

# NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG, LẮP ĐẶT VÀ XÁC ĐỊNH THỰC NGHIỆM CÁC THÔNG SỐ KỸ THUẬT NGUỒN ION PIG TRONG MÁY GIA TỐC CYCLOTRON KOTRON13

THE PRINCIPLES OF OPERATION, INSTALLATION AND DETERMINATION OF TECHNICAL PARAMETERS OF INTERNAL PIG ION SOURCE IN KOTRON-13CYCLOTRON

Nguyễn Tiến Dũng\*,  
Nguyễn Tuấn Anh, Phạm Minh Đức

## TÓM TẮT

Nguồn ion máy gia tốc là nơi tạo ra các hạt tích điện phục vụ quá trình gia tốc hạt tại buồng gia tốc. Nguồn ion được phân ra nhiều loại khác nhau phù hợp với các máy gia tốc được sử dụng với các mục đích khác nhau. Nguồn ion theo công nghệ PIG thuộc loại nguồn có cấu tạo đơn giản thích hợp với các loại máy PET cyclotron đang được sử dụng nhiều trên thị trường. Máy gia tốc cyclotron KOTRON13 được lắp đặt tại Trung tâm chiếu xạ Hà Nội thuộc Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam đã sử dụng nguồn ion theo công nghệ PIG. Máy được dùng để sản xuất được chất phóng xạ  $^{18}\text{F}$  dùng trong kỹ thuật chụp ảnh PET/CT nhằm chẩn đoán bệnh ung thư sớm.

Bài cáo này trình bày nguyên lý hoạt động, lắp đặt và xác định các thông số kỹ thuật cho nguồn ion PIG trong máy KOTRON13. Các thông số về cơ khí lắp đặt vị trí nguồn ion, nguồn điện tạo vùng plasma, lưu lượng dòng khí hydro đưa vào nguồn ion đã được xác định thực nghiệm nhằm đạt được dòng cực đại trên bia và tối ưu hoạt động của KOTRON13.

**Từ khóa:** PIG, Cyclotron, KOTRON13,  $^{18}\text{F}$ , plasma.

## ABSTRACT

Accelerators' ion sources create electrostatic particles used in acceleration chamber. There are several types of ion sources applicable to accelerators with different purposes. The internal PIG ion source, thanks to its simple configuration, is largely used in many PET cyclotrons. The KOTRON-13 cyclotron installed at Hanoi Irradiation Center, Vietnam Atomic Energy Institute uses this ion source. The radiopharmaceutical  $^{18}\text{F}$  produced from KOTRON-13 center is used for PET/CT in early cancer diagnostic.

This report presents the principles of operation, installation and determination of technical parameters of KOTRON-13's internal PIG ion source. The position of internal ion source, the ARC current of the ion source, the flow of hydrogen gas, etc. are determined by experiment with the purpose of achieving maximum current on target and optimal performance for KOTRON13.

**Keywords:** PIG, Cyclotron, KOTRON13,  $^{18}\text{F}$ , plasma.

Phòng Gia tốc, Trung tâm chiếu xạ Hà Nội

\*Email: ntdung@vinatom.gov.vn

Ngày nhận bài: 15/9/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/10/2018

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2018

## 1. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG NGUỒN ION PIG

### 1.1. Giới thiệu về máy gia tốc cyclotron KOTRON13

Máy gia tốc cyclotron KOTRON13 do hãng Samyoung Unitech chế tạo để sản xuất được chất phóng xạ  $^{18}\text{F}$  dùng trong kỹ thuật chẩn đoán ung thư sớm PET/CT [1]. Máy được lắp đặt tại Trung tâm chiếu xạ Hà Nội thuộc Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam. Máy gồm 3 bộ phận chính: Nguồn ion theo công nghệ PIG dùng để tạo ion âm H<sup>-</sup>, buồng gia tốc vòng và hệ dẫn chùm tia ra khỏi máy gia tốc hướng tới bia. Hạt proton được gia tốc tới năng lượng 13MeV và dòng trên bia đạt tới 50 $\mu\text{A}$ . Trong thiết kế của KOTRON13, nguồn ion được đặt tại vùng tâm của máy gia tốc sử dụng công nghệ nguồn PIG cathode lạnh. Bài báo này trình bày chi tiết về nguồn PIG lắp đặt trong KOTRON13. Các kỹ thuật khác của cyclotron sẽ từng bước được công bố trong các bài báo sau.

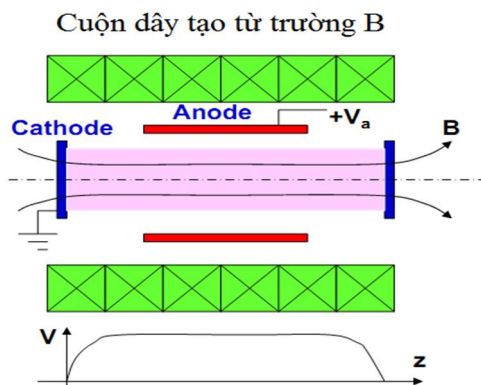


Hình 1. Hình ảnh máy gia tốc cyclotron KOTRON13

### 1.2. Nguyên lý hoạt động của nguồn ion Penning Ionization Gauges (PIG)

Quá trình tạo ion Hydro trong nguồn ion PIG dựa trên hiệu ứng ion hóa chất khí khi bắn phá của các hạt điện tử

vào nguyên tử khí hydro trung hòa. Nguồn ion được thiết kế gồm 1 ống anode hình trụ rỗng cùng với 2 cathode nằm ở hai đầu ống. Toàn bộ nguồn ion được đặt trong từ trường cố định B với chiều từ trường xác định như hình 2. Dưới tác dụng của lực từ, các hạt điện tử chuyển động xoáy tròn từ cathode đến anode dưới tác dụng của điện thế  $V_a$  giữa hai điện cực này. Chuyển động này của các hạt điện tử tạo ra một vùng plasma tại tâm của ống anode bao gồm các hạt ion âm, ion dương, các hạt điện tử và các nguyên tử khí hydro trung hòa [3].



Hình 2. Cấu tạo cơ bản nguồn ion công nghệ PIG

Nguồn ion sử dụng trong máy KOTRON13 là nguồn ion âm H<sup>-</sup>. Việc tạo ra ion âm H<sup>-</sup> được thực hiện theo 2 quá trình cơ bản sau [2]:

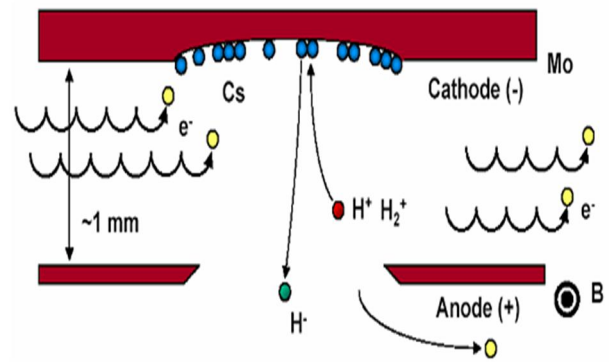
- Tạo ra phân tử hydro ở trạng thái kích thích qua tương tác:  $e (\sim 200 \text{ eV}) + \text{H}_2 \rightarrow e + \text{H}_2^*$
  - Tạo ra ion âm H<sup>-</sup> dựa trên tương tác:
- $$e (\sim 1 \text{ eV}) + \text{H}_2^* \rightarrow \text{H}^- + \text{H} \quad (1)$$

Trong vùng plasma của ống anode, năng lượng của các hạt điện tử với động năng khoảng  $\sim 200\text{eV}$  là điều kiện thuận lợi để tương tác sinh ra các phân tử khí ở trạng thái kích thích  $\text{H}_2^*$ . Các phân tử khí kích thích  $\text{H}_2^*$  này dễ dàng bắt hạt điện tử động năng thấp khoảng  $1\text{eV}$  để tạo ra ion âm H<sup>-</sup>.

Để làm tăng hiệu suất tạo ion H<sup>-</sup>, nguồn ion PIG thiết kế thêm một lớp kim loại Cs trên bề mặt của cathodes. Việc tạo ra H<sup>-</sup> bổ sung dựa trên quá trình tương tác như sau:



Quá trình tương tác này được gọi là quá trình tạo ion dựa vào hiệu ứng ion hóa bề mặt. Tóm lại, quá trình tạo ion âm H<sup>-</sup> trong vùng plasma nguồn ion PIG được tạo ra là sự tổng hợp của hai quá trình: quá trình tạo ion âm H<sup>-</sup> trong thể tích vùng plasma (1) và quá trình tạo ion dựa trên sự ion hóa bề mặt cathode (2).



Hình 3. Quá trình tương tác ion hóa bề mặt tạo ion âm H<sup>-</sup> bổ sung

Các ion âm H<sup>-</sup> được tạo ra trong nguồn ion được kéo ra ngoài dưới tác dụng của điện trường và được đưa vào buồng gia tốc.

## 2. LẮP ĐẶT VÀ XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ KỸ THUẬT NGUỒN PIG

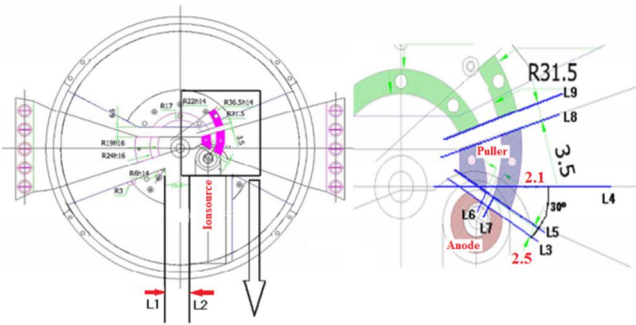
### 2.1. Lắp đặt nguồn ion PIG vào máy KOTRON13

Nguồn ion PIG được lắp đặt tại vùng tâm của buồng cộng hưởng điện từ trường RF trong máy KOTRON13. Khi lắp đặt nguồn ion PIG ta cần phải xác định 2 thông số quan trọng: Vị trí nguồn ion theo không gian 3 chiều bên trong buồng cộng hưởng và góc tạo bởi khe ra chùm hạt trên anode và pháp tuyến 2 điện cực puller. Trong hệ tọa độ Đề-Các, vị trí nguồn ion theo trục Z được xác định theo vị trí giữa của khe hạt ra nằm trên mặt phẳng trung tâm quỹ đạo hạt. Hai vị trí không gian theo chiều X, Y xác định theo vị trí L1-L2 và L3-L5 (hình 4). Sự phụ thuộc dòng ra của máy gia tốc vào vị trí đặt nguồn ion được tiến hành trong nghiên cứu này. Sơ đồ vị trí lắp đặt của nguồn ion được mô tả trên hình 4. Thí nghiệm được tiến hành với 2 điều kiện cho mỗi số liệu thực nghiệm:

- Trở kháng buồng cộng hưởng được điều chỉnh với giá trị  $50\Omega$  tại tần số RF  $77,3\text{MHz}$ .
- Chân không tại buồng cộng hưởng khoảng  $2 \times 10^{-7}$  mbar (Sau 2 ngày hút chân không).

Giải thích các ký hiệu trên hình 4:

- L1: Khe trung tâm của buồng cộng hưởng (Vị trí gốc)
- L2: Mép trái của nguồn ion
- L3: Mặt phẳng đầu ra ion H<sup>-</sup> của chimney
- L4: Trục trung tâm của buồng cộng hưởng.
- L5: Mặt phẳng tạo bởi mép của puller hướng về buồng chimney (Vị trí gốc)
- L6-L7: Khoảng cách giữa 2 khe của puler được cố định  $2,1\text{mm}$



Hình 4. Sơ đồ vị trí lắp đặt nguồn ion PIG vào máy gia tốc KOTRON13

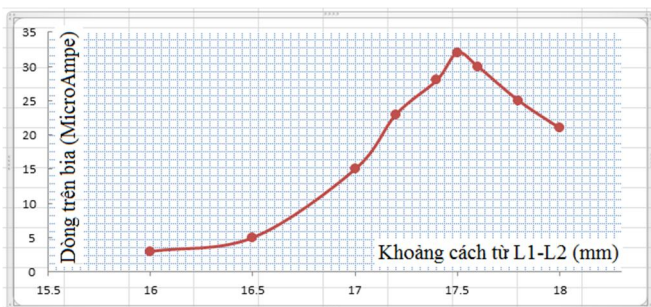
### 2.1.1. Xác định mối quan hệ giữa dòng ra trên bia phụ thuộc khoảng cách giữa L1 và L2

Khi tiến hành lắp đặt nguồn ion PIG vào buồng cộng hưởng gia tốc RF, khoảng cách từ khe trung tâm (Vị trí gốc L1) đến mép trái của nguồn ion (Vị trí L2) ảnh hưởng lớn đến dòng protons đến được bia. Thí nghiệm được tiến hành với các điều kiện biên khác của KOTRON13 được xác lập tại bảng 1.

Bảng 1. Thông số cài đặt cố định khi khảo sát khoảng cách L1 và L2

TT	Thông số cài đặt cố định	Đơn vị đo
1	Khoảng cách từ L3 tới L5	2,5 mm
2	Góc lệch của puller và anode	-1 độ
3	Giá trị Duty cycle của RF	35 %
4	Lưu lượng dòng khí H <sub>2</sub> vào buồng ion	9 sccm
5	ARC-Curent nguồn nuôi cho PIG	1,2 A

Thực nghiệm được tiến hành bằng việc tăng dần khoảng cách giữa L1 và L2 và đo dòng ra trên bia. Các thông số kỹ thuật khác của KOTRON13 được cài đặt giá trị trong bảng 1.



Hình 5. Dòng trên bia phụ thuộc khoảng cách từ khe của buồng cộng hưởng đến mép trái nguồn ion

*Nhận xét:* Từ đồ thị thực nghiệm hình 5 nhận thấy, khoảng cách giữa khe trung tâm của buồng cộng hưởng và mép trái của nguồn ion là 17,5mm thì dòng ra trên bia đạt giá trị cao nhất khoảng 32 $\mu$ A.

### 2.1.2. Xác định mối quan hệ giữa dòng ra trên bia phụ thuộc khoảng cách giữa L3 và L5

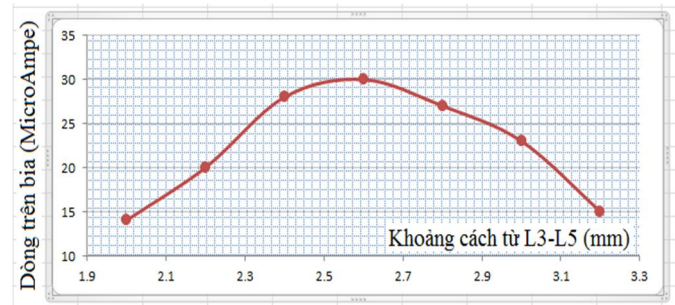
Khi các ion H<sup>+</sup> được tạo ra tại vùng plasma trong ống anode thì điện cực puller có nhiệm vụ kéo các ion H<sup>+</sup> này ra khỏi nguồn ion và hướng chùm hạt này vào buồng gia tốc

cộng hưởng RF dưới tác dụng của lực điện trường. Khi điện trường tại điện cực puller giữ cố định, hiệu suất kéo các hạt ion âm hydro này phụ thuộc vào khoảng cách từ L3 đến L5.

Thực nghiệm được tiến hành bằng việc tăng dần khoảng cách giữa L3 và L5 và đo dòng ra trên bia. Các thông số kỹ thuật khác của KOTRON13 được cài đặt giá trị trong bảng 2.

Bảng 2. Thông số cài đặt cố định khi khảo sát khoảng cách L3 và L5

TT	Thông số cài đặt cố định	Đơn vị đo
1	Khoảng cách L1 và L2	17,5 mm
2	Góc lệch của puller và anode	-1 độ
3	Giá trị Duty cycle của RF	35 %
4	Lưu lượng dòng khí H <sub>2</sub> vào buồng ion	9 sccm
5	ARC-Current nguồn nuôi cho PIG	1,2A



Hình 6. Dòng trên bia phụ thuộc khoảng cách giữa khe ra của anode và giữa 2 mép của puller (L3 đến L5)

*Nhận xét:* Từ đồ thị thực nghiệm hình 6 nhận thấy, khoảng cách giữa khe ra của anode và giữa 2 mép của puller là 2,6mm thì dòng ra tới bia là cao nhất.

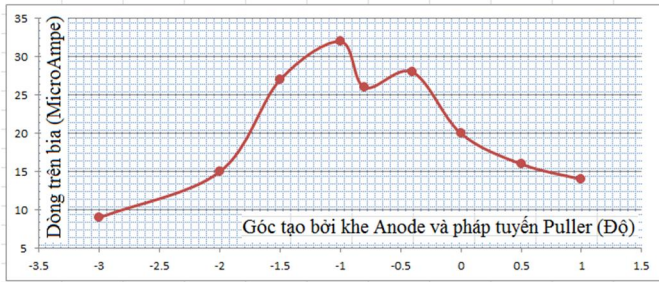
### 2.1.3. Khảo sát góc tạo bởi khe ra của anode và pháp tuyến 2 điện cực puller

Nhiệm vụ của điện cực puller là hút các ion âm H<sup>-</sup> sau khi được tạo ra trong vùng plasma của ống anode để đưa chúng vào buồng cộng hưởng gia tốc. Thí nghiệm này khảo sát sự phụ thuộc dòng trên bia với góc tạo bởi khe ra của anode và pháp tuyến của puller phục vụ quá trình xác định vị trí không gian của anode. Thí nghiệm được tiến hành với các điều kiện biên của KOTRON13 được xác lập tại bảng 3.

Bảng 3. Thông số cài đặt khi khảo sát sự phụ thuộc dòng trên bia vào góc giữa khe ra anode và pháp tuyến của puller

TT	Thông số cài đặt cố định	Đơn vị đo
1	Khoảng cách L1 và L2	17,5 mm
2	Khoảng cách L3 và L5	2,5 mm
3	Giá trị Duty cycle của RF	35 %
4	Lưu lượng dòng khí H <sub>2</sub> vào buồng ion	9 sccm
5	ARC-Current nguồn nuôi cho PIG	1,2A

Thực nghiệm được tiến hành bằng cách quay anode xung quanh vị trí góc 0° (Góc 0° là góc mà bởi khe ra của anode và pháp tuyến của puller là trùng nhau). Kết quả thí nghiệm được mô tả trên hình 7.



Hình 7. Dòng trên bia phụ thuộc góc giữa khe ra anode và pháp tuyến của puller

Nhận xét: Từ đồ thị thực nghiệm hình 7 nhận thấy, góc tạo bởi khe ra của anode và pháp tuyến của puller khoảng -1 độ thì dòng ra tới bia là cao nhất.

## 2.2. Nghiên cứu sự phụ thuộc dòng ra trên bia vào lưu lượng dòng khí H<sub>2</sub> và nguồn nuôi ARC- Current của KOTRON13

### 2.2.1. Sự phụ thuộc dòng ra trên bia vào lưu lượng dòng khí H<sub>2</sub>

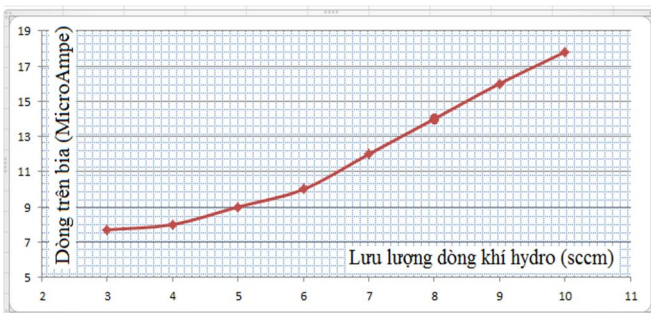
Hai thông số đầu vào ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình tạo plasma trong ống anode là lưu lượng dòng khí H<sub>2</sub> vào nguồn ion và dòng nguồn nuôi một chiều arc current của PIG. Trong thiết kế nguồn ion PIG của máy gia tốc KOTRON13, từ trường B cố định với hướng dọc ống anode như hình 2, tạo chuyển động xoáy tròn các hạt điện tử từ cathode đến anode.

Thông số hoạt động của máy gia tốc khi khảo sát sự phụ thuộc của dòng khí hydro vào PIG:

- Giá trị RF Duty Cycle: 60%
- Dòng arc current: 1,2A.
- Dòng nuôi của cuộn dây nam châm: 145,340A
- Giá trị thế gia tốc: 40kV.
- Chân không máy gia tốc: 1,5.10<sup>-7</sup> mbar.

Bảng 4. Sự phụ thuộc của dòng trên bia và lưu lượng khí hydro vào nguồn ion

STT	Lưu lượng dòng khí H <sub>2</sub> (sccm)	Dòng ra trên carbon foil (μA)	Dòng ra trên bia (μA)
1	3	10,2	4,1
2	4	17,6	6,7
3	5	41,7	15,6
4	7	82,2	33,4
5	9	98,6	39,5



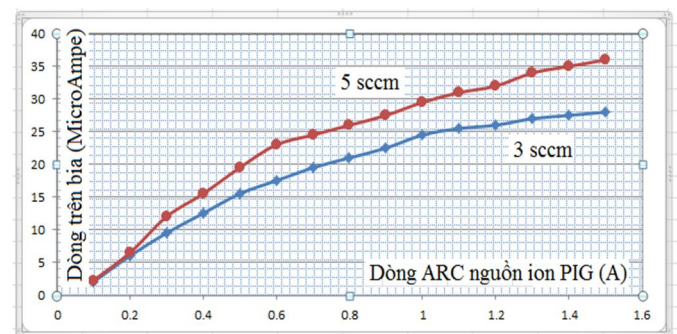
Hình 8. Sự phụ thuộc của dòng ra trên bia vào lưu lượng dòng khí hydro

Nhận xét: Khi ta tăng lưu lượng khí hydro vào nguồn ion thì dòng ra trên bia sẽ tăng dần. Với lưu lượng dòng khí từ 3 đến 9 sccm, dòng ra trên bia tăng liên tục (hình 8).

Thực nghiệm cho thấy không thể tăng lưu lượng dòng khí lớn hơn 10 sccm vì khi đó chân không tại buồng gia tốc lớn hơn 5x10<sup>-6</sup> mbar rất dễ gây hiện tượng phóng điện trong buồng gia tốc.

### 2.2.2. Sự phụ thuộc dòng ra trên bia vào nguồn nuôi arc-current

Nguồn ion PIG được nuôi bằng nguồn nuôi 1 chiều điện áp 2,5kV và dòng ra đến 2A. Các hạt điện tử phát ra từ cathode chuyển động đến anode dưới tác dụng của điện trường gây ra hiệu ứng ion hóa các phân tử khí hydro. Dòng điện lỏi ra của nguồn điện 1 chiều (Ký hiệu arc-current) được điều khiển theo giá trị đặt trước đến 2A. Thí nghiệm này được tiến hành bằng cách thay đổi dòng arc-current và đo dòng ra trên bia theo hai giá trị lưu lượng dòng khí hydro là 3 sccm và 5 sccm.



Hình 9. Sự phụ thuộc của dòng ra trên bia vào dòng nguồn nuôi arc-current

Nhận xét: Khi dòng arc-current tăng thì dòng trên bia cũng tăng theo. Dòng trên bia có xu thế tăng chậm khi dòng Arc trên 1,5A. Giới hạn cho dòng arc-current tại KOTRON13 là 2,0 A (hình 9).

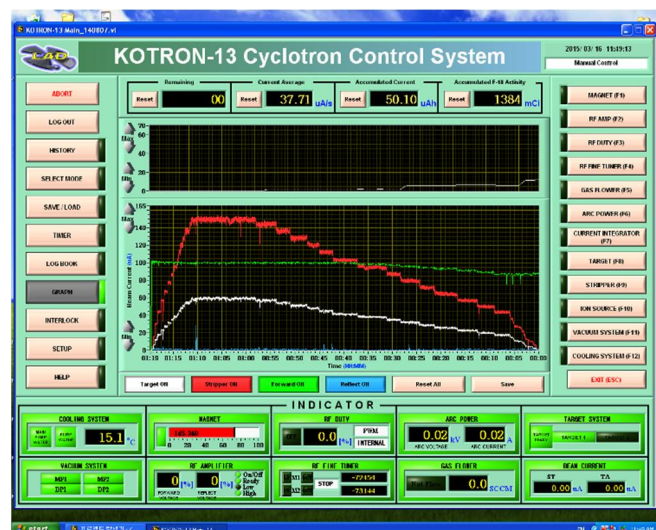
## 3. CHẠY THỬ NGHIỆM KOTRON13 VỚI CÁC THÔNG SỐ NGUỒN PIG ĐƯỢC XÁC ĐỊNH TỪ THỰC NGHIỆM

Các thông số kỹ thuật cơ bản của KOTRON13 được cài đặt theo giá trị tối ưu theo thực nghiệm được mô tả trong bảng 5. Các thông số về lắp đặt vị trí nguồn ion được sử dụng từ các nghiên cứu trên. Dòng ra trên bia được ghi nhận theo giá trị tăng dần của duty cycle từ 0 đến 70%. Dòng ra cao nhất trên bia đạt tới 60 μA (hình 10).

Bảng 5. Tổng hợp các thông số cài đặt cho KOTRON13

STT	Thông số cài đặt	Giá trị	Ghi chú
1	Dòng nam châm tạo từ trường	145,350A	
2	Dòng ARC nuôi nguồn ion	1,5A	
3	Nhiệt độ làm mát đầu ra từ chiller	14°C	
4	Công suất phát RF- Duty cycle	60%	RF Forward đạt trên 95%
5	Lưu lượng dòng khí H <sub>2</sub>	9 sccm	
6	Điện áp cho sợi đốt đèn công suất RF	8V~	

7	Điện áp cho sợi đốt đèn điện tử IPA	6V~	
8	Nhiệt độ phòng Cyclotron và phòng điều khiển	22°C	Khi phát tia
9	Độ ẩm đặt cho máy hút ẩm	40%	
10	Nhiệt độ đốt cho sợi đốt bơm khuếch tán dầu	320°C	Chân không $2 \times 10^{-7}$ mbar



Hình 10. Dòng trên bia ghi nhận được với các thông số cài đặt tại bảng 5 và các thông số vị trí không gian PIG theo nghiên cứu này với giá trị Duty Cycle tăng dần đến 70%

Nhận xét: Các thông số xác định bằng thực nghiệm cho hoạt động của KOTRON13 lắp đặt tại Trung tâm chiếu xạ Hà Nội đã cho dòng ra trên bia đạt giá trị tới 60  $\mu\text{A}$ . Giá trị này là tương đương với các nghiên cứu tại Viện Y học và phóng xạ KIRAMS của Hàn Quốc [5].

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày nguyên lý hoạt động, lắp đặt và tiến hành thực nghiệm xác định các thông số kỹ thuật cho hoạt động của nguồn ion PIG trong máy gia tốc KOTRON13. Các ion âm  $\text{H}^-$  được sinh ra trong vùng plasma của ống anode theo 2 hiệu ứng cơ bản: Sự kết hợp giữa các hạt điện tử năng lượng thấp với các nguyên tử hydro ở trạng thái kích thích và hiệu ứng ion hóa bề mặt của nguyên tố Cs trên bề mặt cathode do H trung hòa tạo ra. Việc lắp đặt, xác định vị trí không gian 3 chiều của nguồn ion PIG đảm bảo dòng ra trên bia là cao nhất và trở kháng của buồng gia tốc RF là 50 $\Omega$ . Kết quả đã xác định được khoảng cách giữa L1, L2 là 17,5mm và L3,L5 là 2,6mm. Mối liên quan giữa dòng ra trên bia và các thông số đầu vào của PIG như lưu lượng dòng khí  $\text{H}_2$  và dòng nguồn nuôi arc-current cũng đã được khảo sát chi tiết. Kết quả là với các thông số cài đặt cho KOTRON13 như bảng 5, dòng ra trên bia đạt giá trị cao nhất là 60 $\mu\text{A}$ . Thực nghiệm cho thấy với dòng trên bia 40 $\mu\text{A}$  sau 2 giờ bắn bia, hoạt độ phóng xạ  $^{18}\text{F}$  đạt 2,2 Ci đủ dùng cho 2 máy PET/CT trong 1 ngày hoạt động. Các khảo sát chi tiết hơn về PIG sẽ được đăng tải trong các ấn phẩm tiếp theo.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Reference manual of cyclotron KOTRON13.
- [2]. The Series 4/3N Injector Training Course at IBA, (1.1. A Brief Guide to the Formation of  $\text{H}^-$  Ions): 2-3
- [3]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_parameters](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_parameters)
- [4]. Peter Spadtke, BEAM FORMATION: 15-16
- [5]. 2010, Byung Chul Lee, Hong Jin Lee, Intensification of the KOTRON-13 Cyclotron by Optimizing the Ion Source.