

## SIMULASI LINTASAN BERKAS ION ISOTOP- ISOTOP KARBON DALAM SIKLOTRON DECY-13

### ION BEAM TRAJECTORY SIMULATION OF CARBON ISOTOPES IN CYCLOTRON DECY-13

Pramudita Anggraita

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN  
Jl. Babarsari, P.O. Box 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281  
e-mail: pramudita@batan.go.id

Diterima 11 Nopember 2013, diterima dalam bentuk perbaikan 31 Desember 2013, disetujui 21 Januari 2014

#### ABSTRAK

**SIMULASI LINTASAN BERKAS ION ISOTOP-ISOTOP KARBON DALAM SIKLOTRON DECY-13.** Telah dilakukan simulasi lintasan berkas ion berbagai isotop ion karbon  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ , dan  $^{14}\text{C}$  dalam siklotron DECY-13 menggunakan perangkat lunak Scilab 5.4.1. Perhitungan simulasi dilakukan secara iterasi dalam 3 dimensi. Hasil simulasi menunjukkan pemisahan lintasan yang memungkinkan untuk pengukuran  $^{14}\text{C}$  seperti pada pertanggalan karbon dengan frekuensi tegangan pemercepat sekitar 72 MHz.

**Kata kunci:** siklotron DECY-13, lintasan berkas ion, isotop karbon, iterasi 3 dimensi, Scilab 5.4.1

#### ABSTRACT

**ION BEAM TRAJECTORY SIMULATION OF CARBON ISOTOPES IN CYCLOTRON DECY-13.** A simulation on the ion beam trajectories of various carbon isotopes  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ , and  $^{14}\text{C}$  in DECY-13 cyclotron has been carried out using Scilab 5.4.1 software. Calculations in the simulation were carried out in 3 dimensions. The simulation shows trajectory separations, which provide possibility for  $^{14}\text{C}$  measurement such as in carbon dating at accelerating voltage frequency of about 72 MHz.

**Keywords:** cyclotron DECY-13, ion beam trajectories, carbon isotopes, 3 dimension iteration, Scilab 5.4.1

#### PENDAHULUAN

Pertanggalan radiokarbon merupakan salah satu pemanfaatan teknologi nuklir yang sangat spesifik dalam menentukan umur cuplikan bahan organik dengan mengukur kandungan  $^{14}\text{C}$  dalam cuplikan tersebut. Di alam kandungan  $^{14}\text{C}$  selalu terbentuk akibat reaksi sinar kosmis dengan  $^{14}\text{N}$ . Pengukuran kandungan  $^{14}\text{C}$  dapat dilakukan dengan mengukur radioaktivitasnya (umur paro 5730 tahun) maupun dengan pengukuran arus ionnya menggunakan teknik AMS (*Accelerator Mass Spectrometry*). Pada pengukuran yang didasarkan pada radioaktivitas, proses analisisnya relatif lebih lama karena harus melewati beberapa proses antara lain sintesis  $^{14}\text{C}$  menjadi benzen, dilanjutkan dengan pengukuran aktivitas beta dari  $^{14}\text{C}$  yang terkandung dalam benzen tersebut dengan alat pencacah kelip cair, dengan waktu cacah kurang lebih 3 hari. Pengukuran  $^{13}\text{C}$  dari cuplikan  $\text{CO}_2$  dilakukan dengan spektrometer massa untuk koreksi fraksinasi isotop, dan data hasil yang telah terkoreksi masih harus dikoreksi lagi berdasarkan fluktuasi kandungan  $^{14}\text{C}$  pada masa silam dengan koreksi lingkaran pohon <sup>(1)</sup>. Pengukuran  $^{14}\text{C}$  dengan AMS lebih teliti dan peka sehingga hanya perlu cuplikan yang sangat sedikit, tetapi memerlukan akselerator *dc* (percepatan satu kali) dengan tenaga beberapa MeV yang harganya tidak murah <sup>(2,3)</sup>. Resonansi laser juga dapat digunakan untuk pengukuran fraksi  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  dengan ketelitian mendekati AMS ( $^{14}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2 \approx 4.3 \times 10^{-14}$ ) <sup>(4)</sup>.

Siklotron DECY-13 (*Development of Experimental Cyclotron in Yogyakarta*) merupakan suatu prototip siklotron yang direncanakan dibuat di PSTA (Pusat Sains dan Teknologi Akselerator), BATAN (Badan Tenaga Nuklir Nasional) di Yogyakarta. DECY-13 didesain untuk mempercepat berkas ion  $\text{H}^-$  hingga tenaga 13 MeV untuk menghasilkan radioisotop untuk PET (*Positron Emission Tomography*) <sup>(5-7)</sup>. Dalam makalah ini dilaporkan simulasi untuk mempercepat berkas ion negatif berbagai isotop karbon. Tujuan penelitian adalah untuk melihat

kemungkinan pemisahannya dengan menggunakan medan magnet dan medan listrik yang ada di kawasan pusat (*central region*) siklotron DECY-13. Pemisahan ini diharapkan dari hipotesis bahwa perbedaan massa akan menimbulkan perbedaan lintasan akibat beda percepatan.

Untuk perhitungan digunakan perangkat lunak Scilab 5.4.1 yang merupakan perangkat lunak gratis (*freeware*). Pilihan perangkat lunak ini karena langsung dapat digunakan untuk membuat gambar lintasan, dan perangkat lunak serupa yang tidak gratis, Matlab, dalam beberapa pustaka juga digunakan untuk perhitungan lintasan serupa. Hasil perhitungan dianalisis untuk menunjukkan pemisahan antara lintasan berkas ion  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  dan ion yang massanya berdekatan. Kajian serupa juga telah dilakukan untuk siklotron dengan tenaga yang lebih kecil <sup>(8,9)</sup>.

Perhitungan lintasan berkas ion muatan  $q$  kecepatan  $\vec{v}$  didasarkan pada gaya  $\vec{F}$  yang diterima oleh partikel bermuatan dalam medan listrik  $\vec{E}$  dan medan magnet  $\vec{B}$

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) . \quad (1)$$

Medan listrik  $\vec{E}$  merupakan fungsi posisi ( $x,y,z$ ) dan waktu ( $t$ ), sedang medan magnet  $\vec{B}$  merupakan fungsi posisi saja. Besar kedua medan ini dapat diperoleh dari simulasi perhitungan maupun dari pengukuran (*mapping*).

Secara komponen persamaan (1) dapat dituliskan sebagai

$$\begin{aligned} dp_x/dt &= F_x = q(E_x + v_y B_z - v_z B_y), \\ dp_y/dt &= F_y = q(E_y + v_z B_x - v_x B_z), \\ dp_z/dt &= F_z = q(E_z + v_x B_y - v_y B_x). \end{aligned} \quad (2)$$

Penyelesaian masing-masing komponen persamaan (1) menggunakan metode Runge-Kutta orde-4 (RK4) adalah <sup>(10)</sup> ( $j = x,y,z$ )

$$p_j(t_0 + dt) = p_{j0} + (k_{j1} + 2k_{j2} + 2k_{j3} + k_{j4})/6 \quad (3)$$

dengan

$$\begin{aligned} k_{j1} &= F_j(t_0, p_0)dt, \\ k_{j2} &= F_j(t_0 + dt/2, p_0 + k_{j1}/2)dt, \\ k_{j3} &= F_j(t_0 + dt/2, p_0 + k_{j2}/2)dt, \\ k_{j4} &= F_j(t_0 + dt, p_0 + k_{j3})dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Setelah momentum baru  $p_i$  diperoleh maka kecepatan  $v_i = p_i/\gamma m$  dan posisi baru  $x_i = x_{i0} + v_i dt$  dapat ditentukan,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  merupakan koreksi relativistik,  $c$  kecepatan cahaya dalam vakum (tetapan Einstein).

## METODOLOGI

Penelitian dilakukan dengan mempelajari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dan perhitungan lintasan dilakukan dengan metode iterasi seperti yang telah dibahas dalam pendahuluan, dalam 3 dimensi, kuat medan magnet dan medan listrik seperti pada DECY-13, tegangan maksimum *dee* 40 kV, frekuensi medan pemercepat 77,66 MHz, fase awal sekitar  $-50^\circ$  tergantung kestabilan lintasan yang diperoleh. Untuk tenaga awal digunakan tenaga berkas setelah bergerak 0,1 mm dari lubang sumber ion <sup>(7)</sup>.

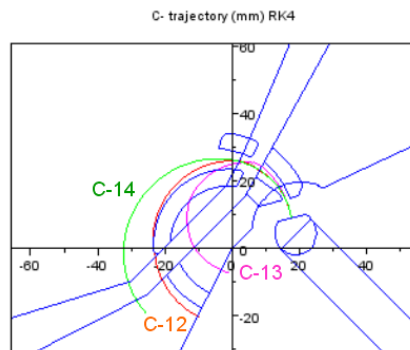
Program lintasan berkas  $\text{H}^-$  dibuat dengan Scilab 5.4.1. Program tersebut memerlukan data kuat medan magnet dalam format *binary* yang sesuai. Karena simetri, data kuat medan magnet ini cukup mencakup 1/8 dari seluruh kawasan medan yang berukuran 480 mm  $\times$  480 mm  $\times$  30 mm, yang diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak Opera3d dan modul Tosca <sup>(6)</sup>. Besar data *binary* sekitar 38 MB untuk masing-masing komponen  $B_x$ ,  $B_y$ , dan  $B_z$ .

Data potensial listrik dengan potensial *dee* 40 kV terhadap *ground* juga dihitung dengan perangkat lunak Opera3d dan modul Tosca juga diperlukan. Karena tidak simetris data meliputi seluruh kawasan medan yang berukuran 480 mm × 480 mm × 30 mm. Supaya ukuran data tidak terlalu besar, data potensial dibagi menjadi 4 kuadran, yaitu V1, V2 (dimasukkan dengan load V12), V3, dan V4 (dimasukkan dengan load V34). Besar data *binary* sekitar 56 MB untuk masing-masing V1, V2, V3, dan V4. Medan listrik  $E_x$ ,  $E_y$ , dan  $E_z$  untuk masing-masing kuadran dihitung dari beda potensial pada  $ds = 1$  mm ke arah masing-masing komponen medan.

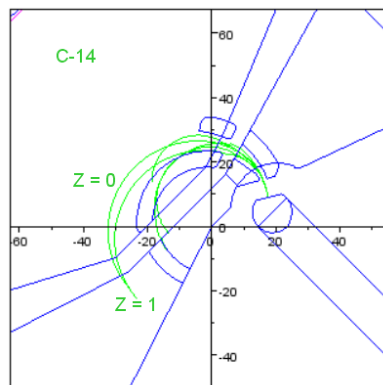
Berkas lintasan dimulai pada posisi lubang sumber ion  $x = 17,5$  mm;  $y = 9$  mm;  $z = 0$ . Kecepatan awal berkas diberikan berdasarkan kenaikan tenaga berkas setelah melintas 0,1 mm dari posisi awal, dengan arah gerak sesuai arah medan listrik pada posisi awal. Posisi selanjutnya dihitung dengan menggunakan persamaan (2), (3), dan (4), lintasan diplot pada bidang XY. Karena siklotron bekerja pada harmonik 4, periode putaran sama dengan 4 periode frekuensi medan pemercepat. Frekuensi medan pemercepat yang memberikan pemisahan berkas terbaik untuk berkas ion  $^{12}\text{C}^-$ ,  $^{13}\text{C}^-$ , dan  $^{14}\text{C}^-$  dari simulasi diperoleh sebesar  $12,9 \times f_p \times m_p/m_{\text{C-14}} \approx 72$  MHz,  $m_p$  massa proton,  $f_p = 77,66$  MHz frekuensi pemercepatan proton dalam DECY-13. Karena data medan magnet dan potensial listrik dalam ketelitian mm, maka nilai medan untuk tiap posisi dibulatkan ke nilai mm terdekat, dan digunakan nilai langkah waktu  $dt = 1/(100 \times \text{frekuensi})$ . Garis besar diagram alir (*flowchart*) program perhitungan diberikan pada Lampiran.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi lintasan dengan posisi awal  $x = 17,5$  mm;  $y = 9$  mm;  $z = 0$ , fase awal  $-50^\circ$  diperlihatkan pada Gambar 1. Pada setengah putaran, berkas ion  $^{12}\text{C}^-$  dan  $^{13}\text{C}^-$  tertahan oleh pengarah berkas, sedang berkas  $^{14}\text{C}^-$  diteruskan pada jarak sekitar 33 mm dari pusat koordinat siklotron.

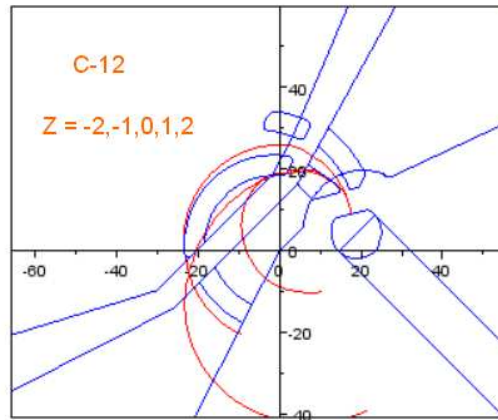


**Gambar 1.** Simulasi lintasan  $^{12}\text{C}^-$ ,  $^{13}\text{C}^-$ , dan  $^{14}\text{C}^-$  pada DECY-13 frekuensi pemercepat  $\sim 72$  MHz, awal posisi dan fase:  $x = 17,5$  mm;  $y = 9$  mm;  $z = 0$ ;  $-50^\circ$ .



**Gambar 2.** Simulasi lintasan  $^{14}\text{C}^-$  pada DECY-13 frekuensi pemercepat  $\sim 72$  MHz, awal posisi dan fase:  $x = 17,5$  mm;  $y = 9$  mm;  $z = -2, -1, 0, 1$ , dan 2 mm;  $-50^\circ$ .

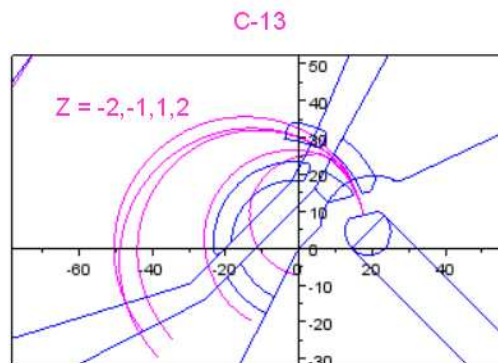
Pada Gambar 3, berkas  $^{12}\text{C}^-$  pada  $z = -2, -1, 0, 1$  dan  $2$  mm semua tertahan oleh pengarah berkas.



**Gambar 3.** Simulasi lintasan  $^{12}\text{C}^-$  pada DECY-13 frekuensi pemercepat  $\sim 72$  MHz, awal posisi dan fase:  $x = 17,5$  mm;  $y = 9$  mm;  $z = -2, -1, 0, 1, \text{ dan } 2$  mm;  $-50^\circ$ .

Hasil simulasi lintasan dengan posisi awal  $x = 17,5$  mm;  $y = 9$  mm;  $z = -2, -1, 0, 1, \text{ dan } 2$  mm, fase awal  $-50^\circ$  diperlihatkan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4. Pada Gambar 2, berkas  $^{14}\text{C}^-$  hanya pada  $z = 1$  mm dan  $0$  diteruskan, sedang berkas dengan  $z = -2, -1, \text{ dan } 2$  mm tertahan oleh pengarah berkas.

Pada Gambar 4, berkas  $^{13}\text{C}^-$  hanya pada  $z = 0$  berkas tertahan sedang pada  $z = -2, -1, 1$  mm semua diteruskan pada jarak  $25, 45, \text{ dan } 50$  mm dari pusat. Meskipun tidak tampak pada sekitar  $33$  mm dari pusat siklotron, tetapi berkas dari nilai  $z$  yang lain (tidak bulat) dapat berinterferensi dengan berkas  $^{14}\text{C}^-$  (Gambar 2). Cara pengurangan interferensi dapat dilakukan dengan membatasi ukuran celah sumber ion menjadi lubang bulat dengan ruji kurang dari  $1$  mm, sehingga hanya berkas sekitar  $z = 0$  yang diteruskan.



**Gambar 4.** Simulasi lintasan  $^{13}\text{C}^-$  pada DECY-13 frekuensi pemercepat  $\sim 72$  MHz, awal posisi dan fase:  $x = 17,5$  mm;  $y = 9$  mm;  $z = -2, -1, 0, 1, \text{ dan } 2$  mm;  $-50^\circ$ .

## KESIMPULAN

Studi menunjukkan bahwa simulasi dengan menggunakan Scilab 5.4.1 pada siklotron PET DECY-13 untuk berkas ion  $^{12}\text{C}^-$ ,  $^{13}\text{C}^-$ , dan  $^{14}\text{C}^-$  telah dapat menunjukkan pemisahan lintasan yang nyata pada setengah putaran lintasan dengan frekuensi pemercepat sekitar  $72$  MHz, sehingga memberikan kemungkinan deteksi seperti dalam analisis pertanggalan radiokarbon.

## DAFTAR PUSTAKA

1. W. FAISAL, SISWANTO, "Pertanggalan Radiokarbon Cuplikan Arang di Daerah Song (Gua) Keplek Gunung Sewu", Prosiding Seminar Nasional X Kimia Dalam Pembangunan, Temu Ilmiah JASA KIAI, Yogyakarta (2007) 35-38
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon\\_dating](http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_dating) (2013), diakses 6 Oktober (2013)
3. HALL ET, *Contemporary Physics*, 1366-5812, Volume 21, Issue 4 (1980) 345-358
4. BLAU, K. STEVEN, *A New Suitor in the Carbon-14 Dating Game*, *Phys. Today*, Vol. 65, Issue 2 (2012) 20.
5. ANONIM, Renstra BATAN 2010 – 2014, Badan Tenaga Nuklir Nasional (2010)
6. P. ANGGRAITA, B. SANTOSA, TAUFIK, E. MULYANI, F.I. DIAH, "Beam Tracking Simulation on the Central Region of A 13 MeV PET Cyclotron," *AIP Conf. Proc.* 1454 (2012) 178-181
7. P. ANGGRAITA, E. MULYANI, "Penggunaan Metode Runge-Kutta (RK4) Pada Simulasi Lintasan Berkas Proton Dalam Siklotron PET 13 MeV," Seminar Nasional Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Yogyakarta (2013) 1-8
8. P. ANGGRAITA, W. FAISAL, "Simulasi Aplikasi Siklotron Untuk Pertanggalan Radiokarbon ( $^{14}\text{C}$ )," Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya 14, (2012) 6-21
9. K.J. BERTSCHE, C.A. KARADI, R.A. MULLER, G.C. PAULSON, *Detection of Radiocarbon in the Cyclotron*, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-29556, (1990)
10. R.H. LANDAU, M.J. PAEZ, C.C. BORDEIANU, *A Survey Computational Physics*, Princeton University Press, (2010)

LAMPIRAN

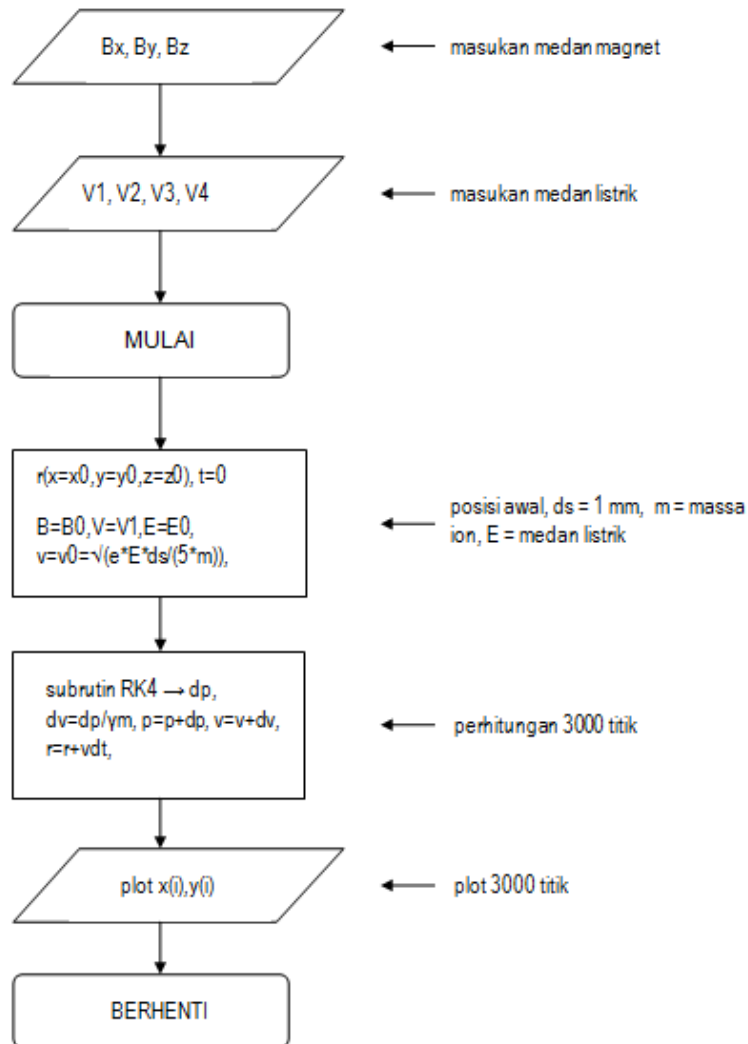


Diagram alir perhitungan lintasan berkas dengan menggunakan RK4