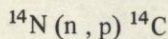


Penyebaran Radiokarbon di Alam dan Tentumur Radiokarbon

oleh
DR. ZAINI BIN HAMZAH
Unit Tenaga Nuklear
PUSPATI

Penyebaran Radiokarbon

Neutron dari sinar kosmik bertindakbalas dengan nitrogen di ruang angkasa (sebelah) atas menghasilkan karbon 14 (^{14}C). Tindakbalas yang terjadi ialah:



di mana kadar pembentukan ^{14}C adalah kira-kira 2.28 nukleus setiap saat pada keluasan 1 sm. persegi. Jika keadaannya sesuai ^{14}C yang baru terbentuk ini akan mengalami pengoksidaan, menghasilkan $^{14}\text{CO}_2$ (radiokarbon dioksida) yang tersibar di segenap ruang angkasa dengan memberikan kepekatan yang sekata. Kadar pencapaian keseimbangan di antara lapisan stratosfera dan troposfera telah dikaji dengan memerhatikan kepada ^{14}C yang dihasilkan dari letupan senjata nuklear di atmosfera. Karbon dioksida ini akan melakukan pertukaran dan cuba mencapai tahap keseimbangan dengan semua bahan yang mengandungi karbon dipermukaan bumi, misalnya melalui pertukaran kimia dengan bikarbonat di dalam lautan, dan melalui fotosintesis di dalam tumbuhan termasuk plankton. Disebabkan tumbuhan adalah merupakan bahan asas kepada rantai pemakanan haiwan (animal food-chain), maka karbon dioksida di ruang angkasa (atmosfera) ini akan berada dalam keadaan keseimbangan dengan semua benda-benda hidup. Kurang dari 1% dari jumlah ^{14}C ini wujud di dalam benda-benda hidup, manakala bakinya adalah wujud dalam bentuk bikarbonat larut, bahan organik dalam larutan, sedimen dan humas. Ada baiknya jika dinyatakan di sini bahawa air laut dan lautan adalah tidak homogeneous. Kawasan permukaannya mengandungi ^{14}C kurang 4% dari atmosfera dan kawasan kedalaman kurang 17% dari atmosfera. Fosil yang tua atau mendakan karbon mati seperti arang batu, minyak dan batu kapur tidak termasuk di dalam proses pertukaran dan ^{14}C yang dikandunginya telah lama menyusut.

Jika kita beranggapan bahawa kadar pembentukan ^{14}C di udara adalah tetap pada kadarnya sekarang setelah begitu lama berbanding dengan tempohnya (half-life) 5730 + 40 tahun, bolehlah kita katakan bahawa ia telah pun mencapai ketepuan di mana kadar pembentukannya sama dengan kadar penyusutan. Setiap 1 sm. persegi bumi telah mempunyai lebih kurang 8g karbon yang telah mengalami pertukaran dan 2.28 nukleus ^{14}C terbentuk setiap saat pada keluasan ini dan ia tersibar kesemua arah. Keaktifan tentu dari karbon ini adalah lebih kurang 2.28/8 dps untuk setiap gram karbon iaitu 17 dpm untuk setiap gram karbon. Nilai yang diukur nampaknya bersetuju dengan nilai kiraan ini dan buat masa ini diterima nilai yang terbaik sebagai 13.6 dpm/g C yang bersamaan dengan 6 pCi/g¹ karbon.

Tentumur Radiokarbon

Tentumur radiokarbon telah diasaskan oleh W.F. Libby dengan merujuk kepada sebab (reasoning) bahawa ^{14}C di dalam semua benda hidup adalah dalam keseimbangan

dengan karbon di udara dan pertukaran ini akan terhenti bila benda-benda hidup tersebut mati. Dari saat itu, keaktifan tentunya mula berkurang pada kadar yang ditentukan oleh temparuh (half-life) dan hukum penyusutan mudah.

Jika keaktifan tentu dari contoh karbon yang telah mati t tahun yang lalu adalah S_0 (semasa ia mati), maka keaktifan tentunya sekarang adalah

$$S_t = S_0 \exp \left(- \frac{0.693}{5730} t \right)$$

Jadi, umur contoh t akan dapat diketahui jika S_t dan S_0 diketahui. S_t sememangnya boleh diukur, tetapi S_0 tidak boleh ditentukan sekarang. Maka itulah sebabnya dianggap bahawa nilai S_0 sewaktu bahan itu mati sama dengan karbon moden yang mengalami pertukaran iaitu 13.6 dpm/g C.

Satu lagi kesukaran yang lebih nyata di dalam tentumur radiokarbon ini ialah, semakin bertambah umur sesuatu contoh, nilai S_t berkurangan dan menjadi semakin sukar untuk ditentukan dengan tepatnya. Untuk mengurangkan sisihan piawai dari pembilangan (count) adalah perlu untuk membilangnya dalam masa yang panjang (lebih dari 12 jam). Dengan menggunakan teknik moden yang mempunyai bilangan latar belakang yang rendah dan kecekapan yang tinggi serta kestabilan yang tinggi, adalah berkemungkinan kita dapat mengukur sehingga 0.1 dpm/g C di mana ini memberikan 'limit' praktikalnya lebih kurang 40,000 tahun pada umur yang ditentukan

Teknik ini adalah sangat berguna kepada ahli arkeologi dan juga ahli kajibumi yang berminat kepada pemendakan terbaru seperti air batu dan tanah liat yang mana keduanya mengandungi karbon yang boleh ditentukan umurnya misalnya 'grains of pollen'. Benda-benda yang boleh ditentukan umur (*dateable*) termasuklah kayu, papyrus, kapas, bulu kamping, linen, kertas, resin, lilin lebah (*beeswax*), tulang, biji, arang batu dan *vellum*.

Teknik Pembilangan

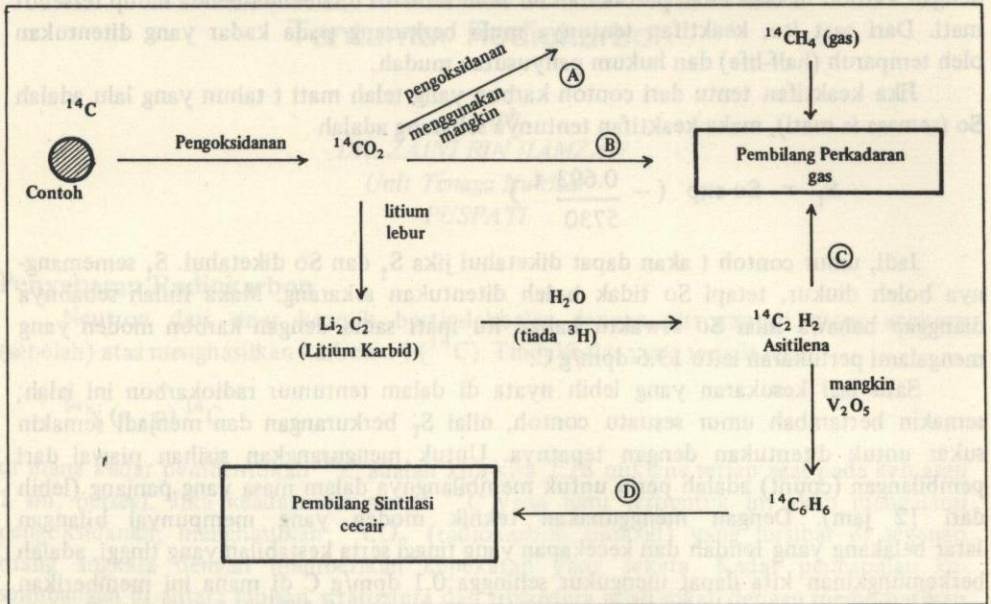
Teknik pembilangan yang dipakai untuk membilang ^{14}C dengan sinar beta ber-tenaga rendah ($E_{\text{max}} = 155.6 \text{ Kev}$) adalah sama ada pembilang perkadaran gas (proportional gas counter) atau pembilang sintilasi cecair (liquid scintillation counter). Kejituan dari kedua-dua teknik adalah saling bersamaan tetapi pembilang sintilasi cecair lebih mengatasi dari segi kebolehnya menampung kuantiti contoh yang agak besar ($\sim 5 \text{ g}$ karbon dalam 6 ml campuran bahan sintilasi) dan pembilang itu tidak perlu dibina khas.

Kaedah penyediaan contoh yang diikuti dapat ditunjukkan dalam Rajah 1.

Dalam langkah A, B, dan C, gas yang terhasil dibilang terus dengan menggunakan pembilang perkadaran gas. Manakala langkah D, benzin yang terhasil dari penukaran asitilin dicampurkan ke dalam bahan sintilasi dan dibilang menggunakan pembilang sintilasi cecair.

Tentukuran piawai (*standard calibration*) untuk tentumur radiokarbon ini boleh dibuat menggunakan hablur asid oksalik yang disediakan dari karbon moden yang mengalami pertukaran (*modern exchangeable carbon*) yang boleh didapati dari *National Bureaus of Standard (NBS), USA*.

Walaupun aktiviti yang dibilang adalah rendah, sekalipun dalam karbon moden, masalah statistik pembilangan dan pengurangan bilangan latar belakang adalah boleh diatasi. Sejak beberapa lama terdapat ketidakpastian terhadap temparuh ^{14}C walaupun sekarang telah diterima sebagai 5730 ± 40 tahun. Telah menjadi kebiasaan mem-



Rajah 1 . Kaedah Penyediaan Contoh.

berikan umur 'conventional' atau 'libby' berasaskan kepada nilai temparuhnya yang lama 5568 tahun (Libby's half-life). Umur akan dinyatakan dalam bentuk 'tahun sebelum sekarang' (*years before the present*) iaitu '*years B.P.*' (1950 A.D.).

Pembentukan sejumlah besar ^{14}C oleh letupan senjata nuklear dan dari reaktor nuklear akan menyebabkan tentumur akan menjadi sukar untuk generasi akan datang. Walau bagaimanapun, ia tidak memberikan masalah kepada tentumur yang dibuat hari ini selagi nilai S_0 adalah berdasarkan kepada karbon pertukaran yang mati sebelum tahun 1950, apabila ujian besar-besaran senjata nuklear bermula. Malahan, nilai 13.6 untuk S_0 adalah merujuk kepada kayu-kayu yang tumbuh hidup dalam lewat kurun kesembilan belas. Ini dapat mengelakkan masalah selanjutnya yang timbul dari fakta yang mengatakan bahawa dalam masa seratus tahun yang kebelakangan ini berlaku pencairan yang berkesan ke atas keaktifan tentu ^{14}C di udara akibat dari pembakaran bahan api fosil mati (^{12}C) seperti minyak dan arang batu. Telah pun dikira bahawa keaktifan tentu ^{14}C sepatutnya telah menurun sebanyak 12% sekarang, tetapi perbandingan di antara tumbuhan sekarang dan sebelum era industri dari pertengahan abad kesembilan belas menunjukkan pengurangan adalah kurang dari 5% sahaja. Perbezaan ini terjadi akibat dari pengambilan yang cepat (*rapid uptake*) karbon dioksida di udara oleh lautan dan penggantinya dari ^{14}C bikarbonat yang larut. Ada bukti yang menunjukkan bahawa pertukaran ini adalah merupakan sebahagian dari pengawalan biokimia oleh karbonik anhidrase atau enzim yang serupa.

Asas andaian yang dibuat untuk tentumur radiokarbon ialah S_0 tinggal tetap untuk jangkamasa yang panjang dan ini adalah bergantung kepada kadar pembentukan ^{14}C yang tetap. Perubahan yang berlaku pada keamatan sinar kosmik dalam masa yang singkat akan memberikan kesalahan yang kecil, tetapi perubahan pusingan (*cyclic changes*) akan memberikan kesalahan hingga 10% untuk jangkamasa kira-kira 10^4 tahun dan boleh menyebabkan perubahan yang sistematik terhadap penentuan umur. Ini

mungkin disebabkan oleh perubahan yang berlaku pada kekuatan medan magnet bumi yang bertindak menapis sinar kosmik. Di samping itu, cuaca mempengaruhi perubahan isipadu, suhu dan pH dari sumber takungan ^{14}C utama (lautan) yang akan menghasilkan sisihan yang sistematik. Berdasarkan kepada sebab-sebab ini berbagai usaha telah dilakukan untuk mencari perkaitan (*correlation*) di antara umur ^{14}C dengan objek lama yang diketahui sejarah umurnya. Bahan-bahan ini mungkin tidak mencukupi, tetapi ianya termasuklah kayu yang diambil dari merata bahagian dari pokok tua yang umurnya boleh ditentukan dengan kaedah pembilangan gelangnya (*dendrochronology*).

Selain dari itu karbon dari *varves*, lapisan sedimen yang terkumpul di bawah tasik (seasaral) dan kayu serta bahan lain dari keranda Firaun yang diketahui umurnya boleh juga digunakan sebagai rujukan.

Untuk julat 0 -2500 tahun kalender nilai kiraan umur dari radiokarbon adalah bersesuaian dengan kalender. Tetapi untuk julat 2500 - 5500 tahun, terdapat sisihan yang menjangkau 20% pada 6000 tahun B.P. Sungguhpun keadaan kompleks ini menimbulkan masalah kepada para penyelidik yang hanya menginginkan umur tetapi sisihan ini memberikan banyak data kepada 'climatologist' dan 'geophysicist' misalnya dari segi kemungkinan perubahan dalam fluk sinar kosmik, medan magnet bumi dan isipadu air yang terekstrak semasa zaman air batu.



Ahli arkeologi boleh menentukan umur yang tepat bahan-bahan jumpaan mereka ini dengan menggunakan teknik tentumur C-14.

Contoh:

Penelitian diperlukan semasa pembersihan dan penyediaan contoh yang akan ditentukan umurnya kerana pencemaran oleh karbon fosil (minyak, lilin, bahan api dari minyak, shellac, bahan kimia dan dawat) akan memberikan umur yang sangat besar. Sebaliknya 'grease' dari jari tangan, habuk rokok dan asap akan memberikan umur yang kecil. Pembuangan humas dan akar-akar kecil adalah mustahak jika pencemaran semulajadi ingin dielakkan. Misalnya, andaikan contoh (spesimen) yang umur sebenarnya melebihi 10^5 tahun dan ditentukan pada praktikalnya tidak aktif. Jika ianya dicemarkan dengan 0.1% karbon moden, ia akan memberikan umur yang berkaitan dengan hanya $0.1 \times 13.6 \text{ dpm/g C}$, iaitu: ~ 57300 tahun. Satu dari misal yang menarik ialah pencemaran biologi yang telah berlaku ke atas contoh yang akan ditentukan umurnya. Semasa penyimpanan (menunggu masa untuk dianalisa) berlaku pertukaran dengan karbon dioksida moden ke dalam contoh basah ini oleh tindakan bakteria. Jadi pencemaran yang menjadi faktor penentu umur, di sini dan bukannya daripada contoh itu sendiri.

Semasa fotosintesis, tumbuhan akan mengalami pertukaran isotop karbon ^{12}C (98.9%), ^{13}C (1.1%) dan ^{14}C mengikut kesan isotop pada kadar yang berbeza-beza. Sebagai hasilnya, aktiviti ^{14}C ini berkurangan (dengan kadar beberapa peratus) di dalam tumbuhan berbanding dengan di udara dan kesan ini berbeza mengikut spesis. Pembetulan boleh dibuat untuk mengetahui pecahan isotop (isotop fractionation) ini dengan mengukur pecahan yang berlaku menggunakan isotop stabil ^{13}C . Pecahan isotop yang kecil tetapi bermakna berlaku semasa pembakaran contoh dan piawai asid okslik.

Penutup

Adalah mustahak untuk diperhatikan bahawa dengan hanya menentukan umur bahan, ahli arkeologi mungkin tidak mendapati maklumat yang dikehendakinya, iaitu tarikh pembuatannya atau kegunaan objek tersebut. Misalnya di dalam satu kawasan di mana kayu adalah terlalu sedikit (akibat penggunaannya di dalam membina bangunan), boleh jadi telah sangat tua semasa ia mula digunakan. Ketidakpastian juga berlaku pada penentuan umur arang batu (charcoal). Biji dan jerami biasanya tidak tahan lama di dalam sekitaran yang tidak dikawal, dan ianya lebih tepat untuk digunakan dalam tentumur.

Lampiran A

Pemungutan Sampel

Sebelum seseorang memutuskan untuk memungut mana-mana sampel, ia haruslah dapat menentukan kaitan di antara sampel dan 'event' yang hendak ditentumkan. Dalam hal ini, ada baiknya kita mengkaji beberapa perkara termasuklah:

- + Apakah "event" yang hendak ditentumkan.
- + Apakah bahan yang mengandungi karbon yang paling sesuai untuk "event" itu.
- + Apakah bahan yang boleh diterima oleh makmal.
- + Apakah bahan yang mungkin ada.
- + Apakah kemungkinan pencemaran yang berlaku ke atas bahan tersebut.
- + Berapa banyakkah bahan tersebut yang diperlukan oleh makmal.
- + Bagaimana sampel harus dipungut dan dibungkus.
- + Apakah langkah pengawasan yang perlu untuk menjaga sampel.
- + Apakah maklumat yang diperlukan oleh makmal mengenai tapak arkeologi dan sampel.

Bekas sampel

Bekas yang paling sesuai untuk menampung sampel adalah beg plastik yang kuat. Jangan menggunakan beg kertas atau kain atau apa saja yang tidak bersih dan kering. Kertas aluminium juga boleh digunakan untuk membungkus sampel.

Label juga harus dibuat pada kertas dan dimasukkan dalam plastik yang kedua. Maklumat penting seperti keterangan, mengenai tapak arkeologi, kedudukan, bahan sampel dan *environment*nya hendaklah dicatat pada kertas tersebut. Satu perkara yang harus diingat, makanan, puntung rokok dan kertas jangan dimasukkan bersama dengan sampel kerana ia mengandungi karbon.

Lampiran B

Banyaknya sampel yang diperlukan

Jadual 1 dalam Lampiran C menggambarkan secara umum banyaknya sampel yang diperlukan untuk analisis. Berat yang dinyatakan di sini adalah merujuk kepada sampel yang tidak ada batu, artifek, akar kayu, pasir dan bendasing yang lain. Berat ini adalah jumlah minima yang diperlukan dan kita digalakkan untuk mengambil kuantiti yang lebih.

Pencemaran

Sebarang karbon yang tidak merupakan juzuk asal dari objek tersebut (sampel) adalah dikira sebagai pencemaran. Umumnya, sampel akan tercemar jika kandungan karbon-14 telah berubah dengan kaedah lain selain dari penyusutan radioaktif. Pencemaran yang biasa ditemui ialah akar tumbuhan, asid kumik dan karbonat.

Asid kumik adalah istilah unsur yang digunakan untuk menerangkan hasil pecahan organik (*organic breakdown products*) dari bahan tumbuhan. Ianya sangat "mobile" di dalam tanah, dan sering berkumpul di dalam struktur porous dari charcoal, kayu dan tulang.

Karbonat pula hadir dalam alam dan boleh mencemarkan semua jenis bahan sampel. Masalah yang biasa ialah pencemaran cengkerang (*shell*) atau karbonat lain ialah batu kapur yang larut di dalam air dan boleh melakukan pertukaran karbon dengan sampel yang kita ingin uji.

Borang permohonan

Sampel yang dipungut mestilah mempunyai maklumat yang cukup untuk kegunaan makmal. Di antara maklumat yang diperlukan ialah:

- + Nama tempat (*site*), kedudukan pada garis bujur dan garis-lintang. Peta boleh disertakan.
- + Keterangan mengenai bahan sampel: sama ada *charcoal*, tulang, cengkerang dan sebagainya. Cuba kenali spesies jika boleh.
- + Keterangan mengenai tempat (*site*), sama ada arkeologi, geologi, kubur, kawasan perkelahan, kawasan berbatu, laut, kawasan berair dan sebagainya.
- + Keadaan sampel semasa dipungut: kering, berair, tertanam, pecah, berkulat dan sebagainya.
- + *Chemical environment*: banjir, batu kapur, klorid, sulfid, perubahan *water table*, pendedahan pada cuaca, air (*hard/soft*).
- + Sama ada sampel ditemui dari galicari atau semula jadi.
- + *Environment* tempat (*site environment*) – *vegetation*, kegunaan tanah.
- + Rajah menunjukkan maklumat terperinci.
- + Hubungan antara sampel dengan 'event' yang dapat difikirkan.
- + Bagaimana sampel dipungut dengan tangan, atau menggunakan alat.
- + Bagaimana rawatan yang telah diberikan kepada sampel.
- + Apakah jenis pencemaran yang mungkin ada.
- + Adakah bahan ini dalam simpanan untuk tentumur yang akan datang.
- + Adakah sebahagian dari sampel ini dihantar ke makmal.

Lampiran C

Jadual 1

OPTIMUM SAMPLE SIZE TO COLLECT

Sample	Weight	Approximate Volume
dry charcoal, burnt wood	10 20 g.	1/2 matchbox
wet charcoal, burnt wood	30 60 g.	1 matchbox
waterlogged wood	50-100 g.	2 matchboxes
clean, dry wood	20-30 g.	1 matchbox
whole shells	50- 100 g.	good handfull
shell fragments	100-200 g.	2 handsfull
dry peat	50-100 g.	small handfull
wet peat	100-200 g.	good handfull
dry organic sediments	100-200 g.	good handfull
wet organic sediments	200-500 g.	2 handsfull
bones	500-1000 g.	2-3 handsfull
bone fragments	1000-2000 g.	1/2 bucket
carbonate nodules calcrete	50-100 g.	small handfull
diffuse carbonate	200-500 g.	2 handsfull
(soil organic matter	1000-5000 g.	special projects only)

Note that these are for fairly clean samples, free of soil, sand, rocks and artifacts. Smaller sizes may be acceptable in some cases, but will often cost more and have lower precision in age. Do not collect samples in matchboxes, but you may use clean hands. When in doubt, consult the laboratory.

If your sample is highly contaminated and/or likely to be older than 20,000 years, collect double the above amounts.