

**PENENTUAN HASIL PRODUK RADIOISOTOP FLUOR-18
PADA FASILITAS SIKLOTRON DECY-13**

***(DETERMINING THE RESULTS OF RADIOISOTOPE PRODUCT
IN DECY-13 CYCLOTRON FACILITY)***

Silakhuddin

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator - BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281
e-mail: silakh@batan.go.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan hasil produk radioisotop khususnya radioisotop fluor-18 pada fasilitas siklotron proton 13 MeV. Perhitungannya menggunakan rumusan *thick target yield* pada reaksi nuklir $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$. Perhitungan ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa rumusan dan parameter-parameter yang dipakai sudah cukup layak untuk digunakan dalam *commissioning* siklotron DECY-13. Hasil perhitungan telah dibandingkan dengan hasil radioisotop dari siklotron-siklotron yang ada di Rumah Sakit Dharmais Jakarta dan MRCCC Jakarta serta standar dari IAEA. Beda dari hasil perhitungan dengan data-data pembanding tidak lebih dari 5%, yang berarti rumus perhitungan ini cukup layak untuk digunakan dalam *commissioning* siklotron. Perhitungan hasil produk fluor-18 dengan menggunakan rumus tersebut adalah 1223 mCi untuk operasi siklotron 30 μA arus berkas proton selama iradiasi 40 menit.

Kata kunci: siklotron, proton, perhitungan hasil radioisotop, fluor-18, *commissioning*

Abstract

This study was aimed at determining the results of radioisotope product in particular radioisotope of fluorine-18 at 13 MeV proton cyclotron facility. The calculation used a formulae of thick target yield on the nuclear reaction of $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$. This calculation is intended to ensure that the formulae and parameters used quite feasible for commissioning DECY-13 cyclotron. The calculation result has been compared with the radioisotope results of the cyclotrons in Dharmais and MRCCC Jakarta hospitals as well as the standards of the IAEA. The difference of results of calculation with comparison data is not more than 5%, which means that the calculation formulae is quite feasible for cyclotron commissioning. The calculation of fluorine-18 product using the formulae is 1223 mCi at 30 μA proton beam current of cyclotron operation and 40 minutes of irradiation.

Keywords: cyclotron, proton, radioisotope yield calculation, fluorine-18, commissioning

PENDAHULUAN

Saat ini di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator BATAN Yogyakarta sedang dilakukan litbang rancang bangun suatu pemercepat partikel bermuatan (akselerator partikel) jenis siklotron dengan nama DECY-13 yang akan menghasilkan berkas proton berenergi 13 MeV. Rencana penggunaan utama dari berkas proton yang akan dihasilkan adalah untuk produksi radioisotop fluor-18 (^{18}F). Radioisotop ini merupakan salah satu di antara radioisotop-radioisotop untuk teknik *imaging Positron Emission Tomography* (PET). PET adalah suatu teknik *imaging* untuk mendiagnosis kelainan organ tubuh manusia, yang menghasilkan gambar irisan tubuh manusia dalam tiga dimensi. Teknik ini dapat mengetahui fungsi (fisiologi) serta proses biokimia dalam tubuh manusia.

Produksi radioisotop ^{18}F dilakukan dengan penembakan berkas proton berenergi proton pada target H_2^{18}O dengan energi proton berkisar antara 10 hingga 20 MeV dan arus berkas proton 20 hingga 100 μA (Jensen, 2012). Reaksi nuklir yang terjadi adalah $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ pada daerah energi beberapa MeV hingga beberapa belas MeV, dengan puncak tampang lintang reaksi pada sekitar 7 MeV (Soppera, Duppont, & Bossant, 2012 dan *International Atomic Energy Agency* [IAEA], 2016). Kurva tampang lintang reaksinya mempunyai ekor

hingga sekitar 20 MeV, sehingga dengan menetapkan energi proton maksimum dari siklotron sebesar 13 MeV diharapkan akan masih cukup untuk menghasilkan aktivitas radioisotop yang bernilai memadai.

Keberhasilan rancang bangun siklotron DECY-13 akan diukur dari jumlah atau aktivitas radioisotop ^{18}F yang akan dihasilkan. Tulisan ini akan membahas tentang hasil-hasil perhitungan simulasi tentang besarnya aktivitas radioisotop yang dihasilkan yang akan dibandingkan dengan acuan-acuan hasil produksi radioisotop pada beberapa fasilitas siklotron untuk medik. Dari hasil perbandingan tersebut dapat dinilai apakah metode perhitungan yang digunakan layak untuk menentukan hasil aktivitas ^{18}F dari hasil rancang bangun siklotron DECY-13. Selanjutnya, dapat diperkirakan hasil produk radioisotope fluor-18 dari siklotron tersebut.

METODE PENELITIAN

Parameter Simulasi akan dihitung aktivitas ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ yang dihasilkan pada fasilitas siklotron proton. Siklotron beroperasi dengan arus proton $I \mu\text{A}$ diiradiasikan pada target air H_2^{18}O diperkaya ^{18}O dengan pengkayaan 97%. Lama iradiasi t menit, dan perhitungan aktivitas ^{18}F ini dilakukan tepat setelah iradiasi (*end of bombardment* = EOB).

Perhitungan yang digunakan di dalam bahasan ini adalah rumus perhitungan hasil

untuk target tebal (*thick target yield*) yang uraiannya sebagai berikut.

Banyaknya radionuklida yang terbentuk dari suatu reaksi nuklir hasil penembakan (iradiasi) partikel bermuatan yang disebut *yield* Y dapat ditulis sebagai

$$Y = n\sigma\Phi(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

dengan n jumlah inti atom target per satuan luas, tampang lintang reaksi nuklir, jumlah partikel penembak per satuan waktu, tetapan peluruhan per satuan waktu dan t lama iradiasi. Suku adalah faktor waktu pertumbuhan radionuklida. Untuk target sepanjang x , nilai n dapat ditulis $n = \frac{\rho N_a}{M} x$ dengan rapat massa target, bilangan Avogadro (atom per mol) dan M no massa atom target. Dengan mengganti n selanjutnya persamaan (1) dapat ditulis

$$Y = \Phi\sigma\frac{\rho N_a}{M}x(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

Karena nilai σ bergantung pada energi partikel penembak E dan E bergantung pada x maka persamaan (2) dapat ditulis

$$Y = \Phi\frac{\rho N_a}{M}\left(\int_0^x \sigma(E)dx\right)(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

Agar dapat diintegrasikan dalam variabel E , dengan menuliskan $dx = \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)}$.

Dengan memasukkan ρ kedalam integrasi maka persamaan (3) dapat ditulis

$$Y = \Phi\frac{N_a}{M}\left[\int_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{1}{\rho}dE/dx\right)}dE\right](1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

dengan E_i energi datang partikel penembak. Setelah partikel penembak masuk ke dalam material target partikel tersebut mengalami penurunan energi hingga mencapai energi ambang terjadinya reaksi nuklir E_{th} sehingga batas integrasinya tidak perlu hingga energi 0. Suku dikenal sebagai besaran *stopping power*.

Suku dalam integrasi dapat dirubah menjadi bentuk sumasi, dan persamaan (4) dapat ditulis dalam bentuk

$$Y = \Phi\frac{N_a}{M}\left[\sum_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{1}{\rho}dE/dx\right)}\Delta E\right](1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

Karena partikel penembak adalah bermuatan listrik maka jumlah partikel datang per waktu dapat dinyatakan dalam jumlah arus listrik I dibagi dengan jumlah muatannya yaitu $\Phi = zx1,6 \times 10^{-19}$ dengan z no muatan partikel penembak. Akhirnya persamaan (5) menjadi (Lepera, 2016; Saied, 2013; Celler *et al.*, 2011):

$$Y = \frac{6,25 \times 10^{18} I N_a}{z} \left[\sum_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{1}{\rho}dE/dx\right)}\Delta E\right](1 - e^{-\lambda t}) \quad (6)$$

Dalam kasus penembakan proton pada target air $H_2^{18}O$ dan terjadi reaksi $^{18}O(p,n)^{18}F$, maka besaran-besaran dalam persamaan (6) adalah: I arus berkas proton (menjadi variable bebas), z nomor muatan proton sama dengan 1, λ tetapan peluruhan radioaktif radionuklida ^{18}F sebesar 0,0063

per menit (Shetty *et al.*, 2013), t lama waktu iradiasi (menjadi variable bebas), N_A bilangan Avogadro adalah 6×10^{23} atom per mol, ρ rapat massa target $H_2^{18}O$ senilai $0,97 \text{ gr/cm}^3$ (ISOFLEX, 2016), M nomor massa atom ^{18}O yaitu 18 gr/mol , E_{th} energi ambang reaksi nuklir sebesar $2,5 \text{ MeV}$ (Hess *et al.*, 2001), E_i energi datang berkas proton sebesar 13 MeV , $\sigma(E)$ tampang lintang reaksi nuklir pada energi E diperoleh dari data EXFOR (IAEA, 2016) yang disajikan pada Tabel 1, $\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)$ *stopping power* proton dalam material target air datanya diambil dari perhitungan program PSTAR (*National*

Institute of Standards and Technology [NIST], 2016) yang disajikan pada Tabel 2, dan ΔE adalah *step* energi partikel penembak yang ditetapkan = $0,5 \text{ MeV}$. Jika I diambil dalam satuan ampere maka Y akan dinyatakan dalam satuan Bq (*becquerel*) dimana $1 \text{ GBq} = 27 \text{ mCi}$ (*millicurie*).

Pembandingan dilakukan dengan melihat hasil-hasil produksi ^{18}F dari fasilitas-fasilitas siklotron yang telah beroperasi dan juga dengan standar IAEA. Fasilitas-fasilitas siklotron yang diambil sebagai data pembanding adalah siklotron yang ada di Rumah Sakit Dharmas Jakarta yang

Tabel 1.
Data Tampang Lintang Reaksi $^{18}O(p,n)^{18}F$

Energi, MeV	Tampang Lintang Reaksi, mb	Energi, MeV	Tampang Lintang Reaksi, mb
2,5	8,30	10,5	136
3,0	33,4	11,0	121
3,5	44,4	11,5	108
4,0	199	12,0	97,0
4,5	182	12,5	88,0
5,0	501	13,0	80,0
5,5	349	13,5	120
6,0	299	14	94
6,5	284	14,5	72
7,0	218	15	98
7,5	234	15,5	98
8,0	232	16	59,5
8,5	216	16,5	74,5
9,0	194	17	44,6
9,5	173	17,5	54,9
10,0	153	18	50

Penentuan Hasil Produk Radioisotop (Silakhudin)

Tabel 2.
Data Stopping Power Proton pada Air

<i>Kinetic Energy (MeV)</i>	<i>Stopping Power (MeV cm²/g)</i>		
	<i>Electronic</i>	<i>Nuclear</i>	<i>Total</i>
2.500E+00	1.343E+02	9.428E-02	1.344E+02
3.000E+00	1.171E+02	7.972E-02	1.172E+02
3.500E+00	1.041E+02	6.916E-02	1.042E+02
4.000E+00	9.398E+01	6.113E-02	9.404E+01
4.500E+00	8.580E+01	5.481E-02	8.586E+01
5.000E+00	7.906E+01	4.970E-02	7.911E+01
5.500E+00	7.339E+01	4.549E-02	7.343E+01
6.000E+00	6.854E+01	4.195E-02	6.858E+01
6.500E+00	6.434E+01	3.894E-02	6.438E+01
7.000E+00	6.068E+01	3.634E-02	6.071E+01
7.500E+00	5.744E+01	3.407E-02	5.747E+01
8.000E+00	5.456E+01	3.208E-02	5.460E+01
8.500E+00	5.199E+01	3.031E-02	5.202E+01
9.000E+00	4.966E+01	2.873E-02	4.969E+01
9.500E+00	4.756E+01	2.731E-02	4.759E+01
1.000E+01	4.564E+01	2.603E-02	4.567E+01
1.050E+01	4.388E+01	2.487E-02	4.391E+01
1.100E+01	4.227E+01	2.380E-02	4.230E+01
1.150E+01	4.079E+01	2.283E-02	4.081E+01
1.200E+01	3.941E+01	2.194E-02	3.943E+01
1.250E+01	3.813E+01	2.111E-02	3.815E+01
1.300E+01	3.694E+01	2.035E-02	3.696E+01
1.350E+01	3.583E+01	1.964E-02	3.585E+01
1.400E+01	3.479E+01	1.898E-02	3.481E+01
1.450E+01	3.382E+01	1.836E-02	3.384E+01
1.500E+01	3.290E+01	1.778E-02	3.292E+01
1.550E+01	3.204E+01	1.724E-02	3.206E+01
1.600E+01	3.122E+01	1.673E-02	3.124E+01
1.650E+01	3.046E+01	1.626E-02	3.047E+01
1.700E+01	2.973E+01	1.580E-02	2.974E+01
1.750E+01	2.904E+01	1.538E-02	2.905E+01
1.800E+01	2.838E+01	1.497E-02	2.840E+01

beroperasi dengan energi proton 11 MeV dan siklotron di rumah sakit MRCCC Siloam Jakarta menghasilkan energi proton 18 MeV. Karena tidak semua fasilitas pembanding beroperasi dengan energi proton 13 MeV maka perhitungan dalam proses pembandingannya juga akan disesuaikan dengan energi proton di fasilitas tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menghitung *yield* ¹⁸F digunakan persamaan (6) dengan terlebih dahulu menghitung nilai besaran $\frac{\sigma(E)}{(\frac{1}{\rho} dE / dx)} \Delta E$.

Dengan menggunakan data pada Tabel 1 dan 2, nilai besaran tersebut untuk rentang mulai $E_{th} = 2,5$ MeV hingga $E_i = 18$ MeV dengan $\Delta E = 0,5$ MeV ditunjukkan pada Tabel 3.

Untuk energi hingga 13 MeV, dari Tabel 2 diperoleh $\sum_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{(\frac{1}{\rho} dE / dx)} \Delta E = 326,12 \times 10^{-28}$ gr.

Nilai *yield* ¹⁸F dari persamaan (6) diperoleh dengan memasukkan $(1-e^{-\lambda t})$ dan $\sum_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{(\frac{1}{\rho} dE / dx)} \Delta E = 326,12 \times 10^{-28}$ gr pada persamaan tersebut. Pada Tabel 4 ditunjukkan nilai *yield* untuk waktu iradiasi 20 hingga 120 menit pada saat akhir penembakan, EOB

Tabel 3.
Nilai $\frac{\sigma(E)}{(\frac{1}{\rho} dE / dx)} \Delta E$ dari Proton pada Material Air

Energi proton (MeV)	(gr)	Energi proton (MeV)	(gr)
2,5	0,30 10 ⁻²⁸	10,5	15,49 10 ⁻²⁸
3	1,43 10 ⁻²⁸	11	14,30 10 ⁻²⁸
3,5	2,13 10 ⁻²⁸	11,5	13,23 10 ⁻²⁸
4	10,59 10 ⁻²⁸	12	12,30 10 ⁻²⁸
4,5	10,59 10 ⁻²⁸	12,5	11,53 10 ⁻²⁸
5	31,67 10 ⁻²⁸	13	10,82 10 ⁻²⁸
5,5	23,76 10 ⁻²⁸	13,5	16,74 10 ⁻²⁸
6	21,80 10 ⁻²⁸	14	13,50 10 ⁻²⁸
6,5	22,06 10 ⁻²⁸	14,5	10,63 10 ⁻²⁸
7	17,95 10 ⁻²⁸	15	14,88 10 ⁻²⁸
7,5	20,36 10 ⁻²⁸	15,5	15,28 10 ⁻²⁸
8	21,24 10 ⁻²⁸	16	9,52 10 ⁻²⁸
8,5	20,76 10 ⁻²⁸	16,5	12,22 10 ⁻²⁸
9	19,52 10 ⁻²⁸	17	7,50 10 ⁻²⁸
9,5	18,18 10 ⁻²⁸	17,5	9,45 10 ⁻²⁸
10	16,70 10 ⁻²⁸	18	8,8 10 ⁻²⁸

(*End of Bombardment*). Pada kolom terakhir dari Tabel 4 dicantumkan nilai *yield* untuk setiap μA arus berkas proton.

Hasil pada Tabel 4 bila dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada operasi fasilitas produksi ^{18}F adalah: *pertama*, operasi siklotron Eclipse di Rumah Sakit Kanker Dharmas dengan energi proton 11 MeV dan arus $30 \mu\text{A}$ waktu iradiasi 20 menit menghasilkan 394,96 mCi pada saat EOB (Listiawadi dkk., 2013). Jika data ini dihitung menggunakan persamaan (6) dan dengan perhitungan pada Tabel 1 (untuk $t = 20$ menit) dan Tabel 2 (untuk energi proton hingga 11 MeV) diperoleh $Y = 415,53$ mCi. Perbedaan hasil praktis dengan perhitungan ini sebesar 5%.

Tabel 4.
Hasil Perhitungan Yield ^{18}F

Waktu iradiasi t (menit)	$(1 - e^{-\lambda t})$	<i>Yield ^{18}F</i>	
		GBq/ μA	mCi/ μA
20	30	40	60
120	0,118	0,172	0,222
0,315	0,530	0,80	1,17
1,51	2,14	3,60	21,60
31,59	40,77	57,78	97,20

Kedua, siklotron Cyclone 18/9 di Rumah Sakit MRCCC Jakarta yang beroperasi dengan energi proton 18 MeV dengan waktu iradiasi 40 menit dan arus proton $37 \mu\text{A}$ dihasilkan *yield* pada saat EOB sebesar

1961 mCi atau $53 \text{ mCi}/\mu\text{A}$ (Kusuma, Tuloh, & Suryanto, 2012). Perhitungan dengan persamaan (6) untuk energi 18 MeV $Y = 53,5 \text{ mCi}/\mu\text{A}$ yang sedikit lebih besar, tetapi hanya berbeda 4,5% terhadap hasil di rumah sakit tersebut.

Ketiga, dalam publikasi IAEA tentang pedoman desain fasilitas dan produksi FDG dengan siklotron disebutkan bahwa dengan energi proton 10-13 MeV dan iradiasi satu jam dapat diperoleh $60 \text{ mCi}/\mu\text{A}$ [^{18}F] fluoride (IAEA, 2012). Dalam perhitungan ini diperoleh $57,78 \text{ mCi}/\mu\text{A}$ ^{18}F , yang berselisih 4%.

Dari perbandingan tersebut terlihat bahwa selisih antara perhitungan dengan hasil praktik di dua fasilitas siklotron dan standard IAEA tidak lebih dari 5%. Dengan demikian metode perhitungan ini dapat dipakai untuk menilai kelayakan dari hasil rancangbangun siklotron DECY 13 setelah proses *commissioning*.

Waktu operasi suatu fasilitas siklotron di rumah sakit dalam produksi radioisotop ^{18}F sekitar 40 menit. Produk radioisotop tersebut kemudian disintesis menjadi bentuk senyawa yang disebut FDG (fluoro-deoxy glucose) yang disuntikan ke tubuh manusia untuk *imaging* kelainan organ tubuh manusia. Setiap pasien umumnya membutuhkan sekitar 20 mCi FDG. Karena adanya faktor peluruhan dari radioisotop maka dibutuhkan paling tidak dua kali radioisotop ^{18}F sewaktu selesai iradiasi di

siklotron yaitu sekitar 40 mCi. Jika siklotron DECY-13 nantinya dioperasikan dengan arus 30 μA selama 40 menit setiap kali operasi, maka berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 2 di atas akan dihasilkan 40,77 30 1223 mCi. Ini berarti setiap kali operasi siklotron akan mampu untuk melayani pasien kira-kira 30 orang dalam *imaging* organ tubuh.

SIMPULAN

Perhitungan produk radionuklida fluor-18 dari reaksi $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ pada siklotron menggunakan rumus *thick target yield* telah dibandingkan dengan hasil praktis dari dua fasilitas siklotron di rumah sakit dan dibandingkan dengan standard dari IAEA. Perbandingan menghasilkan nilai yang layak karena selisihnya tidak ada yang melampaui 5%. Ini berarti bahwa rumus perhitungan yang telah digunakan ini nantinya dapat digunakan dalam *commissioning* kinerja siklotron DECY-13. Hasil perhitungan kasar menyebutkan bahwa jika siklotron DECY-13 dioperasikan dengan arus berkas proton 30 μA dan waktu iradiasi target selama 40 menit, hasil radioisotopnya akan mampu digunakan untuk *imaging* sebanyak 30 orang.

DAFTAR PUSTAKA

Celler, A., Hou, X., Benard, F., & Ruth, T. J. (2011). Theoretical modeling of yields for proton-induced reactions on natural

and enriched molybdenum targets. *Phys Med Biol*, 56, 5469-5484.

Hess, E., Takács, S., Scholten, B., Tárkányi, F., Coenen, H. H., & Qaim, S. M. (2001). Excitation function of the $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ nuclear reaction from threshold up to 30 MeV. *Radiochimica Acta*, 89(6), 357-362. Diunduh dari <https://www.researchgate.net/publication/>.

International Atomic Energy Agency [IAEA]. (2012). Cyclotron produced radionuclides: Guidance on facility design and production of [^{18}F] FDG. *IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 3 OSE (FDG)*, IAEA.

International Atomic Energy Agency [IAEA]. (2016). *Experimental nuclear reaction data (EXFOR) database version of May 05, 2016*. Nuclear Data Center IAEA, Software Version of 2016.05.10.

ISOFLEX. (2016). Isotopes for science, medicine and industry. Diunduh dari <http://www.isoflex.com/isotopes/>.

Jensen, M. (2012). Particle Accelerators for PET Radionuclides. *Nuclear Medicine Review*, 15(C), 9-12.

Kusuma, A., Tuloh, R.A., & Suryanto, H. (2012, November). Pengoperasian cyclotron 18/9 untuk produksi radionuklida ^{18}F dalam penyiapan radiofarmaka FDG di Rumah Sakit MRCCC Jakarta. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Tek-nologi Akselerator dan Aplikasinya* (pp. 202-212).

Lepera, C. G. (2016). *Cyclotron production of PET radionuclides selection and location*. Cyclotop and Experimental

Penentuan Hasil Produk Radioisotop (Silakhudin)

- Diagnostic Imaging, The University of Texas MD Anderson Cancer Center Houston, TX. www.aapm.org/meetings/08SS.
- Listiawadi F. D., Huda N., Suryanto H., & Parwanto. (2013, Oktober). Produksi radionuklida Fluor-18 untuk penandaan radiofarmaka ^{18}F FDG menggunakan siklotron eclipse di Rumah Sakit Kanker Darmas. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya* (p. 61).
- Institute of Standards and Technology [NIST]. (2016). *Stopping power and range tables for proton*. Diunduh dari http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/ap_table.pl.
- Saied, B. M. (2013). Production of medically radionuclide ^{123}I using p, d and ^4He particles induced reactions. *International Journal of Physics and Research (IJPR)*, 3(2), 17-26.
- Shetty, H. U., Morse, C. L., Zhang, Y., & Pike, V. W. (2013). Characterization of fast-decaying PET radiotracers solely through LC-MS/MS of constituent radioactive and carrier isotopologues. *EJNMMI*, 3(1), 1-8.
- Soppera, N., Dupont, E., & Bossant, M. (2012). *JANIS book of proton-induced cross-sections*, OECD NEA Data Bank, June 2012.