

PENGGUNAAN FASILITAS SIKLOTRON BATAN UNTUK PRODUKSI TALIUUM-201

Sunarhadijoso Soenarjo, Hari Suryanto, Silakhuddin, Kadarisman Wisnukaton
Pusat Produksi Radioisotop - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PENGGUNAAN FASILITAS SIKLOTRON BATAN UNTUK PRODUKSI TALIUUM-201. Radioisotop Talium-201 merupakan salah satu radioisotop yang tidak dapat dihasilkan dari reaktor nuklir, namun mempunyai karakteristik yang mendukung pemakaiannya untuk diagnosis penyakit jantung. Siklotron BATAN yang menghasilkan proton berenergi 26,5 Mev sangat layak digunakan untuk memproduksi radioisotop tersebut melalui reaksi inti $^{203}\text{Tl} (p,3n) ^{201}\text{Pb} \longrightarrow ^{201}\text{Tl}$. Sebagai bahan sasaran digunakan ^{203}Tl diperkaya sampai di atas 99 % yang dilapiskan pada permukaan keping target melalui proses elektrolisis. Arus berkas eksterna yang sampai pada target berkisar antara 30 - 46 μA dengan efisiensi ekstraksi antara 62 - 82 %. Iradiasi sasaran dilakukan selama 5,8 - 8,0 jam. Kuantitas arus berkas pada target sangat dipengaruhi oleh fluktuasi efisiensi ekstraksi berkas yang sulit dihindari karena banyaknya variabel operasi yang mempengaruhi efisiensi ekstraksi sementara hubungan ketergantungan antara masing-masing variabel belum diketahui. Fluktuasi tampilan produk ^{201}Tl menunjukkan adanya tahapan kritis pada rantai proses di mana terdapat kemungkinan yang cukup besar untuk lepasnya spesi ^{201}Tl sehingga tidak diperoleh kembali sebagai produk. Secara umum larutan *bulk* ^{201}Tl yang dihasilkan memenuhi persyaratan untuk proses lanjut menjadi sediaan radiofarmaka. Untuk meningkatkan jaminan keamanan dan keselamatan operasi siklotron masih diperlukan sistem kontrol untuk mengendalikan profil tumbukan berkas pada preseptum.

ABSTRACT

UTILIZATION OF BATAN'S CYCLOTRON FACILITY FOR THE PRODUCTION OF THALLIUM-201. Thallium-201 (^{201}Tl) is one of the radioisotopes which can not be produced by nuclear reactor but has characteristics supporting its application for diagnosis of cardiovascular disease. BATAN's cyclotron, having proton beam energy of 26.5 Mev, is suitable for producing ^{201}Tl by nuclear reaction of $^{203}\text{Tl} (p,3n) ^{201}\text{Pb} \longrightarrow ^{201}\text{Tl}$. Enriched ^{203}Tl up to 99 % electroplated on target assembly surface was used as target material. The proton beam current coming to the target was around 30 to 46 μA whereas the beam extraction efficiency was around 62 to 82 %. The irradiation was carried out in about 5.8 to 8.0 hours. There are a lot of cyclotron operation variables affecting beam extraction efficiency, and the interdependence of the variables is not known, so that the beam extraction efficiency fluctuates from one experiment to another. Fluctuation of ^{201}Tl production yield indicates that there are some critical stages in the processing sequence in which the ^{201}Tl is partly lost. Generally, the resulting ^{201}Tl bulk solution is suitable to be formulated for radiopharmaceuticals preparation. For increasing cyclotron operational safety, a system to control the profile of beam collision on the preseptum is required.

PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan teknologi kedokteran nuklir, semakin terasa adanya keterbatasan radioisotop yang dihasilkan dari reaktor nuklir. Untuk berbagai diagnosis secara teknonuklir seringkali dibutuhkan radioisotop tertentu yang tidak dapat dihasilkan dari reaktor nuklir, baik melalui aktivasi neutron maupun reaksi belah bahan bakar nuklir. Radioisotop Talium-201 (^{201}Tl) adalah salah satu jenis radioisotop yang tidak dapat dihasilkan dari reaktor nuklir, dan hanya dapat dibuat

melalui aktivasi dengan partikel bermuatan dalam fasilitas pencepat partikel (akselerator). Akan tetapi karakteristik nuklir, kimiawi dan biomedik ^{201}Tl menjadikan radio isotop tersebut sebagai radioisotop pilihan untuk diagnosis penyakit dan/atau anomali jantung. Hal ini mendorong dilakukannya banyak penelitian untuk pengembangan metode pembuatan dan pemisahan ^{201}Tl (1 - 6). Sebagai bahan sasaran digunakan Tl alam atau ^{203}Tl diperkaya (3,4,6) atau Pb alam (2,5). Pada umumnya proses

pemisahan didasarkan pada metode ekstraksi, pengendapan, penukaran ion atau gabungan dari metode tersebut.

BATAN telah memiliki dan mengoperasikan mesin akselerator jenis siklotron model CS-30. Siklotron ini menghasilkan berkas proton berenergi 26,5 Mev sehingga sangat layak digunakan untuk memproduksi ^{201}Tl melalui reaksi inti $^{201}\text{Tl} (p,3n) ^{201}\text{Pb} \longrightarrow ^{201}\text{Tl}$ yang mempunyai penampang lintang reaksi maksimum pada energi proton sekitar 27 Mev (7).

Dalam makalah ini dikemukakan penggunaan fasilitas siklotron BATAN tersebut di atas untuk produksi ^{201}Tl . Disajikan pula evaluasi proses radiokimia yang dilakukan dalam beberapa kali percobaan produksi ^{201}Tl tersebut. Diharapkan makalah ini dapat merupakan acuan untuk upaya perbaikan lebih lanjut dalam meningkatkan daya guna siklotron serta kemampuan produksi ^{201}Tl . Hal ini dirasakan perlu dalam mendukung kemandirian untuk penyediaan radioisotop dari siklotron, khususnya ^{201}Tl yang terasa semakin banyak dibutuhkan untuk tujuan diagnosis medik secara teknuklir.

TATAKERJA

Fasilitas Iradiasi Dan Sistem Transportasi Target.

Fasilitas iradiasi siklotron BATAN merupakan stasiun target padat eksterna yang dihubungkan ke mesin siklotron dengan saluran berkas dan dilengkapi dengan sistem pemvakuman untuk mencapai tingkat kevakuman ruang target sampai sekitar 10^{-4} Torr. Ke arah *hot cell* proses produksi, fasilitas iradiasi tersebut dihubungkan dengan saluran pneumatik untuk transportasi target dari fasilitas iradiasi ke *hot cell* dan sebaliknya.

Pemasangan target pada fasilitas iradiasi dilakukan secara mekanik otomatis dengan adanya manipulator yang dapat memegang, mendorong dan menarik target dan menempatkan target pada posisi siap iradiasi. Bagan fasilitas iradiasi dan perangkat manipulator tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.

Transportasi target dari *hot cell* ke fasilitas iradiasi dan sebaliknya dilakukan secara semi otomatis terkendali dari Ruang Kontrol Operasi Siklotron. Jalur transportasi melalui saluran pneumatik dengan sistem udara bertekanan tidak kurang dari 42 kPa.

Target yang akan diiradiasi dipasangkan pada sistem *rabbit* yang kemudian ditempatkan di stasiun pengiriman di dalam *hot cell*. Dengan

pengendalian dari Ruang Kontrol Operasi Siklotron, target dikirimkan ke fasilitas iradiasi. Selanjutnya setelah dilepaskan dari sistem *rabbit*, target dipasangkan pada posisi siap iradiasi.

Sasaran pasca iradiasi dilepaskan dari posisi iradiasi dan dipasangkan kembali pada sistem *rabbit* untuk kemudian dikirimkan kembali ke *hot cell* melalui jalur yang sama dengan pengiriman ke fasilitas iradiasi.

Penyiapan Bahan Sasaran

Bahan sasaran $^{203}\text{Tl}_2\text{O}_3$ yang diperkaya sampai di atas 99 % (dari ORNL-USA dan/atau Nordion-Kanada) dijadikan larutan *electroplating* dalam bentuk talium-(I)-sulfat mengikuti prosedur yang telah dikemukakan dalam tulisan terdahulu (8) untuk kemudian dilapiskan pada permukaan target dengan cara elektrolisis (8). Pada proses elektrolisis tersebut keping target yang telah diketahui beratnya berfungsi sebagai katode dan dipasangkan sebagai salah satu sisi samping bejana elektrolisis. Elektrolisis dilakukan pada kondisi ruang dengan arus rata-rata 60 mA selama 4 - 5 jam untuk mendapatkan deposit ^{203}Tl pada target sebanyak 1,6 - 2,0 gram.

Setelah elektrolisis sasaran selesai, larutan *electroplating* dipindahkan dari bejana elektrolisis, dan keping target dilepas dari bejana. Selanjutnya keping target dikeringkan dengan kertas serap dan kemudian ditimbang untuk mengetahui berat deposit yang diperoleh.

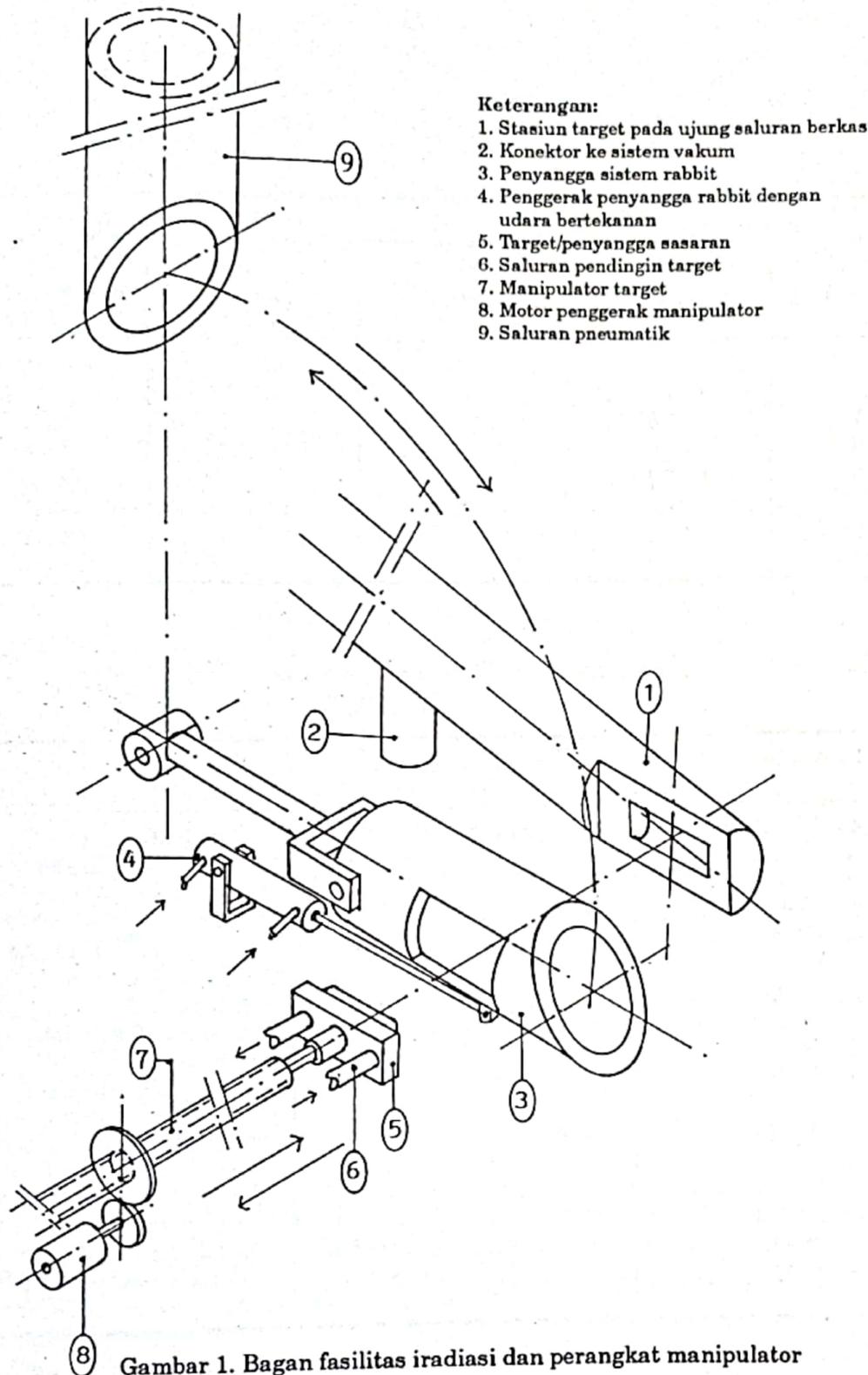
Iradiasi Bahan Sasaran

Target yang telah dilapisi deposit bahan sasaran dikirim ke fasilitas iradiasi dari *hot cell* dengan menggunakan sistem *rabbit* (saluran pneumatik). Iradiasi dengan berkas proton dilakukan selama waktu tertentu dengan dosis iradiasi atau arus berkas rata-rata yang tertentu pula seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Selama iradiasi terjadi reaksi inti $^{201}\text{Tl} (p,3n) ^{201}\text{Pb}$ dan beberapa reaksi inti samping seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Pemisahan ^{201}Pb Dari Sasaran ^{203}Tl

Segera setelah EOB (End Of Bombardment = selesainya proses iradiasi), target dikirimkan kembali ke *hot cell*. Di dalam *hot cell*, keping target dipasangkan sebagai dasar bejana pelarutan. Deposit bahan sasaran dilarutkan dalam 10 ml asam nitrat 1,6 N dan selanjutnya larutan bahan sasaran dipindahkan ke dalam tabung pengendapan melalui pengisapan dalam vakum. Skema peralatan gelas yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.



Selanjutnya spesi ^{201}Pb dalam larutan diendapkan sebagai hidroksida dengan penambahan pengemban 10 ml larutan $\text{Fe}(\text{NO})_3$ yang mengandung 5 mg $\text{Fe}(\text{III})$ dan 5 ml NH_4OH pekat. Endapan hidroksida yang dihasilkan disaring pada filter dengan porositas filtrasi sekitar $5\mu\text{m}$ dan dicuci dengan air. Filtrat dialirkan ke dalam botol penampung dan disimpan

sebagai fraksi ^{203}Tl untuk perlakuan daur ulang nantinya.

Endapan hidroksida segera dilarutkan dengan penambahan HCl 3 N dan dialirkan ke dalam kolom resin AG 1 X 8 (Cl^-) 100 - 200 mesh (1 cm x 8 cm) yang telah dikondisikan sebelumnya dengan larutan HCl 1,2 N. Spesi $\text{Fe}(\text{III})$ dielus keluar kolom dengan larutan HCl 1,2 N

Tabel 1. Tampilan proses produksi ^{201}Tl

Parameter berkas rata-rata			Tampilan produk ^{201}Tl	
Efisiensi ekstraksi (%)	Arus pada target (μA)	Waktu iradiasi (jam)	Aktivitas produk (mCi)	Yield pada 32 J pasca EOB ($\text{mCi}/\mu\text{A}\cdot\text{J/g}$)
- ¹⁾	30,0	5,0	41,61	0,16
78,1	32,0	6,3	55,56	0,15
72,7	35,0	5,8	153,17	0,45
70,0	41,0	6,0	186,66	0,58
82,0	45,7	6,0	158,87	0,35
62,0	31,0	8,0	142,20	0,37
65,0	31,5	7,6	107,20	0,31

Keterangan : ¹⁾ tidak tercatat

Tabel 2. Reaksi inti samping pada iradiasi ^{201}Tl dengan proton berenergi 26,5 MeV.

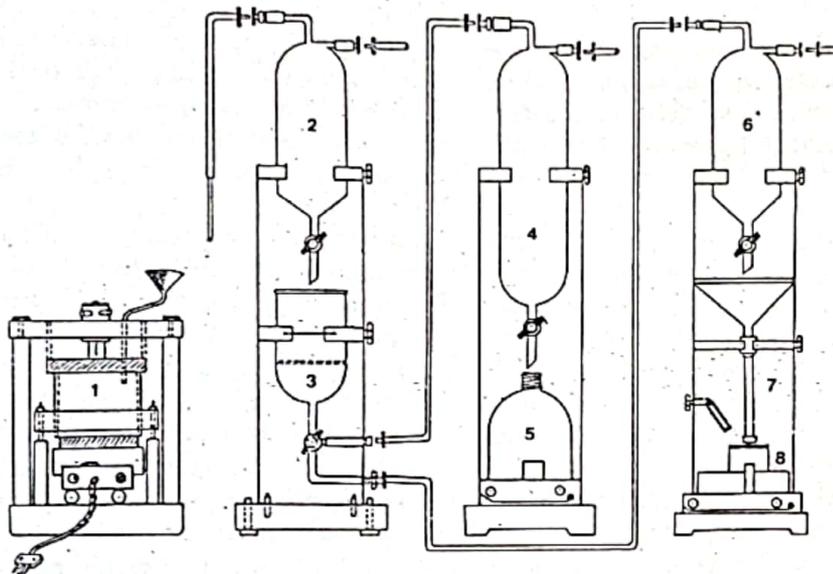
Reaksi inti	Penampang lintang (mili barn) ^{*)}	Waktu paruh nuklida yang dihasilkan (jam)
$^{203}\text{Tl} (p, 4n) \xrightarrow{\quad} ^{200}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\quad} ^{200}\text{Tl}$	sangat rendah	^{200}Pb : 21,5 ^{200}Tl : 26
$^{203}\text{Tl} (p, 2n) \xrightarrow{\quad} ^{202\text{m}}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\quad} ^{202}\text{Tl}$	± 30	$^{202\text{m}}\text{Pb}$: 3,6 ^{200}Tl : 293,5
$^{205}\text{Tl} (p, 2n) \xrightarrow{\quad} ^{204}\text{Pb}$	± 28	^{204}Pb : stabil
$^{205}\text{Tl} (p, 3n) \xrightarrow{\quad} ^{203}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\quad} ^{203}\text{Tl}$	± 1270	^{203}Pb : 52 ^{203}Tl : stabil
$^{205}\text{Tl} (p, 4n) \xrightarrow{\quad} ^{202\text{m}}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\quad} ^{202}\text{Tl}$	sangat rendah	$^{202\text{m}}\text{Pb}$: 3,6 ^{202}Tl : 293,5
REAKSI UTAMA: $^{203}\text{Tl} (p, 3n) \xrightarrow{\quad} ^{201}\text{Pb}$ $\xrightarrow{\quad} ^{201}\text{Tl}$	± 1230	^{201}Pb : 9,4 ^{201}Tl : 73,1

Keterangan : ^{*)} diperkirakan berdasarkan pustaka (15)

dan kemudian spesi ^{201}Pb dielusi dengan larutan HCl 8 N. Fraksi ^{201}Pb dalam HCl 8 N tersebut dikisatkan dan dibiarkan selama satu hari dua malam untuk meluruhkan ^{201}Pb menjadi ^{201}Tl . Waktu ideal untuk peluruhan tersebut adalah 32 jam sesudah EOB.

Pemisahan Dan Pemurnian Fraksi ^{201}Tl

Residu penguapan fraksi ^{201}Pb yang telah meluruh dilarutkan dalam 5 ml HCl 1,2 N yang dijenuhkan dengan gas SO_2 untuk mereduksi spesi $^{201}\text{Tl(III)}$ menjadi $^{201}\text{Tl(I)}$. Larutan dilewatkan pada kolom resin AG 1 X 8 (Cl⁻) 100 - 200



Keterangan:

1. Bejana pelarut; 2. Tabung pengendapan; 3. Filter; 4. Tabung fraksi ^{203}Tl ; 5. Botol penampung fraksi ^{203}Tl ; 6. Tabung fraksi ^{201}Pb ; 7. Kolom resin; 8. Bejana penampung fraksi ^{201}Pb

Gambar 2. Perangkat proses pemisahan ^{201}Pb

mesh (1 cm x 8 cm) yang telah dikondisikan dengan HCl 1,2 N yang dijenuhkan dengan SO_2 . Elusi menggunakan pelarut pengkondisi kolom tersebut meloloskan spesi ^{201}Tl dari kolom sedangkan sisa spesi ^{201}Pb tetap tertahan di dalam kolom.

Eluat yang mengandung ^{201}Tl selanjutnya dikisatkan dan residunya dilarutkan dalam larutan salin atau HCl 0,1 N atau air secukupnya sesuai dengan kebutuhan.

Pemeriksaan Kualitas Larutan Bulk ^{201}Tl

Pemeriksaan kualitas larutan *bulk* ^{201}Tl yang dihasilkan dilakukan sepenuhnya oleh Laboratorium Kendali Kualitas PPR. Pemeriksaan tersebut meliputi pH, konsentrasi radioaktif, kandungan kimiawi Tl, Fe dan Ag, kemurnian

radiokimia, kemurnian radionuklida serta profil spektrum γ , dan dilakukan dengan metode yang digunakan untuk pemeriksaan secara rutin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Percobaan produksi yang dilakukan didasarkan pada hasil alih teknologi dari AECL (9) sebagai realisasi perjanjian antara BATAN dengan AECL (10). Karena itu pada setiap pengu-langan percobaan, dilakukan evaluasi dan upaya perbaikan tahapan proses yang dipandang perlu untuk lebih meningkatkan hasil, walaupun pokok-pokok perlakuan pada dasarnya adalah sama.

Pada Tabel 1 ditunjukkan parameter ber-kas dan hasil produksi yang diperoleh dalam

beberapa pengulangan percobaan yang dilakukan.

Dari data yang ditampilkan pada Tabel 1 dapat ditinjau 2 aspek penting, yaitu tampilan unjuk kerja mesin siklotron BATAN dan tampilan kuantitas produk larutan *bulk* ^{201}Tl . Tentang tampilan unjuk kerja siklotron BATAN, terlihat bahwa efisiensi ekstraksi berkas tidak konsisten dari satu operasi ke operasi berikutnya. Hal ini disebabkan sangat banyaknya variabel operasi siklotron yang mempengaruhi besaran efisiensi ekstraksi tersebut (11,12), misalnya posisi dan tegangan deflektor, kombinasi tegangan ke empat kumparan harmonik dan posisi saluran magnet yang menghubungkan sistem deflektor dengan saluran berkas. Walaupun efisiensi ekstraksi yang dapat dicapai sudah lebih baik daripada harga minimum yang dinyatakan dalam Dokumen Final Acceptance Test, yaitu 60 % (13) namun pada dasarnya semakin besar efisiensi ekstraksi akan semakin menguntungkan.

Semakin tinggi efisiensi ekstraksi berarti semakin kecil penahanan berkas pada sistem deflektor dan semakin rendah pula efek tumbukan berkas dengan preseptum pada sistem deflektor. Di samping itu arus interna yang harus dibangkitkan juga tidak perlu terlalu besar. Hal ini sangat berarti apabila dikaitkan dengan keamanan pemakaian sumber ion dan komponen preseptum.

Kuantitas arus yang sampai pada target umumnya semakin besar apabila efisiensi ekstraksi semakin besar. Hal ini mudah difahami, mengingat semakin besar efisiensi ekstraksi berarti semakin mungkin meningkatkan kuantitas arus berkas eksterna.

Waktu iradiasi dapat memberikan gambaran bahwa siklotron BATAN cukup aman untuk pengoperasian kontinu selama 8 jam. Dari pengalaman selama percobaan, didapati bahwa faktor utama untuk menjamin keandalan dan keamanan operasi sistem siklotron adalah pengendalian tumbukan berkas pada komponen preseptum, terutama bila efisiensi ekstraksi yang dicapai masih di bawah 75 %. Hal ini sulit dilakukan karena tidak adanya indikator untuk mengamati profil tumbukan berkas pada preseptum. Suatu sistem kendali berkas sedang dicoba dewasa ini untuk tujuan tersebut di atas. Sistem kendali berkas tersebut dirancang mempunyai hubungan kontrol dengan sumber ion. Apabila terjadi tumbukan berkas pada preseptum secara berlebihan maka fungsi operasi

sumber ion akan diturunkan, sehingga pembangkitan arus berkas menjadi berkurang.

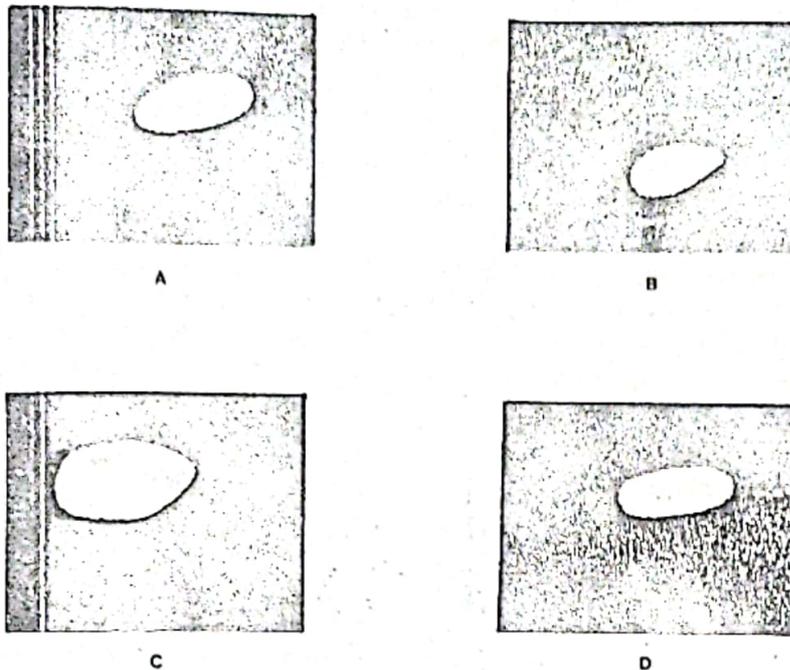
Tampilan kuantitas produk ^{201}Tl menunjukkan fluktuasi yang masih cukup besar. Hal ini menunjukkan adanya tahapan-tahapan kritis pada rantai proses radiokimia di mana spesi ^{201}Tl terlepas dan tidak diperoleh kembali sebagai produk. Penelusuran lebih lanjut yang kemudian dilakukan memberikan indikasi bahwa tahapan kritis tersebut adalah tahapan pencucian dan pelarutan endapan $^{201}\text{Pb}(\text{OH})_2$ serta elusi fraksi Fe(III) dan ^{201}Pb dari kolom resin pertama. Di samping adanya tahapan kritis pada rantai proses radiokimia, fluktuasi kuantitas produk juga dipengaruhi oleh perbedaan profil berkas pada permukaan target. Variabel ini tidak dapat diamati selama proses iradiasi, melainkan setelah selesainya proses pemisahan ^{201}Pb yaitu melalui radiografi permukaan target pasca proses (11,12). Pada Gambar 3 ditunjukkan contoh hasil radiografi target pasca proses yang menunjukkan adanya perbedaan profil berkas pada target.

Untuk mengatasi kesulitan pengamatan dan pengendalian profil berkas pada target selama proses iradiasi, dewasa ini sedang dilakukan pengembangan sistem monitor berkas eksterna yang didasarkan pada terjadinya perpendaran cahaya bila lapisan ZnS ditembak dengan berkas proton (14).

Hasil pemeriksaan kualitas produk larutan *bulk* ^{201}Tl menunjukkan bahwa produk ^{201}Tl yang dihasilkan mempunyai kemurnian radiokimia maupun radionuklida yang tinggi. Gambar 4 menunjukkan pola kromatogram dengan fasa diam kertas Whatman I dan fasa gerak campuran etanol - HCl 5 N (9 : 1, v/v).

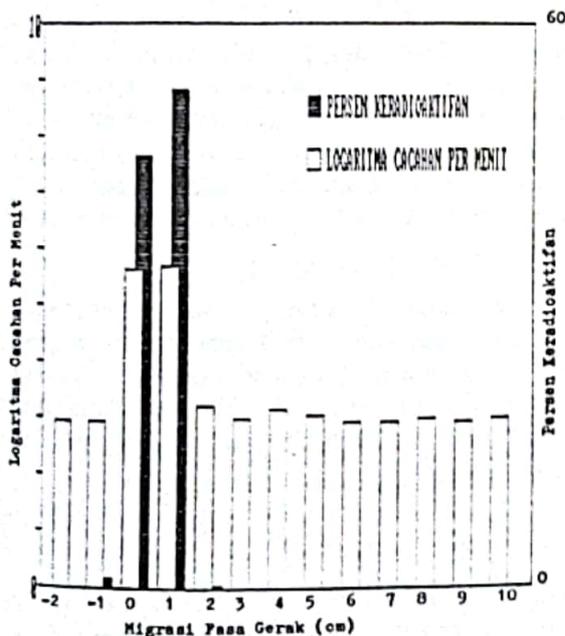
Secara kuantitatif seluruh fraksi ^{201}Tl berada pada tingkat oksidasi +1 dengan harga Rf sama dengan 0,0 - 0,1. Gambar 5 merupakan satu contoh profil spektrum γ produk ^{201}Tl yang dihasilkan.

Dua puncak spektrum bersesuaian dengan energi 135 keV dan 167 keV sementara dua puncak pada energi sekitar 69 - 71 keV dan 79 - 81 keV menunjukkan adanya pembebasan sinar X pada penangkapan elektron. Pengotoran radionuklida yang berarti tidak terdeteksi. Terjadinya reaksi samping ditunjukkan pada Tabel 2. Hal ini bersesuaian dengan rendahnya penampang lintang reaksi samping tersebut pada energi proton 26,5 MeV (15). Radionuklida ^{203}Pb juga tidak terdeteksi, walaupun penampang



Keterangan : (A). Dosis iradiasi 246 $\mu\text{A.j.}$; (B). Dosis iradiasi 239,4 $\mu\text{A.j.}$; (C). Dosis iradiasi 274,2 $\mu\text{A.j.}$; (D). Dosis iradiasi 248 $\mu\text{A.j.}$

Gambar 3. Beberapa contoh otoradiografi target pasca pelarutan sasaran teriradiasi



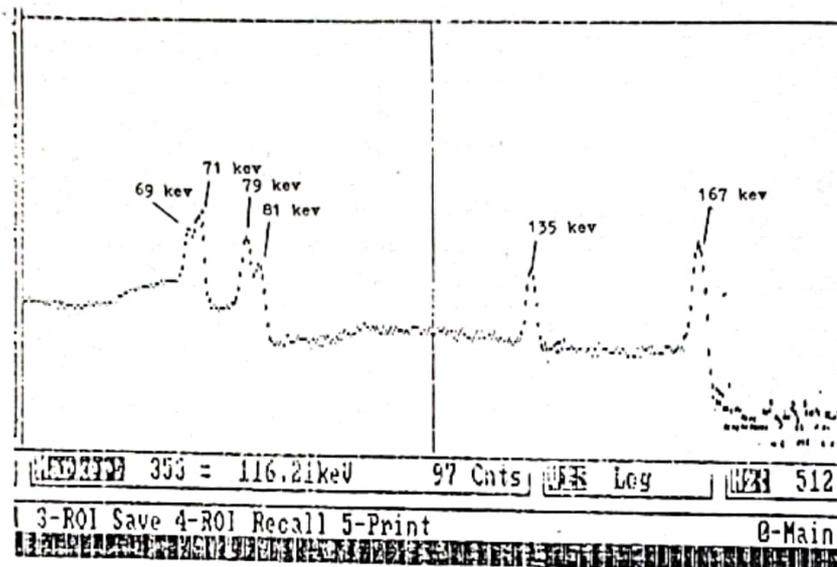
Gambar 4. Pola kromatogram larutan ^{201}Tl .

Fasa diam : Kertas Whatman I
Fasa gerak : Campuran etanol + HCl 5N (9:1, v/v)

lintang cukup besar, karena kandungan ^{205}Tl dalam bahan sasaran kecil.

Evaluasi hasil pemeriksaan kualitas lainnya menunjukkan bahwa kandungan kimiawi Tl merupakan hal kritik yang perlu mendapat perhatian lebih lanjut walaupun sediaan larutan ^{201}Tl dari percobaan ini dapat diproses lanjut menjadi sediaan radiofarmaka. Tahapan kritis yang menyangkut kandungan kimiawi Tl pada produk akhir adalah pemisahan dan pencucian fraksi endapan $^{201}\text{Pb}(\text{OH})_2$, karena masih terdapat kemungkinan terperangkapnya spesi ^{203}Tl dalam pengemban besi hidroksida.

Upaya yang dapat disarankan, dan kemudian juga dilaksanakan, sehubungan dengan hal tersebut adalah dilakukannya uji tetes *in situ* terhadap filtrat pencucian terakhir dengan menggunakan pembanding larutan standar Tl yang mempunyai kandungan Tl sebesar batas ambang yang diijinkan. Uji tetes paling sederhana untuk penentuan Tl adalah uji tetes dengan menggunakan pereaksi larutan KI diikuti dengan penambahan larutan natrium tiosulfat 2% (16).



Gambar 5. Pola spektrum γ larutan ^{201}Tl

KESIMPULAN

Siklotron BATAN sangat layak digunakan untuk produksi ^{201}Tl melalui reaksi inti ^{203}Tl ($p,3n$) $^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$. Tampilan parameter berkas berfluktuasi pada setiap kali pengoperasian siklotron karena banyaknya variabel operasi yang dapat mempengaruhi hal tersebut. Walaupun keandalan mesin cukup baik untuk pengoperasian selama 8 jam/hari operasi, fasilitas siklotron BATAN masih memerlukan tambahan sistem kontrol dan kendali, khususnya untuk mengendalikan profil ekstraksi berkas dan profil berkas pada permukaan target.

Tampilan produk ^{201}Tl memberikan gambaran adanya tahapan kritik pada rantai proses, yaitu spesi ^{201}Tl terlepas dan tidak diper-

oleh kembali sebagai produk. Untuk lebih meningkatkan kuantitas produk yang dihasilkan, masih diperlukan perbaikan pada tahapan kritik proses tersebut. Di sisi lain hasil pemeriksaan kualitas menunjukkan bahwa larutan *bulk* ^{201}Tl yang dihasilkan memenuhi syarat untuk proses lanjut menjadi sediaan radiofarmaka.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Sdr. Triyanto yang banyak membantu dalam proses pemisahan ^{201}Tl dan juga kepada Bidang Kendali Kualitas PPR yang melaksanakan pemeriksaan kualitas produk ^{201}Tl .

DAFTAR PUSTAKA

1. RAMAMOORTHY, N., WATSON, I.A., Separation of ^{203}Pb from Tl_2O_3 target material using a hydrous zirconium oxide column with application to ^{201}Tl preparation, Radiochem. Radioanal. Letters, 39/4-5/ (1979) 309 - 318.
2. LAGUNAS SOLAR, M.S., LITTLE, F.E., JUNGERMAN, J.A., Proton induced reactions on natural Pb targets. A potential new cyclotron method for ^{201}Tl production, Int. J. of Appl. Rad. And Isot., 32 (1981) 817 - 822.

3. Lagunas Solar, M.C., Little, F.E., Goodart, C.D., An integrally shielded transport-able generator system for Thallium-201 production, *Int. J. of Appl. Rad. And Isot.*, 33 (1982) 1439-1443.
4. Malinin, A.B., Kozlova, M.D., Sevastyanova, a.s., et al, Production of no-carrier-Added Tl-201, *Int. J. of Appl. Rad. And Isot.*, 35 (1984) 685 - 687.
5. Sawa, Z.P., Lamb, J.F., Increased Yield Of ^{201}Tl Produced Via $\text{Pb} (p,xn) ^{201}\text{Bi} \rightarrow ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$, *Int. J. of Appl. Rad. And Isot.*, 35 (1984) 909.
6. Deptula, C., Zaitseva, N.G., MIKOLAYEWSKY, S., KHALKIN, V.A., Sorption technique of separation of Thallium-201 from proton-irradiated Thallium, *Isotopenpraxis*, 26 (1990) 476 - 479.
7. Cruz, D.G., K. Okamoto, K., Nuclear data for medical radioisotopes produced by accelerators-status and compilation, *Proceeding of The IAEA Consultants Meeting On Data Requirements For Medical Radioisotope Production*, INDC (NDS) 195/GZ, IAEA, Vienna (1988) 145 - 164.
8. Soenarjo, S., Proses Produksi Tl-201 Dan Ga-67, Latihan Keahlian Operator Produksi Radioisotop, BATAN, Pusdiklat (1991).
9. Dokumen BATAN DMF 5068 AECL-VCR, Tl-201/Pb-201 DMF CP VCR 830-2, TRIUMF, Vancouver, September (1986).
10. Dokumen Kontrak, BATAN - Nuclear mechano electronic laboratory agreement between BATAN and AECL, (1984).
11. Soenarjo, S., Suryanto, H., Silakhuddin, Karakteristik berkas proton pada peng-operasian siklotron BATAN untuk produksi radioisotop, *Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir*, PPNY, Batan, Yogyakarta (1991) 451 - 459.
12. Soenarjo, S., Silakhuddin, Suryanto, H., Analisis Medan Magnet Dan Berkas Proton Siklotron CS-30 BATAN, belum dipublikasi.
13. Partington, D.J., Nuclear mechano-electronic installation, *Manufacturer's Manuals, Computer Technology And Imaging Inc., Procurement Package No. 45, Rev. 0* (1986).
14. Suryanto, H., Arianapriya, B., Soenarjo, S., Disain pengembangan sistem monitor berkas eksternal siklotron BATAN, belum dipublikasi.
15. Lagunas Solar, M.C., Jungerman, J.A., Peek, N.F., et al, Thallium-201 yields and excitation functions for the lead radioactivities produced by Irradiation of natural thallium with 15 - 60 Mev protons, *Int. J. of Appl. Rad. And Isot.*, 29 (1978) 159 - 165.
16. Feigel, F., et al, *Spot test in inorganic analysis*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1972) 474 - 475.