



บทที่ 1

บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ฟลูออรีนเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่พบมากในธรรมชาติ ซึ่งโดยปกติจะไม่เกิดเป็นธาตุอิสระ แต่จะเกิดอยู่ในรูปของฟลูออไรด์และสารประกอบต่างๆ เช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (Hydrogen fluoride) แคลเซียมฟลูออไรด์ (Calcium fluoride) และฟลูออโรคาร์บอน (Fluoro-carbon) เป็นต้น ฟลูออรีนในธรรมชาติมีมากที่สุดที่แร่ฟลูออไรต์ (Fluorite) รองลงมาคือแร่ไครโอไลต์ (Cryolite) และแร่ฟลูออโรอะพาไทต์ (Fluorapatite) นอกจากนี้ยังพบอยู่ในน้ำทะเล กระจก เล็บ และเคลือบฟัน (Dental enamel) ในปัจจุบันได้มีการนำฟลูออรีนมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในงานด้านต่าง ๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาล และหน่วยงานต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบ (Raw materials) ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ เช่น เป็นสารให้ความเย็น เป็นฟลักซ์ในสารบัดกรี เป็นสารหล่อลื่น เป็นสารกัดกร่อน เป็นยาฆ่าเชื้อโรค เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นตัวทำละลาย เป็นต้น แต่ฟลูออรีนในปริมาณสูงอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบปริมาณฟลูออรีนอยู่เป็นประจำทั้งในบรรยากาศทั่วไป และภายในโรงงานอุตสาหกรรม

ในการหาปริมาณของฟลูออรีนนี้ ได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยกันทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศ เพื่อหาวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน ซึ่งวิธีที่ใช้เป็นมาตรฐานนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น ฟลูออโรเมตรี (Fluorometry) สเปกโตรกราฟฟี (Spectrography) กราวิเมตรี (Gravimetry) และไตตริเมตรี (Titrimetry) เป็นต้น วิธีเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นวิธีทางเคมีจึงมีปัญหาในทางปฏิบัติ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของฟลูออรีน เช่น มีความเป็นพิษสูง เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงที่สุด เป็นตัวที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ไวที่สุด และสามารถที่จะติดไฟได้เมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวออกซิไดส์ เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงได้นำวิธี " ฟอสฟอรัสทริคลอไรด์ " มาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณของฟลูออรีนด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้ คือ

- ก. เป็นวิธีที่วิเคราะห์ได้โดยตรง สะดวก รวดเร็ว และต่อเนื่อง
- ข. เป็นวิธีที่วิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง
- ค. เป็นวิธีที่เตรียมตัวอย่างได้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้เทคนิคของฟอสฟอรัสนิวตรอนแอกติเวชันในการหาปริมาณฟลูออรีนในสารบางชนิด เช่น NaF LiF และ CaF<sub>2</sub> เป็นต้น ในแง่ของความแม่นยำ ความไว ชัดจำกัด และการจัดระบบวัดรังสีที่เหมาะสม
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของฟลูออรีนในสารตัวอย่างอนินทรีย์บางชนิด โดยเทคนิคฟอสฟอรัสนิวตรอนแอกติเวชันเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์โดยวิธีอื่น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาออกแบบและสร้างระบบอาบรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิด <sup>238</sup>Pu-Be 5 Ci โดยใช้ระบบ Pneumatic transfer
- 1.3.2 ออกแบบและจัดระบบวัดรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา <sup>19</sup>F (n, α) <sup>16</sup>N
- 1.3.3 วิเคราะห์หาปริมาณฟลูออรีนด้วยเทคนิคฟอสฟอรัสนิวตรอนแอกติเวชันเทียบกับการวิเคราะห์โดยวิธีอื่น

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 การเตรียมงานขั้นต้น
- ค้นคว้ารวบรวมข้อมูล และศึกษาความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ฟลูออรีนด้วยวิธีต่าง ๆ
  - ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟอสฟอรัสนิวตรอนแอกติเวชัน
  - ศึกษา ระบบ Pneumatic transfer
  - จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการวิจัย
- 1.4.2 ขั้นตอนการวิจัย
- ศึกษาออกแบบและสร้างระบบอาบรังสีนิวตรอนด้วยระบบ Pneumatic transfer
  - วัดฟอสฟอรัสนิวตรอนฟลักซ์ของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน <sup>238</sup>Pu-Be
  - จัดระบบการวัดรังสีให้มีประสิทธิภาพ

- ทำการเปรียบเทียบและหาขีดจำกัดในการวิเคราะห์ฟลูออรีนจากสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบปริมาณฟลูออรีนที่แน่นอน
- วิเคราะห์หาปริมาณฟลูออรีนในสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น
- สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถวิเคราะห์ปริมาณฟลูออรีนในสารตัวอย่าง เช่น แร่ฟลูออไรต์ เป็นต้น โดยเทคนิคฟอสต์นิวตรอนแอกติเวชันได้
- 1.5.2 ใช้เป็นข้อมูลในทางปฏิบัติสำหรับการนำเทคนิคของฟอสต์นิวตรอนแอกติเวชันไปใช้ในการวิเคราะห์ฟลูออรีน
- 1.5.3 ได้แนวทางในการนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ธาตุอื่นที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น ๆ หรือเป็นธาตุเบาได้โดยง่าย เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน อะลูมิเนียม เป็นต้น

### 1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1.7 การสำรวจงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งได้กระทำมาแล้ว

Kimball and Tufts, 1947 วิเคราะห์ปริมาณฟลูออรีนและคลอรีนในสารประกอบอินทรีย์ โดยนำตัวอย่างที่เป็นของแข็งหรือของเหลวที่ระเหยได้ประมาณ 0.1- 0.35 กรัม ใส่ใน Gelatin capsule หรือ Glass ampoule ผสมกับ Metallic potassium ประมาณ 1 กรัม ใส่ใน Nickel bomb แล้วทำให้ร้อนขึ้นจนมีอุณหภูมิ 500-550 °C เป็นเวลานาน 2 ชม. จากนั้นทำให้ตัวอย่างสลายอย่างสมบูรณ์ด้วยน้ำ เมธานอล และ Solid ammonia bicarbonate ตามลำดับ จะได้สารละลายใส ไม่มีสี แล้วแบ่งสารละลายนั้นออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปหาปริมาณฟลูออรีนโดยใช้วิธี Distillation และ Titration ด้วย Thorium nitrate ส่วนที่เหลือนำไปหาปริมาณคลอรีนโดยใช้วิธี Volhard ซึ่งพบว่ามีค่าความผิดพลาด 0.2-2.2 เปอร์เซ็นต์

Milton and other, 1947 วิเคราะห์ปริมาณฟลูออรีนด้วยวิธี Titrimetric โดยใช้ซีเถ้า (Ash) ที่มีฟลูออรีนผสมอยู่เป็นตัวอย่าง นำไปทำให้แห้งด้วย Calcium oxide แล้วนำมาละลายน้ำ จากนั้นทำให้ตกตะกอนด้วย Silver perchlorate แล้วเติม Glass wool และ Perchloric acid จำนวน 0.1 กรัม และ 15 มิลลิลิตร ลงไปอีกตามลำดับ นำสารละลายที่ได้ไปกลั่นที่อุณหภูมิ 135-145 °C จนได้สารละลายจำนวน 200 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายที่ได้นี้ใส่ใน Nessler glass เติม Phenolphthalein ลงไปเพื่อทำให้สารละลายนี้เป็นกลาง และเติม Dye solution อีก 1 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่เป็นสีเหลือง แล้วทำให้สารละลายนี้เปลี่ยนเป็นสีชมพูด้วย Perchloric acid และเติม Chloro-acetic buffer solution จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ลงไปอีก แล้วนำไปไตเตรตกับ 0.004 N Thorium nitrate solution จนได้สารละลายที่มีสีม่วงน้ำเงิน (Bluish purple) ซึ่งเป็นสีเดียวกับสีของสารมาตรฐานที่เตรียมได้จากวิธีเดียวกัน เพียงแต่ใช้น้ำที่มีปริมาตรเท่ากับสารละลายแทน แล้วใส่ใน Nessler glass ทำการเติมสารต่าง ๆ ลงไปเช่นเดียวกัน จนได้สารละลายที่มีสีม่วงน้ำเงิน ซึ่งพบว่าสามารถหาปริมาณฟลูออรีนได้ในช่วง 2-100 ไมโครกรัม

Anders, 1960 วิเคราะห์ฟลูออรีนด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน โดยนำตัวอย่างใส่ใน Rabbit แล้วนำเข้าไปอบรังสีนิวตรอนใน Van de graaff accelerator ( $\phi = 10^8$  n/cm<sup>2</sup>/sec) เป็นเวลา 30 วินาที เนื่องจากฟลูออรีนเกิดปฏิกิริยา  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  ( $T_{1/2} = 7.14$  วินาที) จึงใช้เวลาอบรังสีน้อย จากนั้นจึงนำสารตัวอย่างไปวัดปริมาณรังสีแกมมาโดยใช้หัววัด NaI(Tl) ขนาด 3 นิ้ว x 3 นิ้ว และ Scintillation counter ในการนำสารตัวอย่างไปวัดปริมาณรังสีนี้ใช้ Pneumatic transfer system โดยใช้ท่อโพสิเอทริลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ยาว 35 ฟุต เมื่อวัดปริมาณรังสีเสร็จแล้วก็นำเข้าไปอบรังสีใหม่อีก ทำซ้ำกันหลาย ๆ รอบ พบว่ามี Sensitivity เท่ากับ 100 ส่วนในล้านส่วนสำหรับสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม และมีจำนวนรอบเท่ากับ 10 รอบ

Blackburn, 1964 วิเคราะห์ฟลูออรีนใน Organic compound ด้วยวิธีฟอสฟอรัสนิวตรอนแอกติเวชัน โดยใช้สารตัวอย่างหนัก 50 มิลลิกรัม เข้าไปอบรังสีนิวตรอนใน Van de graaff accelerator ( $\phi_F = 5 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>/sec) เป็นเวลา 30 นาที เนื่องจากฟลูออรีนเกิดปฏิกิริยา  $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$  ( $T_{1/2} = 112$  นาที) จึงต้องใช้ระยะเวลาอบนาน จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปวัดปริมาณรังสีโดยใช้หัววัด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 1.75 นิ้ว พบว่ามีค่า Relative error อยู่ในช่วง 0.5 - 1.4 เปอร์เซ็นต์



Lukens, 1968 ใช้วิธีนิวตรอนแอกติเวชันวิเคราะห์ปริมาณ Be, Li, B, F และ Pb โดยใช้ตัวอย่างที่อยู่ใน Polyethylene vials ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว เข้าไปอบรังสีนิวตรอนใน The general atomic triga mark II nuclear reactor และใช้ Pneumatic transfer system ที่มีแรงดัน 80 psig สำหรับส่งตัวอย่างไปอบรังสีและวัดปริมาณรังสี การวัดปริมาณรังสีใช้ Cerenkov counter ขนาด 3 นิ้ว x 3 นิ้ว วัดปริมาณรังสีของ Be, Li, B และ F ส่วน Pb จะใช้ NaI(Tl) Counter ขนาด 3 นิ้ว x 3 นิ้ว พบว่ามีค่า Detection limits เท่ากับ 15 , 1.1, 0.008 , 0.83 และ 0.4 ไมโครกรัม ตามลำดับ

Wing and Wahlgren, 1969 วิเคราะห์ปริมาณฟลูออรีนด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน โดยใช้  $^{241}\text{Am}$ - $^{242}\text{Cm}$ -Be เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน ( $\phi_F = 1.4 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup>/sec) นำสารตัวอย่างใส่ในแคปซูล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13.5 มิลลิเมตร ยาว 57 มิลลิเมตร เข้าไปอบรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 30 วินาที เนื่องจากฟลูออรีนเกิดปฏิกิริยา  $^{19}\text{F} (n, \alpha) ^{16}\text{N}$  จึงใช้ระยะเวลาอบรังสีน้อย จากนั้นจึงนำไปวัดปริมาณรังสีโดยผ่านทาง Pneumatic Transfer System ด้วยเวลา 4 วินาที และวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัด NaI(Tl) ขนาด 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร จำนวน 2 หัว ซึ่งต่ออยู่กับ SCA เป็นเวลา 30 วินาที พบว่ามีค่า Sensitivity เท่ากับ  $4.8 \times 10^4$  Counts/กรัมฟลูออรีน และมี Detection Limit เท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมของฟลูออรีนในตัวอย่างหนัก 10 กรัม มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.31 เปอร์เซ็นต์ และค่า Reproducibility อยู่ในช่วง 0.24 เปอร์เซ็นต์

Lauff and other, 1973 วิเคราะห์ฟลูออรีน และออกซิเจนด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน โดยใช้ Cf-252 Neutron source และ Cockroft-walton 14 MeV neutron generator โดยใช้สารตัวอย่าง 0.7-1.5 กรัม ใส่ใน Polyethylene vial ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว ยาว 1 13/16 นิ้ว จากนั้นจึงนำไปอบรังสีนิวตรอนใน Cockroft-walton 14 MeV neutron generator ( $\phi_F = 10^7$  n/cm<sup>2</sup>/sec) และ Cf-252 neutron source (Yield =  $5 \times 10^{10}$  n/sec) เป็นเวลา 40 วินาที จากนั้นจึงส่งตัวอย่างไปวัดหาปริมาณฟลูออรีนโดยผ่านทาง Pneumatic transfer system ด้วยเวลา 2 วินาที และวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัด NaI(Tl) ขนาด 3 นิ้ว x 3 นิ้ว จำนวน 2 หัว ซึ่งต่ออยู่กับ MCA เป็นเวลา 38 วินาที จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปอบรังสีใหม่อีกครั้งหนึ่ง ทำซ้ำกันหลาย ๆ รอบ พบว่ามี Sensitivity เท่ากับ 0.4 และ 0.04 มิลลิกรัม สำหรับ

ตัวอย่าง 10 กรัมของฟลูออรีนและออกซิเจนตามลำดับ และมีค่า Precision เท่ากับ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่าสำหรับการหาฟลูออรีนและออกซิเจนตามลำดับเช่นเดียวกัน

วัลลภ บุญคง, 1979 ได้ทำการวิเคราะห์แร่ฟลูออไรต์ (Fluorite) ด้วยวิธี นิวตรอนแอคติเวชัน 3 แบบด้วยกันคือ

แบบ ก. ใช้นิวตรอนพลังงานสูงจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเกิดปฏิกิริยา  $^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$  โดยใช้  $\text{CaF}_2$  หนัก 1 กรัมเป็นสารมาตรฐานและตัวอย่างหนัก 0.4 กรัม อาบรังสีเป็นเวลา 10 นาที และจัดระบบวัดรังสีเป็นแบบแกมมาโคอินซิเดนซ์ ด้วยหัววัด  $\text{NaI(Tl)}$  เป็นเวลา 30 นาที

แบบ ข. ใช้นิวตรอนพลังงานสูงจากต้นกำเนิดนิวตรอน  $^{241}\text{Am-Be}$  เกิดปฏิกิริยา  $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$  โดยใช้  $\text{CaF}_2$  หนัก 3 กรัมเป็นสารมาตรฐาน และตัวอย่างหนัก 5-9 กรัม อาบรังสีเป็นเวลา 30 วินาที และวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัด  $\text{NaI(Tl)}$  แบบหลุมขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ซึ่งต่ออยู่กับ SCA เป็นเวลา 30 วินาที ทำการวัดซ้ำ 10 ครั้ง

แบบ ค. ใช้เทอร์มินัลนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เกิดปฏิกิริยา  $^{19}\text{F}(n,\delta)^{20}\text{F}$  โดยใช้  $\text{CaF}_2$  หนัก 50 มิลลิกรัมเป็นสารมาตรฐาน และตัวอย่างหนัก 60 มิลลิกรัม อาบรังสีเป็นเวลา 10 วินาที และวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัด  $\text{NaI(Tl)}$  แบบหลุมขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ซึ่งต่ออยู่กับ MCA เป็นเวลา 20 วินาที

พบว่า การวิเคราะห์แบบ ก. และ แบบ ค. จะได้ผลที่ต่างจากกับการวิเคราะห์ทางเคมี ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และต้องใช้แร่ฟลูออไรต์ที่มีปริมาณมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ปนกับหินปูนด้วย เพื่อป้องกันการรบกวนของ Ba-139 และ Al-28 ส่วนการวิเคราะห์แบบ ข. จะได้ผลใกล้เคียงกับวิธีวิเคราะห์ทางเคมีมากที่สุด

Tominaga and other, 1979 วิเคราะห์หาปริมาณฟลูออรีนในแก้วด้วยวิธี Cyclic activation analysis โดยใช้ Cf-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน ใช้สารตัวอย่างเป็นสารผสมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , ฯลฯ ขนาด 20-30 กรัม อัดแน่นในแคปซูลที่เป็นโพลิเอทิลีนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร ยาว 85 มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำไปอาบรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 17 วินาทีและใช้เวลาส่งตัวอย่างเพื่อไปวัดปริมาณรังสีอีก 1 วินาที จากนั้นจึงวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัด  $\text{NaI(Tl)}$  ขนาด 5 นิ้ว x 5 นิ้ว ซึ่งต่ออยู่กับ MCA เป็นเวลา 17 วินาที หลังจากนั้นจึงนำเข้าไปอาบรังสีใหม่อีก ทำซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง พบว่า Detection limit เท่ากับ 0.024 เปอร์เซ็นต์ และมี Relative error เท่ากับ 2 และ 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ 1 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของฟลูออรีนตามลำดับ

Norre and other, 1980 วิเคราะห์หาปริมาณฟลูออรีนในแร่สังกะสี (Zinc ores) ด้วย Isotopic neutron source โดยใช้ตัวอย่างเป็นผงสังกะสีที่มีฟลูออรีนผสมอยู่ประมาณ 0.3-0.7 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับ 10 เปอร์เซ็นต์ของผงแว็กซ์ (Powder wax) แล้วอัดให้อยู่ในรูปของ Pellets (แร่ 14.5 กรัม และแว็กซ์ 1.45 กรัม) และใช้สารมาตรฐานเป็น NBS No. 91, NBS No.120b และ BCS No.382/1 (Basic slag) จากนั้นจึงนำไปอบรังสีนิวตรอนใน  $^{227}\text{Ac-Be}$  Source (Yield =  $10^{10}$  n/sec) เป็นเวลา 20 วินาที และใช้เวลาส่งตัวอย่างไปวัดปริมาณรังสีอีก 4 วินาที จากนั้นจึงวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดขนาด 13 เซนติเมตร x 13 เซนติเมตร แบบหลุมซึ่งต่ออยู่กับ SCA เป็นเวลา 20 วินาที พบว่ามีค่า Precision เท่ากับ 1.56, 1.33 เปอร์เซ็นต์สำหรับสารที่มีฟลูออรีนผสมอยู่ 0.3 และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และค่า Detection limit เท่ากับ 0.0022 กรัม ของฟลูออรีนที่ไม่มีออกซิเจนเป็นส่วนผสม

Randle, 1985 วิเคราะห์ปริมาณฟลูออรีนในตัวอย่างดินด้วย Neutron accelerator โดยใช้สารตัวอย่างเป็นซิลิเกต (Silicate) หนัก 4.5 - 5.5 กรัม ใส่ใน Rabbit และใช้ USGS Standard rock DTS-1 ซึ่งทำให้เจือจางด้วย NBS No. 91 (Opal glass) และ NBS 120b (Phosphate rock) เป็นสารมาตรฐาน จากนั้นจึงนำไปอบรังสีนิวตรอนใน Dynamitron accelerator ( $\phi_F = 10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>/sec) เป็นเวลา 40 วินาที ต่อจากนั้นจึงส่งตัวอย่างไปวัดปริมาณรังสีด้วยเวลา 3 วินาที และวัดปริมาณรังสีเป็นเวลา 20 วินาที ด้วยหัววัด NaI(Tl) ขนาด 13 เซนติเมตร x 13 เซนติเมตร ซึ่งต่ออยู่กับ SCA พบว่ามีค่า Detection limit เท่ากับ 1 ส่วนในล้านส่วน สำหรับตัวอย่าง 5 กรัม

Mouadili and other, 1989 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟลูออรีนในสารเคลือบฟัน (Dental enamel) ด้วยฟาสต์นิวตรอนแอกติเวชัน โดยใช้ตัวอย่างฟันเข้าไปอบรังสีนิวตรอนใน Cyclotron ( $\phi_F = 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/sec) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากฟลูออรีนเกิดปฏิกิริยา  $^{19}\text{F} (n, 2n) ^{18}\text{F}$  จึงใช้เวลาอบรังสีนาน หลังจากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างนี้สลายตัวอีก 100 นาที แล้วนำไปวัดปริมาณรังสีด้วยระบบ Coincident annihilation photon ด้วยหัววัด NaI(Tl) พบว่ามีค่า Detection limit เท่ากับ 1 ส่วนในล้านส่วน และมี Reproducibility มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์