10^{-21} detik, inti atom ^5Li langsung membelah lalu menghasilkan partikel alfa atau inti atom helium (He) dan proton atau inti atom hidrogen (H). Pembentukan inti ^{10}Be diilustrasikan pada Gambar 5.4. Prosesnya dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi nuklir sebagai berikut (Dunai, 2010):

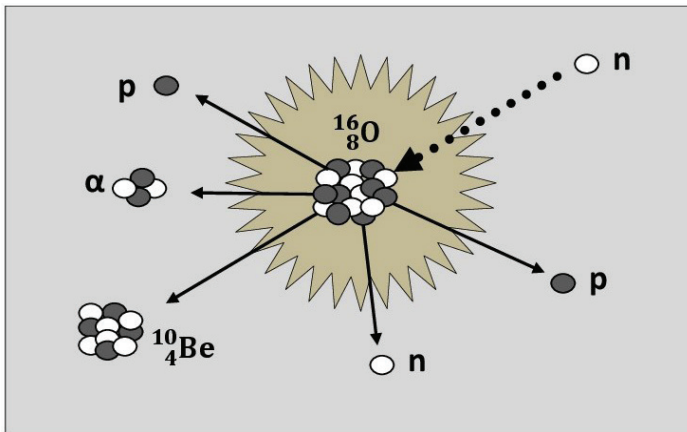
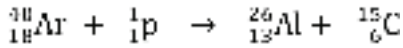


Dalam bentuk ringkasnya, persamaan reaksi nuklir tersebut sering ditulis dengan ${}^{14}_7\text{N}(n, \alpha p) {}^{10}_4\text{Be}$. Selain itu, pembentukan radionuklida ^{10}Be dari inti ^{16}O berlangsung melalui reaksi ${}^{16}_8\text{O}(n, \alpha 2p) {}^{10}_4\text{Be}$ yang

dapat dijabarkan dalam bentuk persamaan reaksi nuklir sebagai berikut (Dunai, 2010).



Radionuklida ^{26}Al memiliki umur paro $7,17 \times 10^5$ tahun, terbentuk di ruang angkasa sebagai hasil pemecahan yang dipicu oleh penembakan radiasi kosmis proton terhadap inti atom argon-40 (^{40}Ar). Prosesnya berlangsung melalui reaksi $^{40}\text{Ar}(\text{p}, \text{C})^{26}\text{Al}$ dan dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi nuklir sebagai berikut (Dunai, 2010).



Sumber: Dunai (2010)

Gambar 5.4 Proses Nuklir Pembentukan $^{10}_4\text{Be}$ dari $^{16}_8\text{O}$

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Selain berlangsung di atmosfer, pembentukan radionuklida kosmogenik ^{10}Be juga berlangsung di permukaan Bumi (Darvill, 2013). Radionuklida ini menarik bagi ilmuwan karena potensinya sebagai perunut di lingkungan yang dapat dipakai dalam studi geologi, arkeologi, glasiologi, dan oseanografi. Pengendapan ^{10}Be di permukaan Bumi umumnya bergantung pada curah hujan. Radionuklida yang terendapkan terdiri atas beberapa komponen, terutama yang terbentuk di stratosfer dan troposfer. Fluks radiasi kosmis dan perubahan mayor pada medan magnet Bumi berpengaruh terhadap laju pengendapan ^{10}Be . Radionuklida yang terdapat dalam sedimen dan air tanah segera terendapkan pada sedimen tepi sepanjang garis pantai, kemudian sebagian kecilnya akan terlepas dan menyebar ke laut dalam.

7.2 TEMUAN ARKEOLOGI

Penanggalan radiokarbon telah digunakan di beberapa negara untuk mendata usia temua-temuan arkeologi. Berbagai temuan sejarah dan arkeologi berhasil didata dan diketahui usia maupun tahun pembuatannya menggunakan teknik ini. Banyak bukti mengungkapkan bahwa manusia purba dari generasi ke generasi memanfaatkan gua sebagai tempat tinggalnya. Bukti paling otentik dari peninggalan mereka yang sering ditemukan di dalam gua adalah berbagai jenis peralatan, senjata perburuan, dan peralatan rumah tangga yang tertimbun berlapis-lapis bersama tulang hewan hasil buruannya. Di Amerika Serikat, penanggalan radiokarbon telah dipakai untuk menentukan usia benda arkeologi berupa 300 pasang sandal bertali ditenun, ditemukan dalam gua yang dikenal sebagai Fort Rock Cave di Oregon. Hasil pendataan sampel organik yang dipakai sebagai bahan pembuat sandal menunjukkan bahwa benda tersebut dibuat sekitar 9.000 tahun lalu (Libby, 1997). Taimyr, fosil gajah raksasa asal Siberia, didata menggunakan teknik radiokarbon sehingga diketahui spesies tersebut telah binasa sejak 10.000 SM (Arnika, 1996).

Penanggalan radiokarbon juga telah berhasil mengungkap misteri homosapiens modern yang menjadi nenek moyang masyarakat

Amerika Serikat. Laporan sementara mengenai kehadiran nenek moyang masyarakat Amerika Serikat di Bumi belahan barat (Western Hemisphere) sebelumnya diperkirakan telah berlangsung sejak 30.000–40.000 tahun silam. Namun, bukti paling akurat yang diperoleh dengan penanggalan radiokarbon menunjukkan bahwa leluhur bangsa Amerika Asli, yang oleh orang Eropa disebut Bangsa Indian, datang melalui Siberia Timur dan Alaska sekitar 13.000–15.000 tahun silam (Taylor, 2005).

Di Mesir yang kaya dengan peninggalan benda-benda arkeologi, penanggalan radiokarbon dengan sukses digunakan untuk menentukan usia kayu dek kapal keranda agung dari makam raja Sesostrius III. Menurut kisah lama, pohon-pohon yang tumbuh di Mesir suatu saat ditebang dan kayu hasil tebangan tadi dijadikan patung, kursi, tempat tidur, perahu, dan sebagainya yang kemudian ditempatkan dalam suatu piramida. Perahu itu kini berada di Musium Sejarah Alam di Chicago, Amerika Serikat. Perahu dengan panjang kira-kira 3,5 meter dan lebar 2 meter itu diketahui sudah berumur sekitar 3.600 tahun. Masih di Mesir, penanggalan radiokarbon digunakan untuk mengetahui usia kepingan balok kayu akasia dari makam Zoser di Sakkara yang diawetkan dengan cermat. Makam itu diperkirakan telah berumur 4.650 tahun. Butiran gandum dan jawawut yang ditemukan dalam lumbung di provinsi Faiyun didata dengan radiokarbon sehingga diketahui usianya sekitar 6.000 tahun (Libby, 1997).

Gobekli Tepe merupakan situs peninggalan arkeologi yang terletak di Selatan Turki, tepatnya di daerah Anatolia yang ditemukan pada tahun 1994 dan diteliti oleh tim arkeologi dari Jerman, di bawah arahan German Archeological Institute. Menurut para arkeolog, situs itu menjadi tempat perlindungan bagi manusia yang hidup pada Zaman Batu. Berdasarkan hasil penanggalan menggunakan teknik radiokarbon diketahui bahwa bangunan di tempat itu telah ada sejak 12.000 tahun silam dan merupakan situs keagamaan tertua yang pernah ditemukan hingga saat ini (Hajdas, 2008). Penelitian lebih lanjut menginformasikan bahwa manusia Zaman Batu di Gobekli Tepe telah meninggalkan aktivitas berburu dan beralih ke aktivitas

bertani. Saat itu, masyarakat di Gobekli Tepe telah menemukan bibit gandum yang pertama dari jenis *einkom wheat*.

Penanggalan radiokarbon berhasil memastikan bangsa mana yang merupakan pembuat mie pertama di dunia. Sejarah membuktikan bahwa Tiongkok merupakan penemu pertama mie. Sebuah tim dari Lembaga Geologi dan Geofisika di Chinese Academy of Sciences yang berlokasi di Beijing berhasil menemukan semangkok mie di Lajia, sebuah situs arkeologi di pinggir sungai Kuning di Tiongkok Barat Laut. Mie dengan panjang sekitar 50 cm dan diameter 0,3 cm lengkap dengan warna kekuning-kuningan ditemukan tersaji pada sebuah mangkuk dengan posisi terbalik. Posisi tersebut menciptakan ruang hampa yang memperlambat mie hancur. Mangkuk terkubur pada kedalaman tiga meter dari permukaan sedimentasi. Setelah dilakukan uji penanggalan radiokarbon, diketahui bahwa mie tersebut berasal dari zaman Neolitikum sekitar 4.000 tahun silam. Inilah data paling awal mengenai sejarah mie yang pernah ditemukan. Temuan ini sekaligus menempatkan Lajia sebagai desa penemu dan pembuat mie paling tua (*Oldest noodles unearthed*, 2015).

Penanggalan radiokarbon juga dimanfaatkan untuk menelusuri kapan manusia mulai mengenal tradisi bercocok tanam. Dari penelitian menggunakan teknik radiokarbon, sekelompok peneliti menawarkan suatu pandangan bahwa tradisi bercocok tanam, terutama untuk gandum sebagai bahan roti, telah dilakukan oleh masyarakat Pleistosen di dekat Aswan, Pakistan, sekitar 17.000–18.000 tahun yang lalu atau 10.000 tahun lebih awal dibandingkan dengan data yang diperoleh dari penelitian di Timur Tengah (Taylor, 2005).

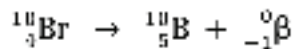
Penetapan awal tradisi manusia mulai bercocok tanam didasarkan pada analisis penanggalan radiokarbon pada seonggok arang sisa yang terdapat di dalam tungku pengapian yang ditemukan terkubur di daerah dekat Aswan. Selain itu, analisis dengan penanggalan radiokarbon pada sampel biji jewawut (*barley sheeds*) yang ditemukan di tempat-tempat lain selain kedua daerah tadi (Pakistan dan Timur Tengah) menunjukkan tidak ada yang usianya lebih tua dari 5.000 tahun. Oleh sebab itu, para peneliti menyimpulkan bahwa kebiasaan

bercocok tanam oleh manusia purba di luar kawasan Timur Tengah dan Pakistan baru dimulai sekitar 5.000 tahun silam (Taylor, 2005).

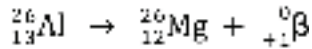
Peluruhan mengakibatkan kadar ^{14}C di dalam sampel arkeologi lama kelamaan menjadi sangat rendah, radiasi yang dipancarkannya menjadi berkurang sehingga sulit untuk dideteksi. Oleh sebab itu, cara penanggalan benda-benda arkeologi dengan metode radiokarbon ini hanya efektif untuk umur maksimal sampai dengan 50.000 tahun. Untuk umur yang diperkirakan lebih tua dari itu dapat digunakan metode penanggalan lain, misalnya penanggalan dengan menganalisis kandungan radionuklida ^{40}K maupun ^{238}U (Blyth & de Freitas, 1984).

Fosil *Australopithecus*, hominid (manusia kera) yang memiliki ciri manusia dan kera sekaligus, telah ditemukan di sebuah gua Sterkfontein yang berlokasi di 50 km sebelah barat Johannesburg, ibu kota Afrika Selatan (Rozanski & Froehlich, 1996). Penanggalan fosil dilakukan menggunakan peluruhan radionuklida kosmogenik yang ditemukan pada sedimen gua, di mana fosil *Australopithecus* tadi terkubur. Diduga sejak empat juta tahun silam, tanah, batu karang, dan tulang fosil terkubur di dalam gua tersebut. Berdasarkan hasil penanggalan, ada kemungkinan manusia purba telah hidup sejuta tahun lebih awal dibandingkan dengan yang diperkirakan sebelumnya.

Jutaan tahun lalu, radiasi kosmis membombardir permukaan Bumi sehingga terbentuklah radionuklida kosmogenik ^{10}Be dan ^{26}Al (Dunai, 2010). Kedua jenis radionuklida itu ditemukan pada permukaan karang dan butiran-butiran kuarsa yang terkubur bersamaan dan berdekatan dengan fosil di gua Sterkfontein. Begitu karang terkubur, pembentukan kedua jenis radionuklida itu langsung berhenti. Selanjutnya, karena bersifat radioaktif, keduanya melakukan proses peluruhan inti sehingga jumlahnya terus berkurang seiring dengan berjalannya waktu. Radionuklida ^{10}Be meluruh sambil memancarkan elektron atau sinar beta negatif dan menghasilkan inti baru boron-10 (^{10}B) yang stabil dengan proses nuklir untuk peluruhannya adalah sebagai berikut:



Sementara itu, radionuklida ^{26}Al meluruh sambil memancarkan positron atau sinar beta positif menghasilkan inti baru magnesium-26 (^{26}Mg) yang stabil dengan proses nuklir untuk peluruhannya adalah sebagai berikut:



7.3 ARANG SISA PEMBAKARAN

Di Amerika Serikat, penanggalan radiokarbon telah dipakai untuk memperkirakan saat terbentuknya Danau Kawah di Oregon (Libby, 1997). Danau Kawah di Oregon muncul karena adanya letusan gunung berapi kuno yang menghancurkan puncak gunung sehingga reruntuhan dan lahar panasnya mengubur seluruh kawasan dan membakar atau menghanguskan hutan-hutan di sekitarnya. Sampel yang dipakai untuk penyelidikan ini ialah arang dari suatu pohon yang hangus oleh lahar panas dan terkubur di dasar danau. Hasil pengukuran kadar ^{14}C dalam arang tersebut menunjukkan bahwa Danau Kawah di Oregon terbentuk kira-kira 6.400 tahun lalu.

Penanggalan radiokarbon juga dapat dilakukan melalui pengukuran ^{14}C dalam arang sisa pengapian manusia purba (Libby, 1997). Metode ini telah digunakan di Prancis untuk mengetahui usia lukisan peninggalan manusia purba di gua Lascaux, di departemen Dordogne. Gua yang terbentuk sejak zaman Paleolitikum itu sangat terkenal dengan lukisan berwarna yang terdiri atas berbagai jenis hewan dari zaman batu. Pada dinding maupun langit-langit gua yang dihuni manusia purba itu dihiasi dengan seni lukis yang indah dan hingga kini masih tampak jelas. Melalui pengukuran ^{14}C dalam arang sisa pengapian manusia purba yang di temukan di dalam gua tersebut, diketahui bahwa lukisan dalam gua Lascaux dibuat kira-kira 15.000 tahun silam.

Dengan metode yang sama seperti dalam mengungkap misteri lukisan di gua Lascaux, Prancis, pengukuran kadar ^{14}C dalam sampel arang sisa pengapian manusia purba juga digunakan untuk men-

gungkap misteri bangunan purba di Wiltshire, 13 kilometer barat laut Salisbury di Inggris (Libby, 1997). Bangunan batu besar bernama *Stonehenge* dari zaman Neolitikum itu masih menyimpan sejumlah misteri.

Terdapat pertikaian mengenai usia sebenarnya lingkaran batu *Stonehenge*, tetapi kebanyakan arkeolog memperkirakan bahwa bangunan tersebut didirikan antara 3.000 SM hingga 2.000 SM. Teknik nuklir memiliki andil yang cukup penting dalam mengungkap misteri bangunan tersebut, yaitu dipakainya teknik penanggalan radiokarbon untuk menentukan usia bangunan. Penanggalan dilakukan terhadap sampel arang sisa pengapian manusia purba yang ditemukan pada salah satu lubang *Stonehenge*.

Berdasarkan data hasil pengukuran kadar ^{14}C yang tersisa dalam sampel arang itu diketahui bahwa lokasi bangunan tersebut telah digunakan untuk beraktivitas sejak sekitar 4.000 tahun silam (Libby, 1997). Penanggalan radiokarbon menunjukkan bahwa batu pertama didirikan antara 2.400 hingga 2.200 SM atau telah berusia sekitar 4.200 hingga 4.400 tahun. Masih di Inggris, panggung Birchwood dari permukiman manusia purba di danau Pickering di Yorkshire telah didata menggunakan penanggalan radiokarbon dan diketahui telah berumur sekitar 9.500 tahun.

7.4 MANUSKRIP TUA

Menurut riwayat, kitab suci Al-Qur'an bagi umat Islam diturunkan kepada Nabi Muhammad *sallallahu alaihi wasallam* (saw.) sejak 610 hingga 632 Masehi. Penulisan wahyu dari Allah *subhānahu wa ta'āla* (Swt.) telah dilakukan oleh para sahabat yang hidup dan bertemu langsung dengan Nabi saw. Mereka mendengarkan bacaan wahyu Allah Swt. dari Muhammad saw. dan menuliskan wahyu tersebut pada berbagai media, seperti pelepah kurma, tulang unta, dan kulit binatang. Beberapa catatan bagian-bagian mushaf Al-Qur'an itu ternyata masih ada, tersimpan dan berhasil ditemukan kembali di beberapa museum (Birmingham Qur'an manuscript, 2015).

Pada awalnya, konvensi umum mengenai naskah Al-Qur'an yang tertua ialah milik pemerintah Yaman. Menurut situs resmi UNESCO-Persikatan Bangsa-Bangsa (PBB), lembaran-lembaran catatan wahyu Allah Swt. itu ditemukan para pekerja bangunan saat merenovasi tembok loteng di Masjid Agung Sanaa, ibu kota Yaman, pada tahun 1972. Jumlah fragmen lembaran perkamen kulit yang ditemukan mencapai sekitar 12 ribu fragmen. Pada tahun 1979, pemerintah Yaman mengundang peneliti Jerman untuk menelaah perkamen-perkamen tersebut. Melalui uji penanggalan radiokarbon, diketahui bahwa sebagian dari lembaran-lembaran tersebut berasal dari masa sebelum 671 Masehi (M) dengan akurasi 99 persen (A'zami, 2003).

Naskah Al-Qur'an dengan usia yang lebih tua dibanding milik pemerintah Yaman ditemukan di Jerman. Pada November 2014, lembaran-lembaran Al-Qur'an yang tergolong tua ditemukan di perpustakaan Universitas Tübingen, Jerman. Bentuknya berupa lembaran perkamen dari kulit binatang. Manuskrip tersebut terselip di antara koleksi manuskrip yang disumbangkan ke perpustakaan pada tahun 1864 sebagai bagian dari koleksi konsul Prussia, Johann Gottfried Wetzstein (Reynolds, 2014). Universitas Tübingen memberi kode manuskrip itu dengan MA IV 165. Selanjutnya, Universitas Tübingen membentuk satu tim khusus untuk menganalisis temuan naskah Al-Qur'an tersebut melalui proyek Coranica. Melalui uji penanggalan radiokarbon yang dilakukan oleh para ilmuwan, didapatkan rentang asal naskah, yaitu antara 649 hingga 675 M dengan akurasi 95,4 persen (Reynolds, 2014). Lembaran naskah kitab suci yang ditemukan di Tübingen itu ditulis dengan gaya Arab Hijazi bergaya kaligrafi Kufi. Gaya tersebut pertama kali dipopulerkan oleh Khalifah keempat, Ali bin Abi Thalib (Reynolds, 2014)

Penemuan terbaru manuskrip kuno berupa catatan awal wahyu Allah Swt. terjadi di Birmingham, Inggris. Naskah itu semula merupakan koleksi perpustakaan The University of Birmingham (Birmingham Qur'an manuscript, 2015). Kisah naskah di Birmingham itu dimulai pada akhir abad ke-19 hingga awal abad ke-20 di Mosul, Irak, ketika hidup seorang pendeta Katolik Khaldea bernama Alphonse Mingana

(1878–1937). Menurut catatan Universitas Birmingham, Mingana pernah diundang mengunjungi Inggris pada tahun 1913, kemudian bertugas sebagai kurator naskah-naskah kuno dari Timur Tengah di Manchester. Dengan sponsor dari Edward Cadbury (1873-1948), pemilik raksasa perusahaan cokelat di Bournville, Birmingham, Mingana melakukan sejumlah perjalanan kembali ke Timur Tengah pada tahun 1920-an untuk mengumpulkan manuskrip-manuskrip tua, di antaranya berupa dokumen-dokumen lama tentang agama Kristen dan Islam dari Suriah, Lebanon, Irak, Mesir, dan Kurdistan dari tahun 1924 hingga 1929. Sebagian naskah yang dibawa Mingana ke Eropa dipamerkan di berbagai museum dan sebagian lagi disimpan di bagian arsip Perpustakaan Cadbury milik Universitas Birmingham di Inggris.

Di antara naskah-naskah yang disimpan di Perpustakaan Cadbury itu, ada dua lembar naskah Al-Qur'an yang terselip di antara naskah-naskah lain. Sekitar 100 tahun kemudian terungkap bahwa dua lembar naskah yang ditulis di atas perkamen dari kulit binatang itu memiliki arti yang begitu penting bagi ilmu pengetahuan. Seorang mahasiswa bernama Alba Fedeli tertarik pada keunikan cara penulisan naskah tersebut. Fedeli melihat bahwa gaya penulisan dua lembar naskah itu ternyata tidak seragam dengan naskah lainnya yang juga terkumpul dalam buku yang sama (Birmingham Qur'an manuscript, 2015).

Berkat kajian pada manuskrip yang dilakukan oleh Fedeli untuk disertasinya, dengan uji penanggalan radiokarbon akhirnya diketahui bahwa naskah itu berasal dari masa antara 568 hingga 645 M dengan akurasi 95,4 persen. Jangka waktu tersebut mencakup masa kehidupan Nabi saw. Hingga sekitar 20 tahun setelah Nabi saw. wafat. Jika Nabi Muhammad wafat pada 632 M, ada kemungkinan besar lembaran-lembaran kulit binatang bertuliskan naskah Al-Qur'an itu pernah disentuh oleh para sahabat Nabi lebih dari 1.370 tahun lalu.

Selain untuk penanggalan naskah tua berupa lembaran-lembaran bertuliskan ayat suci Al-Qur'an, penanggalan radiokarbon juga dimanfaatkan untuk penelitian naskah-naskah tua yang dikenal sebagai

Gulungan Laut Mati (Arnikar, 1996). Gulungan Laut Mati merupakan manuskrip Yahudi kuno yang mayoritas ditulis dalam bahasa Ibrani, beberapa dalam bahasa Aramaik, dan sedikit dalam bahasa Yunani. Di antara gulungan-gulungan pertama yang diperoleh dari orang-orang Badui terdapat tujuh manuskrip panjang dengan berbagai tahap kerusakan. Makin banyak gua yang diperiksa, makin banyak ditemukan ribuan gulungan dan fragmen lainnya. Manuskrip-manuskrip terkenal yang ditemukan di Laut Mati telah didata berdasarkan kandungan radionuklida ^{14}C nya dan diketahui bahwa manuskrip itu dibuat sekitar tahun 20 SM. Banyak gulungan dan fragmen ini berusia lebih dari 2.000 tahun (Arnikar, 1996).

7.5 FENOMENA GUNUNG KAPUR

Kita telah mengenal dan menemui berbagai macam gua yang menakjubkan, terutama karena rahasia yang sering kali menyelubungi gua tersebut. Di dalamnya, para peneliti bisa menemukan sebuah ruangan yang dikelilingi batu-batu atau ruangan menakjubkan yang dihiasi dengan seni pahat alamiah yang tidak kalah indah dari hasil pahatan manusia. Para pengunjung gua batu kapur biasanya tertarik pada berbagai bentuk kotoran gua mirip patung yang berada di dalam gua selama berabad-abad. Kotoran-kotoran gua ini disebut *speleotem*, bentuknya berbeda-beda dan sangat menarik. Ada yang berupa jerami tipis panjang dan tetesan air es menggelantung dari atap, tiang-tiang kokoh yang muncul dari bawah lantai, air terjun yang membeku, serta keanehan-keanehan lainnya (Lobeck, 1997).

Tingkah laku air terhadap batu kapur ternyata dapat menciptakan berbagai efek yang sangat menakjubkan. Unsur utama batu kapur berupa kalsium karbonat (CaCO_3) dapat mengkristal dalam dua bentuk, yaitu kalsit dan aragonite (Pacton dkk., 2013). Gua terbentuk oleh air hujan (H_2O) mengandung gas karbon dioksida (CO_2) yang di serap dari atmosfer. Ketika larutan mengalami kontak dengan udara, partikel CaCO_3 akan muncul sebagai endapan sehingga membentuk stalaktit dan stalagmit. Keduanya merupakan ciri khas gua batu kapur (White, 2013).

Stalaktit (berasal dari kata Yunani, *stalaktos*, yang artinya “tetesan keringat”) muncul karena larutan sudah terurai terlebih dahulu sebelum menetes ke dasar gua sehingga terjadi penumpukan CaCO_3 di atap gua. Stalaktit menghiasi dan menciptakan pemandangan spektakuler pada langit-langit gua. Bila air menembus melalui celah yang sempit, endapan batu kapur dapat membentuk gorden atau tirai. Alur-alur yang menggantung bergaris-garis warna coklat disebabkan oleh *limonit* atau karat besi (Lobeck, 1997).

Larutan berkapur terus menetes ke lantai gua tepat di bawah stalaktit sehingga lama-kelamaan mengakibatkan penumpukan CaCO_3 di dasar gua yang semakin tinggi. Pengendapan dan penumpukan CaCO_3 inilah yang nantinya tumbuh sebagai stalagmit (berasal dari kata *stalagmos* yang artinya tetesan). Akibat proses pembentukannya sudah berlangsung sekian lama, tidak jarang stalaktit yang terbentuk dari atas dan stalagmit yang terbentuk dari bawah akhirnya menyatu membentuk tiang-tiang atau pilar yang seakan-akan berperan sebagai penyangga gua kapur.

Pembentukan stalaktit dan stalagmit berlangsung begitu lambat. Dalam setahun, stalaktit dan stalagmit umumnya akan tumbuh rata-rata sepanjang 0,13 mm (0,005 inci). Pertumbuhan stalaktit berlangsung cepat apabila dibentuk oleh air yang mengalir cepat serta kaya akan kalsium karbonat dan karbon dioksida sehingga dapat tumbuh hingga 3 mm (0,12 inci) per tahun. Lambatnya laju pengendapan ini juga dipengaruhi oleh gerakan udara dan campuran di dalam batu kapur (Pacton dkk., 2013).

Analisis dengan memanfaatkan perunut radiokarbon ternyata dapat dipakai untuk menentukan usia stalagmit di dalam gua-gua pegunungan kapur dengan cara menganalisis kandungan ^{14}C yang terdapat di dalam CaCO_3 penyusun stalagmit tersebut. Perunut ^{14}C sendiri dapat masuk dan menjadi komponen penyusun batu kapur bersama dengan masuknya CO_2 yang terlarut dalam air. Stalagmit terbentuk di dasar gua secara berangsur-angsur, selapis demi selapis, sehingga lapisan termuda terletak pada bagian paling atas dan lapisan tertua terletak pada bagian paling bawah. Dengan mengambil sampel

pada bagian bawah dan tengah stalagmit dapat diketahui kronologi terbentuknya stalagmit tersebut (Satrio dkk., 2003).

Suatu penelitian pernah dilakukan oleh Satrio dan kawan-kawan dari Puslitbang Teknologi Isotop dan Radiasi di Badan Tenaga Nuklir Nasional (P3TIR-BATAN). Kini instansi tersebut bernama Pusat Riset Teknologi Proses Radiasi, Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTPR – BRIN). Satrio dan tim meneliti umur stalagmit gua Njirak di Trenggalek, Jawa Timur. Dari hasil penelitian tadi diketahui bahwa umur stalagmit kecil pada bagian tengah dan dasar masing-masing (2.340 ± 270) tahun dan (2.895 ± 240) tahun, sedangkan umur stalagmit besar pada bagian tengah dan dasar masing-masing (2.425 ± 290) tahun dan (3.355 ± 270) tahun (Satrio dkk., 2003). Penentuan umur ini dapat dipakai untuk mengetahui laju pertumbuhan relatif stalagmit sebagai bahan informasi yang berguna, baik untuk tujuan wisata maupun bidang penelitian yang berkaitan dengan geologi.



Penutup

Dalam menjalani kehidupan di planet Bumi, disadari maupun tidak, manusia selalu berinteraksi dengan berbagai jenis radionuklida serta radiasi yang dipancarkannya. Berbagai macam radionuklida primordial yang dapat ditemukan di bagian-bagian kerak bumi telah terbentuk secara alamiah bersamaan dengan kelahiran planet Bumi. Hujan radiasi kosmis dari ruang angkasa yang disertai dengan terbentuknya berbagai macam radionuklida kosmogenik telah berlangsung di atmosfer Bumi sejak alam ini terbentuk.

Radionuklida alamiah serta radiasi yang dipancarkannya bukanlah merupakan hal asing dalam kehidupan. Radionuklida alam itu ada di berbagai tempat dan paparan radiasinya dapat ditemui di manapun manusia berada. Radionuklida dan radiasi yang dipancarkannya merupakan bagian dari kehidupan dan manusia sudah bersinggungan dengannya sejak pertama kali hadir di dunia. Bahkan, radionuklida alamiah itu sudah menjadi bagian dari penyusun tubuh manusia sejak awal kelahirannya. Dengan kata lain, dalam kehidupannya, manusia tidak dapat menghindarkan diri dari keberadaan radionuklida alamiah.

Bagi masyarakat ilmiah, adanya radionuklida alamiah serta radiasi yang dipancarkannya justru bermanfaat untuk penanggalan radioaktif (*radioactive dating*). Teknik penanggalan dengan memanfaatkan radionuklida alamiah ternyata dapat membantu para ilmuwan dalam mengungkap berbagai misteri yang ditemui dalam kehidupan di dunia. Usia Bumi dan alam semesta dapat diprediksi lebih akurat, peristiwa-peristiwa besar yang pernah terjadi di muka Bumi dapat dirunut kembali, perkembangan peradaban penduduk Bumi yang sudah berlangsung selama ribuan tahun dapat diketahui oleh generasi penerus, perjalanan planet Bumi serta penduduknya dapat direkonstruksi ulang, dan masih banyak lagi manfaat yang dapat diperoleh umat manusia dari keberadaan radionuklida alamiah.

Penemuan radionuklida primordial ternyata dapat mengubah cara pandang para ilmuwan dalam penentuan waktu geologi. Pemanfaatan teknik nuklir dalam bidang geologi mampu memberikan data-data terukur dan lebih tepat mengenai jam geologi. Radionuklida primordial melakukan peluruhan secara kontinyu dengan laju konstan tanpa terpengaruh oleh faktor-faktor lingkungan. Dengan demikian, radionuklida itu dapat dipakai sebagai jam geologi yang disediakan oleh alam dan hingga saat ini diakui sebagai metode untuk penentuan waktu geologi yang paling objektif.

Penemuan radionuklida alamiah secara radikal telah mengubah pandangan manusia tentang sejarah Bumi. Pemanfaatan radionuklida primordial untuk penanggalan geologi menunjukkan bahwa teknik nuklir memiliki peran yang cukup penting dalam mengungkap sejarah perjalanan planet Bumi serta peristiwa-peristiwa yang menyertai perjalanannya di masa lampau. Melalui studi ini, pengetahuan lebih detail mengenai sejarah permukaan Bumi, Bulan, dan batuan meteorit lainnya telah berkembang dengan pesat. Melalui data-data terukur yang diberikan oleh radionuklida primordial, rekonstruksi sejarah perjalanan planet Bumi dapat diketahui lebih pasti. Data yang dihasilkan dari penggunaan teknik nuklir ini bukan sekedar perkiraan-perkiraan dengan asumsi-asumsi yang sulit dibuktikan,

melainkan data terukur dengan akurasi tinggi yang dapat dibuktikan secara ilmiah di laboratorium.

Selain studi geologi, keberadaan radionuklida primordial ternyata juga dapat dimanfaatkan untuk kepentingan arkeologi. Radionuklida primordial dapat berperan sebagai sumber radiasi yang kontinyu bagi lingkungan. Interaksi radiasi itu dengan berbagai bahan termoluminesens (TL) yang ada di lingkungan ternyata dapat dimanfaatkan untuk keperluan penanggalan temuan-temuan hasil kerajinan tembikar kuno. Informasi umur dalam bentuk penumpukan sinyal TL di dalam benda-benda arkeologi tersimpan dengan aman. Informasi itu tidak akan keluar atau hilang tanpa adanya pemanasan pada suhu tinggi dari luar. Aplikasi fenomena TL untuk penanggalan temuan arkeologi tersebut dapat memberikan keuntungan tersendiri karena metode ini dapat memberikan perkiraan umur melalui pengukuran fisika yang lebih pasti dan teliti.

Selain radionuklida primordial, keberadaan radionuklida kosmogenik di lingkungan juga dapat dimanfaatkan untuk studi arkeologi. Berbagai radionuklida kosmogenik dengan umur paro panjang dapat ditemukan dalam berbagai jenis fosil organik maupun terkubur bersama-sama dengan fosil tersebut. Peluruhannya yang berlangsung secara konstan tanpa terpengaruh oleh faktor-faktor lingkungan menjadikannya sebagai penanggal waktu yang sangat akurat bagi studi arkeologi.

Teknik penanggalan radiokarbon yang mengandalkan radionuklida kosmogenik ^{14}C di bidang arkeologi telah banyak membantu memberikan informasi kepada para arkeolog dan paleoantropolog dalam mengungkap bukti-bukti zaman purbakala. Melalui penanggalan ini, para ilmuwan dapat merekonstruksi sejarah kehidupan dan perjalanan hidup nenek moyang manusia di masa lalu dengan bantuan teknik nuklir. Penanggalan ulang dengan mengandalkan teknik penanggalan radioaktif terhadap temuan-temuan fosil manusia purba digunakan sebagai koreksi terhadap sejarah awal nenek moyang manusia.

Meskipun dalam tingkat aktivitas tertentu keberadaan radionuklida memiliki potensi berbahaya bagi kesehatan, tingkat aktivitas radionuklida alamiah ternyata jauh berada di bawah level bahaya sehingga keberadaannya di lingkungan hidup itu aman bagi kesehatan. Alih-alih berbahaya bagi kehidupan, keberadaan radionuklida alamiah justru memberikan suatu laboratorium alam bagi para peneliti fisika nuklir. Radionuklida primordial yang ditemukan pada bagian kulit bumi dan radionuklida kosmogenik di ruang angkasa dapat dimanfaatkan oleh para ilmuwan untuk berbagai keperluan ilmiah yang memberi manfaat besar bagi kehidupan.

Daftar Referensi



- A brief history of radiation.* (1995). Los Alamos Science Number 23 (116–123).
- A'zami, M. M. (2003). *The history of the Qur'anic text from revelation to compilation: a comparative study with the Old and New Testaments.* UK Islamic Academy.
- Amirudin, A. (2009). *Kimia inti dan radiokimia.* PDIN-BATAN.
- Anatole, A., Klyosov, A. A., & Rozhanskii, I. L. (2012). Re-examining the “Out of Africa” theory and the origin of Europeoids (Caucasoids) in light of DNA genealogy. *Advances in Anthropology*, 2(2), 80–86.
- Anderson, D. L. (1989). *Theory of the earth.* Blackwell Scientific Publications.
- Arnika, H.J. (1996). *Essentials of nuclear chemistry.* (4th edition). New Age International (P) Limited Publishers.
- Aryawardhana, W. (1996). *Radioekologi.* Penerbit Andi.

- Asteroids and dinosaurs: unexpected twists and an unfinished story.* (2007). The University of California Museum of Palaeontology and the Regents of the University of California.
- Bacon, D. H. & Seymour, P. A. (2003). *Mechanical history of the universe*. Philip Wilson Publishing Ltd.
- Badan Tenaga Nuklir Nasional (t.t). Glosarium iptek nuklir. Diakses pada 10 April, 2016, dari <http://www.batan.go.id/index.php/id/glosarium2>.
- Balchin, J. (2012). *Quantum leaps: 100 ilmuwan besar paling berpengaruh di dunia.* (S.Damayanti, Penerj.). Ufuk Press.
- Birch, B. (1993). *Marie Curie* (A. T. K. Widodo, Penerj.), P.T. Gramedia Pustaka Utama.
- Birmingham Qur'an manuscript dated among the oldest in the world. (2015, 22 July). *University of Birmingham* <http://www.birmingham.ac.uk/news/latest/2015/07/quran-manuscript-22-07-15.aspx>,
- Blyth, F. G. H. & de Freitas, M. H. (1984). *Geology for engineers*. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House.
- Branley, F.M. (1997). Bumi. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1* (97–105). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Chember, H. & Johnson, T.E. (2009). *Introduction of health physics*. (4th edition). Pergamon Press.
- Chiappini, C. (2001). The formation and evolution of the Milky Way. *American Scientist*, 89(6), 506–515.
- Cohen, B. L. (1982). *Concept of Nuclear Physics*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd.
- Cook, J. E. (1986). *Environmental radiation and radioactivity*. Australian School of Nuclear Technology.
- Cosmic background explorer*. (2001). Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. Nature Publishing Group; Institute of Physics Publishing.

- Cosmic rays. (2003). *Spatium*; No. 11. International Space Science Institute.
- Cross, A., Jaireth, S., Huston, D., Skirrow, R. (2012, June). Dating Australia's uranium deposits: Chemical dating of uraninite to encourage explorers. *Ausgeo News; Issue 106*. <https://ga.gov.au/ausgeonews/ausdeonews201205/uranium.isp>.
- Darmawan, D. (2017, 20 Maret). Lecture notes: astrofisika (FIS-239), *Program Studi Fisika FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta*.
- Darvill, C. M. (2013). *Cosmogenic nuclide analysis*. Dalam *Geomorphological Techniques* (1–25), British Society for Geomorphology.
- Debaene, G. (2003). Uranium-series dating of Marly sediments: application to Jaroszw Fossil Lake (SW Poland). *Geochronometria: Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology*, 22, 15–26.
- Delgado, A. (1995). Basic concepts of thermoluminescence. Dalam M. Oberhofer (Ed.). *Personnal Thermoluminescence Dosimetry* (47–69). Report EUR 16 277: 47.
- Dimitrova, C. (2008). Pottery production in ancient Greece. Dalam R. I. Kostov, B. Gaydarska, B., & M. Gurova (Eds.). *Geoarcheology and Archaeomineralogy* (108-110). Proceedings of the International Conference.
- Dunai, T. J. (2010). *Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences*. Cambridge University Press.
- Field, G. B. (1997). Asal mula jagad raya. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1* (13–16). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Friedlander, G., Kennedy, J. W., & Macias, E. S. (1981). *Nuclear and radiochemistry*. (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Fujitaka, K. (t.t.). *Cosmic radiation*. NIRS, 4-9-1 Anagawa, Inaga, Chiba 263-8555, Japan.

- Furetta, C. (1995). TL materials and their properties. Dalam M. Oberhofer (Ed.), *Personnal Thermoluminescence Dosimetry* (71–106). Report EUR 16 277 EN.
- Gautreau, R. & Savin, W. (1995). *Fisika Modern* (H. J. Wopspakrik, Penerj). Penerbit Erlangga.
- Glosarium Ilmu dan teknologi nuklir.* (2009). Cetakan III. BATAN.
- Goldstein, B. R. (2002). Copernicus and the origin of his heliocentric system. *Journal for the History of Astronomy*, 33(3), 219–235.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., & Van Kranendonk, M. (2008). On the geologic time scale 2008. *Newsletters in Stratigraphy*, 43(1), 5. <https://www.nhm2.uio.no/norges/TimeScale2008.pdf>
- Hajdas, I. (2008). Radiokarbon dating and its applications in quaternary studies. *Eiszeitalter and Gegenwart Quaternary Science Journal*, 57(1–2), 2–24.
- Halliday, D. & Resnic, R. (1990). *Fisika modern* (P. Silaban, Penerj.). Penerbit Erlangga.
- Haramundanis, K. (1997). Penelaahan tentang jagad raya. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1* (1–12). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Hipkin, J. & Payter, R. A. (1991). Radiation exposures to the workplaces from natural occurring radioactivity in industrial processes. *Radiation Protection Dosimetry*. 36(2–4): 97–100.
- Historic England. (2015). Archaeological and historic pottery production sites. Guidelines for best practice. *Historic England*.
- Hufton, A. P. (ED.). (1984). *Practical aspect of thermoluminescence dosimetry*. The Hospital Physicists' Association.
- Ingpen, R. & Wilkinson, P. (1995). *Encyclopedia of ideas that changed the world, the greatest discoveries and inventions of human history*. A Dragon's World Book.
- Kaplan, I. (1979). *Nuclear physics* (2nd edition). Addison-Wesley Publishing Company.

- Knief, R. A. (1981). *Nuclear energy technology*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Krane, K. S. (1992). *Fisika modern* (H. J. Wospakrik & S. Niksolihin, Penerj.). Cetakan I. Penerbit Universitas Indonesia.
- Krymsky, R. S., Macambira, M. J. B., Lafon, J. M., & Estumano, G. S. (2007). Uranium-lead dating method at the Pará-Iso Isotope Geology Laboratory, UFPA, Belém - Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 79(1), 115–128.
- Libby, W. F. (1960). *Radiocarbon dating nobel lecture*. The Nobel Prize. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1960/libby/lecture>.
- Libby, W. F. (1997). Pendataan radiocarbon. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 10* (52–57). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Libby, W. F. (t.t.). *History of radiocarbon dating*. Department of Chemistry and Institute of Geophysics, University of California.
- Lobeck, A. K. (1997). Gua. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 3* (2–12). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Mahesh, K. (1989). *Thermoluminescence in solids and its applications*. Nuclear Technology Publishing.
- Martin, A. & Harbinson, S. A. (1986). *An introduction to radiation protection*. (3rd edition). Chapman and Hall.
- McKinlay. (1981). *Thermoluminescence dosimetry (medical physics handbooks 5)*. Adam Hilger Ltd.
- Newman, W. L. (t.t.). *Geologic time*. U.S. Geological Survey. Information Services Box 25286.
- Nieto, J. A. (1990). *Luminescence dosimetry: theory and applications*. Derechos Reselvados.
- Oldest noodles unearthed in China. (2015, October 12). <http://news.bbc.uk/go/pr/fr/-/1/hi/sci/tech/4335160.stm>.
- Pacton, M., Breitenbach, S. F. M., & Lechleitner, F. A. (2013). The role of microorganisms in the formation of a stalactite in Botovskaya

- cave, Siberia – Paleoenvironmental Implications. *Biogeosciences* 10, 6115–6130.
- Parkinson, C. L., Ward, A., & King, M.D. (2006). *Earth science reference handbook: a guide to NASA's earth science program and earth observing satellite missions*. National Aeronautics and Space Administration, 277, 805.
- Penelaahan tentang bumi. (1997). Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 2* (204–211). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Quamrul, A. Q. & Galor, O. (2012). The “Out of Africa” Hypothesis, Human Genetic Diversity, and Comparative Economic Development. *IZA Discussion Paper No. 6330*. <http://ftp.iza.org/dp6330.pdf>.
- Quirke, T. T. (1997). Lapisan kerak bumi. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 2* (212–220). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Radiasi dalam bahasa sehari-hari*. (1996). BATAN.
- Reynolds, G. S. (Ed.). *New perspectives on the Qur'an: the Qur'an in its historical context 2*. Routledge.
- Rozamski, K. & Froehlich, K. (1996). Radioactivity and earth Sciences: understanding the natural environment. *IAEA Bulletin*, 38(2), 9–15.
- Santoso, R. S. I. (1977). *Capita selecta sejarah perkembangan ilmu pengetahuan*. Sinar Hdaya.
- Satrio, Rokhma, N. S., Abidin, Z., Syafalni, Paston, & Djiono (2003). Penentuan umur stalagmite gua Njirak Tenggalek Jawa Timur dengan ¹⁴C. *Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*; P3TIR-BATAN, 193–197.
- Scharmann, A. (1995). Thermoluminescence dosimetry – historical review, status quo and perspective. Dalam M. Oberhofer. (Ed.). *Personnal Thermoluminescence Dosimetry* (1–19). Report EUR 16 277 EN.

- Setiawan, S. (1994). *Gempita tarian kosmos*. Penerbit Andi Offset.
- Skala waktu geologi. (1997). Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 3* (187–192). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Standen, A. (1997). Daftar berkala. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 4* (139–161). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Supelli, K. (2017, 20 Maret). Kosmologi: mengenali alam semesta. <https://arusbawah20.wordpress.com/2010/07/24/kosmologi-mengenali-alam-semesta>.
- Suprpto. (1991). Granit sumber uranium. *Buletin BATAN*, Th. XII(3), 14–18.
- Sutton, C. (1987). Ninety years around the atom. *New Scientist* 40(2), 49–53.
- Taylor, J. R. & Zafiratos, C. D. (1991) *Modern physics for scientist and engineers*. Prentice Hall.
- Taylor, R. E. (2005). Radiocarbon dating: the continuing revolution. *Evolutionary Anthropology, Issues, News and Reviews*, 4(5), 169–181.
- Torsvik, T. H. & Cocks, L. R. M. (2013). Gondwana from top to base in space and time. *Gondwana Research* 24(3–4), 999–1030.
- Tsoulfanidis, N. (1983). *Measurement and detection of radiation*. Hemisphere Publishing Corporation.
- United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiations. *Sources and effects of ionizing radiation (UNSCEAR 2000 Reports to General Assembly)*. Volume 1: Sources. United Nations.
- Uranium/lead dating provides most accurate date yet for earth's largest extinction (2004, 16 September). *Phys Org*. <https://phys.org/news/2004-09-uraniumlead-dating-accurate-date-earth.html>.
- Walker, F. W., Miller, D. G., & Feiner, F. (1989). *Nuclides and isotopes*. (14th edition). GE Nuclear Energy.

- White, O. R. (1997). Matahari. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1* (65–78). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- White, W. B. (2013). Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69(1), 76–93.
- Wilopo, A. C. (Ed.). (2002). *Seabad pemenang hadiah nobel fisika*. Abdi Tandur.
- Wilson, C. V. (1997). Sinar-sinar kosmos. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1* (223–229). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Wilson, J. T. (1997). Lempeng tektonik. Dalam S. C. Bernard, G. B. Lynn, & J. J. Joseph (Ed.). *Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 2* (221–229). Grolier International Inc.; P.T. Widyadara.
- Wospakrik, H. J. (2005). *Dari atomos hingga quark*. Penerbit Universitas Atma Jaya; Kepustakaan Populer Gramedia.
- Yigal, S. H.(Ed.). (1983). *Thermoluminescence and thermoluminescent dosimetry volume III*. CRC Press Inc.
- Young, H. D. & Freedman, R. A. (1998). *University physics* (9th edition). Addison-Wesley Publishing Company.

Daftar Istilah



- Aktivitas** : Bagian dari sejumlah nuklida radioaktif yang mengalami transformasi nuklir spontan selama interval waktu tertentu.
- Atom** : Suatu satuan dasar materi yang terdiri atas inti atom serta awan elektron bermuatan negatif yang mengelilinginya. Inti atom terdiri atas proton yang bermuatan positif dan neutron yang bermuatan netral. Elektron-elektron pada sebuah atom terikat pada inti atom oleh gaya elektromagnetik.
- Atom for peace* : Judul pidato yang disampaikan oleh Presiden Amerika Serikat, Dwight D. Eisenhower, kepada Majelis Umum Perserikatan Bangsa-Bangsa di New York City pada tanggal 8 Desember 1953 untuk mencerahkan publik Amerika tentang risiko dan harapan masa depan nuklir.

- Badan Tenaga Atom Internasional (International Atomic Energy Agency, IAEA) : Organisasi internasional yang berupaya mempromosikan penggunaan energi nuklir secara damai dan menghambat penggunaannya untuk tujuan militer apa pun, termasuk senjata nuklir. Badan Tenaga Atom Internasional didirikan sebagai organisasi otonom pada 29 Juli 1957.
- Bahan keramik : Bahan padat dengan struktur kristal yang biasanya mengandung SiO_2 dan oksida anorganik lain serta dibuat pada temperatur dan tekanan tinggi.
- Bahan (zat) radioaktif : Bahan yang mampu memancarkan radiasi partikel atau elektromagnetik secara spontan dan kontinyu.
- Bahan termoluminesens : Bahan yang berluminesens bila tereksitasi oleh panas.
- Berat atom efektif : Berat atom rerata semua komponen produk yang diiradiasi sesuai dengan perbandingan berat masing-masing komponen.
- Berkas elektron : Berkas searah elektron negatif yang sudah dipercepat sampai energi tinggi secara listrik atau elektromagnetik.
- Detektor radiasi : Pendeteksi radiasi pengion.
- Deret aktinium : Deret nuklida hasil peluruhan radioaktif uranium⁻²³⁵. Produk akhir deret ini dalam alam ialah timah hitam⁻²⁰⁷.
- Deret torium : Nuklida yang merupakan hasil peluruhan torium⁻²³². Beberapa nuklida buatan meluruh menjadi nuklida dalam rantai torium. Produk akhir dari rantai peluruhan ini ialah Pb^{208} (timbal).
- Deret uranium : Inti atom yang dihasilkan dari peluruhan uranium-238, dikenal sebagai deret uranium. Produk akhir deret peluruhan ini ialah timbal-206.

- Deuterium ^2H atau D : Isotop hidrogen yang intinya mengandung satu neutron dan satu proton. Deuterium juga disebut hidrogen berat dan tidak radioaktif.
- Deuteron : Inti deuterium, terdiri dari satu proton dan satu neutron.
- Elektron : Partikel dasar bermassa $9,107 \times 10^{-28}$ g dan muatan listrik $4,8025 \times 10^{-10}$ satuan elektrostatik, muatan listrik dapat bermuatan negatif (elektron negatif atau negatron) atau positif (elektron positif atau positron).
- Elektron volt (eV) : Satuan energi yang menyatakan perubahan energi elektron saat melintasi beda potensial sebesar satu volt, dinyatakan sebagai $1 \text{ eV} = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- Fluoresens : Pancaran foton elektromagnetik yang berasal dari penyerapan energi radiasi dan partikel.
- Foton elektromagnetik : Satu kuantum radiasi elektromagnetik yang dianggap sebagai partikel elementer, tidak bermassa dan tidak bermuatan.
- Geokimia : Bidang studi tentang komposisi kimia Bumi beserta proses kimia dan fisika yang menyebabkan terjadinya distribusi bahan di Bumi.
- Hidrogen, H : Unsur paling ringan bernomor atom 1, memiliki dua isotop alam stabil dengan berat atom 1 dan 2 yang disebut deuterium atau hidrogen berat dan satu radioisotop, yaitu tritium dengan berat atom 3.
- Hukum peluruhan radioaktif : Laju pengurangan fraksi jumlah atom radionuklida tertentu adalah konstan, tidak bergantung pada umur atau lingkungannya, dan merupakan karakteristik radionuklida tersebut.
- Induk : Radionuklida yang meluruh menghasilkan nuklida lain.

- Inti atom : Bagian kecil atom bermuatan positif, berdiameter $\frac{1}{10.000}$ diameter atom, bermassa hampir sama dengan massa atom.
- Isobar : Beberapa nuklida dengan nomor massa yang sama, tetapi berbeda nomor atomnya sehingga mempunyai sifat kimia yang berbeda.
- Isomer : Beberapa nuklida dengan jumlah neutron dan proton yang sama, tetapi mempunyai tingkat energi yang berbeda.
- Isoton : Beberapa nuklida dengan jumlah neutron yang sama, tetapi jumlah proton yang berbeda.
- Isotop : Beberapa nuklida dengan jumlah proton yang sama, tetapi jumlah neutron yang berbeda, misalnya oksigen mempunyai tiga isotop alam dengan massa 16, 17, dan 18.
- Isotop karbon : Di alam terdapat tiga isotop karbon, dua di antaranya isotop stabil, yaitu ^{12}C (98,89%) dan ^{13}C (1,11%), dan isotop ketiga bersifat radioaktif, yaitu ^{14}C .
- Isotop radioaktif : Atom tidak stabil yang berubah menjadi isotop lain secara spontan melalui peluruhan radioaktif.
- Isotop stabil : Isotop yang tidak mengalami peluruhan radioaktif.
- Jam atom : Piranti yang menggunakan vibrasi sangat cepat dari molekul atau inti atom untuk mengukur waktu. Vibrasi ini bersifat konstan terhadap waktu sehingga interval yang sangat pendek dapat diukur dengan presisi sangat tinggi dibandingkan jam mekanik atau elektrik.
- Karbon-14, ^{14}C : Isotop radioaktif karbon terjadi dalam atmosfer, akibat interaksi neutron yang dihasilkan sinar kosmis dengan nitrogen.

- Keadaan dasar : Keadaan inti, atom, atau molekul pada tingkat energi dasar.
- Kelimpahan alam : Kelimpahan isotop suatu unsur yang terdapat di alam.
- Kelimpahan isotop : Jumlah relatif atom suatu isotop dalam campuran isotop suatu unsur, dinyatakan sebagai fraksi dari semua atom unsur tersebut.
- Konstanta peluruhan : Kebolehjadian peluruhan zat radioaktif (dN) pada tingkat energi tertentu selama selang waktu tertentu (dt).
- Kurva peluruhan : Bentuk penyajian peluruhan zat radioaktif sebagai fungsi waktu.
- Neutron : Partikel elementer tak bermuatan dengan massa sedikit lebih besar daripada massa proton.
- Neutron cepat : Neutron dengan energi yang lebih besar dari 100 keV.
- Neutron termal : Neutron yang sudah diperlambat oleh moderator sehingga kecepatan rerata menjadi sekitar 2.200 meter per detik (pada temperatur kamar) dari kecepatan awal yang jauh lebih tinggi saat baru dilepaskan dari reaksi fisi. Kecepatan ini hampir sama dengan kecepatan gerak molekul gas pada temperatur kamar.
- Nomor atom, Z : Jumlah proton yang terdapat dalam inti atom.
- Nomor massa, A : Bilangan yang menyatakan jumlah dari proton (Z) dan neutron (N) dalam inti atom.
- Nukleon : Penyusun inti atom, yaitu proton dan neutron.
- Nuklida : Istilah umum untuk semua atom unsur yang dibedakan menurut nomor atom, nomor massa, dan tingkat energi.
- Nuklida anak : Nuklida hasil peluruhan nuklida induk.
- Orbit : Lintasan elektron mengelilingi inti dalam atom.

- Partikel : Materi penyusun atom yang mempunyai massa terukur, misalnya alfa, beta, neutron, dan proton.
- Partikel alfa, α : Partikel bermuatan positif yang dipancarkan oleh beberapa unsur radioaktif. Partikel alfa terdiri atas dua neutron yang terikat pada dua proton sehingga identik dengan inti atom helium.
- Partikel beta, β : Partikel elementer bermuatan negatif yang dipancarkan oleh inti pada waktu peluruhan radioaktif, mempunyai satu satuan muatan listrik dan massa yang sama dengan $1/_{1837}$ amu.
- Partikel bermuatan : Partikel elementer yang bermuatan listrik negatif atau positif.
- Partikel elementer : Partikel yang merupakan komponen dari semua materi dan radiasi, misalnya neutron, elektron, meson, dan antipartikel.
- Peluruhan alfa (α) : Pemancaran spontan partikel alfa oleh radionuklida yang mengakibatkan massa nuklida berkurang 4 dan nomor atom berkurang 2.
- Peluruhan beta (β) : Pemancaran spontan elektron oleh radionuklida yang mengakibatkan nomor atom nuklida bertambah 1 tanpa perubahan massa.
- Peluruhan radioaktif : Pemancaran spontan partikel alfa, beta, atau radiasi elektromagnetik oleh atom akibat transisi yang terjadi di dalam intinya.
- Peluruhan tangkapan elektron : Peluruhan radionuklida karena penangkapan satu elektron orbital yang mengakibatkan nomor atom nuklida berkurang satu tanpa perubahan massa.
- Penanggalan radioaktif : Penentuan umur benda atau bahan berdasarkan Pengukuran kandungan nuklida radioaktif (Uranium, ^{14}C , ^{40}K , dan lain-lain).
- Positron, β^+ : Partikel elementer bermassa. Identik dengan elektron, tetapi bermuatan positif.

- Radiasi : Emisi dan propagasi energi melalui materi atau ruang dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel.
- Radiasi elektromagnetik : Radiasi yang terdiri atas gabungan dan interaksi dari gelombang magnetik dan listrik yang bergerak dengan kecepatan cahaya, misalnya cahaya, gelombang radio, sinar gamma, dan sinar-X. Semuanya dapat dipancarkan melalui ruang vakum.
- Radiasi gamma : Radiasi elektromagnetik yang dihasilkan oleh proses transisi nuklir atau anihilasi partikel.
- Radiasi pengion : Radiasi elektromagnetik atau partikel yang mampu menghasilkan ion secara langsung atau tidak langsung, dalam lintasannya menembus materi, misalnya sinar-X, sinar alfa, sinar beta, sinar gamma, proton, elektron, positron, dan partikel berat bermuatan.
- Radioaktif : Mampu memancarkan radiasi partikel atau elektromagnetik secara spontan dan kontinyu.
- Radioaktivitas : Peluruhan spontan isotop tak stabil menjadi isotop lain, disertai pemancaran radiasi.
- Radioisotop : Isotop tidak stabil yang meluruh secara spontan dengan memancarkan radiasi.
- Radium, Ra : Unsur logam radioaktif dengan nomor atom 88, isotop radium alam mempunyai nomor massa 226.
- Radon, Rn : Unsur gas radioaktif alam dengan nomor atom 86 dan nomor massa 222. Isotop ini merupakan luruhan dari deret radioaktif uranium, sedangkan yang bermassa 220 berasal dari deret radioaktif torium.
- Rasio kelimpahan : Perbandingan antara jumlah atom suatu isotop dengan jumlah atom isotop lain dari unsur yang sama dalam suatu sampel.

- Satuan konsen- : Kandungan ^{14}C pada senyawa karbon alam, di-
trasi ^{14}C nyatakan dalam persen terhadap kandungan ^{14}C
karbon modern. Kandungan karbon modern
ialah kandungan ^{14}C normal pada tanaman
sebelum tahun 1890, yaitu sebelum pengenceran
karbon-14 dalam CO_2 atmosfer yang disebabkan
oleh pembakaran bahan bakar fosil.
- Satuan massa : Satuan massa sebesar $1/_{12}$ massa atom karbon-12;
atom 1 satuan massa atom = $1,6605 \times 10^{-27}$ kg; massa
elektron = 0,00055 amu; massa proton = 1,00727
amu; massa neutron = 1,00866 amu.
- Sinar alfa : Berkas partikel alfa, sinonim partikel alfa.
- Sinar beta : Berkas partikel beta yang kekuatan ionisasinya
lebih kecil daripada sinar alfa, tetapi kekuatan
penetrasinya lebih besar.
- Sinar gamma : Radiasi elektromagnetik berenergi tinggi yang
dipancarkan oleh radionuklida yang mengalami
peluruhan.
- Sinar kosmis : Radiasi pengion (sebagian besar berupa inti
atom, misalnya proton) berumur pendek, tetapi
berenergi sangat tinggi yang berasal dari luar
angkasa. Radiasi kosmis merupakan bagian dari
radiasi latar. Terdapat sinar kosmis yang mem-
punyai energi lebih tinggi dari radiasi buatan.
- Tabel periodik : Tabel unsur yang diatur menurut urutan nomor
atom dan digolongkan berdasarkan karakteristik
fisik dan kimia yang sama ke dalam periode. Per-
tama kali diperkenalkan oleh ahli kimia Rusia,
Dmitri I. Mendeleev, tahun 1869.
- Tanah liat : Mineral yang terdiri dari hidrat aluminium silikat
atau magnesium silikat yang mengandung kation
natrium, kalium, kalsium, dan magnesium serta
bersifat mudah dibentuk.

- Tangkapan elektron : Penangkapan elektron orbital oleh inti, diikuti dengan pemancaran neutrino dan radiasi-X karakteristik serta berkurangnya nomor atom.
- Torium, Th : Unsur radioaktif alam dengan nomor atom 90 dan berat massa mendekati 232. Isotop fertil torium-232 sangat banyak di alam dan dapat ditransmutasikan menjadi Th-233 dengan iradiasi neutron yang selanjutnya meluruh menjadi isotop fisil U-233.
- Tritium : Isotop radioaktif hidrogen dengan dua neutron dan satu proton dalam inti. Isotop ini merupakan isotop buatan.
- Umur paro : Waktu yang diperlukan bahan radioaktif untuk meluruh menjadi separuh jumlah awalnya.
- Unsur : Zat yang tidak dapat dibagi menjadi zat yang lebih kecil secara kimia. Terdapat 103 unsur kimia yang telah ditemukan dan masing-masing memiliki nomor atom karakteristik, misalnya hidrogen, timah, uranium.
- Uranium, U : Unsur radioaktif dengan nomor atom 92 dan ditemukan di alam, berat rerata atomnya mendekati 238. Pada dasarnya ada dua isotop alam, yaitu uranium-235 (0,7% dari uranium alam) yang bersifat fisil dan uranium-238 (99,3% dari uranium alam) yang bersifat fertil. Uranium alam juga meliputi sejumlah kecil uranium-234. Uranium merupakan bahan dasar energi nuklir.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Indeks



- Aktivitas radionuklida, 6, 49, 50,
107, 136
- Alba Fedeli, 129
- Angin Matahari, 63
- Arkeolog, 111, 113, 114, 115, 123,
127, 135
- Arkeologi, 6, 7, 61, 69, 98, 101, 102,
105, 106, 107, 108, 109, 111, 112,
113, 114, 115, 116, 118, 119, 120,
122, 123, 124, 125, 135
- Atom, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15,
16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24,
25, 26, 27, 30, 32, 35, 36, 38, 39,
40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 63, 66,
67, 68, 69, 70, 83, 84, 86, 90, 92,
99, 106, 118, 119, 120, 121, 145,
146, 147, 148, 149, 150, 151, 152,
153
- Atom Radioaktif, 6, 12, 44, 45, 83
- Batuan Beku, 37, 84, 85, 88, 91
- Birmingham, 127, 128, 129
- Cahaya Kutub, 65
- Cahaya TL, 101, 102, 105, 106
- China, 110, 111, 124, 162
- Demokritos, 9
- Dendrokronologi, 81
- Dentuman Besar, 74, 75
- Deret Actinium, 52
- Deret Peluruhan, 6, 51, 88, 146
- Deret Torium, 51, 52, 107, 146
- Deret Uranium, 51, 52, 109, 146
- Elektron, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19,
20, 21, 23, 40, 41, 42, 43, 44, 45,

46, 47, 64, 65, 66, 99, 100, 101, 106, 125, 145, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153

Elektron orbital, 42, 150, 153

Elektroskop, 31, 59, 60

Era Azoikum, 78

Era Kenozoikum, 79

Era Mesozoikum, 79

Era Paleozoikum, 79

Etiopia, 93, 94, 95

Fenomena TL, 101, 102, 135

Film Fotografi, 28, 29, 31

Fisika Nuklir, 5, 18, 67, 136, 161

Fluoresens, 27, 28, 29, 38, 147

Garam Uranium, 27, 28, 29

Gejala Radioaktivitas, 27, 30, 31, 33, 35, 39

Geologi, 3, 4, 5, 6, 7, 37, 38, 39, 51, 61, 74, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 91, 93, 98, 101, 102, 113, 114, 122, 132, 134, 135

Gobekli Tepe, 123, 124

Gondwana, 75, 76

Gulungan Laut Mati, 130

Hamburan Partikel Alfa, 14

Intensitas TL, 100, 105, 106

Inti Atom, 6, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 24, 26, 27, 30, 32, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 63, 66, 67, 69, 83, 84, 120, 121, 145, 146, 148, 149, 150, 152

Inti Bumi, 76

Isobar, 25, 41, 43, 148

Isoton, 25, 148

Isotop, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 37, 52, 68, 69, 85, 89, 92, 147, 148, 149, 151, 153

Jam Geologi, 6, 7, 39, 82, 84, 93, 134

Jam Kalium-argon, 91

Kalium-argon, 90, 91, 94

Kamar Pengionan, 59, 60

Kerak Bumi, 3, 5, 25, 34, 37, 73, 75, 77, 83, 84, 133

Keramik, 97, 98, 102, 110, 146

Komponen Keras, 65, 66

Komponen Lunak, 65

Kosmologi, 74

Kulit Atom, 15, 19, 20

Laboratorium Alam, 7, 8, 67, 136

Laurasia, 75, 76

Ledakan Supernova, 63

Masa Kriptozoik, 34, 37

Medan Magnet Bumi, 36, 62, 63, 64, 67, 122

Mesir, 110, 112, 123, 129

Model Atom, 12, 13, 14, 15

Model Atom Rutherford, 14, 15

Model Atom Rutherford-Bohr, 15

Model Atom Thomson, 12, 13

Neutron, 18, 40, 67

Nomor Atom, 20, 21, 23, 40, 41, 45, 149, 150, 151, 152, 153

Nomor Massa, 20, 21, 41, 148, 149, 151

NORM, 35

Nukleon, 18, 39, 44, 65, 149
 Nuklida, 21, 22, 23, 25, 26, 145, 146,
 147, 148, 149, 150
 Nuklida Stabil, 26
 Out of Africa, 95
 Pakistan, 124, 125
 Partikel Alfa, 12, 13, 14, 17, 40, 44,
 63, 65, 109, 120, 150, 152
 Partikel Sub-atomik, 64, 66
 Peluruhan, 6, 7, 33, 34, 38, 39, 41,
 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50,
 51, 69, 70, 82, 83, 84, 85, 86, 87,
 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 102,
 114, 116, 118, 125, 134, 146, 147,
 148, 149, 150, 151, 152
 Peluruhan Radionuklida, 6, 7, 49,
 82, 83, 85, 86, 87, 90, 94, 102,
 114, 125
 Penanggalan Arkeologi, 7, 101, 105,
 112, 114, 120
 Penanggalan Fosil, 61, 81, 84, 93,
 115
 Penanggalan Geologi, 61, 82, 85, 90,
 98, 134
 Penanggalan Kalium-argon, 90, 94
 Penanggalan Radiokarbon, 7, 71,
 114, 115, 122, 123, 124, 126, 127,
 128, 129, 135
 Penanggalan Radiometri, 82
 Penanggalan Stalaktit, 7
 Penanggalan Tembikar, 7, 61, 111
 Penanggalan TL, 7, 101, 102, 105,
 107, 108, 111, 112
Pitchblende, 32
 Positron, 42, 43, 45, 126, 147, 150,
 151
 Proton, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23,
 36, 39, 40, 41, 42, 44, 63, 64, 65,
 66, 68, 120, 121, 145, 147, 148,
 149, 150, 151, 152, 153
 Radiasi Alfa, 38, 44, 103, 104
 Radiasi Beta, 41, 42, 69
 Radiasi Gamma, 17, 18, 151
 Radiasi Kosmis, 6, 36, 61, 62, 63,
 64, 65, 66, 67, 68, 109, 110, 120,
 121, 122, 125, 133
 Radiasi Kosmis Galaksi, 63
 Radiasi Kosmis Primer, 36, 62, 63,
 64, 65, 66, 67, 68
 Radiasi Kosmis Sekunder, 36, 65,
 66, 67, 120
 Radiasi Pengion, 39, 59, 69, 99, 146,
 151, 152
Radioactive Dating, 71, 134
 Radioaktivitas, 27, 30, 31, 32, 33,
 35, 36, 39, 82, 151
 Radiogeologi, 38
 Radioisotop, 26, 67, 147, 151
 Radiokarbon, 7, 67, 71, 114, 115,
 116, 122, 123, 124, 125, 126, 127,
 128, 129, 131, 135
 Radionuklida, 6, 7, 26, 27, 32, 33,
 34, 35, 36, 38, 39, 40, 43, 44, 47,
 48, 49, 50, 51, 52, 59, 60, 61, 66,
 69, 70, 71, 82, 83, 84, 85, 86, 87,
 88, 90, 94, 98, 99, 102, 103, 104,
 107, 108, 109, 112, 114, 116, 120,
 122, 125, 126, 130, 133, 134, 135,
 136, 147, 150, 152

Radionuklida Alamiah, 27, 32, 34, 35, 36, 60, 82, 85, 102, 103, 104, 109, 133, 134, 136
 Radionuklida Induk, 83, 86, 87, 88, 90
 Radionuklida Kosmogenik, 6, 7, 36, 61, 66, 70, 114, 120, 122, 125, 133, 135, 136
 Radionuklida Primordial, 6, 7, 33, 34, 36, 38, 59, 60, 61, 82, 83, 84, 86, 87, 98, 99, 102, 108, 112, 133, 134, 135
 Radium, Ra, 151
 Reaksi Nuklir, 22, 36, 60, 66, 67, 120, 121
 Sabuk Radiasi, 64
 Sampel Arkeologi, 69, 106, 107, 108, 109, 115, 118, 119, 125
 Sedimentasi, 78, 84, 85, 86, 92, 124
 Sejarah Bumi, 3, 4, 5, 73, 77, 78, 80, 81, 83, 84, 86, 134
 Sinar Alfa, 40, 44, 45, 46, 103, 104, 105, 107, 109, 151, 152
 Sinar Beta, 33, 42, 103, 104, 107, 108, 109, 125, 126, 151
 Sinar Gamma, 17, 40, 45, 46, 103, 151
 Sinar Radioaktif, 32, 40
 Sinar-X, 11, 27, 28, 29, 30, 43, 44, 47, 59, 60, 65, 151
 Skala Waktu Geologi, 5, 78, 82, 83
 Spektrograf Massa, 21, 23
 Stalagmit, 7, 130, 131, 132
 Stonehenge, 127
 Struktur Atom, 14
 Struktur Inti Atom, 21, 30, 35
 Tabel Periodik, 44, 115, 152
 Teknologi Nuklir, 26
 Tembikar, 7, 61, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 111, 135
 Teori Jagat Raya, 2
 Torium, Th, 153
 Umur Absolut, 80, 82
 Umur Relatif, 80
 Unsur Radioaktif, 5, 6, 7, 33, 37, 43, 45, 66, 84, 103, 150, 153
 Unsur Radioaktif Alamiah, 5
 Uranium, U, 153
 Usia Bumi, 78, 92, 93
 Varve, 81
 Waktu Geologi, 5, 7, 51, 74, 76, 77, 78, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 90, 134

Biodata Penulis



Mukhlis Akhadi lahir di Yogyakarta, 17 September 1961. Menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengatahuan Alam - Universitas Indonesia (FMIPA-UI) di Jakarta pada 1980 dan memperoleh gelar sarjana fisika pada 1985.

Sejak awal 1986 sampai sekarang, penulis bekerja sebagai peneliti pada Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR - BATAN) di Jakarta (sekarang menjadi Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional). Meraih jabatan fungsional tertinggi sebagai Ahli Peneliti Utama bidang fisika nuklir sejak Desember 2002.

Beberapa pendidikan tambahan atau spesialisasi yang pernah diperoleh penulis ialah *Radiation Protection Course* di ANSTO

Buku ini tidak diperjualbelikan.

(Australia 1989), *Personal Dosimetry* di JAERI (Jepang 1991), *Working Area Monitoring* di JAERI (Jepang 1992), *Workshop on the Application of the ICRP's 1990 Recommendations* di Kuala Lumpur (Malaysia 1993).

Beberapa kegiatan lainnya yang pernah diikuti ialah sebagai perwakilan BATAN untuk mengikuti pembahasan buku *Basic Safety Standards* (BSS) di Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) di Vienna (Austria 1994), menjadi anggota *Radiation Safety Standards Committee* (RASSC) di bawah koordinasi IAEA periode 2005–2007, mengikuti kegiatan *Forum for Nuclear Cooperation in Asia* (FNCA) on *QA/QC radiation dosimetry for radiotherapeutic of cancer* di Tiongkok tahun 2006, dan partisipan dalam *Technical Meeting to Develop a Draft Text for the Revision of the BSS* di IAEA (Austria 2007).

Selain sebagai peneliti, penulis juga sering diminta sebagai pengajar pada berbagai jenis diklat yang diselenggarakan oleh BATAN. Penulis banyak menulis artikel ilmiah populer dan ilmiah semi populer di berbagai media cetak nasional. Penulis pernah menjadi dosen tidak tetap pada jurusan teknik mesin, teknik elektro, dan teknik sipil di Sekolah Tinggi Teknik (STT)-PLN di Jakarta. Penulis telah menulis empat buku dengan judul *Pengantar Teknologi Nuklir* (Penerbit PT Rineka Cipta, Jakarta 1997), *Dasar-Dasar Proteksi Radiasi* (Penerbit PT Rineka Cipta, Jakarta 2000), *Ekologi Energi: Mengenali Dampak Lingkungan dari Penggunaan Sumber-Sumber Energi* (Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta 2009), dan *Isu Lingkungan Hidup: Mewaspada Dampak Kemajuan Teknologi dan Polusi Lingkungan Global yang Mengancam Kehidupan* (Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta 2014).

PENANGGALAN RADIOAKTIF

Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi
dengan Teknik Nuklir

Buku ini mengupas pemanfaatan radionuklida alamiah untuk penanggalan radioaktif (*radioactive dating*). Di dalamnya dibahas secara komprehensif hal-hal yang berkaitan dengan radionuklida primordial dan radionuklida kosmogenik. Dibahas pula hal-hal yang terkait dengan teknik penanggalan dengan mengandalkan kedua jenis radionuklida tersebut baik di bidang geologi maupun arkeologi, disertai dengan contoh-contoh prestasi konkrit yang telah dihasilkan dari pemanfaatan teknik tersebut.

Selesai membaca buku ini diharapkan akan muncul gambaran obyektif tentang peran penting teknologi nuklir dalam studi geologi dan arkeologi. Aplikasi teknologi nuklir telah memberi sumbangan yang nyata bagi perkembangan ilmu pengetahuan di kedua bidang tersebut. Selamat membaca!



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung BJ Habibie, Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.593



ISBN 978-623-8052-48-6



9 786238 052486