

Mukhlis Akhadi

PENANGGALAN RADIOAKTIF

Mengungkap Sejarah dan Peradaban Bumi
dengan **Teknik Nuklir**



PENANGGALAN RADIOAKTIF

**Mengungkap Sejarah dan Peradaban
Bumi dengan Teknik Nuklir**

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Right Reserved

PENANGGALAN RADIOAKTIF

**Mengungkap Sejarah dan Peradaban
Bumi dengan Teknik Nuklir**

Mukhlis Akhadi

BATAN Press

© 2017 Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)
Pusat Diseminasi dan Kemitraan

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Penanggalan radioaktif: rengungkap rjarah dan reradaban bumi dengan teknik nuklir / Mukhlis Akhadi – Jakarta: BATAN Press, 2017.
xiv + 152 hlm; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-979-8500-75-6

1. Teknik
2. Nuklir Penanggalan radioaktif
3. Mengungkap sejarah

621.48

Copyeditor : Ferhat Aziz
Proofreader : Anhar R. Antariksawan dan Heru Santosa
Desainer sampul & isi : Agus Rial dan Aan D'Tech

Cetakan pertama, Januari 2018



Diterbitkan oleh:
BATAN Press, anggota Ikapi
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49
Ged. Perasten Kawasan Nuklir Pasar Jumat
Jakarta Selatan 12440
Telp. : +62 21 7659401
Faks. : +62 21 75913833
E-mail : batanpress@batan.go.id

KATA PENGANTAR

Buku ini diterbitkan untuk menambah referensi masyarakat tentang radiasi serta pemanfaatannya terutama bagi pelajar, mahasiswa, pecinta iptek dan lingkungan serta yang mempelajari arkeologi. Radiasi ada di sekitar kita, bahkan kehidupan berlangsung dengan adanya radiasi yang bersumber dari radiasi kosmis, batuan, material dari perut bumi dan sinar matahari. Melalui buku ini pembaca memperoleh pengetahuan tentang radiasi dan manfaat bagi kehidupan kita di dunia ini. Seiring dengan ditemukan radionuklida alamiah yang dipancarkannya memiliki arti penting bagi kehidupan dunia ini. Misteri yang terkandung di dunia yang kita alami ini dapat terkuak dan dijelaskan secara ilmiah dengan bantuan radiasi, baik umur bumi, bebatuan, kelompok material dan pengaruh dari kosmogenik serta lebih jauh asal usul material yang pernah ada atau hidup di dunia ini.

Masyarakat yang membaca buku ini akan memperoleh pengetahuan tentang radionuklida baik dari struktur atom, inti atom, isotop dan nuklida, penemuan radionuklida, radionuklida primordial yaitu radionuklida yang terbentuk dalam perut bumi, sampai ke deret peluruhan. Berbekal pengetahuan tersebut, pembaca dijelaskan pengaruh kehidupan di bumi ini, akibat radionuklida kosmogenik dan produksi radiokarbon. Pemahaman mendasar tersebut di atas, maka pembaca dapat mengetahui dan dapat gambaran untuk mengetahui penanggalan geologi tentang kelahiran alam semesta dan pembentukan planet bumi. Pembaca juga mengetahui waktu geologi, penanggalan uranium-timbal (U-Pb), penanggalan kalium-argon dan dapat digunakan radionuklida untuk memperkirakan umur bumi. Bahkan temuan benda arkeologi atau purbakala dapat ditentukan secara ilmiah dengan menghitung total akumulasi dosis radiasi yang tersimpan dalam benda arkeologi (dinyatakan dalam satuan dosis Gray, disingkat Gy) dan mengukur laju dosis radiasi alamiah tahunan (dinyatakan dalam Gy

per tahun) pada lokasi dimana benda itu ditemukan, maka dengan mudah dapat ditentukan umur benda arkeologi/purbakala tersebut. Penanggalan radiokarbon telah digunakan di beberapa negara untuk mendata usia temuan-temuan arkeologi. Berbagai temuan sejarah dan arkeologi berhasil didata dan diketahui usia maupun tahun pembuatannya menggunakan teknik yang pembaca dapatkan di buku ini.

Semoga dengan terbitnya buku ini masyarakat menjadi tahu tentang apa radiasi itu? Manfaat yang begitu besar untuk menguak masa lalu termasuk pra sejarah.

BATAN Press

KATA PENGANTAR

”**A**pa yang Saudara ketahui tentang radiasi?” Jika pertanyaan itu ditujukan kepada masyarakat awam, maka memori kolektif mereka akan langsung tertuju ke Three Mile Island, Chernobyl atau Fukushima Dai-ichi. Di tempat-tempat itulah kecelakaan radiologis pernah terjadi, dan kecelakaan itu ternyata berdampak sangat dalam secara psikologis bagi masyarakat dunia. Wajarlah jika gambaran tentang radiasi yang serba menakutkan itu sulit dihapus dari memori kolektif masyarakat.

Apakah masyarakat awam memiliki gambaran tentang sisi ramah dari radiasi? Mungkin hanya sebagian kecil dari mereka yang memiliki gambaran seperti itu. Dibanding dengan teknologi lain, teknologi nuklir merupakan teknologi yang oleh sebagian besar masyarakat awam dirasa paling jarang atau bahkan tidak pernah sama sekali bersentuhan dengan masalah-masalah kehidupan manusia sehari-hari. Masyarakat awam lebih banyak mengenali risiko atau bahaya dibandingkan dengan manfaat yang dapat diperoleh dari radiasi atau teknologi nuklir pada umumnya.

Faktanya, pemanfaatan teknologi nuklir selalu dikampanyekan oleh Badan Tenaga Atom International (IAEA, *International Atomic Energy Agency*) untuk maksud-maksud damai. IAEA merupakan suatu organisasi antar pemerintah yang didirikan pada 1957 dan bernaung di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). Organisasi itu sendiri dibentuk dalam rangka mempercepat dan memperluas kontribusi tenaga nuklir untuk maksud-maksud damai, kesehatan dan kesejahteraan bangsa-bangsa di seluruh dunia. Ada banyak manfaat yang dapat dinikmati oleh umat manusia di muka bumi ini jika teknologi nuklir digunakan secara benar. Karena itu, kesalahan persepsi masyarakat awam terhadap radiasi perlu diluruskan dengan memberikan informasi yang menyeluruh mengenai keuntungan yang dapat diperoleh umat manusia berkaitan dengan pemanfaatan radiasi atau teknologi nuklir dalam kehidupan sehari-hari.

Untuk mengeliminir gambaran negatif tentang radiasi, dirasa sangat perlu untuk memperkenalkan manfaat radiasi secara komprehensif agar memori kolektif masyarakat tentang radiasi bisa diluruskan. Buku yang sedang berada di tangan pembaca ini hadir dalam rangka memperkenalkan salah satu pemanfaatan teknik nuklir untuk penanggalan radioaktif (*radioactive dating*) dengan memanfaatkan keberadaan sumber-sumber radiasi alam. Radionuklida alamiah beserta radiasi yang dipancarkannya bukanlah merupakan barang asing bagi 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 umat manusia dengan radionuklida alamiah beserta radiasi yang dipancarkannya ternyata memiliki arti penting dalam bidang geologi maupun arkeologi. Teknik penanggalan dengan memanfaatkan radionuklida alamiah ternyata dapat membantu para ilmuwan dalam mengungkap berbagai misteri yang ditemui dalam kehidupan di dunia ini. Penanggalan dengan memanfaatkan keberadaan radionuklida primordial dalam bidang geologi mampu memberikan data terukur yang lebih tepat mengenai jam geologi. Sedang pemanfaatan 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 dalamnya dibahas secara komprehensif pengertian radionuklida, baik dalam kelompok primordial maupun kosmogenik. Pembahasan mengenai teknik penanggalan radioaktif meliputi penanggalan untuk studi geologi, penanggalan thermoluminesensi (TL) untuk tembikar dan penanggalan radiokarbon untuk fosil organik. Teknik nuklir ternyata memiliki peran yang cukup penting dalam studi geologi maupun arkeologi. Sumbangannya untuk penanggalan dapat memberi titik

terang terhadap suatu peristiwa dengan data terukur yang diperoleh secara ilmiah di laboratorium.

Penulis menyadari sepenuhnya jika pembahasannya dalam buku ini masih banyak 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 tetap ditunggu. Semoga kehadiran buku ini dapat memberi pencerahan dan memperkaya khasanah pengetahuan tentang manfaat teknologi nuklir dalam kehidupan sehari-hari bagi masyarakat pada umumnya.

Tangerang Selatan, September 2017

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
1. PENDAHULUAN	1
2. MENGENAL RADIONUKLIDA	9
2.1. Struktur Atom	11
2.2. Inti Atom	16
2.3. Isotop dan Nuklida	20
2.4. Penemuan Radionuklida	26
2.5. Radionuklida Primordial	31
3. PELURUHAN RADIONUKLIDA	37
3.1. Pancaran Radiasi	38
3.2. Aktivitas Radionuklida	47
3.3. Deret Peluruhan	51
4. RADIONUKLIDA KOSMOGENIK	59
4.1. Radiasi Kosmis	61
4.2. Produksi Radiokarbon	68
5. PENANGGALAN GEOLOGI	73
5.1. Kelahiran Alam Semesta	74
5.2. Pembentukan Planet Bumi	75
5.3. Waktu Geologi	78
5.4. Penanggalan Uranium-Timbal	84
5.5. Penanggalan Kalium-Argon	92
5.6. Perkiraan Usia Bumi	93
6. PENANGGALAN TEMBIKAR	99
6.1. Fenomena Thermoluminesensi	101

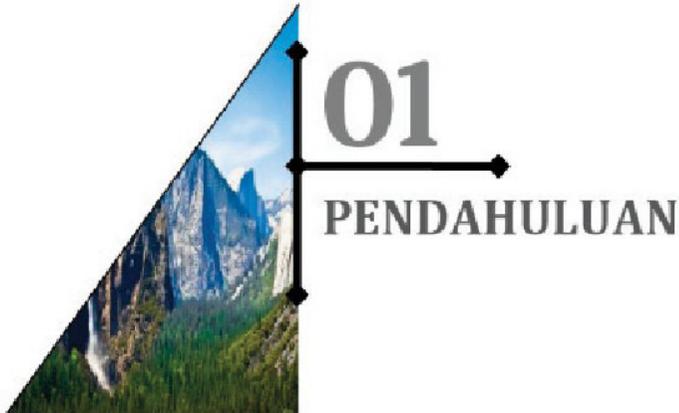
6.2. Teknik Penanggalan Thermoluminesensi	105
6.3. Penanggalan Arkeologi	113
7. PENANGGALAN RADIOKARBON	117
7.1. Teknik Penanggalan	118
7.2. Temuan Arkeologi	126
7.3. Arang Sisa Pembakaran	131
7.4. Manuskrip Tua	132
7.5. Fenomena Gunung Kapur	135
8. PENUTUP	139
DAFTAR PUSTAKA	143
INDEX	151

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Model atom <i>Rutherford-Bohr</i>	15
Gambar 2.2.	Struktur atom dengan inti yang tersusun atas proton dan neutron serta kulit atom yang tersusun atas elektron	20
Gambar 2.3.	Struktur atom isotop-isotop ^{12}C dengan 6 proton dan 6 neutron, ^{13}C dengan 6 proton dan 7 neutron dan ^{14}C dengan 6 proton dan 8 neutron	21
Gambar 3.1.	Jenis-jenis sinar radioaktif	45
Gambar 3.2.	Kondisi atom yang tereksitasi	47
Gambar 3.3.	Diagram penurunan aktivitas radionuklida karena peluruhan	51
Gambar 3.4.	Skema peluruhan deret uranium	54
Gambar 3.5.	Skema peluruhan deret thorium	56
Gambar 3.6.	Skema peluruhan deret actinium	57
Gambar 4.1.	Proses pembentukan dan perjalanan radionuklida ^{14}C di lingkungan	72
Gambar 5.1.	Prinsip dasar penanggalan geologi uranium-timbal	91
Gambar 5.2.	Prinsip dasar penanggalan geologi kalium-argon	93
Gambar 7.1.	Metode penanggalan radiokarbon	121
Gambar 7.2.	Proses nuklir pembentukan dari	125

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Radionuklida anggota deret uranium (deret $4n + 2$)	52
Tabel 3.2.	Radionuklida anggota deret thorium (deret $4n$)	55
Tabel 3.3.	Radionuklida anggota deret actinium (deret $4n + 3$)	56
Tabel 5.1.	Data radionuklida primordial yang banyak dimanfaatkan sebagai jam geologi	83



01

PENDAHULUAN

Berbagai pertanyaan sederhana maupun masalah-masalah pelik tentang jagad raya telah merasuki alam pikiran manusia, baik dari kalangan filsof maupun ilmuwan [1]. Para pemikir Yunani umumnya tertarik pada pengembangan teori yang dapat menerangkan jagad raya. Dalam melihat alam semesta, mereka menganut teori geosentris yang menyatakan bahwa pusat jagad raya itu adalah bumi [2]. Matahari, bulan, bintang-bintang serta benda-benda langit lainnya bergerak mengelilingi bumi. Anggapan seperti itu muncul karena memang seperti itulah penampakan serta pengalaman 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 sebagai benda padat seperti bumi. Seabad kemudian, pemikir Yunani Heraclides menyatakan bahwa bumi tidaklah tinggal diam, melainkan berputar seperti halnya sebuah gasing [3].

Pada Abad Pertengahan, teori jagad raya versi Ptolemeus mendapatkan tantangan dari ahli perbintangan Polandia yang hidup pada abad ke-15, Nicolaus Copernicus. Copernicus menyatakan bahwa

sistem tata surya di alam semesta ini tidak diam melainkan berputar pada porosnya (rotasi) dengan periode 23 jam 57 menit, dan 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 149, 6 juta km [7].

Bumi merupakan jenis planet yang terus-menerus mengalami perubahan. Kerak bumi sepanjang sejarah seiring dengan perjalanan waktu selalu mengalami pembentukan, modifikasi dan penghancuran oleh kekuatannya sendiri. Peristiwa-peristiwa ekstrim yang menimpa bumi seperti letusan gunung berapi, badai, gempa bumi, banjir, tsunami, tanah longsor dan sebagainya menyebabkan terjadinya perubahan formasi batuan-batuan penyusun kerak bumi [8]. Dalam perjalanan waktu, pasir maupun lumpur, yang sering disebut sedimen, mengeras menjadi hamparan batuan sedimen suatu lapisan, dimana lapisan yang lebih muda berada di atas lapisan yang lebih tua. Adakalanya berbagai peristiwa yang terjadi di bumi hanya berpengaruh terhadap kondisi planet bumi itu sendiri, namun tidak jarang suatu peristiwa yang menimpa bumi berpengaruh terhadap jalannya kehidupan di muka bumi.

Karena gerakan-gerakan bumi, dasar batuan dapat terbalik sehingga lapisan yang lebih tua menempati posisi di atas lapisan yang lebih muda [9]. Selain itu, batuan sering muncul sebagai singkapan terpencar dan terpecah-pecah pada permukaan bumi. Dengan demikian, banyak batuan yang tidak saling berhubungan. Sebagai hasilnya, batuan-batuan yang merekam sejarah paling awal pembentukan bumi sudah tidak dapat ditemukan dan bahkan mungkin sudah tidak ada lagi [9]. Sementara para ahli geologi sangat berkepentingan dalam merekonstruksi ulang sejarah bumi untuk keperluan ilmu pengetahuan.

Berbagai peristiwa pernah terjadi di bumi dan memengaruhi kehidupan yang ada di muka bumi, seperti kepunahan Dinosaurius,

Geologi juga menyusun kembali urutan perubahan struktur bumi zaman dahulu. Lingkup kajiannya bukan hanya tentang sejarah bumi, tetapi juga tentang bentuk kehidupan yang berbeda yang pernah mendiami bumi pada zaman dahulu. Berbagai metode telah dikembangkan untuk menetapkan kronologi mutlak sejarah bumi. Metode itu 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 itu mengandalkan pada keberadaan unsur radioaktifalamiah yang dapat berperan sebagai penunjuk waktu geologi, yaitu skala waktu yang meliputi seluruh sejarah geologi bumi dari mulai terbentuknya hingga saat ini [11]. Metode penanggalan ini terus-menerus mengalami perbaikan dan penyempurnaan. Metode ini ternyata mampu membantu para ilmuwan dalam 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 1907 [12]. Penentuan skala waktu geologi dengan teknik nuklir itu 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 merubah 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 fisika nuklir. Ada banyak manfaat yang diperoleh para

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.

Karena berperan penting dalam penanggalan radioaktif, tak ketinggalan pada Bab 4 buku ini dibahas pula masalah 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 terkait 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, maka radionuklida kosmogenik mempunyai peran penting dalam penanggalan arkeologi dengan mengandalkan keberadaan unsur radioaktif carbon-14. Dari sinilah istilah penanggalan radiokarbon muncul.

Sampailah pembaca pada pembahasan inti dari maksud utama penulisan buku ini, yaitu pemanfaatan radionuklida alam untuk penanggalan. Tiga pembahasan tentang penanggalan radioaktif secara berturut-turut disajikan pada Bab 5, Bab 6 dan Bab 7. Pembahasan pada Bab 5 mencakup tentang pengertian waktu geologi yang berorde milyaran tahun dan teknik penanggalan bumi serta alam semesta dengan mengandalkan peluruhan radionuklida primordial yang berperan sebagai jam geologi dengan umur paronya juga berorde milyaran tahun. Dilengkapi juga dengan prestasi nyata teknik penanggalan radioaktif ini dalam memperkirakan kelahiran bumi, pembentukan alam semesta serta peristiwa-peristiwa geologi lainnya yang pernah berlangsung di muka bumi milyaran tahun silam.



02

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 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, maka setiap hasil belahan mempunyai sifat yang sama seperti benda asal [3,14]. Dari contoh ini Demokritos menggambarkan atom sebagai materi terkecil yang sedemikian kecilnya sehingga tidak dapat dibagi-bagi lagi. Inilah konsep tentang atom pertama yang tercatat oleh sejarah ilmu pengetahuan. Konsep tersebut lahir murni dari hasil pemikiran, dan bukan merupakan hasil percobaan [14].

Dalam perkembangan berikutnya, istilah atom digunakan untuk menerangkan bagian terkecil dari suatu benda, sedemikian kecilnya sehingga benda tersebut tidak dapat dibagi-bagi lagi. Namun pengetahuan manusia mengenai ukuran dan sifat-sifat alamiah dari atom tersebut berkembang sangat lambat selama berabad-abad. Oleh sebab itu, konsep tentang atom tidak terdefiniskan secara pasti. Pada saat itu manusia hanya berspekulasi mengenai keberadaan suatu atom [3].

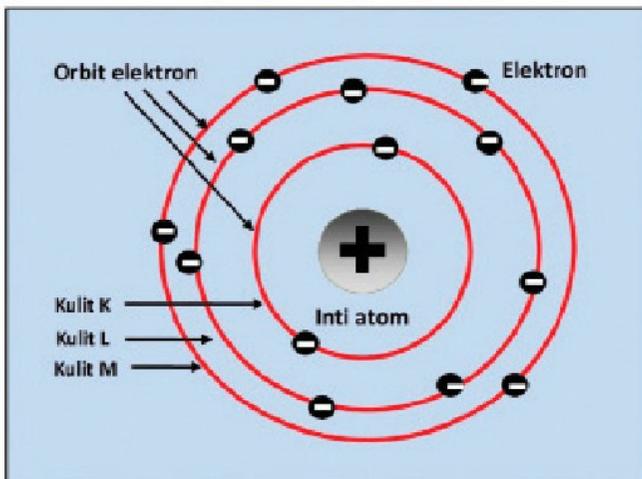
Model atom Rutherford pun harus diuji untuk membuktikan apakah teori itu sesuai dengan kaidah-kaidah fisika yang ada. Dari hasil pengujian terhadap model atom Rutherford ini diketahui bahwa kelemahan utama dari model atomnya terletak pada masalah kestabilan atom. Dalam gerakan mengelilingi inti, elektron akan kehilangan energi terus-menerus. Jika model ini diikuti maka elektron yang bergerak mengelilingi inti atom akan menempuh lintasan dengan jari-jari lintasan elektron yang semakin kecil karena berkurangnya energi elektron, sehingga lama-kelamaan elektron tersebut akan menempel pada permukaan inti atom [20,21].

Meski masih ada kelemahan dikaitkan dengan uji spektroskopi warna pancaran cahaya dari atom, keberhasilan model atom Rutherford dalam menjelaskan gejala hamburan partikel alfa menunjukkan bahwa model atom itu tidaklah terlalu keliru. Paling tidak, apa yang telah dikemukakan oleh Rutherford itu sudah mendekati model struktur atom yang memadai, meski masih perlu penyempurnaan. Masalah kestabilan model atom Rutherford akhirnya teratasi dengan sumbangan fisikawan teori Denmark, Niels Henrik David Bohr (1885-1962). Kelemahan model atom Rutherford tersebut disempurnakan oleh Bohr dalam teori atomnya yang dikemukakan pada 1913. Dalam hal ini Bohr tidak mengemukakan teori atomnya sendiri, melainkan hanya menambahkan postulat terhadap teori atom Rutherford sebagai berikut [21]:

- Elektron tidak dapat berputar mengelilingi inti melalui sembarang lintasan, tetapi hanya dapat melalui lintasan-lintasan tertentu saja tanpa membebaskan energi. Lintasan ini disebut lintasan stasioner dimana elektron-elektron yang berada di dalamnya memiliki energi tertentu.
- Apabila terjadi perpindahan elektron dari lintasan luar menuju ke lintasan lebih dalam maka akan disertai pelepasan energi

radiasi elektromagnetik, sebaliknya jika elektron pindah dari lintasan dalam menuju ke lintasan yang lebih luar akan terjadi penyerapan energi elektromagnetik.

Model atom Rutherford-Bohr dewasa ini 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 dinamai kulit K, kulit L, kulit M dan seterusnya. Bohr menemukan rumus matematika yang dapat digunakan untuk menghitung panjang gelombang dari semua garis yang muncul dalam spektrum atom hidrogen. Nilai hasil perhitungannya ternyata sangat cocok dengan nilai yang diperoleh melalui percobaan langsung. Hal ini dipakai sebagai bukti bahwa teori Bohr tentang spektrum atom adalah benar [13].

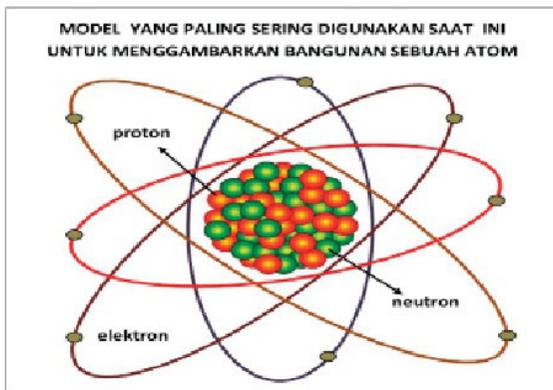


Gambar 2.1: Model atom Rutherford-Bohr [20,21]

2.2. Inti Atom

Temuan penting berkaitan dengan teka-teki inti atom adalah bahwa massa atau berat atom dari semua jenis atom hampir merupakan kelipatan bulat dari berat satu atom hidrogen (H). Kenyataan ini memberi kesan bahwa semua jenis atom yang ditemukan di alam ini dibangun dari satu jenis atom saja, yaitu H. Lebih tepatnya, inti atom H berperan sebagai satuan massa [17]. Temuan ini menempatkan inti atom H pada posisi sangat penting, sehingga oleh Rutherford diberi nama proton (p), suatu kosakata Yunani yang berarti “yang pertama”. Proton pertama kali ditemukan secara eksperimental oleh Carl D. Anderson pada 1932. Dari penelitian itu diketahui bahwa proton merupakan partikel bermuatan listrik positif (+) yang sama besarnya dengan muatan sebuah elektron, hanya tandanya saja yang berlawanan.

Rutherford merupakan orang pertama yang menduga bahwa inti atom tersusun atas proton dan elektron (e). Hipotesis proton-elektron sebagai penyusun inti dihubungkan dengan sifat-sifat elektron bebas. Diusulkan bahwa elektron diikat oleh partikel bermuatan positif dan tidak memiliki sifat independen di dalam inti. Salah satu kemungkinannya, sebagaimana diusulkan oleh Rutherford di awal 1920, adalah bahwa elektron dan proton mungkin bergabung sangat dekat sehingga membentuk partikel netral. Partikel hipotetis ini selanjutnya diberi nama neutron [17]. Namun studi intensif yang detil tentang garis-garis spektrum dari suatu atom ternyata dapat menggagalkan asumsi tersebut. Selain itu, pada awal abad 20, semua metode untuk mendeteksi partikel seukuran inti didasarkan pada efek muatan listrik partikel tersebut, seperti pembelokan partikel oleh medan magnet atau medan listrik serta proses pengionan. Keberadaan neutron yang tidak memiliki muatan listrik akan sangat sulit untuk dideteksi, sementara beberapa usaha yang telah dilakukan gagal untuk menemukan neutron tersebut.



Gambar 2.2. Struktur atom dengan inti yang tersusun atas proton dan neutron serta kulit atom yang berisi elektron [17]

Untuk mendapatkan gambaran mengenai nomor atom dan nomor massa suatu inti, berikut kita analisis lebih lanjut contoh atom di atas. Dari susunan berkala atom kita dapat mengetahui bahwa nama atom dengan simbol U adalah uranium dengan $Z = 92$ dan $A = 235$. Dari data nuklir tersebut dapat ditentukan jumlah elektron, proton dan neutron dalam atom U sebagai berikut:

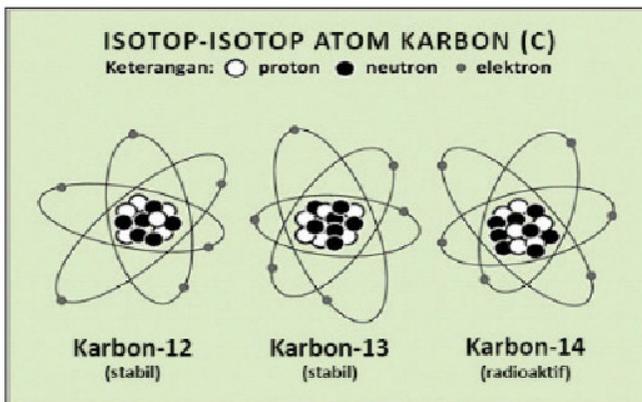
- Jumlah elektron (Z) = 92
- Jumlah proton (Z) = 92
- Jumlah neutron (N) = $A - Z = 235 - 92 = 143$

2.3. Isotop dan Nuklida

Dengan menggunakan spektrograf massa telah ditemukan beberapa unsur kimia yang mempunyai dua atau lebih komponen, masing-masing mempunyai massa yang berbeda. Hal ini disebabkan jumlah neutron di dalam inti atom tidak sama. Atom oksigen (O) misalnya, dapat membentuk tiga jenis inti, yaitu inti dengan delapan, sembilan dan sepuluh buah neutron di dalamnya. Nomor massa dari ketiga

jenis inti oksigen tersebut masing-masing 16, 17 dan 18. Terkait dengan penemuan tiga jenis inti dari atom O ini, para ilmuwan biasanya menyatakan bahwa atom O dapat membentuk tiga macam isotop [24].

Isotop adalah unsur-unsur dengan nomor atom (Z) sama tetapi nomor massanya (A) berbeda. Karena Z nya sama, berarti inti atom tersebut mempunyai jumlah proton yang sama. Perbedaan nomor massanya tidak lain 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 carbon, 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.



Gambar 2.3. Struktur atom isotop-isotop ^{12}C dengan 6 proton dan 6 neutron, ^{13}C dengan 6 proton dan 7 neutron dan ^{14}C dengan 6 proton dan 8 neutron [24]

cukup lebar dalam kelimpahan isotop timbal (Pb) juga ditemukan, dan besarnya variasi ini biasanya dihubungkan dengan sumber dari mana sampel tersebut diperoleh. Dalam Pb secara umum, tidak mungkin mendapatkan kelimpahan isotop secara pasti tanpa menentukan asal sumber bahan tersebut.

Sebagian besar unsur yang ada di alam ini terdapat dalam dua atau lebih isotop dan hanya 20 unsur alamiah (kira-kira seperempat dari seluruh unsur) yang memiliki satu bentuk inti saja, seperti aluminium (Al), cobalt (Co) dan emas (Au). Pada unsur tersebut tidak dikatakan membentuk satu isotop stabil. Dari 20 unsur tersebut, hanya Be yang memiliki Z genap, sementara 19 unsur lainnya memiliki Z ganjil. Sebagai informasi tambahan untuk mengenali lebih banyak mengenai isotop ini, perlu juga dikemukakan sebaran isotop di alam berdasarkan jumlah proton dan neutron dalam inti atomnya, yaitu [25]:

1. Unsur-unsur dengan Z ganjil biasanya hanya mempunyai satu inti stabil, sedang unsur dengan Z genap biasanya mempunyai lebih dari satu isotop stabil. Sebagai contoh adalah (Carbon) yang terdapat dalam jumlah banyak dan mudah ditemukan di alam ini. Carbon memiliki Z genap, yaitu 6.
2. Unsur dengan Z dan A genap (berarti N nya juga genap) banyak terdapat di alam dan umumnya berada di kulit atau kerak bumi. Keberadaan dan dapat dipakai sebagai contoh unsur-unsur jenis ini.
3. Unsur dengan Z dan A ganjil (berarti N nya genap) atau sebaliknya (Z genap, N ganjil dan A ganjil) terdapat di alam dalam jumlah cukup.
4. Unsur-unsur dengan Z maupun N ganjil ditemukan di alam dalam jumlah yang sangat jarang. Contoh dari unsur jenis ini adalah : (Deuterium, isotop Hidrogen), (Lithium), (Boron) dan (Nitrogen).

membedakan dengan nuklida yang stabil, sering digunakan istilah radionuklida untuk menyatakan isotop atau nuklida yang bersifat radioaktif [17].

Meskipun di alam hanya dapat ditemukan 92 jenis unsur yang terbentuk secara alamiah dan lebih dari 13 jenis merupakan unsur buatan, namun ada sekitar 1.440 macam isotop yang saat ini dikenal, 340 diantaranya terdapat di alam dan sekitar 1.100 diproduksi di laboratorium, reaktor nuklir dan ledakan senjata nuklir [16,24]. 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 1945 mengeluarkan antara 30-40 unsur baru yang semula belum dikenal. Unsur-unsur baru tersebut masih melakukan peluruhan sehingga menghasilkan unsur-unsur lain yang juga bersifat radioaktif, sehingga jumlah unsur yang keluar dari ledakan senjata nuklir dalam bentuk debu-debu radioaktif dapat mencapai sekitar 200 jenis radionuklida [28].

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 merupakan hasil samping dari kegiatan nuklir yang kemunculannya tidak disengaja atau bahkan tidak dikehendaki, gejala radioaktivitas ternyata dapat ditemukan pada radionuklida yang terbentuk secara alamiah. Karena proses terbentuknya berlangsung secara alamiah bersamaan dengan proses kelahiran maupun aktivitas alam semesta, maka untuk selanjutnya, radionuklida ini sering disebut sebagai radionuklida alam. Radionuklida ini sudah terbentuk semenjak alam ini lahir. Proses terbentuknya diperkirakan bersamaan dengan proses terbentuknya planet bumi, atau bahkan lebih tua lagi [29].

kristal yang tercetak pada permukaan film fotografi itu ternyata tidak beda kerapatan optisnya dengan yang diperoleh dari eksperimennya yang pertama. Becquerel segera menyadari bahwa ada sejenis sinar aneh yang tidak kasat mata telah menyinari film tersebut. Sumbernya tentu bukan peristiwa fluoresens dari garam U yang terpapari sinar matahari. Becquerel menduga bahwa satu-satunya sumber sinar aneh tersebut pastilah garam uranium-natrium-sulfat itu sendiri.

Dengan penelitian lanjutan akhirnya Becquerel mengetahui bahwa sinar aneh yang dipancarkan garam U itu memiliki banyak kesamaan dengan sinar-X, salah satunya adalah daya tembusnya tinggi. Hal penting lainnya dari hasil penelitian Becquerel ini adalah bahwa sinar dari garam U tidak bergantung sama sekali pada bentuk senyawa kimia bahan. Dalam hal ini Becquerel menyadari bahwa gejala radiasi tersebut tidak berasal dari struktur kimia bahan, melainkan harus berasal dari U itu sendiri. Namun karena belum cukupnya pengetahuan tentang sinar ini, maka untuk sementara sinar aneh yang dipancarkan garam U tadi diberi nama sinar Becquerel. Penemuan ini merupakan salah satu pondasi untuk melangkah lebih lanjut ke perkembangan fisika modern melalui pemahaman struktur inti atom yang lebih detil [17]. Sebelum 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 alam itu terungkap, penemuan-penemuan baru berikutnya di bidang ini menjadi terbuka lebar [14].

Pada 1896, Becquerel menerbitkan beberapa kertas kerja ilmiah tentang fenomena yang ditemukannya. Semula publikasi ilmiah itu ternyata kurang mendapatkan perhatian dari kalangan fisikawan saat itu. Baru kira-kira setahun kemudian, penemuan gejala radiasi dari U itu mulai dipelajari secara intensif oleh peneliti lain. Beberapa ilmuwan yang membaca kertas kerja tersebut menjadi tertarik dan melakukan penelitian serupa. Pada akhir 1897, Maria Sklodowska

yang ternyata juga mampu memancarkan sinar-sinar sama seperti yang dipancarkan U. Ketika diukur dengan elektroskop tampak bahwa keduanya memiliki kekuatan yang hampir sama [31]. Marie telah berhasil menjawab pertanyaan dasar paling penting dari para peneliti, yaitu adanya bahan selain U yang mampu menunjukkan gejala sama seperti U.

Dengan penemuan Th itu, Marie Curie berpikir tentang perlunya sebutan umum untuk bahan-bahan yang mampu memancarkan sinar-sinar Becquerel. Atas usulan Marie, gejala pemancaran radiasi secara spontan dari bahan semacam itu akhirnya dikenal sebagai gejala radioaktivitas, sedang bahan yang dapat menunjukkan gejala radioaktivitas disebut bahan radioaktif, dan radiasi yang dipancarkannya disebut sinar radioaktif. Namun dengan semakin banyaknya bahan-bahan radioaktif yang kini dikenal manusia, untuk hal-hal yang lebih spesifik, sebutan radionuklida sering dipakai sebagai pengganti untuk bahan radioaktif.

2.5. Radionuklida Primordial

Sampai sejauh ini telah ditemukan dua jenis radionuklida di alam, yaitu U dan Th. Tantangan berikutnya adalah menjawab pertanyaan, masih adakah radionuklida alamiah selain dua bahan yang sudah ditemukan. Ketika pasangan Marie dan Pierre Curie (1859-1905) menguji sejenis mineral yang disebut *pitchblende*, bahan itu ternyata empat kali lebih radioaktif dibanding bahan kimia lain yang hanya mengandung U dengan jumlah yang sama. Fenomena itu ternyata sangat menarik perhatian bagi pasangan Marie dan Pierre Curie. Persoalan ilmiah muncul untuk menjelaskan fenomena itu. Namun saat itu belum ada satupun teori yang mampu menjelaskan fenomena itu secara fisika. Satu-satunya dugaan yang paling mungkin bisa menjawab masalah itu adalah adanya sesuatu yang lain dalam *pitchblende* yang jauh lebih radioaktif dibanding U dan

Radionuklida primordial yang terdapat dalam udara terutama 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 , sedang ^{226}Ra dalam peluruhannya menghasilkan ^{222}Rn (gas radon). Dalam deret Th, peluruhan ^{232}Th menghasilkan ^{220}Rn (gas thoron). Karena U dan Th terdapat di dalam hampir semua lapisan kerak bumi, maka gas ^{222}Rn dan ^{220}Rn akan selalu terbentuk setiap saat [34]. Karena berbentuk gas, maka 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 kandungannya ditemukan cukup tinggi dibandingkan pada kondisi normal.

Dengan memperhatikan umur paro radionuklida alam, ada beberapa radionuklida yang 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 terbentuk pada saat masih dalam keadaan proto planet yang kemudian dingin dan melahirkan planet bumi sesuai dengan hipotesis mengenai teori terbentuknya bumi ini [11].

Radionuklida primordial seringkali disebut juga 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 Canada. Di lapangan pertambangan gas alam banyak ditemukan gas radon yang merupakan anak luruh NORM radium-226 (Ra-226). Deposif fosfat alam biasanya mengandung radionuklida



03

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 sejak lama dikenal orang. Pada masa Kriptozoik, zaman geologi Pra Kambrium yang terjadi pada 3.900 juta tahun silam, mineral U telah terbentuk. Uranium terdapat sebagai mineral dalam kerak bumi, juga dalam air laut, air sungai, minyak bumi, batu bara dan lain-lain. Peristiwa-peristiwa alam dan proses geologi telah 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 [36]. Bersamaan dengan terbentuknya U, terbentuk juga unsur-unsur radioaktif alam seperti thorium (Th), actinium (Ac), kalium (K) serta unsur lainnya.

Di alam dapat ditemukan berbagai jenis mineral U, antara lain 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 [36]. 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% [37]. Radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida primordial sering disebut sebagai radiasi teresterial, yaitu radiasi yang berasal dari permukaan bumi.

Radiasi dari mineral-mineral yang ada dalam batu-batuan maupun di dalam tanah seringkali juga 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, antara lain [38]:

- Uranium bersifat radioaktif yang mampu memancarkan radiasi alfa, radiasi beta dan radiasi gamma, sehingga keberadaannya dapat dipantau menggunakan alat ukur radiasi.
- Dalam deret peluruhannya U menghasilkan gas radon yang terlepas ke dalam udara. Oleh sebab itu, udara di atas wilayah yang mengandung U terdapat gas radon-222 dengan kadar yang relatif lebih tinggi dibandingkan dalam udara pada umumnya. Keberadaan gas radon-222 ini sangat mudah dikenali menggunakan alat ukur radiasi.
- Oksidasi alam dari uranium mempunyai warna hijau kekuning-kuningan dan coklat tua yang mencolok sehingga mudah dikenali dengan mata telanjang.
- Apabila disinari dengan cahaya ultra ungu, uranium akan mengeluarkan cahaya fluoresensi 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. Karena peluruhan merupakan proses yang berlangsung di dalam inti atom suatu radionuklida, maka laju peluruhannya tidak pernah terpengaruh dan terganggu oleh perubahan kondisi fisika maupun kimia lingkungan. Karena itu, keberadaan radionuklida U dalam berbagai jenis mineral dapat dimanfaatkan sebagai jam geologi bagi perjalanan planet Bumi [11].

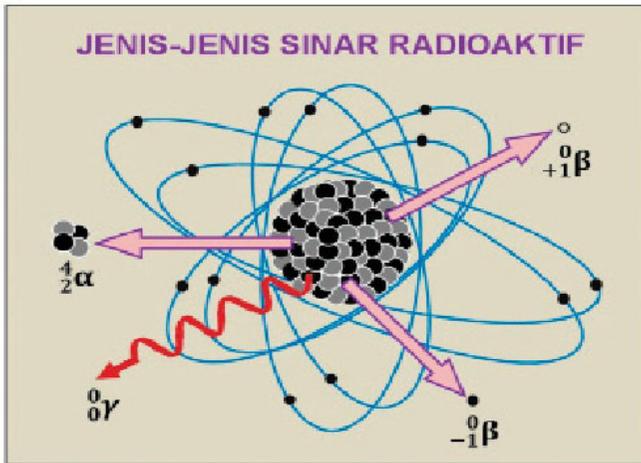
3.1. Pancaran Radiasi

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 massa unit* yang lazim ditulis dengan $1u$. Bedanya proton bermuatan listrik positif, sedang 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 itu sendiri 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 keadaan stabil.

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.

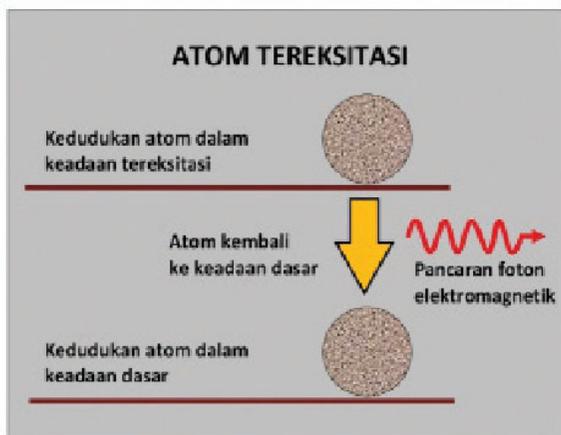
Dari hasil pengamatan diketahui bahwa radiasi yang dipancarkan suatu radionuklida dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu radiasi partikel bermuatan dan radiasi elektromagnetik [39]. Karena radiasi yang dipancarkannya membawa energi yang cukup tinggi dan bersifat dapat mengionkan materi yang dilewatinya, maka radiasi ini lazim disebut sebagai radiasi pengion. Karena bersifat pengion, maka pada materi yang dilalui radiasi ini akan terbentuk pasangan-pasangan ion positif (+) dan negatif (-) sebagai akibat dari terjadinya pengalihan energi dari radiasi kepada materi.

Jenis-jenis radiasi yang dapat dipancarkan oleh inti atom radioaktif adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Ketika para ilmuwan baru mengenal atom radioaktif alam, jenis radiasi yang diketahui pada 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 β positif atau positron, yang setelah diselidiki ternyata merupakan elektron bermuatan listrik positif.



Gambar 3.1: Pancaran radiasi oleh radionuklida [12]

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*). Sedangkan tingkat energi dasar suatu inti adalah energi ikat inti total dari inti stabil [19].



Gambar 3.2 : Kondisi atom yang tereksitasi [13]

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 akan disertai juga 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 (Δt) yang dapat ditulis dalam bentuk persamaan sebagai berikut [15]:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \quad \text{atau} \quad \frac{\Delta N}{N} = -\lambda \Delta t \quad (3-1)$$

Tanda minus (-) di depan λ ($-\lambda$) menunjukkan bahwa dalam proses peluruhan ini terjadi pengurangan jumlah radionuklida. Dengan mengintegrasikan persamaan (3-1) akan diperoleh persamaan yang menyatakan kondisi jumlah radionuklida setiap saat,

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

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t \quad \text{atau} \quad N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3-2)$$

dengan N_t adalah jumlah radionuklida setiap saat N_0 , adalah jumlah radionuklida mula-mula, λ adalah konstanpa peluruhan dan t adalah jangka waktu peluruhan yang telah berlangsung. Satuan untuk λ dan t harus disesuaikan, misal jika t dalam detik atau sekon (s) maka λ harus dalam S^{-1} , jika t dalam menit⁻¹ maka λ harus dalam , jika t dalam tahun (th) maka λ harus dalam th⁻¹ dan sebagainya.

Persamaan (3-1) maupun (3-2) diperoleh melalui eksperimen berdasarkan tingkat kebolehjadian berlangsungnya proses peluruhan atas sejumlah radionuklida pada selang waktu tertentu. Karena proses peluruhan merupakan peristiwa statistik, maka 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. Semakin pendek umur paro, semakin cepat radionuklida tersebut meluruh, sehingga kemampuannya memancarkan radiasi berkurang dengan cepat pula. Sebaliknya, semakin panjang umur paronya, semakin lambat radionuklida melakukan proses peluruhan [24].

Seperti halnya 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 proses peluruhan per satuan waktu, dan satuan waktu yang lazim digunakan adalah detik atau sekon (s). Untuk menyatakan besaran aktivitas radionuklida digunakan satuan Becquerel, yang disingkat dengan 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 Bq = 1 dps) [39]. Satuan Bq dipakai sebagai Satuan Internasional (SI) sejak 1976.

Mengingat aktivitas radionuklida (A) menyatakan jumlah inti radionuklida yang melakukan peluruhan (ΔN) per satuan waktu (Δt), maka dari persamaan (3-1) diperoleh persamaan baru yang dipakai untuk menyatakan aktivitas suatu radionuklida sebagai berikut:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (3-4)$$

Jumlah inti radionuklida akan terus berkurang setiap saat karena terjadinya peluruhan. Dengan demikian, aktivitas suatu radionuklida juga akan terus menyusut setiap saat seiring dengan perjalanan waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dari persamaan (3-2) dapat diturunkan suatu persamaan untuk menyatakan aktivitas radionuklida sebagai berikut:

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

Berdasarkan persamaan (3-4), $A = \lambda N$, maka aktivitas radionuklida setiap saat memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3-5)$$

Nama Radionuklida	Lambang	Peluruhan	Umur Paro ($T_{1/2}$)
Ionium (Io)	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	α	$8,0 \times 10^4$ tahun
Radium (Ra)	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	α	1620 tahun
Ra Emanation (Rn)	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	α	3,82 hari
Radium A (RaA)	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	α dan β	3,20 menit
Radium B (RaB)	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	β	26,8 menit
Astatine 218	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	α	1,5 detik
Radium C (RaC)	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	α dan β	19,7 menit
Radium C' (RaC')	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	α	$1,64 \times 10^{-4}$ detik
Radium C'' (RaC'')	${}^{210}_{81}\text{Tl}$	β	1,32 menit
Radium D (RaD)	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	β	19,4 tahun
Radium E (RaE)	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	β	5 hari
Radium F (RaF)	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	α	138,3 hari
Thalium 206	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	β	4,2 menit
Radium G (RaG)	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	stabil	---

Ketiga deret radioaktif alam tersebut mempunyai karakteristik umum yang mirip antara satu dengan lainnya sebagai berikut [40] :

- Radionuklida induk (radionuklida anggota pertama) pada masing-masing deret mempunyai umur paroh yang sangat panjang dan dapat dinyatakan dalam satuan waktu geologi. Dalam deret uranium, radionuklida induknya ${}^{238}_{92}\text{U}$ dengan $T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ tahun. Deret thorium radionuklida induknya ${}^{232}_{90}\text{Th}$ dengan $T_{1/2} = 1,39 \times 10^{10}$ tahun, dan deret actinium radionuklida induknya ${}^{235}_{92}\text{U}$ dengan $T_{1/2} = 7,10 \times 10^8$ tahun.

Tabel 3.2. Radionuklida anggota deret thorium (deret 4n) [11,17]

Nama Radionuklida	Lambang	Peluruhan	Umur Paro ($T_{1/2}$)
Thorium (Th)	$^{228}_{90}\text{Th}$	α	$1,39 \times 10^{10}$ tahun
Mesothorium 1 (MsTh1)	$^{228}_{90}\text{Th}$	β	6,7 tahun
Mesothorium 2 (MsTh2)	$^{228}_{90}\text{Th}$	β	6,13 jam
Radiothorium (RdTh)	$^{228}_{90}\text{Th}$	α	1,91 tahun
Thorium X (ThX)	$^{212}_{84}\text{Po}$	α	3,64 hari
Th Emanation (Tn)	$^{212}_{84}\text{Po}$	α	51,5 detik
Thorium A (ThA)	$^{212}_{84}\text{Po}$	α dan β	0,16 detik
Thorium B (ThB)	$^{212}_{84}\text{Po}$	β	10,6 jam
Astatine 216	$^{212}_{84}\text{Po}$	α	3×10^{-4} detik
Thorium C (ThC)	$^{212}_{84}\text{Po}$	α dan β	60,5 menit
Thorium C' (ThC')	$^{212}_{84}\text{Po}$	α	3×10^{-7} detik
Thorium C'' (ThC'')	$^{208}_{82}\text{Pb}$	β	3,10 menit
Thorium D (ThD)	$^{208}_{82}\text{Pb}$	stabil	---



04

RADIONUKLIDA KOSMOGENIK

Tidak berselang lama dari penemuan sinar-X oleh Wilhelm Conrad Roentgen pada 1895 dan penemuan radionuklida primordial uranium oleh Anthony Henry Becquerel pada 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 [41]. Elektroskop yang ditemukan oleh A. Bennet dari Inggris pada 1787 itu semula dirancang untuk mendeteksi keberadaan muatan listrik. Alat itu berfungsi mengukur besar kecilnya muatan listrik dan jenis kelistrikan, positif atau negatif, dari bahan listrik gosokan. Karena radiasi dapat mengionkan medium yang dilaluinya, maka pasangan ion yang dihasilkan oleh radiasi itu 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 dioperasikan ternyata juga dapat mendeteksi adanya sinar-sinar misterius di atmosfer. Sinar misterius tadi mempunyai daya tembus yang jauh lebih kuat dibandingkan dengan

sinar-X atau radiasi lainnya yang sudah diketahui pada saat itu. Para peneliti pada saat itu membandingkan 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 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 tadi ternyata datang dari ruang angkasa [41]. Mereka juga mendapatkan bahwa intensitas sinar bertambah kuat pada tempat-tempat yang lebih tinggi. Antara 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 mencapai 10 kali lebih tinggi dibandingkan intensitasnya di permukaan laut. Hess akhirnya menyimpulkan bahwa sinar-sinar itu pasti berasal dari angkasa luar.

Serangkaian percobaan yang dilakukan oleh tim fisikawan yang dikomandoi oleh Robert A. Millikan dari Institut Teknologi California pada 1925 memperkuat kesimpulan Hess. Millikan beserta 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 sampai pada 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 [42]. Jadi selain radionuklida primordial 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. Karena proses terbentuknya radionuklida itu melibatkan radiasi kosmis, maka radionuklida yang dihasilkan dikenal sebagai radionuklida kosmogenik. Jika keberadaan radionuklida primordial dapat dimanfaatkan untuk penanggalan geologi sebagaimana akan dibahas pada Bab 5 dan penanggalan tembikar sebagaimana akan dibahas pada Bab 6, maka radionuklida kosmogenikpun dapat dimanfaatkan untuk penanggalan fosil di bidang arkeologi sebagaimana akan dibahas pada Bab 7.

4.1. Radiasi Kosmis

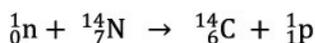
Pada 1927, fisikawan Rusia DV Sobelstyn mengubah pemantau radiasi kamar kabut Wilson untuk memantau sinar kosmis. Dengan alat itu, jejak radiasi kosmis yang mengionkan kabut dapat diamati seperti aliran tetes air. Pada tahun 1928 dan 1929, Werner Kolhorster dan ilmuwan lainnya dari Jerman Walther Bothe 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 [24].

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 [35].

4.2. Produksi Radiokarbon

Penduduk bumi selalu dihujani radiasi kosmis baik yang berasal dari bintang-bintang keluarga 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 tadi karena bumi memiliki medan magnet yang mampu memantulkan partikel-partikel bermuatan dari ruang angkasa yang memasuki atmosfer bumi. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa medan magnet bumi itu berperan sebagai pelindung radiasi bagi penduduk bumi. Di lain pihak, hujan radiasi kosmis dari ruang angkasa ini justru memberikan suatu laboratorium alam bagi para peneliti fisika nuklir.

Radionuklida kosmogenik yang cukup penting karena dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dalam berbagai bidang kehidupan adalah radiokarbon dalam bentuk radioisotop carbon-14 (^{14}C). Radionuklida ini terbentuk melalui proses nuklir di ruang angkasa. Neutron (n) dari radiasi kosmis primer akan kehilangan sebagian besar energinya melalui tumbukan 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 persen komponen atmosfer bumi [44]. Penangkapan tersebut mendorong terjadinya reaksi nuklir sehingga terbentuk ^{14}C melalui proses sebagai berikut:



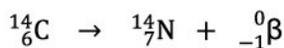
Produksi ^{14}C berlangsung terus di atmosfer bagian atas. Namun karena bersifat radioaktif, ^{14}C juga selalu melakukan peluruhan sehingga jumlahnya di atmosfer selalu konstan. Jumlah yang terbentuk setiap



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

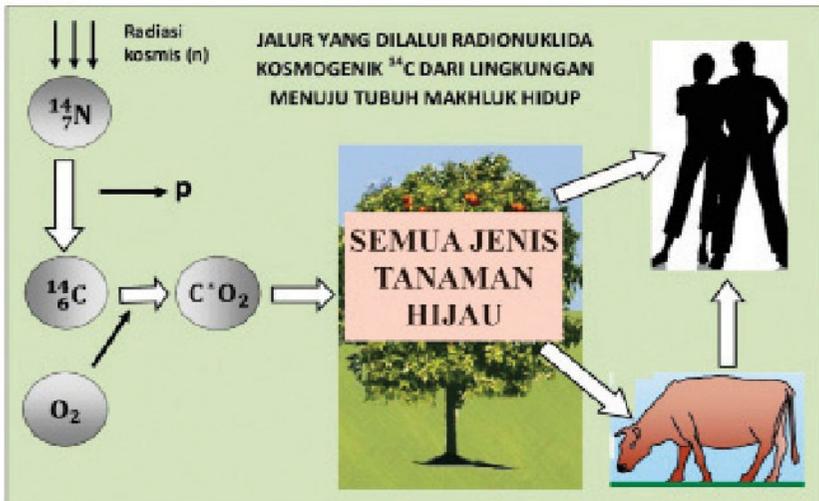
Perbedaan sifat fisika antara ¹²C dan ¹⁴C terletak pada kemampuannya dalam memancarkan radiasi pengion dari dalam inti atom isotop tersebut. Inti ¹²C karena bersifat stabil maka tidak melakukan proses peluruhan inti dan tidak memancarkan radiasi pengion, sedang inti ¹⁴C karena bersifat radioaktif maka selalu melakukan proses 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, kelembaban dan sebagainya. Perbedaan sifat fisika itu ternyata dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dalam ilmu pengetahuan dan kehidupan.

Proses peluruhan inti radioaktif selalu disertai dengan pelepasan radiasi yang membawa sejumlah energi. Inti ¹⁴C meluruh menjadi inti atom nitrogen-14 (¹⁴N) sambil memancarkan radiasi beta murni berenergi rendah ($E_\beta : 0,115 \text{ MeV}$) dengan persamaan reaksi intinya sebagai berikut [24]:



Sebagai radionuklida, ¹⁴C 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 ¹⁴C di dalam suatu sampel arkeologi dapat

Jumlah radionuklida kosmogenik ^{14}C dalam tubuh makhluk hidup (manusia, hewan serta tumbuh-tumbuhan) selalu tetap, karena disamping terjadi pemasukan juga terjadi pengeluaran maupun peluruhan secara kontinyu [40]. Namun setelah kematian makhluk hidup, pemasukan ^{14}C ke dalam tubuhnya tidak terjadi lagi. Dilain fihak, karena ^{14}C ini bersifat radioaktif, maka radionuklida tersebut akan melakukan peluruhan sehingga jumlahnya terus berkurang secara eksponensial oleh waktu [11]. 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*). Khusus penanggalan dengan radionuklida ^{14}C ini lebih sering disebut dengan istilah penanggalan radiokarbon (*radiocarbon dating*) [46].



Gambar 4.1: Proses pembentukan dan perjalanan radionuklida ^{14}C di lingkungan [46]



05

PENANGGALAN GEOLOGI

Berbagai informasi untuk menelaah planet bumi telah berhasil dikumpulkan oleh para ilmuwan. Dari berbagai sumber informasi itu para ilmuwan memiliki landasan yang mantap untuk menganalisis struktur dan komposisi planet bumi. Bahkan para ilmuwan bisa 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 [47]. 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 dirinya. Melalui berbagai studi yang telah dilakukan, didukung oleh penemuan-penemuan ilmiah yang sangat menakjubkan, kini para ilmuwan berhasil merekonstruksi sejarah planet Bumi, mulai dari penyusunan teori untuk menggambarkan proses pembentukannya, pembagian interval waktu

geologi serta peristiwa-peristiwa besar yang diikuti kepunahan spesies penghuninya, hingga ke sejarah kehidupan yang pernah berlangsung di permukaannya serta peradaban yang ditinggalkan penghuninya [48].

5.1. Kelahiran Alam Semesta

Proses pembentukan atau kelahiran planet bumi tidak bisa dipisahkan dari proses kelahiran alam semesta. Karena itu, untuk memahami proses pembentukan bumi bisa dilakukan melalui tiga tahap pembahasan, yaitu: diawali dengan pembahasan mengenai proses kelahiran alam semesta, diikuti dengan pembahasan mengenai kelahiran sistem tatasurya, dan diakhiri dengan pembahasan mengenai proses pembentukan Bumi.

Disiplin ilmu yang berkaitan erat dengan masalah alam semesta adalah Kosmologi [49], yaitu studi tentang alam semesta dan manusia yang hidup di dalamnya. Sejak beberapa ratus tahun terakhir ini, studi Kosmologi didominasi oleh pendekatan fisika dan astrofisika [50]. Meskipun demikian, konsepsi ilmiah tentang kosmologi yang disepakati oleh mayoritas ilmuwan pada saat ini bukanlah merupakan sesuatu yang absolut benar [51].

Teori paling ilmiah untuk menggambarkan proses kelahiran alam semesta dikenal sebagai Teori Letusan Besar (*Big Bang*). Teori ini menyatakan bahwa proses terbentuknya alam semesta berawal dari suatu peristiwa yang terjadi milyaran tahun silam [51,52]. Teori Letusan Besar kini banyak dianut oleh kalangan ilmuwan. Bukti penting yang mendukung teori ini adalah keberadaan hidrogen dan helium di ruang angkasa. Dalam berbagai penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa konsentrasi hidrogen-helium di alam semesta bersesuaian dengan perhitungan teoritis konsentrasi hidrogen-helium sisa peninggalan peristiwa Letusan Besar. Bukti meyakinkan ini menyebabkan teori Letusan Besar diterima

oleh masyarakat ilmiah [53]. Bukti radiasi sisa Letusan Besar ini pada akhirnya berhasil ditemukan. Kosmologi modern berhasil memperoleh bukti kuat berupa penemuan radiasi latar dalam bentuk gelombang mikro kosmik bersuhu 3 Kelvin, yang diduga kuat berasal dari peristiwa Letusan Besar. Bukti ilmiah itu berhasil dideteksi tanpa sengaja pada 1965 oleh Arno A. Penzias dan Robert W. Wilson dari Laboratorium Telefon Bell [32]. Sinyal itu tersebar secara merata dan dapat dideteksi ke arah manapun antena radio pendeteksi di arahkan. Temuan ini menjadi landasan kuat dan meyakinkan untuk ketepatan model Letusan 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 [32].

5.2. Pembentukan Planet Bumi

Setelah membahas secara singkat teori tentang kelahiran tatasurya, berikutnya dibahas salah satu produk dari kelahiran itu, yaitu hadirnya planet Bumi. Bumi bukanlah benda di jagat raya yang muncul dengan sendirinya dalam bentuk langsung sempurna. Bumi terbentuk melalui proses yang panjang dan terus berkembang hingga mencapai bentuknya seperti sekarang ini. Pada saat terlahir, planet Bumi masih merupakan bola pijar yang sangat panas. Lama kelamaan secara berangsur-angsur suhu Bumi mendingin. Sebagai akibat dari proses pendinginan itu, bagian luar Bumi membeku membentuk lapisan kerak bumi yang disebut litosfer [54].

Para ilmuwan telah berhasil merunut sebagian sejarah perjalanan planet Bumi. Kira-kira 250 juta tahun silam sebagian besar kerak benua di bumi merupakan satu massa daratan berbentuk superbenua atau benua raksasa yang dikenal sebagai Pangea. Sekitar 135 juta tahun silam superbenua itu pecah menjadi dua benua besar sebelum

ketebalan dan massa jenis, umur kerak benua umumnya lebih tua dibandingkan dengan kerak samudera. Batuan kerak samudera diketahui berumur sekitar 200 juta tahun atau terbentuk pada masa Jura. Umur ini sangat muda bila dibandingkan dengan kerak benua tertua yang diketahui berumur sekitar 3.800 juta tahun [47].

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 [57]. 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 proses sedimentasi. Data itu dapat dipakai untuk memperkirakan waktu yang diperlukan dalam pembentukan batuan, dan sekaligus menentukan umur batuan. Namun hasil yang diperoleh ternyata bervariasi sangat lebar [9]. Sebelum dimulainya penggunaan skala waktu geologi pada awal abad

Ahli geologi masih 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 maksud ini adalah penentuan waktu geologi yang didasarkan pada telaah tentang perubahan tingkat radioaktivitas suatu radionuklida alamiah yang ditemukan di dalam suatu batuan [61]. Pada Tabel 5.1 disajikan berbagai jenis induk radionuklida primordial berumur paro sangat panjang dengan ukuran skala waktu geologi. Dalam peluruhannya, radionuklida itu memproduksi unsur-unsur stabil yang dapat dideteksi keberadaannya dan dapat diukur jumlahnya sehingga dapat dimanfaatkan untuk penanggalan geologi.

Tabel 5.1. Data radionuklida primordial yang banyak dimanfaatkan sebagai jam geologi [8]

NO.	RADIONUKLIDA INDUK	PRODUK TURUNAN STABIL	UMUR PARO (MILYAR TAHUN)
1	Uranium-238 (^{238}U)	Timbal-206 (^{206}Pb)	4,5
2	Uranium-235 (^{235}U)	Timbal-207 (^{207}Pb)	0,713
3	Thorium-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 ($T_{1/2}$) adalah: $\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$

Jam geologi berbasis peluruhan radionuklida primordial membuat semuanya dapat diidentifikasi secara lebih akurat. Pada umumnya penentuan skala waktu geologi dengan teknik nuklir itu dapat memberikan gambaran yang cukup baik tentang rangkaian 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 kejadian peristiwa lainnya. Penentuan skala waktu geologi dengan teknik nuklir ini mampu menetapkan kronologi periode-periode yang berbeda-beda dalam sejarah bumi [61].

5.4. Penanggalan Uranium-Timbal

Planet bumi beserta 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 radionuklida itu sudah terbentuk pada saat bumi masih berupa proto planet yang akhirnya mendingin sehingga terbentuklah planet bumi ini [17].

Salah satu metode penanggalan yang dapat memberikan hasil paling memuaskan untuk maksud ini adalah penentuan waktu geologi yang didasarkan pada telaah tentang perubahan tingkat radioaktivitas dari suatu radionuklida primordial yang terjadi di dalam suatu batuan [11]. 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

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 proses peluruhan untuk berubah menjadi atom lain (disebut sebagai anak hasil peluruhan) yang stabil, setiap proses peluruhan itu akan disertai dengan berkurangnya jumlah atom induk dan meningkatnya jumlah atom anak. 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) [11,13]. Identik dengan persamaan (3-2), jika ada radionuklida induk sebanyak P_0 dengan konstanta peluruhannya λ_p , maka jumlah radionuklida induk setelah menjalani proses peluruhan selama jangka waktu t (P_t) dirumuskan dengan persamaan :

$$P_t = P_0 e^{-\lambda_p t} \quad \text{atau} \quad P_0 = P_t e^{\lambda_p t} \quad (i)$$

Proses 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 :

$$D_t = P_0 - P_t \quad (ii)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (i) ke persamaan (ii) diperoleh :

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

Persamaan (iii) hanya berlaku jika tidak ada penambahan dan pengurangan radionuklida induk maupun unsur anak kecuali dari proses peluruhan radionuklida induk itu sendiri. Kondisi seperti itu dikatakan bahwa sampel geologi merupakan sistem tertutup. Penyelesaian persamaan (iii) untuk menyatakan usia sampel (t) adalah:

$$t = \frac{1}{\lambda_p} \ln \left(1 + \frac{D_t}{P_t} \right) \quad (5-1)$$

Persamaan (5-1) berlaku umum untuk semua jenis radionuklida primordial sebagaimana disajikan pada Tabel 5.1 di atas. Prinsipnya cukup sederhana, yaitu menghitung nisbah atau rasio jumlah produk turunan stabil yang dihasilkan terhadap radionuklida induk (λ) yang ditemukan dalam suatu sampel geologi.

Salah satu metode penanggalan radioaktif untuk penentuan umur bumi yang cukup banyak digunakan adalah dengan memanfaatkan rasio kemunculan unsur anak dalam bentuk ^{206}Pb sebagai hasil dari peluruhan radionuklida induk ^{238}U ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) [11,12,13]. Dengan mengukur nisbah $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dan memasukkan data ke persamaan (5-1), dapat diperoleh hasil perhitungan yang menyatakan usia sampel geologi yang diukur. Untuk ^{238}U , nilai λ adalah $1,54 \times 10^{-10}$ /tahun, dihitung menggunakan persamaan (3-3) dengan data nilai $T_{1/2}$ seperti disajikan pada Tabel 5.1. Misal jika nisbah jumlah unsur ^{206}Pb terhadap ^{238}U dari suatu sampel batuan adalah 1 ($D_t/P_t = 1$ atau $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 1$), maka usia sampel tersebut adalah $4,5 \times 10^9$ tahun. Jika nisbah $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0,5$, usia sampel batuan adalah $2,6 \times 10^9$ tahun, dan sebagainya.

Metode penanggalan radioaktif lainnya untuk penentuan umur bumi adalah memanfaatkan keberadaan unsur stabil ^{206}Pb dan ^{207}Pb secara bersamaan [12]. Batuan yang mengandung radionuklida induk dalam bentuk ^{238}U dan ^{235}U dapat ditentukan umurnya secara

langsung dengan mengukur nisbah $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ tadi. 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 3.4), sedang ^{235}U menghasilkan unsur stabil ^{207}Pb (perhatikan Tabel 3.3 atau Gambar 3.6).

Karena unsur Pb diyakini hanya berasal dari proses peluruhan U, maka Pb awal tidak ada selama tidak ada peluruhan U sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.1. Jika sampelnya berupa batuan beku, maka unsur Pb yang sebelumnya ada di dalam magma cair lepas dari matrik karena tingginya temperatur magma tersebut. Ketika magma membeku, yang ada di batuan itu hanyalah radionuklida induk U. Unsur Pb perlahan-lahan terbentuk bersamaan dengan proses peluruhan U. Hubungan antara radionuklida induk (U) dan unsur stabil yang dihasilkannya (Pb) dari kedua proses peluruhan tadi dapat dirumuskan dengan menurunkan persamaan (iii) sebagai berikut:

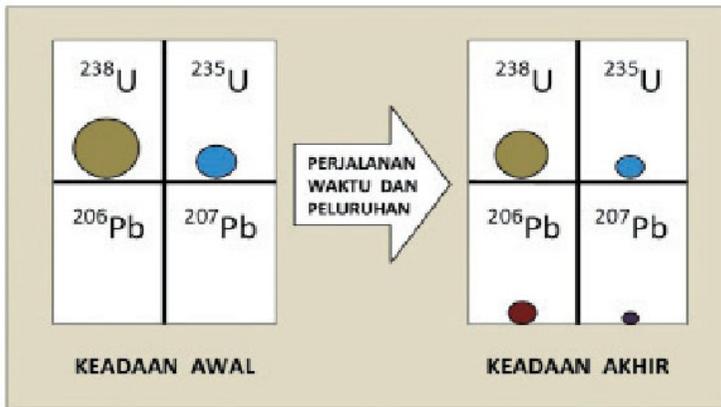
$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U} [e^{\lambda_8 t} - 1] \quad (\text{iv})$$

$$^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U} [e^{\lambda_5 t} - 1] \quad (\text{v})$$

Jika persamaan (iv) dibagi dengan persamaan (v) maka diperoleh :

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

dengan λ_8 dan λ_5 masing-masing adalah konstanta peluruhan untuk ^{238}U dan ^{235}U dengan nilai masing-masing $1,54 \times 10^{-10}$ /tahun dan $9,8 \times 10^{-10}$ /tahun [17].



Gambar 5.1: Prinsip dasar penanggalan geologi uranium-timbal [11,12]

Ada tiga jenis isotop uranium yang dapat ditemukan di alam, yaitu ^{235}U dengan kelimpahan 0,715%, ^{238}U dengan kelimpahan 99,825% dan ^{234}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 [12]. Dengan memasukkan nilai tersebut ke persamaan (vi) diperoleh :

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}} = 137,8 \times \frac{[e^{\lambda_8 t} - 1]}{[e^{\lambda_5 t} - 1]} \quad (5-2)$$

Karena pengukuran rasio kelimpahan $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ dapat dilakukan dengan hasil yang sangat akurat, maka metode penanggalan geologi tersebut dapat memberi 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.

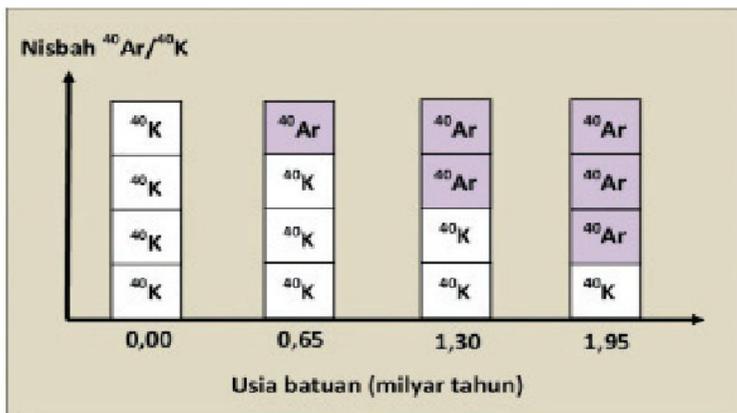
5.5. Penanggalan Kalium-Argon

Penentuan waktu geologi dapat pula dilakukan dengan dasar peluruhan radionuklida induk kalium-40 (^{40}K). Radionuklida ini memiliki umur paro 1,3 milyar tahun, meluruh menghasilkan unsur anak yang stabil berupa gas argon-40 (^{40}Ar). Karena proses peluruhan berlangsung di dalam batuan, meski berupa gas, unsur anak dapat terperangkap dan menetap di dalam batuan, selama batuan tersebut tidak mengalami proses metamorphosis [11,12]. Radionuklida induk ^{40}K meluruh dan jumlahnya terus berkurang, sementara unsur stabil anak ^{40}Ar terbentuk dan jumlahnya terus bertambah seiring dengan perjalanan waktu.

Metode penanggalan kalium-argon ini dikembangkan sejak 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 dasarnya adalah seperti diilustrasikan pada Gambar 5.2. Jika dalam sampel terdapat tiga atom ^{40}K untuk setiap satu atom ^{40}Ar , berarti batuan tersebut berumur sekitar 650 juta atau 0,65 milyar tahun. Jika dalam sampel suatu batuan mengandung ^{40}K dengan jumlah yang sama dengan ^{40}Ar atau setengah dari jumlah radionuklida induk awal sudah meluruh, berarti batuan tersebut telah berumur sama dengan umur paronya, yaitu 1,3 milyar tahun. Sebaliknya, jika dalam sampel batuan itu tinggal terdapat satu atom ^{40}K untuk setiap tiga atom ^{40}Ar , berarti usia batuanya adalah 1,95 milyar tahun.

Dalam batuan beku, jam kalium-argon ini mulai bekerja pada saat batuan pertama kali mengkristal dari cairan magma. Pada kondisi itu, yang ada dalam magma hanyalah ^{40}K , sementara gas ^{40}Ar yang terbentuk dari hasil proses peluruhan sebelumnya habis menguap

ketika magma masih dalam keadaan cair [11,12]. 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 metamorphosis dan berubah menjadi jenis batuan lain, maka 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 proses metamorphosis itu berlangsung.



Gambar 5.2: Prinsip dasar penanggalan geologi kalium-argon [11,12]

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 manusia lebih detil mengenai sejarah permukaan bumi, bulan, batuan meteorit lainnya serta galaksi telah berkembang dengan pesat. Batuan terbawah yang ditemukan di

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

Dari beberapa penelitian menggunakan beberapa metode penanggalan radioaktif yang berbeda-beda akhirnya ditemukan bukti-bukti meyakinkan, bahwa planet bumi beserta benda-benda lain dalam sistem tatasurya ini berusia antara 4,5 hingga 4,6 milyar tahun, sedang galaksi Bima Sakti dan jagad raya berusia lebih tua lagi. Dengan mengkombinasikan beberapa data, para ilmuwan berkesimpulan bahwa bumi sebagai sistem tertutup terbentuk sejak kira-kira 4,57 milyar tahun yang lalu. Cukup banyak bukti yang diperoleh bahwa seluruh sistem tatasurya terbentuk kira-kira 4,6 milyar tahun yang lalu. Usia galaksi kita, yaitu galaksi Bimasakti, juga berhasil diperkirakan berdasarkan penanggalan radioaktif. Dengan memanfaatkan peluruhan uranium dan thorium, galaksi kita diperkirakan berusia sekitar 10 milyar tahun. Sementara alam semesta berumur lebih tua dibandingkan galaksi, yaitu sekitar 14 milyar tahun [12].

Selain untuk memperkirakan usia bumi beserta benda-benda lain dalam sistem tatasurya, metode penanggalan radioaktif juga bisa 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 lebih tepat mengenai jam geologi. Dengan data itu, rekonstruksi sejarah perjalanan planet bumi dapat diketahui lebih pasti.



06

PENANGGALAN TEMBIKAR

Dalam kehidupan sehari-hari kita sering menemukan perkakas kehidupan yang dibuat dari bahan dasar tanah liat dengan proses pembakaran yang disebut tembikar, gerabah, porselen dan keramik. Meskipun seringkali 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 oleh pengrajin 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 [67].

Gerabah adalah perkakas yang terbuat dari tanah liat yang dibentuk kemudian dibakar untuk kemudian dijadikan alat-alat yang dapat dimanfaatkan dalam kehidupan, biasanya dalam bentuk periuk, belanga, tempat air dan lain-lain. Gerabah termasuk keramik golongan tembikar yang matang pada suhu pembakaran di bawah 1200°C [68]. Namun ada kalangan masyarakat yang mengartikan terpisah antara gerabah dan keramik. Dibanding keramik, kekuatan badan gerabah lebih rendah,

dapat dilakukan karena di dalam bahan dasar untuk pembuatan tembikar itu mengandung kristal-kristal 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 Thermoluminesensi

Luminesensi 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 [69].

Ada kalanya proses luminesensi baru terjadi jika suatu bahan mendapatkan pemanasan dari luar. Peristiwa luminesensi dengan bantuan panas dari luar ini disebut thermoluminesensi. Pancaran cahaya thermoluminesensi (TL) didefinisikan sebagai pancaran cahaya dari benda padat dengan struktur kristal sebagai 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. Beberapa kerusakan kisi-kisi itu disebabkan antara lain 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 [70].

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 irradiasi dan membaca respon TL-nya di laboratorium.

Bahan dasar untuk pembuatan keramik adalah sejenis tanah liat yang dapat ditemukan di berbagai tempat di permukaan bumi ini. Bahan keramik merupakan bahan nonmetal, tersusun atas senyawa anorganik, terutama dalam bentuk karbida, nitrida, barida dan silisida. Termasuk dalam lingkup pembuatan keramik adalah pembuatan barang tembikar (dari tanah), porselin, batubata porselin dan beberapa jenis ubin maupun atap rumah serta periuk-belanga. 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).

Mengingat pembuatan tembikar adalah melalui proses pembakaran atau pemanasan pada suhu tinggi, maka pada saat itu semua informasi TL yang tersimpan dalam bahan dasar pembuatan tembikar akan keluar dan tembikar tidak menyimpan informasi TL sama sekali. Namun dengan perjalanan 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 Thermoluminesensi

Kwarsa 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 kwarsa berasal dari penyinaran radiasi alfa, beta dan gamma dari matriks tanah liat dan sinar gamma dari batuan di sekitarnya dalam radius sekitar 30 cm. Karena terbatasnya daya tembus sinar alfa (umumnya hanya sampai jarak 25 – 40 mikron) dan sinar beta (sampai jarak 500 mikron) ke dalam partikel kwarsa, maka distribusi dosis serap di dalam kwarsa tersebut tidak merata dan sangat bergantung pada ukuran partikel. Zirkon yang juga menempel pada tanah liat jumlahnya 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 [76].

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 tertempel banyak kwarsa 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 thorium dan 2 ppm kalium). Karena itu, butiran tanah liat berukuran sangat kecil akan teradiasi secara merata oleh sinar alfa, beta dan gamma dari sumber-sumber alamiah [68]. Namun butiran tanah liat itu ternyata mempunyai kepekaan TL yang sangat rendah. Melalui pemisahan komponen butiran-butiran tanah liat, kwarsa dan zirkon, diperoleh tiga metode yang dapat dipakai untuk memperkirakan umur suatu tembikar, yaitu [76]:

- Memisahkan butiran-butiran tanah liat yang halus (diameter kurang dari 8 mikron). Disini dapat diasumsikan bahwa dosis serap pada butiran-butiran itu cukup merata dan umumnya berasal dari irradiasi sinar alfa, beta dan gamma. Kontribusi dosis serap yang berasal dari uranium dan thorium dapat diukur menggunakan pencacah radiasi alfa, dan dosis radiasi dari

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 dimana benda itu ditemukan. Umur benda arkeologi dapat diperkirakan melalui perhitungan menggunakan persamaan dasar sebagai berikut :

$$\text{Umur (tahun)} = \frac{\text{dosis radiasi total (Gy)}}{\text{laju dosis tahunan } \left(\frac{\text{Gy}}{\text{tahun}}\right)} \quad (6-1)$$

Persamaan yang cukup sederhana tersebut dapat dimodifikasi disesuaikan dengan jenis material (tanah liat, kwarsa atau zirkon) yang sedang dipelajari. Dalam prakteknya, 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 (6-1) 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 ditempuh dengan cara membaca intensitas TL melalui pemanasan tembikar. Cahaya TL yang keluar merupakan akibat dari pemanasan luar, sehingga sistem instrumen pembaca intensitas TL dirancang agar mampu memberikan pemanasan pada tembikar dan mendeteksi cahaya tampak yang dipancarkannya.

Sistem pada alat baca yang dipakai untuk deteksi 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

luruhnya juga memberikan dosis beta dan gamma dengan laju masing-masing 146,2 dan 114,8 $\mu\text{Gy}/\text{tahun}$, yang berarti menempati porsi masing-masing 5 dan 4% dari total dosis.

Seringkali kadar radionuklida primordial dalam jenis-jenis tembikar tertentu sudah diketahui, misal tembikar yang ditemukan di Skandinavia umumnya mengandung 10 ppm thorium, 3 ppm uranium, 2,5% kalium dan 200 ppm Rb. Dengan komposisi tersebut, bahan tembikar akan menerima laju dosis dari sumber pemancar alfa sebesar 2.359 $\mu\text{Gy}/\text{tahun}$ (35%), sumber pemancar beta sebesar 2.894 $\mu\text{Gy}/\text{tahun}$ (43%), sumber pemancar gamma sebesar 1.481 $\mu\text{Gy}/\text{tahun}$ (22%), sedang laju dosis efektif seluruhnya sebesar 6.734 $\mu\text{Gy}/\text{tahun}$ [76].

Dalam penanggalan TL dengan sampel berupa kwarsa, radiasi yang berperan dalam pembangkitan TL adalah sinar beta dan gamma. Untuk butiran kwarsa 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), maka dapat dipastikan bahwa dosis beta yang diterima sampel hanya berasal dari sumber pemancar beta yang ada di dalam matrik sampel itu sendiri. Karena tidak adanya pengaruh sinar beta dari lingkungan sekitar, maka 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 matrik sampel arkeologi. Metode pertama adalah menentukan kandungan radionuklida pemancar beta dan gamma di dalam sampel diikuti dengan perhitungan laju dosis dengan asumsi laju dosis yang dipancarkan sumber sama dengan

Dengan menganggap tidak ada radiasi dari sumber-sumber buatan, maka semua informasi TL dalam tembikar hanya berasal dari radionuklida alamiah serta dengan jumlah sangat sedikit datang dari ruang angkasa berupa radiasi kosmis. 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 thorium serta sinar beta dan gamma dari sumber ^{40}K dan ^{87}Rb yang ada di dalam matrik 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 (misal temuan dari dalam gua) atau di dasar laut, kontribusi radiasi kosmis tersebut bisa lebih kecil [74].

6.3. Penanggalan Arkeologi

Keramik berasal dari kata Yunani *keramikos* yang berarti tanah liat atau lempung pengrajin tembikar (*potter's clay*). Malcolm G. McLaren dalam Encyclopedia Americana (1996) menyatakan keramik adalah suatu istilah yang sejak semula diterapkan pada karya yang terbuat dari tanah liat alami dan telah melalui perlakuan pemanasan pada suhu tinggi sehingga menjadi keras secara permanen. Pada mulanya, produksi keramik dikaitkan dengan seni membuat barang-barang tembikar [67]. 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, porselin, dan sebagainya. 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

Dari uraian mengenai pemanfaatan 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 beserta 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.



07

PENANGGALAN RADIOKARBON

Dalam bidang arkeologi, menentukan usia benda purba merupakan salah satu kegiatan yang sangat penting, namun seringkali sangat sulit untuk dilakukan, terutama bila tidak cukup atau bahkan tidak ada sama sekali bukti-bukti sejarah yang mendukung. Di lain pihak, temuan benda purba akan 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 diperkenalkan dan dicoba untuk mempelajari zaman prasejarah. Metode kronometri mendasarkan pada perhitungan susunan lapisan-lapisan sedimen tahunan di dalam danau-danau yang dikenal sebagai *Varve Chronologis*. Metode ini dapat membantu melengkapi data geologi selama 10.000 tahun silam di Skandinavia [60]. Zaman prasejarah umumnya diteliti dengan data-data skematik yang sulit untuk disetarakan dengan skala kronometri. Metode konvensional itu memiliki beberapa kelemahan, misal 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 [77]. Sampai saat ini, metode ini masih terus dipakai dan dikembangkan. Para arkeolog dan paleoantropolog sejak beberapa dekade lalu telah melakukan kerjasama 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 bekerjasama dengan James Arnold dan Ernest C. Anderson pada 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 [76]. Penemuan metode ini merupakan sumbangan yang sangat berharga dalam rangka penelusuran benda-benda peninggalan bersejarah. 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 [78]. Penanggalan fosil (tengkorak, kerangka manusia maupun binatang) dapat pula didata secara tidak langsung, yaitu melalui penanggalan arang sisa pengapian maupun bahan organik lainnya yang ditemukan pada

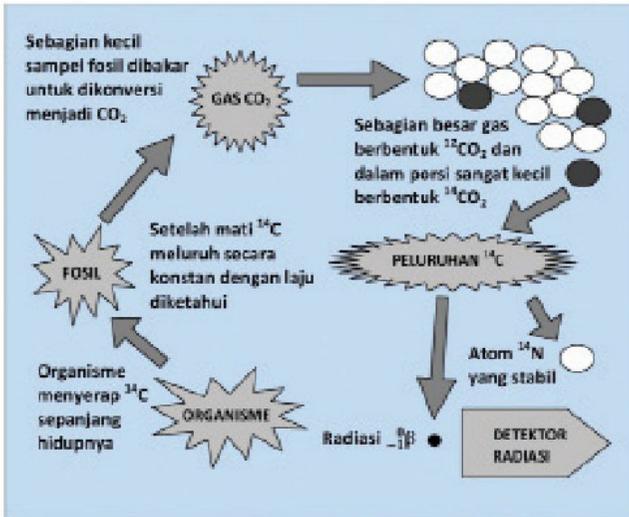
atau sisa yang masih tertinggal dalam sampel inilah, para ilmuwan bisa memperkirakan secara lebih akurat sejak kapan organisme itu mati. Jika A_t menyatakan jumlah atau aktivitas ^{14}C dalam sampel fosil pada saat ditemukan, dan A_0 menyatakan jumlah ^{14}C standar dalam makhluk hidup dari fosil tersebut, maka antara kedua besaran tersebut mempunyai hubungan yang memenuhi persamaan (3-5) sebagai berikut:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{atau} \quad A_0 = A_t e^{\lambda t} \quad (*)$$

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 , maka dari persamaan (*) dapat diperoleh persamaan baru untuk menyatakan usia fosil (t) sebagai berikut:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A_t} \quad (7-1)$$

Proses pengukuran kadar ^{14}C dalam benda arkeologi adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 7.1. 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 carbon dioksida 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 [11]. 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.



Gambar 7.1: Metode penanggalan radiocarbon [46]

Jika pengukuran kadar ^{14}C dalam sampel dilakukan dalam bentuk gas CO_2 murni, maka aktivitas standarnya dapat mengacu pada kadar ^{14}C dalam udara normal. Misal 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 waktu dengan satuan dps (disintegrasi per sekon, dimana $1 \text{ dps} = 1 \text{ Bq}$). Langkah pertama adalah menghitung terlebih dahulu jumlah mol gas CO_2 (n dalam mol) yang terdapat dalam bejana menggunakan persamaan umum gas ideal. Dengan mengambil nilai tetapan gas ideal $R = 8,314 \text{ Joule.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, nilai n dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut [13]:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(2,00 \times 10^4 \text{ N/m}^2) (2 \times 10^{-4} \text{ m}^3)}{(8,314 \text{ J/mol.K})(295 \text{ K})} = 1,63 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Karena tiap mol suatu senyawa, dalam hal ini gas CO_2 , mengandung jumlah molekul sebanyak A_0 , dengan A_0 adalah bilangan Avogadro yang nilainya $6,02 \times 10^{23}$ molekul/mol, maka jumlah molekul (N) gas CO_2 yang terdapat di dalam bejana adalah:

$$N = n \times A_0 = (1,63 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (6,02 \times 10^{23} \frac{\text{molekul}}{\text{mol}}) = 9,82 \times 10^{20} \text{ molekul}$$

Mengingat tiap molekul gas CO_2 tersusun atas satu atom carbon (C) dan dua atom oksigen (O), maka dalam bejana ada $9,82 \times 10^{20}$ atom C yang terdiri atas ^{12}C dan ^{14}C . Jika nisbah atom ^{14}C terhadap ^{12}C adalah 10^{-12} , maka dalam bejana ada $9,82 \times 10^8$ buah atom ^{14}C . Berdasarkan data ini, maka aktivitas atau jumlah atom ^{14}C yang melakukan peluruhan dalam bejana dapat dihitung menggunakan persamaan (3-4) sebagai berikut:

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

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, maka usia sampel arkeologi tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan (7-1) sebagai berikut:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A_t} = \frac{1}{1,21 \times 10^{-4} / \text{tahun}} \ln \frac{3,76 \times 10^{-3} \text{ dps}}{2,31 \times 10^{-3} \text{ dps}} = 3.920 \text{ tahun}$$

Jika usia fosil dinyatakan dalam satuan kelipatan umur paro ^{14}C (n), dimana $n = t/T_{1/2}$, maka persamaan (7-1) dapat ditulis dalam bentuk :

$$A_t = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

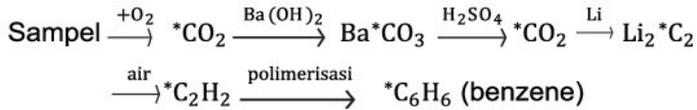
Karena perbandingan massa dari $^{14}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ dalam atmosfer bumi cenderung konstan sepanjang waktu dengan nisbah $\approx 10^{-12}$, maka semua makhluk hidup baik tanaman maupun hewan jika dianalisis akan memberikan data yang konstan mengenai kandungan ^{14}C di dalam tubuhnya [40]. 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 praktek adalah nilai rata-rata yang berkisar antara $(15,8 \pm 0,3)$ dpm/gram dari total C [11]. 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 carbon.

Dengan mengambil nilai rata-rata disintegrasi spesifik untuk sampel C ($A_0 = 15,8$ dpm/gram), maka persamaan (7-1) dapat ditulis menjadi:

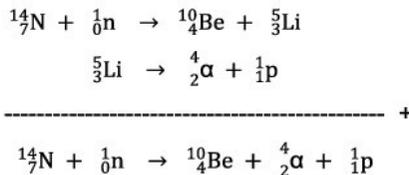
$$A_t = 15,8 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (7-2)$$

dengan A_t adalah aktivitas ^{14}C dalam sampel organik yang diukur setelah n kali umur paro ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ tahun). Berdasarkan persamaan tadi, usia fosil cukup dinyatakan dengan n kali 5730 tahun. Sebagai contoh, potongan kain dari karung yang ditemukan di sebuah gua kuno, ketika dianalisis kandungan ^{14}C nya pada 1990 memberikan data hasil cacahan sebesar 11,1 dpm. Dengan memasukkan nilai itu ke persamaan (7-2) akan diperoleh nilai $n = 0,509$. Dari sini dapat disimpulkan bahwa sampel tadi telah bertahan atau berusia selama $t = 0,509 \times 5730$ tahun atau 2919 tahun terhitung sejak sebelum 1990. Dengan kata lain, sampel tersebut dibuat kira-kira pada 930 Sebelum Masehi.

Pencacahan ^{14}C dapat juga dilakukan dalam bentuk senyawa benzene. Untuk keperluan ini, sampel arkeologi yang mengandung bahan-bahan organik akan menjalani proses dengan perlakuan sebagai berikut [11]:



Selain memanfaatkan keberadaan radionuklida kosmogenik ^{14}C , penanggalan arkeologi dapat juga dilakukan dengan memanfaatkan keberadaan radionuklida kosmogenik jenis lainnya, terutama yang saat ini banyak dimanfaatkan adalah beryllium-10 (^{10}Be) dan aluminium-26 (^{26}Al). Keduanya disukai oleh para ilmuwan karena memiliki umur paro yang relatif panjang [82]. 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 ^{17}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 menghasilkan partikel alfa atau inti atom helium (He) dan proton atau inti atom hidrogen (H). Proses pembentukan inti ^{10}Be tersebut adalah seperti diilustrasikan pada Gambar 7.2. Prosesnya dapat ditulis dalam bentuk persamaan reaksi nuklir sebagai berikut [75]:



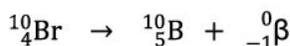
Selain berlangsung di atmosfer, pembentukan radionuklida kosmogenik ^{10}Be juga berlangsung di permukaan bumi [75]. Radionuklida ini memiliki daya tarik bagi ilmuwan karena potensinya sebagai perunut di lingkungan yang dapat dipakai dalam studi geologi, arkeologi, glasiologi dan oseanografi. Pengendapan ^{10}Be di permukaan bumi bergantung terutama 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

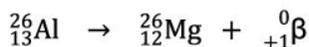
Penanggalan radiokarbon telah digunakan di beberapa negara untuk mendata usia temua-temuan arkeologi. Berbagai temuan sejarah dan arkeologi berhasil didata dan diketahui usia maupun tahun pembuatannya menggunakan teknik ini. Banyak bukti mengungkapkan bahwa manusia purba dari generasi ke generasi memanfaatkan 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 (AS), penanggalan radiokarbon telah dipakai untuk menentukan usia benda arkeologi berupa 300 pasang sandal bertali ditunen yang 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 [77]. Taimyr, fosil

terkubur. Diduga sejak empat juta tahun silam, tanah, batu karang, dan tulang fosil terkubur di dalam gua tersebut. Berdasarkan hasil penanggalan terhadap fosil yang telah terkubur sejak empat juta tahun silam tadi, maka 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 [75]. Kedua jenis radionuklida itu ditemukan pada permukaan karang dan butiran-butiran kwarsa yang terkubur bersamaan dan ditemukan berdekatan dengan fosil di gua Sterkfontein. Begitu karang terkubur, maka pembentukan kedua jenis radionuklida itu langsung berhenti. Selanjutnya, karena bersifat radioaktif, keduanya melakukan proses peluruhan inti sehingga jumlahnya terus berkurang seiring dengan perjalanan waktu. Radionuklida ^{10}Be meluruh sambil memancarkan elektron atau sinar beta negatif menghasilkan inti baru boron-10 (^{10}B) yang stabil dengan proses nuklir untuk peluruhannya adalah sebagai berikut:



Sedang 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 AS, penanggalan radiokarbon telah dipakai untuk memperkirakan saat terbentuknya Danau Kawah di Oregon [77]. 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 adalah 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 tadi terbentuk kira-kira 6.400 tahun lalu.

Penanggalan radiokarbon juga dapat dilakukan melalui pengukuran ^{14}C dalam arang sisa pengapian manusia purba [77]. Metode ini telah digunakan di Perancis untuk mengetahui usia lukisan peninggalan manusia purba di gua Lascaux, di departemen Dordogne. Di dalam gua yang terbentuk sejak zaman Paleolitik itu terdapat lukisan berwarna yang terdiri atas berbagai jenis hewan dari zaman batu. 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 sama seperti dalam mengungkap misteri lukisan di gua Lascaux di Perancis, pengukuran kadar ^{14}C dalam sampel arang sisa pengapian manusia purba juga telah dipakai untuk mengungkap misteri bangunan purba di Wiltshire, 13 kilometer barat laut Salisbury di Inggris [77]. Bangunan batu besar bernama *Stonehenge* dari zaman Neolitik itu masih menyimpan sejumlah misteri.

Terdapat perbedaan pendapat mengenai usia sebenarnya lingkaran batu *Stonehenge*, tetapi kebanyakan arkeolog memperkirakan

bahwa bangunan tersebut didirikan antara 3.000 SM hingga 2.000 SM. Terkait dengan *Stonehenge*, 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 [77]. 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 pemukiman manusia purba di danau Pickering di Yorkshire, telah didata menggunakan penanggalan radiokarbon dan diketahui telah berumur sekitar 9.500 tahun.

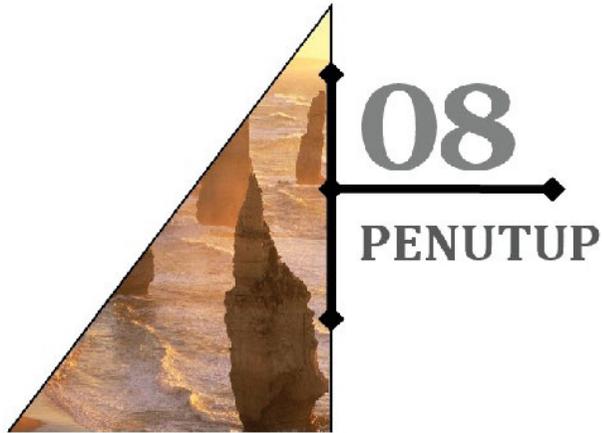
7.4. Manuskrip Tua

Menurut riwayat, kitab suci al-Qur'an bagi umat Islam diturunkan Kepada Nabi Muhammad Sallallaahu'alaihiwasallam (SAW) sejak 610 hingga 632 Masehi. Penulisan wahyu dari Allah Subhaanahuwata'aala (SWT) telah dilakukan oleh para sahabat yang hidup dan bertemu langsung dengan Nabi. 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 [83].

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 [11]. Gulungan Laut Mati adalah manuskrip Yahudi kuno, yang kebanyakan 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 tingkat kerusakan. Bersamaan dengan semakin banyaknya gua yang diperiksa, ditemukan ribuan gulungan dan fragmen lainnya. Manuskrip-manuskrip sangat terkenal yang ditemukan di Laut Mati telah didata berdasarkan pada 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 [11].

7.5. Fenomena Gunung Kapur

Dalam kehidupan sehari-hari kita mengenal dan menemui berbagai macam gua yang menakjubkan, terutama karena rahasia yang seringkali menyelubungi gua tersebut. Di dalamnya, para peneliti bisa menemukan sebuah ruangan yang dikelilingi batu-batu atau ruangan menakjubkan yang dihiasi dengan seni pahat alamiah dengan keindahan tidak kalah dibanding hasil pahatan manusia. Para pengunjung gua batu kapur terutama tertarik pada berbagai bentuk kotoran gua yang mirip patung dan telah 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 menggelayut dari atap, tiang-tiang kokoh yang muncul dari bawah lantai, air terjun yang membeku, serta keanehan-keanehan lainnya [86].



08

PENUTUP

Dalam menjalani kehidupan di muka planet Bumi ini, baik disadari maupun tidak, manusia selalu berinteraksi dengan berbagai jenis radionuklida beserta radiasi yang dipancarkannya. Berbagai macam radionuklida primordial yang dapat ditemukan di berbagai 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 beserta radiasi yang dipancarkannya bukanlah barang asing bagi kehidupan. Radionuklida alam itu ada di berbagai tempat, dan paparan radiasinya dapat ditemui di manapun manusia berada. Radionuklida beserta radiasi yang dipancarkannya merupakan bagian dari kehidupan dan manusia sudah bersinggungan dengannya sejak pertama kali hadir di dunia ini. Bahkan radionuklida alamiah itu sudah menjadi bagian dari penyusun tubuh manusia sejak awal kelahirannya. Manusia tidak mungkin dapat menghindarkan diri dari bersentuhan dengan radionuklida alamiah ini.

asumsi-asumsi yang sulit dibuktikan, melainkan data terukur dengan akurasi tinggi yang dapat dibuktikan secara ilmiah di laboratorium.

Selain bermanfaat untuk sudi 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 thermoluminesensi (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 pengukur 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 dipakai sebagai koreksi terhadap sejarah awal nenek moyang manusia.

DAFTAR PUSTAKA

1. Haramundanis K. Penelaahan tentang jagad raya. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 1-12.
2. Bacon DH, Seymour PA. Mechanical history of the universe. London: Philip Wilson Publishing Ltd; 2003.
3. Santoso RSI. Kapita selecta sejarah perkembangan ilmu pengetahuan. Jakarta: Sinar Hudaya;1977.
4. Goldstein B. Copernicus and the origin of his heliocentric system. University of Pittsburgh; 2002.
5. Chiappini C. The formation and evolution of the Milkyway. American Scientist. 2001; Nov./Dec.: 506-515.
6. Anonim. Penelaahan tentang bumi. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 2. Jakarta: Grolier International Inc./PT Widyadara,1997: hal. 204-211.
7. Parkinson CL, Ward A, King MD, editors. Earth science reference handbook: A guide to NASA's earth science program and earth observing satellite missions. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration; 2006.
8. Quirke TT. Lapisan kerak bumi. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 2. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 212-220.
9. Branley FM. Bumi. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1. Jakarta: Grolier International Inc./ P.T. Widyadara, 1997; hal. 97-105.
10. Asteroids and dinosaurs: Unexpected twists and an unfinished story. Berkeley: The University of California Museum of Paleontology and the Regents of the University of California; 2007.

11. Arnikar HJ. Essentials of nuclear chemistry. 4th ed. New Delhi: New Age International (P) Limited Publishers; 1996.
12. Friedlander G. Nuclear and radiochemistry. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 1981.
13. Krane KS. Fisika modern. Terjemahan oleh HJ Wospakrik & S Niksolihin. Salemba 4, Jakarta 10430: Penerbit Universitas Indonesia; 1992.
14. Wospakrik HJ. Dari atomos hingga quark. Jakarta 12210: Penerbit Universitas Atma Jaya/Kepustakaan Populer Gramedia; Mei 2005.
15. Young HD, Freedman RA. University physics. 9th ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company; 1998.
16. Standen A. Daftar berkala. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 4. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara,1997; hal. 139-161.
17. Kaplan I. Nuclear physics. 2nd ed. London: Addison-Wesley Publishing Company; 1979.
18. Sutton C. Ninety years around the atom. New Scientist. 1987; January 8: 49-53.
19. Halliday D, Resnic R. Fisika modern. Alih bahasa oleh P. Silaban. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga; 1990.
20. Taylor JR, Zafiratos CD. Modern physics for scientist and engineers. New Jersey: Prentice Hall; 1991.
21. Gautreau R, Savin W. Fisika modern. Terjemahan oleh Hans J. Wospakirk. Jakarta 10430: Penerbit Erlangga; 1995.
22. Cohen BL. Concept of nuclear physics. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd; 1982.
23. Balchin J. Quantum leaps, 100 ilmuwan besar paling berpengaruh di dunia. Jakarta Selatan 12520: Ufuk Press; Maret 2012.
24. Walker FW. Nuclides and isotopes. 14th ed. California: GE Nuclear Energy; 1989.

25. Amirudin A. Kimia inti dan radiokimia. Jakarta: PDIN-BATAN; 2009.
26. Glosarium Ilmu dan teknologi nuklir. Cet. ke-3. Jakarta: BATAN; 2009.
27. Radiasi dalam bahasa sehari-hari. Jakarta: BATAN; Januari 1996.
28. Cook JE. Environmental radiation and radioactivity. Australia: Australian School of Nuclear Technology; 1986.
29. Aryawardhana W. Radioekologi. Yogyakarta: Penerbit Andi; 1996.
30. A brief history of radiation. Los Alamos Science. 1995; Number 23: 116-123.
31. Birch B. Marie Curie. Alih bahasa oleh Alex Tri Kantjono Widodo. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama; 1993.
32. Wilopo AC, editor. Seabad pemenang hadiah nobel fisika. Jakarta: Abdi Tandur; 2002.
33. 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. New York: United Nations; 2000.
34. Hipkin J. Payter RA. Radiation exposures to the workplaces from natural occurring radioactivity in industrial processes. Rad. Prot. Dosim. 1991; No. 36: 96-100.
35. Fujitaka K. Cosmic radiation. Japan: NIRS; 4-9-1 Anagawa, Inaga, Chiba 263-8555
36. Suprpto. Granit sumber uranium. Buletin BATAN. 1991; Th. XII (3): 14-18.
37. Knief RA. Nuclear energy technology. Washington: Hemisphere Publishing Corporation; 1981.
38. Tsoulfanidis N. Measurement and detection of radiation. New York: Hemisphere Publishing Corporation; 1983.
39. Martin A, Harbinson SA. An introduction to radiation protection. 3rd ed. London: Chapman and Hall; 1986.

40. Chember H, Johnson TE. Introduction of health physics. 4th ed. New York: Pergamon Press; 2009.
41. Wilson CV. Sinar-sinar kosmos. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1. Jakarta: Grolier International/P.T. Widyadara, 1997; hal. 223-229.
42. Cosmic rays, Spatium. 2003; No. 11. International Space Science Institute.
43. White OR. Matahari. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 65-78.
44. Dunai TJ. Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences. Cambridge University Press; 2010.
45. Darvill CM. Cosmogenic nuclide analysis, Geomorphological Techniques, Chap. 4, Sec. 2.10, British Society for Geomorphology; 2013.
46. Libby WF. Pendataan radiocarbon. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 10. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 152-157.
47. Wilson JT. Lempeng tektonik. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 2. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 221-229.
48. Blyth FGH, de Freitas MH. Geology for engineers. Burlington MA 01803: Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House; 1984.
49. Field GB. Asal mula jagad raya. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 1. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 13-16.
50. Darmawan D. Lecture notes: astrofisika (FIS-239), Program Studi Fisika FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta. Tersedia di: <http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/pendidikan/denny-darmawan-ssimsc/modulastrofisikaupload.pdf>, dikunjungi: 20 Maret 2017.

51. Supelli K. Kosmologi: mengenali alam semesta. Makalah disampaikan dalam ceramah ilmiah di LIPI untuk siswa-siswi Sekolah Lanjutan Tingkat Atas. Tersedia di: <https://arusbawah20.wordpress.com/2010/07/24/kosmologi-mengenali-alam-semesta/>, dikunjungi: 20 Maret 2017.
52. Setiawan, S. Gempita tarian kosmos. Yogyakarta: Penerbit Andi Offset; 1994.
53. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. Cosmic background explorer. United Kingdom: Nature Publishing Group and Institute of Physics Publishing; 2001.
54. Anderson DL. Theory of the earth. United Kingdom: Blackwell Scientific Publications; 1989.
55. Torsvik TH, Cocks LRM. Gondwana from top to base in space and time. Gondwana Research. 2013; 24: 999–1030.
56. Skala waktu geologi. Dalam: Bernard SC, Lynn GB, Joseph JJ, editor. Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 3, Jakarta: Grolier International Inc./ P.T. Widyadara; 1997, hal. 187-192.
57. Newman WL. Geologic time, U.S. Geological Survey. Federal Center Denver: Information Services Box 25286.
58. Rozamski K, Froehlich K. Radioactivity and earth Sciences : understanding the natural environment. IAEA Bulletin. 1996; 38 (2): 9-15.
59. Gradstein FM, Ogg JG, van Kranendon M. On the geologic time scale 2008. Tersedia di: <http://www.geo.arizona.edu/geo3xx/geo302/readings/TimeScale-gradstein.pdf>, dikunjungi: 20 Maret 2017.
60. Uranium/lead dating provides most accurate date yet for earth's largest extinction. Berkeley: Phys Org; 2004.
61. Cross A, Jaireth S, Huston D, Skirrow R. Chemical dating of uraninite to encourage explorers. Ausgeo News. 2012; Issue 106.

62. Debaene G. Uranium-series dating of Marly sediments: Application To Jaroszów Fossil Lake (SW Poland). *Geochronometria, Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology*. 2003; Vol. 22: 15-26,
63. Krymsky RS, Macambira MJB, Lafon JM, Estumano GS. Uranium-lead dating method at the Pará-Iso Isotope Geology Laboratory, UFPA, Belém – Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*. 2007; 79(1): 115-128.
64. Quamrul AQ, Galor O. The “Out of Africa” Hypothesis, Human Genetic Diversity, and Comparative Economic Development. 2012; IZA Discussion Paper No. 6330. Tersedia di: <http://ftp.iza.org/dp6330.pdf>, dikunjungi: 20 Maret 2017.
65. Anatole A, Klyosov AA, Rozhanskii IL. Re-examining the “Out of Africa” theory and the origin of Europeoids (Caucasoids) in light of DNA genealogy. *Advances in Anthropology*. 2012; 2(2): 80-86.
66. Dimitrova C. Pottery production in ancient Greece. In: *Geoarchaeology and Archaeomineralogy*. Eds. Kostov RI, Gaydarska B, Gurova M. Proceedings of the International Conference, Sofia; 2008: 108-110.
67. Historic England, Archaeological and historic pottery production sites (October 2015). Tersedia di: <https://www.historicengland.org.uk/advice/technical-advice/archaeological-science/>, dikunjungi: 20 Maret 2017.
68. Delgado A. Basic concepts of thermoluminescence. *Personnal Thermoluminescence Dosimetry*. Ed. M. Oberhofer. Luxembourg: Report EUR 16 277 EN; 1995: 47-69.
69. Hufton AP. Editor. *Practical aspect of thermoluminescence dosimetry*. England: The Hospital Physicists’ Association; 1984.
70. Furetta C. TL materials and their properties. *Personnal Thermoluminescence Dosimetry*; Ed. M. Oberhofer. Luxembourg: Report EUR 16 277 EN; 1995: 71-106.

71. Scharmann A. Thermoluminescence dosimetry – historical review, status quo and perspective. *Personnal Thermoluminescence Dosimetry*; Ed M. Oberhofer. Luxembourg: Report EUR 16 277 EN; 1995: 1-19.
72. McKinlay, Thermoluminescence dosimetry. *Medical Physics Handbooks 5*. Bristol: Adam Hilger Ltd; 1981.
73. Nieto JA. Luminescence dosimetry: theory and applications. Mexico DF: Derechos Reselvados; 1990.
74. Mahesh K. Thermoluminescence in solids and its applications. United Kingdong: Nuclear Technology Publishing; 1989.
75. Yigal SH. Editor. Thermoluminescence and thermoluminescent dosimetry volume III. Florida: CRC Press Inc; 1983.
76. Ingpen R, Wilkinson P. *Encyclopedia of ideas that changed the world, the greatest discoveries and inventions of human history*. London: A Dragon's World Book; 1995.
77. Hajdas I. Radiokarbon dating and its applications in quaternary studies. *Eiszeitalter and Gegenwart Quaternary Science Journal*. 2008; 57(1–2): 2–24.
78. Libby WF. *History of radiocarbon dating*. Los Angeles: Department of Chemistry and Institute of Geophysics, University of California.
79. Libby WF. Radiocarbon dating nobel lecture. December 12, 1960, tersedia di: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1960/libby-lecture.pdf, dikunjungi: 18 Juni 2015.
80. Taylor RE. Radiocarbon dating: the continuing revolution. *Evolusionary Anthropology, Issues, News and Reviews*. 2005. Tersedia di: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/evan.1360040507/abstract>, dikunjungi: 18 Juni 2015.
81. BBC News. Oldest noodles unearthed in China. Tersedia di: <http://news.bbc.uk/go/pr/fr/-/1/hi/sci/tech/4335160.stm>. Published: 2005/10/12 17:29:26 GMT, dikunjungi: 18 Juni 2015.

82. University of Birmingham, Birmingham Qur'an manuscript dated among the oldest in the world. Tersedia di: <http://www.birmingham.ac.uk/news/latest/2015/07/quran-manuscript-22-07-15.aspx>, dikunjungi: 23 Maret 2017.
83. A'zami MM., the history of the Qur'anic text from revelation to compilation. England: UK Islamic Academy Leicester. Tersedia di: http://islamicbulletin.org/free_downloads/quran/history_of_quranic_text.pdf, dikunjungi: 23 Maret 2017.
84. Reynolds GS. Editor. New perspectives on the qur'an, the Qur'an in its historical context 2. London and New York: Routledge Taylor & Francis Group. Tersedia di: <https://serdargunes.files.wordpress.com/2008/05/reynolds-the-quran-in-its-historical-context-2.pdf>, dikunjungi: 23 Maret 2017.
85. Lobeck AK. Gua. Dalam: Ilmu Pengetahuan Populer Vol. 3. Jakarta: Grolier International Inc./P.T. Widyadara, 1997; hal. 2-12.
86. White WB. Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*. 2013; 69(1): 76–93.
87. Pacton M, Breitenbach SFM, Lechleitner FA, et.al. The role of microorganisms in the formation of a stalactite in Botovskaya cave, Siberia – Paleoenvironmental Implications. *Biogeosciences*. 2013; 10: 6115–6130.
88. Satrio. Penentuan umur stalagmite gua njirak tenggalek jawa timur dengan ¹⁴C. *Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Jakarta: P3TIR-BATAN; 2003.

INDEKS

A

- aktivitas radionuklida 6, 50, 51, 108, 140
- alba Fedeli 132
- angin matahari 62
- argon-40, ^{40}Ar 33, 81
- arkeolog 112, 115-117, 125, 129, 139
- arkeologi 6-8, 59, 68, 98, 101-102, 106-118, 120-122, 124-127, 139
- atom 4, 6, 9-23, 25-26, 29, 35, 38-47, 62, 65-69, 82-84, 86, 90, 92, 99-100, 107, 120-123, 142
- atom radioaktif 6, 12, 45, 83

B

- batuan beku 37, 83-84, 88, 90
- becquerel, Antoine Henry 57
- birmingham 131, 148
- boltwood, BB. 5, 85

C

- cahaya kutub 63
- cahaya TL 101-102, 106, 107
- Chadwick, Sir James 17
- carbon-12, ^{12}C 67
- carbon-14, ^{14}C 7, 65-66
- China 112-113, 126, 147
- Curie, Marie 30-32, 143
- Curie, Pierre 30-32

D

- Dalton, John 10
- Demokritos 9
- dendrokronologi 80
- deret actinium 54, 56
- deret peluruhan 7, 51, 89

deret thorium 52, 54
deret uranium 53-54, 111

E

elektron 11-16, 18-22, 40-46, 62-65, 99-101, 107, 127
elektron orbital 42
elektroskop 30-31, 57
Era Azoikum 77
Era Kenozoikum 78
Era Mesozoikum 77=78
Era Paleozoikum 77-78
Ethiopia 93-95

F

fenomena TL 99
film fotografi 27-30
fisika nuklir 5, 18, 66, 140, 157
fluoresensi 27, 38

G

garam uranium 27-29
gas radon, ^{222}Rn 32, 34, 38, 54, 108
gas thoron, ^{220}Rn 34
gejala radioaktivitas 26, 31-32, 35, 39
geologi 3-7, 37-38, 54, 57, 72, 76-77, 79-85, 87, 89-91, 93, 98, 102,
115, 116, 124, 135, 138-139, 145
Gobekli Tepe 125-126
Gondwana 74, 145
Gua Sterkfontein 127-128
Gulungan Laut Mati 132

H

hamburan partikel alfa 12, 14
hipotesa proton-elektron 16

I

intensitas tl 100, 106-107

inti atom 6, 12-16, 18-21, 25-26, 29, 35, 38-45, 62, 65-66, 68, 83-84,
122-123
inti bumi 74-75
isobar 25, 41, 43
isoton 25
isotop 21-26, 37, 54, 67-68, 84-85, 89, 92

J

jam geologi 6-7, 38, 81, 83-84, 93, 138
jam kalium-argon 90-91

K

kalium-40, ^{40}K 33, 81
kalium-argon 89
kamar pengionan 57-58
kerak bumi 3, 6, 24, 34, 37, 71, 73, 75, 82-84, 137, 141
keramik 97-98, 103, 111-112
komponen keras 63-64
komponen lunak 63-64
konstanta peluruhan, λ 47, 81, 88, 118
kosmologi 72-73, 145
kulit atom 15, 18, 20

L

laboratorium alam 6, 66, 140
Laurasia 74
ledakan supernova 61
Letusan Besar 72-73
Libby, Willard F. 116
Litosfer 73

M

masa Kriptozoik 33, 37
medan magnet bumi 35, 60-62, 66, 124
Mesir 112-113, 125, 127, 131
model atom 12-14
model atom Rutherford 14-15

model atom Rutherford-Bohr 15
model atom Thomson 12-13

N

Neutron 16-22, 24, 25, 39, 41-44, 64-65, 67, 122
nomor atom 18-22, 41, 44-45
nomor massa 18-20, 41
NORM 34
nukleon 18, 39, 44, 64
nuklida 22, 25-26
nuklida stabil 25

O

Out of Africa 95, 146

P

Pakistan 126-127
Paleoantropolog 116, 139
paleomagnetism 80
partikel alfa 12-14, 17, 40, 44, 62-63, 110, 122
partikel sub-atomik 62, 65
peluruhan 6-7, 26, 34, 38-39, 41-43, 46-51, 54-56, 66-68, 70, 81-90,
92-94, 103, 116, 118-120, 127-128, 138
peluruhan radionuklida 6-7, 49-50, 82-83, 85-89, 94, 103, 116, 127
penanggalan arkeologi 7, 101, 106, 114, 116, 122
penanggalan fosil 116, 127
penanggalan geologi 6, 81, 85, 89, 91, 98, 138
penanggalan kalium-argon 89
penanggalan radiocarbon 119
penanggalan radiometri 81
penanggalan stalaktit 8
penanggalan tembikar 6, 8, 59, 113
penanggalan TL 8, 101-102, 106, 108-109, 113
penanggalan uranium-timbal 82
pitchblende 31
polonium, Po 32
positron 42-43, 45, 128
proton 16-22, 24, 35, 39-44, 62-65, 67, 122-123

R

- radiasi alfa 38, 44, 104-105
- radiasi beta 38, 41-42, 68
- radiasi gamma 17, 38
- radiasi kosmis 7, 35, 59, 60-67, 111, 112-124, 128, 137
- radiasi kosmis galaksi 61
- radiasi kosmis primer 35, 60, 62-63, 65-67
- radiasi kosmis sekunder 35, 63-64, 66, 122
- radiasi pengion 39, 57, 68, 99
- radioactive dating* 70, 138
- radioaktivitas 26, 31-32, 35, 39, 81-82
- radiogeologi 38
- radioisotop 25, 66
- radiocarbon 7-8, 66, 70, 116-118, 124-132, 134, 139.
- radionuklida 6-8, 26-27, 31-35, 38-41, 43-45, 47-54, 57-59, 65, 68-70, 81-90, 94, 98-99, 102-105, 108-109, 111, 114, 116, 118, 122-123, 127-128, 132, 137-140
- radionuklida alamiah 31, 33-35, 58, 81, 84, 103-105, 111, 137-138, 140
- radionuklida induk 81
- radionuklida kosmogenik 7, 35, 59, 65, 69, 116, 122-123, 127-128, 137, 139-140
- radionuklida primordial 6-8, 32-33, 35, 38, 57, 59, 81-83, 85-87, 98-99, 102, 108, 114, 137-139
- radium, Ra 32, 53
- radon-222, ²²²Rn 32, 38
- reaksi nuklir 22, 35, 58, 65, 66, 122-123
- Rutherford, Ernest 12-16, 84

S

- sabuk radiasi 62
- sampel arkeologi 68, 107-110, 117, 120-121, 127
- satuan massa atom, sma 19, 39-40
- sedimentasi 75, 84-85, 92, 126
- sejarah bumi 3, 5, 71, 76, 79-80, 82-83, 86, 183
- sinar alfa 40, 46, 104-104, 108, 111
- sinar beta 33, 104-105, 108-111, 128

sinar gamma 17, 40, 45-46, 104
sinar radioaktif 31, 40
sinar-X 11, 27-27, 44, 46, 57-58, 63
skala waktu geologi 5, 76-77, 81-82
spektrograf massa 20, 23
stalakmit 8, 133-135
Stonehenge 129
struktur atom 11
struktur inti atom 21, 29, 35

T

Tabel periodik 44
teknologi nuklir 143
tembikar 6-8, 59, 97-99, 101-104, 106-107, 109-113, 139
teori jagad raya 1
Thomson, Joseph J. 11
thermoluminesensi, TL 99, 103
thorium, Th 30, 37, 52, 54-55, 93-94, 104-105, 108-109, 111

U

umur absolut 79, 81
umur paro, $T_{1/2}$ 33-34, 38, 44, 48, 68, 81-82, 89, 120-123, 139
umur relatif 79
unsur radioaktif 5-7, 32, 37, 43, 45, 65, 84, 103
unsur radioaktif alamiah 5, 6
uranium, U 20, 27-29, 37-38, 51, 53-54, 57, 84-85, 89, 93, 94, 104-105, 109, 111, 143
uranium-235, U-235 81
uranium-238, U-238 81
usia bumi 91

V

varve 80

W

waktu geologi 1, 9, 16, 111, 132, 133

Y

Yunani purba 1, 9, 16, 111, 132, 133

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. Meraih jabatan fungsional tertinggi sebagai Ahli Peneliti Utama bidang fisika nuklir sejak Desember 2002.

Beberapa pendidikan tambahan/spesialisasi yang pernah diperolehnya adalah: *Radiation Protection Course* di ANSTO (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 Kualalumpur (Malaysia 1993).

Mewakili BATAN untuk mengikuti pembahasan buku *Basic Safety Standars* (BSS) di Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) di Vienna (Austria 1994). Ditunjuk BATAN 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 Cina tahun 2006. Sebagai 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. Banyak menulis artikel ilmiah populer dan ilmiah semipopuler di berbagai media cetak nasional. Pernah menjadi dosen tidak tetap pada jurusan teknik mesin, teknik elektro dan teknik sipil Sekolah Tinggi Teknik (STT)-

PLN di Jakarta. 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**

Bahan-bahan radioaktif yang terbentuk secara alamiah atau lebih sering dikenal dengan sebutan radionuklida alamiah telah ada bersamaan dengan kelahiran alam semesta. Secara garis besar, radionuklida alamiah itu dapat dikelompokkan menjadi dua bergantung pada tempat dimana bahan itu ditemukan. Kelompok pertama disebut sebagai radionuklida primordial yang terbentuk secara alamiah dan ditemukan di dalam perut bumi. Kelompok kedua disebut sebagai radionuklida kosmogenik yang terbentuk sebagai hasil interaksi antara radiasi kosmis dari ruang angkasa dengan atom-atom penyusun atmosfer bumi.

Bagi para ilmuwan, keberadaan radionuklida alamiah itu ternyata memberi manfaat yang sangat besar bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Interaksi radionuklida alamiah dengan berbagai komponen di alam semesta ini telah menghasilkan suatu laboratorium alam bagi para peneliti fisika nuklir. Radionuklida primordial yang ditemukan pada bagian kulit bumi telah dimanfaatkan untuk studi penanggalan dalam bidang geologi dan arkeologi, sedang radionuklida kosmogenik telah dimanfaatkan untuk penanggalan terhadap temuan-temuan fosil dan barang-barang bersejarah di bidang arkeologi.

Buku yang sedang ada di tangan pembaca 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.

