

## **ANALISIS ISOTOP STABIL DALAM PENYELIDIKAN ARKEOLOGI DI MALAYSIA: PRINSIP DAN APLIKASI**

*(STABLE ISOTOPE ANALYSIS IN ARCHAEOLOGICAL RESEARCH IN  
MALAYSIA: PRINCIPLES AND APPLICATIONS)*

**Shaiful Shahidan, Hsiao Mei Goh & Mokhtar Saidin**

### **Abstrak**

---

Analisis isotop stabil merupakan kaedah yang signifikan dalam arkeologi, yang dapat membantu dalam penilaian mengenai diet, migrasi dan adaptasi manusia pada masa lalu. Makalah ini membincangkan prinsip serta aplikasi analisis isotop stabil, dengan penekanan terhadap potensinya dalam kajian arkeologi di Malaysia. Beberapa konsep penting seperti nisbah isotop, fraksionasi dan penggunaan piawaian antarabangsa diperjelaskan. Aplikasi isotop karbon, nitrogen, oksigen, dan strontium diuraikan secara terperinci: isotop karbon membezakan antara pengambilan tumbuhan C3 dan C4, isotop nitrogen menentukan aras trofik serta keseimbangan antara sumber makanan marin dan darat, isotop oksigen menelusuri corak migrasi dan sumber air, manakala isotop strontium mendedahkan asal usul geologi dan corak mobiliti. Potensi penggunaan kaedah ini dalam penyelidikan arkeologi di Malaysia turut diterokai, termasuklah penilaian terhadap kajian terdahulu dan cadangan hala tuju penyelidikan masa hadapan. Dengan menggabungkan analisis isotop stabil, pemahaman yang lebih komprehensif mengenai diet, biologi dan penyesuaian manusia masa lampau di Malaysia dapat dicapai, seterusnya melengkapkan data arkeologi yang konvensional. Cadangan turut dikemukakan untuk membangunkan pangkalan data isotop serantau dan memperluaskan aplikasi teknik isotop pada tinggalan arkeologi dari Semenanjung Malaysia bagi memudahkan kajian perbandingan serta membuka ruang bagi penemuan baharu mengenai cara hidup masyarakat terdahulu di rantau ini.

---

**Kata kunci:** Isotop stabil, arkeologi, Malaysia

### **Abstract**

---

*Stable isotope analysis is a significant method in archaeology that aids in evaluating past human diet, migration, and adaptation. This paper discusses the principles and applications of stable isotope analysis, with a focus on its potential in Malaysian archaeological research. Key concepts such as isotope ratios, fractionation, and the use of international standards are explained. The applications of carbon, nitrogen, oxygen, and strontium isotopes are elaborated in detail: carbon isotopes differentiate between the consumption of C3 and C4 plants, nitrogen isotopes determine trophic levels and the balance between marine and terrestrial food sources, oxygen isotopes trace migration patterns and water sources, while strontium isotopes reveal geological origins and mobility patterns. The potential for applying these methods in Malaysian archaeological research is explored, including an evaluation of previous studies and suggestions for future research directions. By incorporating stable isotope analysis, a more comprehensive understanding of past human diets, biology, and*

*adaptations in Malaysia can be achieved, complementing conventional archaeological data. Recommendations are also made for developing a regional isotopic database and expanding the application of isotope techniques to archaeological remains from Peninsular Malaysia, which would facilitate comparative studies and open new avenues for discoveries about the lifeways of past communities in the region.*

---

**Keywords:** *Stable isotope, archaeology, Malaysia*

## PENGENALAN

Bumi secara amnya dibentuk oleh unsur-unsur dan atom-atom yang berlainan. Antara unsur yang utama di bumi ialah oksigen, karbon dan nitrogen. Setiap unsur ini mempunyai bentuk yang berbeza, berdasarkan kepada berat atom serta mempunyai isotop stabil dan isotop yang tidak stabil. Isotop boleh ditakrifkan sebagai salah satu daripada dua atau lebih bentuk unsur yang mempunyai bilangan proton yang sama (atau dikenali sebagai nombor atom) tetapi bilangan neutron yang berbeza, menghasilkan berat atom yang berbeza (Hoefs 2009). Contohnya, unsur karbon wujud dalam 3 bentuk isotop, iaitu karbon-12 ( $^{12}\text{C}$ ), karbon-13 ( $^{13}\text{C}$ ), dan karbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ).  $^{12}\text{C}$ , yang wujud sebanyak 99 peratus di bumi, memiliki berat atom 12, dengan nukleus yang terdiri daripada 6 proton dan 6 neutron.  $^{13}\text{C}$  pula terdiri daripada 6 proton dan 7 neutron, manakala karbon-14 memiliki 6 proton dan 8 neutron. Dalam konteks  $^{14}\text{C}$ , pada dasarnya ia menjadi terlalu berat untuk bertahan dengan cara yang stabil, maka ia bersifat radioaktif (mengalami pereputan pada kadar yang diketahui) dan tidak stabil. Bentuk  $^{12}\text{C}$  dan  $^{13}\text{C}$  adalah lebih stabil, maka ia tidak berubah dari semasa ke semasa. Oleh sebab itu, ia sesuai sebagai pengesan atau “tracers” dalam sistem biologi.

Sebanyak 300 unsur telah dikenalpasti mempunyai isotop stabil (Hoefs 2009). Unsur-unsur seperti karbon, nitrogen, sulfur, oksigen di dalam tisu manusia atau haiwan adalah diperolehi daripada diet dan pemakanan. Oleh yang demikian, tanda atau “signature” khusus isotop karbon dan nitrogen di dalam tisu menggambarkan makanan yang diambil oleh organisma tersebut. Makalah ini akan berfokus kepada prinsip dan aplikasi isotop stabil, terutamanya isotop karbon, nitrogen, oksigen dan strontium yang sering digunakan dalam penyelidikan arkeologi. Seterusnya, potensi penyelidikan isotop stabil di Malaysia akan diterangkan secara umum.

## SEJARAH PENYELIDIKAN ISOTOP STABIL

Kajian isotop stabil bermula sebagai gabungan bidang kimia, fizik dan geologi. Ia telah dimulakan oleh Nier dan Gulbransen (Nier & Gulbransen 1939), dengan melihat variasi dalam isotop karbon, manakala Craig (1953) telah melihat kepada pembahagian isotop karbon dalam persekitaran. Calvin and Benson (1948) memperincikan kitaran karbon dalam proses fotosintesis, manakala Hatch and Slack (1966) dan Ranson (1960) pula telah menerangkan kepelbagaian aliran fotosintesis, yang dirujuk sebagai C3, C4 dan *Crassulacean Acid Metabolism* (CAM). Idea awal mengenai kajian isotop dalam diet manusia telah diketengahkan oleh Parker (1964) namun begitu aplikasi sebenar telah dimulakan oleh van der Merwe (1982) pada awal tahun 70-an dengan kajian ke atas rangka manusia zaman besi dari Transvaal, Afrika Selatan. Ini seiring dengan perkembangan analisis saintifik, terutamanya dalam kaedah penyahmineralan tulang serta pengekstrakan asid humik dan asid fulvik bagi mendapatkan pentarikhan yang lebih tepat ke atas kolagen tulang manusia. Vogel and Van Der Merwe (1977) turut melanjutkan penelitian dengan kajian terhadap pertanian jagung dan corak pemakanan, berdasarkan tulang manusia dari tapak-tapak di Amerika Utara.

Dalam awal tahun 1980-an, kajian isotop nitrogen telah dimulakan, dengan berfokus kepada kajian kesan paras trofik (*trophic level effects*), terutamanya dalam persekitaran marin (Ambrose & DeNiro 1986; DeNiro & Epstein 1981; DeNiro & Schoeninger 1983; Schoeninger & DeNiro 1984; Sealy et al. 1987; Schober & Molto 2009). Kajian terhadap isotop nitrogen lebih tertumpu kepada cuaca dan persekitaran, namun begitu ia berguna untuk melihat kesan kedua-dua ini kepada tumbuhan, haiwan serta perubahan paras trofik dalam persekitaran daratan dan maritim (Pate 1997).

Ia juga turut membantu dalam memahami proses “weaning”, atau bercerai susu bagi kanak-kanak dalam komuniti prasejarah.

Pada dekad 80-an, satu sub-bidang kajian dalam kimia tulang mula dipelopori secara meluas, terutamanya dalam aspek penyediaan isotop karbon dalam analisis inorganik terhadap apatit tulang. Apatit tulang atau *calcium hydroxyphosphate*,  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{OH}$ , yang secara amnya membentuk 75 peratus dari tulang, sangat terdedah kepada kesan luluhawa dan tindak balas kimia di dalam tanah. Ini mengakibatkan perubahan yang jelas dalam tanda isotopik (*isotopic signature*) yang asal. Namun begitu, perkembangan dan kemajuan dalam prosedur pra-rawatan (*pretreatment*) sampel telah memberikan hasil analisis yang lebih baik dan ini dapat dilihat daripada analisis isotop enamel gigi terhadap sampel-sampel yang berusia jutaan tahun (Ambrose & Krigbaum 2003).

## PRINSIP DAN APLIKASI

### Nisbah Isotop

Dalam atmosfera bumi, nisbah isotop karbon-13 ( $^{13}\text{C}$ ) kepada karbon-12 ( $^{12}\text{C}$ ) adalah tetap, iaitu sekitar 1.1% dan 98.9% masing-masing (Hoefs 2009). Setiap tumbuhan dan haiwan mempunyai nilai nisbah isotop stabil yang tersendiri dan nilai ini akan berpindah dalam rantaian makanan (Schoeninger & Moore 1992). Nilai untuk isotop stabil tidak diberikan dalam nilai absolut atau tetap, tetapi sebagai nilai relatif, atau nisbah. Karbon dan nitrogen dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\delta (\text{‰}) = [\text{R sample} / \text{R standard} - 1] \times 1000$$

Dengan membandingkan nisbah sampel (contohnya: R sampel ialah  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  atau  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) kepada nilai nisbah yang sama daripada piawai antarabangsa yang telah dikenalpasti (R standard), nilai daripada makmal yang berlainan dapat dibandingkan. Nisbah isotop ditulis di dalam nilai  $\delta$  dan dalam notasi “per mil” atau ‰. Nilai positif menunjukkan sampel yang dianalisis mempunyai lebih banyak isotop “berat” daripada standard manakala nilai negatif menunjukkan sampel mempunyai kurang isotop berat berbanding standard.

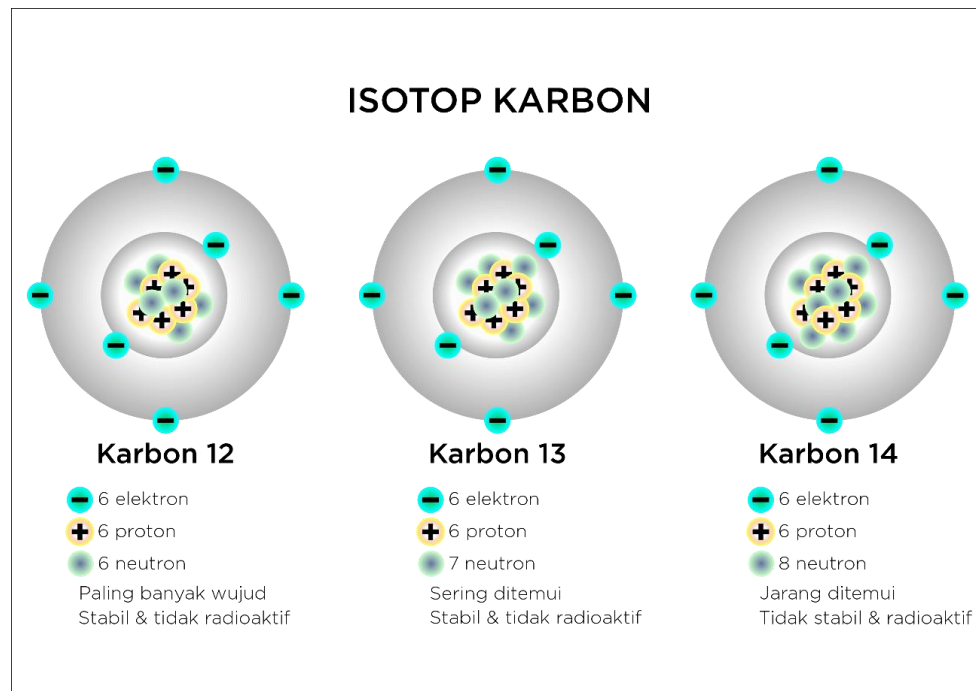
Standard atau piawai antarabangsa yang biasa digunakan untuk komposisi isotop umum diperincikan di dalam Jadual 1.

Jadual 1. Standard antarabangsa yang digunakan untuk komposisi umum isotop hidrogen, karbon, nitrogen, oksigen, strontium dan sulfur (CIAAW 2015; Hoefs 2009)

Unsur	Standard (Piawai)	Singkatan
Hidrogen (H)	Standard Mean Ocean Water	V-SMOW
Karbon (C)	<i>Belemnite americana</i> dari Formasi Cretaceous Peede, South Carolina	V-PDB
Nitrogen (N)	Kandungan nitrogen di dalam udara	$\text{N}_2$ (atm.)
Oksigen (O)	Standard Mean Ocean Water	V-SMOW
Strontium	Strontium Carbonate Isotopic Standard	NIST SRM 987
Sulfur (S)	Troilite (FeS) dari meteorit besi Canyon Diablo	V-CDT

Bagi isotop karbon, bilangan proton adalah sama tetapi berbeza dari segi bilangan neutron (Rajah 1). Perbezaan ini mempengaruhi jisim (*mass*) isotop, yang seterusnya mempengaruhi kadar tindak balas antara isotop unsur tersebut. Kesemua isotop karbon mempunyai bilangan elektron yang sama, maka ia tidak memberi kesan kepada berat isotop itu. Namun begitu, tindak balas kimia sebahagian besarnya ditentukan oleh konfigurasi elektron. Isotop yang berbeza (contohnya  $^{12}\text{C}$  dan  $^{13}\text{C}$ ) bertindak balas pada kadar yang berbeza kerana perbezaan kekuatan ikatan. Contohnya,  $^{12}\text{C}$  (yang lebih ‘ringan’) bertindak balas dengan lebih pantas berbanding  $^{13}\text{C}$  (yang lebih ‘berat’), serta dapat

memecahkan ikatan dengan lebih mudah. Dalam kata lain, ikatan  $^{12}\text{C}$ - $^{14}\text{N}$  terbentuk dan terpecah dengan lebih mudah berbanding ikatan oleh  $^{12}\text{C}$ - $^{15}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$ - $^{14}\text{N}$  dan  $^{13}\text{C}$ - $^{15}\text{N}$  (Schoeninger 2010).



Rajah 1. Isotop karbon

Isotop bagi unsur tertentu bergerak dalam sistem biosfera melalui reaksi atau tindak balas seperti metabolisme protein dalam diet untuk membentuk tisu. Oleh kerana terdapat perbezaan di dalam kadar tindak balas, maka terdapat perbezaan relatif jumlah isotop stabil di antara produk dan komponen permulaan (atau substrat). Contohnya, kolagen tulang (produk) adalah protein yang terhasil daripada rangkaian asid amino. Asid amino ini pula hadir daripada makanan dan juga produk pecahan daripada tisu haiwan itu sendiri (substrat). Dalam konteks ini, kolagen adalah produk yang dihasilkan akibat tindak balas ke atas substrat, iaitu makanan. Maka, nisbah  $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$  antara produk (kolagen tulang) dan nisbah  $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$  substrat adalah berbeza; kebiasaannya kolagen tulang mempunyai  $^{13}\text{C}$  yang lebih berbanding diet, kerana ikatan  $^{12}\text{C}$  yang lemah dan mudah terurai, maka  $^{12}\text{C}$  lebih mudah dikeluarkan dari badan (Schoeninger 2009).

Perbezaan antara nisbah isotop antara produk dan substrat ini dikenali sebagai *fractionation* atau pemeringkatan. Akibat daripada tindak balas ke atas substrat, elemen isotop stabil (yang tidak mereput) boleh diperolehi dalam produk. Terdapat dua jenis pemeringkatan iaitu *kinetic isotope fractionation* (tindak balas yang terhasil akibat penambahan elemen biokimia) dan *equilibrium isotope fractionation* (tindak balas akibat daripada elemen fizikal seperti suhu, penyejatan dan evapotranspirasi (O'Leary 1988; Hoefs 2009). Kadar jumlah isotop di dalam satu-satu elemen boleh diukur dengan menggunakan *isotope ratio mass spectrometer* (IRMS).

### Isotop karbon

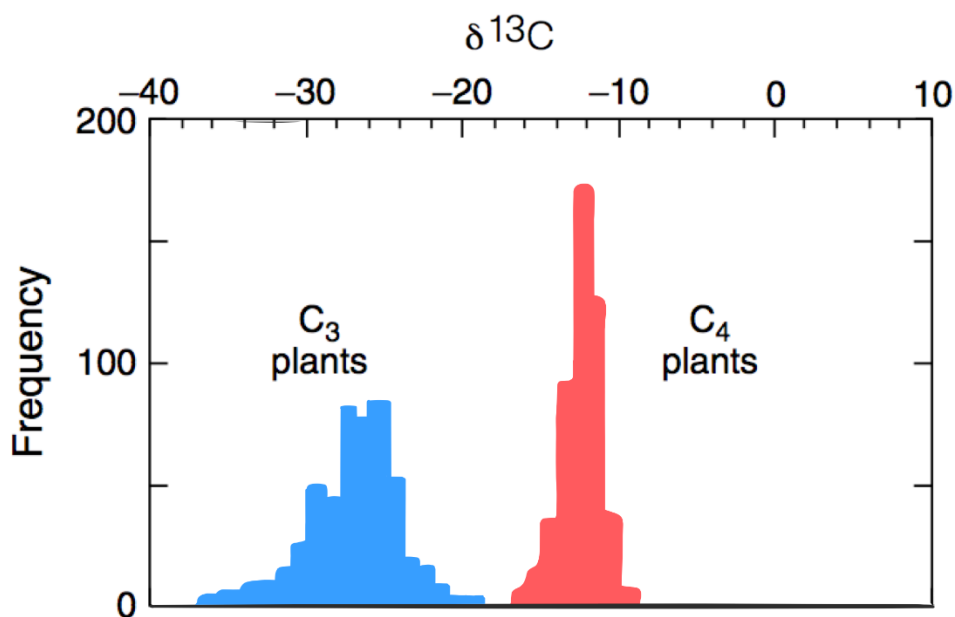
Kebanyakan simpanan isotop karbon di bumi adalah daripada lautan dalam bentuk karbonat terlarut. Kitaran karbon ( $\text{CO}_2$ ) di antara atmosfera bumi dan lautan berlaku melalui *equilibrium isotope fractionation*, di mana  $^{13}\text{C}$  dalam atmosfera dikurangkan.  $\delta^{13}\text{C}$  atmosfera pada masa kini ialah sekitar  $-8\text{‰}$  ( $-6.5\text{‰}$  sebelum era pengindustrian sekitar 100 tahun dahulu) manakala  $\delta^{13}\text{C}$  bagi permukaan laut ialah sekitar  $1\text{‰}$  (Francey et al. 1999; Rubino et al. 2013).

Nilai untuk  $\delta^{13}\text{C}$  bagi tumbuhan bergantung kepada *kinetic isotope fractionation* semasa proses fotosintesis. Terdapat 3 kelas tumbuhan yang menghasilkan nilai nisbah isotop stabil yang berbeza berdasarkan kepada strategi fotosintesis masing-masing, iaitu tumbuhan  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  dan CAM. Tumbuhan  $\text{C}_3$ , yang merangkumi buah-buahan, sayuran dan bijirin seperti beras, soya dan gandum, mempunyai  $\delta^{13}\text{C}$  yang rendah. Tumbuhan  $\text{C}_3$  merangkumi hampir 85% tumbuhan yang wujud di bumi, termasuk tumbuhan herba dan rumput. Tumbuhan  $\text{C}_4$  pula merupakan tumbuhan vaskular seperti jagung, tebu dan paku pakis yang biasanya tumbuh di kawasan yang panas dan banyak sinaran matahari. Di kawasan beriklim sederhana, majoriti tumbuhan adalah  $\text{C}_3$  dan ada juga sesetengah rumput yang tergolong dalam kumpulan  $\text{C}_4$ . Sebaliknya, di kawasan tropika, majoriti tumbuhan  $\text{C}_3$  ialah tumbuhan herba (tanpa tisu berkayu) dan  $\text{C}_4$  adalah rumput (Chisholm, Nelson & Schwarcz 1982). Kelas ketiga ialah tumbuhan CAM atau *crassulacean acid metabolism*, seperti kaktus yang hadir di kawasan yang sangat panas dan kering. Nilai  $\delta^{13}\text{C}$  bagi kelas tumbuhan diringkaskan dalam Jadual 2 dan Rajah 2.

Jadual 2. Nilai  $\delta^{13}\text{C}$  bagi kelas tumbuhan  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  dan CAM.

Jenis tumbuhan (strategi fotosintesis)	Nilai purata $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Adaptasi persekitaran
$\text{C}_3$	-26 hingga -28	Persekitaran basah dan sejuk
$\text{C}_4$	-12 hingga -14	Panas dengan sinaran matahari
CAM	-10 hingga -20	Sangat panas dan kering

Sumber: Tieszen 1991



Rajah 2. Histogram yang menunjukkan perbezaan nilai  $\delta^{13}\text{C}$  antara tumbuhan  $\text{C}_3$  dan  $\text{C}_4$

Sumber: Cerling et al. 1997

Bagi manusia dan haiwan, nilai  $\delta^{13}\text{C}$  adalah bergantung kepada diet (DeNiro & Epstein 1978). Tanda isotop tumbuhan  $\text{C}_3$  dan  $\text{C}_4$  akan hadir dan direkod dalam tisu organisma yang memakan tumbuhan daripada kelas-kelas ini. Contohnya, sekiranya manusia memakan haiwan yang dikelaskan sebagai “browser” seperti rusa dan kambing (memakan daun, pucuk dan buah dari pohon), maka ia akan mempamerkan signal isotop  $\text{C}_3$  dan sekiranya haiwan tersebut ialah “grazer” seperti lembu (memakan rumput), maka ia mempamerkan signal  $\text{C}_4$ . Secara amnya, haiwan yang memakan tumbuhan  $\text{C}_3$  mempunyai nilai  $\delta^{13}\text{C}$  yang lebih rendah berbanding haiwan yang memakan tumbuhan  $\text{C}_4$  (Schoeninger 2010). Ikan laut, haiwan daratan dan ikan air tawar masing-masing mencatatkan nilai  $\delta^{13}\text{C}$  tinggi, sederhana dan rendah, bergantung kepada jumlah simpanan karbon di atmosfera dan sumber akuatik (Chisholm et al. 1982). Dalam konteks komuniti manusia yang mempunyai akses

kepada makanan daratan dan lautan, adalah agak sukar untuk menentukan diet hanya berdasarkan nilai  $\delta^{13}\text{C}$  sahaja. Maka, nilai isotop lain lain turut diperlukan, seperti isotop nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ).

### Isotop nitrogen

Hampir 99% nitrogen (N) di bumi hadir dalam bentuk udara atau  $\text{N}_2$  yang terlarut di dalam lautan (Hoefs 2009). Nitrogen mempunyai dua isotop stabil iaitu  $^{14}\text{N}$  dan  $^{15}\text{N}$ , dengan peratusan masing-masing sebanyak 99.63% dan 0.37% (Hoefs 2009). Nisbah antara  $^{15}\text{N}$  dan  $^{14}\text{N}$  biasanya diungkapkan dalam nilai  $\delta^{15}\text{N}$ .

Nitrogen merupakan elemen utama dalam klorofil, sebatian dalam tumbuhan yang menggunakan cahaya matahari bagi menghasilkan gula daripada air dan karbon dioksida dalam proses fotosintesis. Konsentrasi nitrogen dalam tanah dikekalkan melalui proses biologi seperti asimilasi (penghasilan nitrogen organik daripada nitrogen inorganik), nitrifikasi (pengoksidaan nitrogen daripada amonia) dan denitrifikasi (proses penyingkiran nitrat). "Nitrogen fixation" adalah proses menukar gas nitrogen inorganik kepada ammonia bagi untuk digunakan oleh tumbuhan dibantu oleh bakteria *diazotrophs*. Kebanyakan tumbuhan mengambil nitrogen daripada tanah berbanding atmosfera, maka nilai  $\delta^{15}\text{N}$  tumbuhan selalunya lebih tinggi dari 0%.

Isotop nitrogen sering digunakan dalam kajian mengenai diet manusia dan corak pemakanan yang bergantung kepada diet marin atau daratan. Setiap organisma mempunyai tempatnya tersendiri dalam rantai makanan, yang dipanggil sebagai tahap trofik. Terdapat peningkatan konsisten nilai  $\delta^{15}\text{N}$  sebanyak 3.5% antara tahap trofik (Ambrose 2002). Umumnya, organisma marin mempunyai nilai  $\delta^{15}\text{N}$  yang lebih positif berbanding organisma daratan pada paras trofik yang sama (6% - 8% lebih tinggi), kesan daripada aktiviti bakteria dan paras trofik yang lebih banyak di dalam lautan berbanding daratan (Schoeninger & DeNiro 1984). Nilai  $\delta^{15}\text{N}$  yang tinggi juga dapat dilihat pada tisu manusia yang beradaptasi dengan diet marin berbanding diet daratan (DeNiro & Epstein 1981; Hare et al. 1991; Sealy dan Van de Merwe 1986). Selain daripada itu, isotop nitrogen juga boleh digunakan untuk mengkaji proses cerai susu (*weaning*) dalam populasi manusia (Schurr 1998).

### Isotop oksigen

Oksigen (O) merupakan unsur yang terbanyak di bumi, hadir dalam bentuk gas, cecair dan pepejal. Ia mempunyai 3 isotop stabil, iaitu  $^{16}\text{O}$  (99.757%),  $^{17}\text{O}$  (0.038%) dan  $^{18}\text{O}$  (0.205%) (Hoefs 2009). Nisbah  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  biasanya digunakan untuk melihat perkaitan antara tisu manusia atau haiwan dengan sumber air setempat dan diwakili oleh  $\delta^{18}\text{O}$  (Craig 1953; Luz, Kolodny & Horowitz 1984). Ia merupakan petunjuk penting dalam menentukan sumber makanan atau pergerakan populasi (Bol dan Pflieger 2002; Bowen et al. 2009; Ehleringer et al. 2010) oleh kerana isotop oksigen berbeza mengikut latitud, ketinggian, kadar hujan, kelembapan, suhu udara permukaan dan jarak daripada pinggir laut (Dansgaard 1964; Hoefs 2009).

$\delta^{18}\text{O}$  adalah bergantung kepada kadar penyejatan. Kadar penyejatan yang tinggi akan mengurangkan jumlah  $^{16}\text{O}$  di dalam air (seperti di tasik dan empangan) dan meninggalkan lebih banyak  $^{18}\text{O}$ . Sekiranya kadar penyejatan adalah rendah, contohnya akibat hujan dan pergerakan sungai, lebih sedikit  $^{16}\text{O}$  akan hilang, dan kadar  $^{18}\text{O}$  akan menjadi kurang (Hoefs 2009).

Pergerakan oksigen di dalam badan manusia dipengaruhi banyak faktor (seperti kadar metabolisme, anemia dan sebagainya) dan ini mempengaruhi kadar  $\delta^{18}\text{O}$  dalam tisu manusia (Epstein & Zeiri 1988). Air di dalam tubuh manusia berasal daripada air minuman, air di dalam makanan serta air daripada oksigen di atmosfera. Maka, refleksi nilai  $\delta^{18}\text{O}$  daripada sumber air akan dapat dilihat di dalam  $\delta^{18}\text{O}$  air dalam badan (yang diperoleh daripada tisu manusia). Diet manusia yang pelbagai boleh memberikan maklumat mengenai sumber dan strategi hidrasi. Contohnya, air daripada buah dan sayuran mempunyai isotop yang lebih tinggi daripada air biasa akibat daripada proses evapotranspirasi (penyejatan air ke atmosfera atas faktor iklim dan vegetasi) (Dunbar & Wilson 1983). Perbezaan jenis air (atau cecair) yang diambil oleh manusia juga dapat dilihat menggunakan nilai  $\delta^{18}\text{O}$ . Contohnya, maklumat penyusuan dan *weaning* (cerai susu) bayi juga boleh dilihat kerana nisbah  $\delta^{18}\text{O}$  susu ibu lebih

tinggi daripada air (Wright & Schwarcz 1998), serta air yang telah dididihkan mempunyai lebih isotop  $^{18}\text{O}$  kerana kehilangan  $^{16}\text{O}$  dalam bentuk wap (Brettell, Montgomery & Evans 2012)

### Isotop strontium

Kajian isotop strontium sering digunakan dengan meluas dalam bidang geokronologi dan geokimia (Faure & Mensing 2005). Strontium merupakan unsur surih yang wujud dalam tumbuhan, haiwan, batuan igneus, metamorfik, sedimentari, juga dalam kandungan air termasuklah sungai, air bawah tanah dan air laut. Terdapat 23 isotop strontium yang wujud di bumi, 4 daripadanya wujud secara semula jadi iaitu  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  dan  $^{88}\text{Sr}$  (Bowen 1994). Daripada keempat-empat isotop ini,  $^{87}\text{Sr}$  adalah bersifat metastabil (radiogenik) dan terbentuk akibat penguraian  $^{87}\text{Rb}$ , dengan masa setengah hayat (*half-life*)  $4.88 \times 10^{10}$  tahun (Faure & Mensing 2005).

Oleh kerana strontium merupakan unsur yang berat (berjisim 87.62), nilai  $\delta^{87}\text{Sr}$  mengalami sedikit pemeringkatan (*fractionation*) dan tidak banyak berubah dalam pergerakan daripada substrat (batuan dasar) kepada rantai makanan (Beard & Johnson 2000; De Souza 2007; Ericson 1985). Nisbah  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  di dalam tanah, air bawah tanah, tumbuhan dan haiwan secara asasnya mencerminkan nisbah  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  bagi batuan dasar (Capo, Stewart & Chadwick 1998). Oleh yang demikian, nisbah  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  boleh memberikan gambaran jitu tentang kawasan geografi manusia, kerana strontium daripada persekitaran tempatan akan berpindah masuk ke dalam tisu badan daripada air, tumbuhan dan haiwan yang dimakan. Dari sudut kajian arkeologi, ini dapat memberikan data yang lebih tepat kepada pergerakan dan mobiliti manusia, berbanding hanya bergantung kepada artifak, fitur atau struktur.

Nisbah  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  juga boleh menerangkan tentang tingkah laku masyarakat terdahulu, melalui eksperimen ke atas gigi dan tulang manusia prasejarah (Ericson 1985). Sepanjang hayat manusia, banyak rekod biogeokimia yang disimpan dalam gigi dan tulang. Komposisi kimia enamel gigi, yang terbentuk semasa bayi dan kanak-kanak tidak akan berubah selepas umur 12 tahun (Hillson 2005), manakala tulang pula sentiasa berubah komposisi kimianya setiap 5-7 tahun (Tykot 2004). Dengan beranggapan bahawa seseorang individu itu hanya makan sumber di kawasan tempat tinggalnya sahaja sepanjang hayatnya, nilai  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  daripada enamel akan memberikan diet semasa kanak-kanak dan  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  daripada tulang pula akan memberikan diet semasa dewasa (Ericson 1985). Sekiranya nilai  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  enamel dan tulang berbeza, maka mungkin berlaku pergerakan (migrasi) atau perubahan corak dan sumber pemakanan. Namun begitu, terdapat beberapa faktor yang perlu diambil kira dalam menentukan corak mobiliti menggunakan isotop stabil strontium (Ericson 1985). Pertama, variasi geologi antara kawasan kediaman yang berbeza mestilah mencukupi supaya nilai variasi  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dapat dikesan. Kedua, analisis isotop strontium mungkin tidak berkesan dalam mengesan pergerakan antara kawasan pesisir jika penduduknya hanya bergantung pada makanan laut. Ini kerana individu tersebut akan menunjukkan tanda  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  marin berbanding nilai  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  daratan. Ketiga, nilai  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dalam kalangan satu populasi manusia hanya akan berfungsi sebagai penanda diet yang tepat sekiranya kebergantungan kepada makanan yang diimport dari luar boleh diketepikan. Pengambilan makanan yang kaya dengan kalsium dan strontium (seperti kekacang, susu dan ikan) atau bahan campuran yang tinggi dengan strontium seperti garam laut boleh merubah tanda isotop  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dalam tulang dan gigi, walaupun diambil dalam jumlah yang kecil (Burton & Wright 1995).

### POTENSI KAJIAN ISOTOP STABIL DALAM BIDANG ARKEOLOGI DI MALAYSIA

Sehingga kini, kajian isotop stabil dalam bidang arkeologi di Malaysia masih lagi pada tahap yang rendah. Antara kajian isotop stabil yang telah dijalankan di Malaysia berfokus kepada aspek pertanian seperti isotop karbon dan nitrogen dalam pertanian kelapa sawit (Fathia Alaswad et al. 2017) dan padi (Hashim et al. 2015; Wahid et al. 2015); kajian isotop stabil dalam sistem hidrologi (Ayub & Mohamad 1998; Stephens & Rose 2005; Roslanzairi et al. 2011; Lee et al. 2013); kajian geokimia berdasarkan isotop stabil karbon dan oksigen (Cobb et al. 2007; Partin et al. 2013) dan sulfur (Basori et al. 2017); serta kajian nic isotop stabil dalam haiwan mamalia moden (Kawanishi et al. 2012) dan ekosistem air tawar (Amila & Suhaila 2017).

Antara kajian terawal yang pernah dijalankan di Malaysia dengan melihat kepada aplikasi isotop stabil dalam arkeologi ialah mengenai diet prasejarah. Krigbaum (2001) telah mengkaji rangka manusia Pleistosen-Holosen Akhir dari Gua Niah, Sawarak dan Gua Cha, Kelantan melalui isotop karbon dan oksigen, dengan melihat kepada korelasi antara diet dan tisu manusia menggunakan apatit enamel gigi. Hasil analisis mendapati bahawa sampel masyarakat pra-Neolitik memberikan nilai yang lebih negatif ( $\delta^{13}\text{C} = -14.5\%$ ) berbanding masyarakat Neolitik ( $\delta^{13}\text{C} = -13.2\%$ ). Nilai ini membuktikan bahawa masyarakat pra-Neolitik memburu di kawasan hutan tertutup, berbanding kawasan terbuka oleh masyarakat Neolitik. Ini selari dengan kesan kanopi (*canopy effect*); wujudnya penurunan secara berterusan dari bahagian atas ke dasar hutan. Nilai  $\delta^{13}\text{C}$  dalam ekosistem hutan tertutup (seperti hutan hujan tropika) adalah lebih rendah berbanding habitat terbuka yang panas dan kering, yang mencatatkan nilai  $\delta^{13}\text{C}$  dan  $\delta^{15}\text{N}$  yang lebih tinggi (Tieszen 1991). Dalam masa yang sama, nilai  $\delta^{13}\text{C}$  yang diperoleh juga adalah sekitar  $-15.7 - 11.3\%$ , konsisten dengan diet berasaskan tumbuhan  $\text{C}_3$  (Krigbaum 2001). Aplikasi sebegini dapat menjawab pelbagai persoalan bukan sahaja melibatkan diet, tetapi permulaan pertanian, jenis tumbuhan, iklim, migrasi dan sebagainya, sebagai sokongan kepada data konvensional yang diperolehi daripada aspek analisis arkeologi yang lain.

Di Gua Niah juga, analisis oleh Valentine, Kamenov dan Krigbaum (2008) mendapati wujud kepelbagaian kawasan tadahan diet antara kelompok individu Neolitik yang dikebumikan di Gua Niah, Gua Sireh dan Lobang Angin. Data  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  daripada enamel gigi dan tulang menunjukkan kebarangkalian eksploitasi sumber marin dan estuari, begitu juga dengan haiwan dan tumbuhan mungkin diperoleh dari kawasan yang lain. Di samping itu, pergerakan komuniti Neolitik dari satu tempat ke tempat yang lain mungkin turut berlaku dan kawasan West Mouth mungkin berfungsi sebagai “hub” kepada pengebumian Neolitik.

Melihat kepada skop yang lebih besar, kajian terkini di rantau ini dalam bidang isotop turut mengkaji variasi spatial dan temporal dalam isotop stabil, terutamanya  $\delta^{13}\text{C}$  dan  $\delta^{15}\text{N}$ , dalam ekosistem marin di seluruh Asia Timur dan Tenggara (Boulanger et al. 2024). Dengan menganalisis data isotop daripada tulang ikan moden, sisa cangkerang dan enamel gigi, kajian itu menunjukkan bagaimana isotop marin boleh berfungsi sebagai proksi yang boleh dipercayai untuk memahami diet serta strategi sara hidup manusia prasejarah, terutamanya dalam komuniti pantai dan pulau. Melalui kajian ini, faktor ekologi didapati boleh mempengaruhi kebolehubahan isotop, seperti arus lautan, tahap kemasinan air laut serta tahap trofik, yang penting untuk membina semula persekitaran kuno masyarakat prasejarah. Selain itu, kajian oleh Cheung (2022) di tapak Tung Wn Tsai, Hong Kong menunjukkan adanya campuran diet daripada sumber marin dan daratan hasil daripada analisis  $\delta^{13}\text{C}$  dan  $\delta^{15}\text{N}$  daripada rangka manusia dan sisa fauna. Kajian-kajian ini memberikan contoh yang baik, tentang pembinaan garis dasar (*baseline*) yang boleh membantu dalam mengenal pasti mobiliti. Ini kerana nilai isotop boleh mendedahkan asal usul geografi sumber marin yang terdapat dalam konteks arkeologi, terutamanya bagi tapak prasejarah yang terletak di tepi laut seperti Guar Kepah, Pulau Pinang.

Aplikasi kajian isotop stabil tidak hanya terhad kepada corak pemakanan manusia sahaja. Daripada aspek zooarkeologi, pergerakan haiwan dan aktiviti pemburuan dapat dibuat. Contohnya, Madgwick et al. (2013) menjalankan analisis isotop stabil karbon, nitrogen dan sulfur ke atas tulang rusa semasa era Roman di Britain dan mendapati bahawa rusa yang diburu hidup dekat dengan ruang lingkup kediaman manusia. Namun begitu, terdapat sejumlah besar rusa yang lebih liar dan tinggal di kawasan semula jadi, serta mempunyai akses kepada rawang garam (*salt marsh*) yang memberikan nilai  $\delta^{15}\text{N}$  yang sangat tinggi. Replikasi kajian sebegini terhadap tinggalan fauna di Malaysia secara tidak langsung dapat memberikan idea yang lebih jelas tentang corak pemburuan dan analisis kawasan tadahan (*site catchment analysis*) yang lebih tepat.

Hyodo et al. (2010) telah mengukur  $\delta^{13}\text{C}$  dan  $\delta^{15}\text{N}$  dalam paras trofik di Taman Negara Lambir, Sarawak, bagi mengenalpasti jaringan makanan (*food web*) berdasarkan aras trofik yang berbeza. Kajian menunjukkan adanya perbezaan ketara bagi setiap 4 aras trofik (detritivor, herbivor, onmivor dan pemangsa) yang dikaji, dengan pemangsa (seperti *horseshoe bat*) mempunyai nilai  $\delta^{13}\text{C}$  yang tinggi berbanding herbivor tetapi sama dengan detritivor (pemakan tumbuhan mati, seperti anai-anai dan kumbang). Nilai  $\delta^{13}\text{C}$  tidak menunjukkan perubahan yang banyak dalam peningkatan aras trofik



(DeNiro & Epstein 1978), maka ini menunjukkan pemangsa lebih banyak bergantung kepada detritivor (di bahagian bawah jaringan makanan) sebagai sumber makanan berbanding herbivor, yang lebih cenderung memilih makanan di lapisan kanopi hutan. Dari sudut arkeologi, ini juga dapat membantu dalam pembinaan aras trofik, dengan menjalankan penilaian semula tinggalan sisa fauna yang telah diperolehi dari tapak-tapak arkeologi.

## KESIMPULAN

Secara amnya, kajian isotop stabil mempunyai potensi yang besar dalam menyumbang data yang lebih holistik dan jitu kepada kajian arkeologi. Prinsip dan aplikasi isotop stabil karbon, nitrogen, oksigen dan strontium diterangkan secara am, namun begitu berpotensi merentas pelbagai sub-bidang dalam penyelidikan arkeologi. Walaupun kajian isotop stabil telah bermula hampir 7 dekad yang lalu, namun aplikasinya dalam bidang arkeologi di Malaysia masih rendah. Persoalan mengenai biologi manusia, terutamanya diet dan nutrisi serta mobiliti mampu dijawab dengan kajian isotop stabil ke atas tisu dan gigi. Ia tidak sahaja terhad kepada populasi prasejarah, tetapi juga boleh diaplikasikan kepada populasi moden. Di samping itu, adaptasi marin dan daratan serta transisi daripada pemburuan kepada pertanian dan penternakan adalah salah satu skop khusus dalam penyelidikan isotop stabil. Walaupun aplikasi isotop stabil dalam bidang-bidang lain telah mula dilakukan, kajian komprehensif isotop stabil, terutamanya kepada rangka manusia serta sisa fauna dari tapak-tapak arkeologi di Semenanjung Malaysia diharap dapat menambahkan lagi data perbandingan antara komuniti prasejarah di tanah besar dan kepulauan. Setakat ini, kajian isotop stabil di dalam bidang arkeologi di Malaysia hanya terhad kepada kawasan pedalaman Sarawak. Data *benchmark* (tanda aras) dalam isotop stabil di Malaysia harus dikumpul dan dibentuk dengan lebih banyak, agar perbandingan dapat dilakukan. Variasi yang wujud boleh meluaskan pemahaman tentang aktiviti manusia merentas masa, yang juga akan mencerminkan teknik dan adaptasi manusia terhadap persekitarannya.

## RUJUKAN

- Amila, F.Z., & Suhaila, A.H. 2017. Determination of Trophic Structure in Selected Freshwater Ecosystems by using Stable Isotope Analysis. *Tropical Life Sciences Research* 28(2): 9-29. <https://doi.org/10.21315/tlsr2017.28.2.2>
- Ambrose, S.H. 2002. Controlled Diet and Climate Experiments on Nitrogen Isotope Ratios of Rats. In S.H. Ambrose & M.A. Katzenberg (Eds.). *Biogeochemical Approaches to Paleodietary Analysis*, hlm. 243-259. Boston, MA: Springer US.
- Ambrose, S.H., & DeNiro, M.J. 1986. The isotopic ecology of East African mammals. *Oecologia* 69(3): 395-406. <https://doi:10.1007/bf00377062>
- Ambrose, S.H., & Krigbaum, J. 2003. Bone chemistry and bioarchaeology. *Journal of Anthropological Archaeology* 22(3): 191-192. [https://doi.org/10.1016/S0278-4165\(03\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0278-4165(03)00032-1)
- Ayub, M.S. & M., Daud. 1999. *Isotope hydrological study of Pulau Langkawi, Malaysia*. Paper presented at the Ninth Regional Congress on Geology, Mineral and Energy Resources of Southeast Asia - GEOSEA '98, Shangri-La Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Basori, M.B.I., Zaw, K., Ross, R. & Wan Fuad, W.H. 2017. Sulfur isotope characteristics of the Permian VHMS deposits in Tasik Chini district, Central Belt of Peninsular Malaysia. *Turkish Journal of Earth Sciences* 26(1): 91-103. <https://doi:10.3906/yer-1510-17>
- Beard, B.L., & Johnson, C.M. 2000. Strontium isotope composition of skeletal material can determine the birth place and geographic mobility of humans and animals. *J Forensic Sci* 45(5): 1049-1061.
- Bol, R. & Pflieger, C. 2002. Stable isotope (<sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N and <sup>34</sup>S) analysis of the hair of modern humans and their domestic animals. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 16(23): 2195-2200. <https://doi:10.1002/rcm.706>
- Boulanger, C., Roberts, P., Lucas, M., Ingicco, T., O'Connor, S., Ono, R. & Sémah, A.-M. 2024. Stable isotope variation in East and Southeast Asian marine ecosystems and its relevance for archaeological analysis. *Environmental Archaeology*. <https://doi.org/10.1080/14614103.2024.2352666>
- Bowen. 1994. Rubidium-Strontium Dating *Isotopes in the Earth Sciences*, hlm. 162-200. Dordrecht: Springer Netherlands.

- Bowen, G.J., Ehleringer, J.R., Chesson, L.A., Thompson, A.H., Podlesak, D.W., & Cerling, T.E. 2009. Dietary and physiological controls on the hydrogen and oxygen isotope ratios of hair from mid-20<sup>th</sup> century indigenous populations. *American Journal of Physical Anthropology* 139(4): 494-504. <https://doi:10.1002/ajpa.21008>
- Brettell, R., Montgomery, J., & Evans, J. 2012. Brewing and stewing: the effect of culturally mediated behaviour on the oxygen isotope composition of ingested fluids and the implications for human provenance. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 27(5): 778-785.
- Burton, J.H., & Wright, L.E. 1995. Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet: Paleodietary implications. *American Journal of Physical Anthropology* 96(3): 273-282. <https://doi:10.1002/ajpa.1330960305>
- Calvin, M., & Benson, A.A. 1948. The Path of Carbon in Photosynthesis. *Science* 107(2784): 476-480. <https://doi:10.1126/science.107.2784.476>
- Capo, R.C., Stewart, B.W., & Chadwick, O.A. 1998. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma* 82(1): 197-225. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00102-X)
- Cerling, T.E.; Harris, J.M., MacFadden, B.J., Leakey, M.G., Quade, J., Eisenmann, V., Ehleringer, J.R. 1997. *Nature* 389(6647): 153-158. <https://doi:10.1038/38229>
- Cheung, C. 2022. Examining prehistoric diet at Tung Wan Tsai, Ma Wan Island, Hong Kong through stable isotope analysis. *The Journal of Island and Coastal Archaeology*. <https://www.academia.edu/72600037>
- Chisholm, B.S., Nelson, D.E., & Schwarcz, H.P. 1982. Stable-Carbon Isotope Ratios as a Measure of Marine Versus Terrestrial Protein in Ancient Diets. *Science* 216(4550): 1131-1132. <https://doi:10.1126/science.216.4550.1131>
- CIAAW. 2015. Isotopic Reference Material. Retrieved from <http://www.ciaaw.org/reference-materials.htm>
- Cobb, K.M., Adkins, J.F., Partin, J.W., & Clark, B. 2007. Regional-scale climate influences on temporal variations of rainwater and cave drip water oxygen isotopes in northern Borneo. *Earth and Planetary Science Letters* 263(3): 207-220. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.08.024>
- Craig, H. 1953. The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 3(2): 53-92. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90001-5)
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16(4): 436-468. <https://doi:10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- De Souza, G.F.R., B.C. and Bourdon B. 2007. Evidence for stable strontium isotope fractionation during chemical weathering. *Goldschmidt Conference Abstracts 2007*.
- DeNiro, M.J., & Epstein, S. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42(5): 495-506. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90199-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90199-0)
- Deniro, M.J. & Epstein, S. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45(3): 341-351. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(81\)90244-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)90244-1)
- Deniro, M.J. & Schoeniger, M.J. 1983. Stable carbon and nitrogen isotope ratios of bone collagen: Variations within individuals, between sexes, and within populations raised on monotonous diets. *Journal of Archaeological Science* 10(3): 199-203. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(83\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0305-4403(83)90002-X)
- Dunbar, J. & Wilson, A.T. 1983. The origin of oxygen in soil humic substances. *Journal of Soil Science* 34(1): 99-103. <https://doi:10.1111/j.1365-2389.1983.tb00816.x>
- Ehleringer, J.R., Bowen, G.J., Chesson, L.A., West, A.G., Podlesak, D.W., & Cerling, T.E. 2008. Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(8): 2788-2793. <https://doi:10.1073/pnas.0712228105>
- Epstein, S. & Zeiri, L. 1988. Oxygen and carbon isotopic compositions of gases respired by humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 85(6): 1727-1731.
- Ericson, J.E. 1985. Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. *Journal of Human Evolution* 14(5): 503-514. [https://doi.org/10.1016/S0047-2484\(85\)80029-4](https://doi.org/10.1016/S0047-2484(85)80029-4)
- Fathia Alaswad; Ferdaus Mohamat-Yusuff; Roslan Ismail, F. M. K., Zulfa Hanan Asha'ari and Khairiah J. 2017. Spatial Distribution of Carbon and Nitrogen Stable Isotope in Soil of an Oil Palm Plantation. *Advances in Environmental Biology* 11(1): 16-25.

- Faure, G. & Mensing, T.M. 2005. *Isotopes: principles and applications* (3<sup>rd</sup> ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Francey, R.J., Allison, C.E., Etheridge, D.M., Trudinger, C.M., Enting, I.G., Leuenberger, M., Steele, L.P. 1999. A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}\text{C}$  in atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Tellus B* 51(2): 170-193. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1999.t01-1-00005.x>
- Hare, P.E., Fogel, M.L., Stafford, T.W., Mitchell, A.D. & Hoering, T.C. 1991. The isotopic composition of carbon and nitrogen in individual amino acids isolated from modern and fossil proteins. *Journal of Archaeological Science* 18(3): 277-292. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(91\)90066-X](https://doi.org/10.1016/0305-4403(91)90066-X)
- Hashim, M.M. a., Yusop, M.K., Othman, R. & Wahid, S.A. 2015. Characterization of Nitrogen Uptake Pattern in Malaysian Rice MR219 at Different Growth Stages Using  $^{15}\text{N}$  Isotope. *Rice Science* 22(5): 250-254. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2015.09.005>
- Hatch, M.D., & Slack, C.R. 1966. Photosynthesis by sugar-cane leaves. A new carboxylation reaction and the pathway of sugar formation. *Biochem J* 101(1): 103-111.
- Hillson, S. 2005. *Teeth* (2<sup>nd</sup> ed.). New York: Cambridge University Press.
- Hoefs, J. 2009. *Stable isotope geochemistry* (6<sup>th</sup> ed.). Berlin: Springer.
- Hyodo, F., Matsumoto, T., Takematsu, Y., Kamoi, T., Fukuda, D., Nakagawa, M. & Itioka, T. 2010. The structure of a food web in a tropical rain forest in Malaysia based on carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Journal of Tropical Ecology* 26(2): 205-214. <https://doi.org/10.1017/S0266467409990502>
- Kawanishi, K., Liang, S.H.N., Darimont, C., Reimchen, T.E. & Sunquist, M.E. 2012. Isotopic niche differentiation among mammals from a rainforest in Peninsular Malaysia. *Raffles Bulletin of Zoology* 60(1): 233-9. <https://www.wellbeingintlstudiesrepository.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=bioche>
- Krigbaum, J. 2001. *Human Paleodiet in Tropical Southeast Asia: Isotopic Evidence from Niah Cave and Gua Cha*. (Ph.D), New York University New York.
- Lee, K.Y., Syakir, M.I., Clark, I.D., & Veizer, J. 2013. Isotope Constraints on the Aquatic Carbon Budget: Langat Watershed, Malaysia. *Aquatic Geochemistry* 19(5): 443-475. <https://doi.org/10.1007/s10498-013-9198-3>
- Luz, B., Kolodny, Y. & Horowitz, M. 1984. Fractionation of oxygen isotopes between mammalian bone-phosphate and environmental drinking water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48(8): 1689-1693. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90338-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90338-7)
- Madgwick, R., Sykes, N., Miller, H., Symmons, R., Morris, J. & Lamb, A. 2013. Fallow deer (*Dama dama*) management in Roman South-East Britain. *Archaeological and Anthropological Sciences* 5(2): 111-122. <https://doi.org/10.1007/s12520-013-0120-0>
- Nier, A.O. & Gulbransen, E.A. 1939. Variations in the Relative Abundance of the Carbon Isotopes. *Journal of the American Chemical Society* 61(3): 697-698. <https://doi.org/10.1021/ja01872a047>
- O'Leary, M.H. 1988. Carbon Isotopes in Photosynthesis Fractionation techniques may reveal new aspects of carbon dynamics in plants. *BioScience* 38(5): 328-336. <https://doi.org/10.2307/1310735>
- Parker, P.L. 1964. The biogeochemistry of the stable isotopes of carbon in a marine bay. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(7): 1155-1164. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90067-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90067-5)
- Partin, J.W., Cobb, K.M., Adkins, J.F., Tuen, A.A. & Clark, B. 2013. Trace metal and carbon isotopic variations in cave dripwater and stalagmite geochemistry from northern Borneo. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14(9): 3567-3585. <https://doi.org/10.1002/ggge.20215>
- Pate, F.D. 1997. Bone Chemistry and Paleodiet: Reconstructing Prehistoric Subsistence-Settlement Systems in Australia. *Journal of Anthropological Archaeology* 16(2): 103-120. <https://doi.org/10.1006/jaar.1997.0306>
- Ranson, S.L. a. T.M. 1960. Crassulacean Acid Metabolism. *Annual Review of Plant Physiology* 11(1): 81-110. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.11.060160.000501>
- Roslanzairi Mostapa, S., Mohd-Tadza Abdul-Rahman, Ismail Abustan. 2011. Comparison Between Conventional and Stable Isotope Techniques In Determining Distribution Of Landfill Leachate In Groundwater And Surface Waters In Perak, Malaysia – Techniques Of Water Resources Investigation. *International Journal of Environmental Sciences* 1(5): 948-958.
- Rubino, M., Etheridge, D.M., Trudinger, C.M., Allison, C.E., Battle, M.O., Langenfelds, R.L., Francey, R.J. 2013. A revised 1000 year atmospheric  $\delta^{13}\text{C}$ - $\text{CO}_2$  record from Law Dome and

- South Pole, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(15): 8482-8499. <https://doi:10.1002/jgrd.50668>
- Schober, T.M. a. M., J.E. 2009. Marine Resource Consumption in Ancient California *Pacific Coast Archaeological Society Quaterly* 45(1 & 2).
- Schoeninger, M.J. 2009. Toward a  $\delta^{13}\text{C}$  Isoscape for Primates. In J.B. West, G.J. Bowen, T.E. Dawson, & K.P.Tu (Eds.), *Isoscapes: Understanding movement, pattern, and process on Earth through isotope mapping*, hlm. 319-333. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Schoeninger, M. J. 2010. Diet Reconstruction and Ecology Using Stable Isotope Ratios *A Companion to Biological Anthropology* :445-464: Wiley-Blackwell.
- Schoeninger, M.J. & DeNiro, M.J. 1984. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48(4): 625-639. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90091-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90091-7)
- Schoeninger, M.J., & Moore, K. 1992. Bone Stable Isotope Studies in Archaeology. *Journal of World Prehistory* 6(2): 247-296.
- Schurr, M.R. 1998. Using Stable Nitrogen-Isotopes to Study Weaning Behavior in past Populations. *World Archaeology* 30(2): 327-342.
- Sealy, J.C., van der Merwe, N.J., Hobson, K.A., Horton, D.R., Lewis, R.B., Parkington, J., . . . Schwarcz, H.P. 1986. Isotope Assessment and the Seasonal-Mobility Hypothesis in the Southwestern Cape of South Africa [and Comments and Replies]. *Current Anthropology* 27(2): 135-150.
- Sealy, J.C., van der Merwe, N.J., Thorp, J.A.L., & Lanham, J.L. 1987. Nitrogen isotopic ecology in southern Africa: Implications for environmental and dietary tracing. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51(10): 2707-2717. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90151-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90151-7)
- Stephens, M., & Rose, J. 2005. Modern stable isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) variation in terrestrial, fluvial, estuarine and marine waters from north-central Sarawak, Malaysian Borneo. *Earth Surface Processes and Landforms* 30(7): 901-912. <https://doi:10.1002/esp.1218>
- Tieszen, L.L. 1991. Natural variations in the carbon isotope values of plants: Implications for archaeology, ecology, and paleoecology. *Journal of Archaeological Science* 18(3): 227-248. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(91\)90063-U](https://doi.org/10.1016/0305-4403(91)90063-U)
- Tykot, R. 2004. *Stable isotopes and diet: You are what you eat*. Paper presented at the International School of Physics Enrico Fermi.
- Valentine, B., Kamenov, G.D. & Krigbaum, J. 2008. Reconstructing Neolithic groups in Sarawak, Malaysia through lead and strontium isotope analysis. *Journal of Archaeological Science* 35(6): 1463-1473. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.10.016>
- van der Merwe, N.J. 1982. Carbon Isotopes, Photosynthesis, and Archaeology: Different pathways of photosynthesis cause characteristic changes in carbon isotope ratios that make possible the study of prehistoric human diets. *American Scientist* 70(6): 596-606.
- Vogel, J.C., & Van Der Merwe, N.J. 1977. Isotopic Evidence for Early Maize Cultivation in New York State. *American Antiquity* 42(2): 238-242. <https://doi:10.2307/278984>
- Wahid, A.N.A., Rahim, S.A., Rahim, K.A., & Harun, A.R. 2015. Nitrogen use efficiency evaluation of aerobic rice under field capacity water potential using  $^{15}\text{N}$  isotopic tracer technique. *AIP Conference Proceedings* 1678(1): 020003. <https://doi:10.1063/1.4931188>
- Wright, L.E. & Schwarcz, H.P. 1998. Stable carbon and oxygen isotopes in human tooth enamel: Identifying breastfeeding and weaning in prehistory. *American Journal of Physical Anthropology* 106(1): 1-18.

Shaiful Shahidan, (Ph.D)  
 Research Center for History,  
 Politics and International Affairs (SPHEA),  
 Faculty of Social Sciences and Humanities,  
 Universiti Kebangsaan Malaysia,  
 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia  
 Email: shaifuls@ukm.edu.my

Hsiao Mei Goh  
Penyelidik Bebas

Mokhtar Saidin  
Penyelidik Bebas

Received: 5<sup>th</sup> December 2024  
Accepted: 17<sup>th</sup> December 2024  
Published: 30<sup>th</sup> December 2024