

**การวัดโดสนิวตรอนของแหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดพลูโตเนียม-เบอริเลียมใน  
แบบจำลองชนิดน้ำโดยใช้ฟิล์มตรวจจัมรังสีแบบกัทรอยและการคำนวณแบบส่งผ่าน  
หลายกลุ่ม**

สมหมาย ช่างเขียน วัช ชิตตระการ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

**บทคัดย่อ**

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาผลการวัดรอยอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน  $\text{Pu}^{238} - ^9\text{Be}$  ความแรง 18 คูรี ในแบบจำลองชนิดน้ำรูปทรงกระบอก ติดตั้งอยู่ ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ด้วยฟิล์มตรวจจัมรังสี 2 ชนิด คือ CN-85B และ LR-115 type IIB โดยวางแผ่นฟิล์มตรวจจัมรังสีชนิดละ 10 แผ่นในแนวรัศมีและให้แต่ละแผ่นห่างกัน 5 เซนติเมตร ทั้งไว้ 1 สัปดาห์จึงนำฟิล์มทั้งสองมากัดขยายรอย โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 นอร์มอลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที และ 90 นาทีตามลำดับ ทำการนับรอยอนุภาคต่อหน่วยพื้นที่ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดธรรมดาที่ กำลังขยาย 400 เท่า ผลการวิจัยแสดงว่าฟิล์มชนิด LR-115 type IIB มีความไวต่อการบันทึกรอยอนุภาคแอลฟามากกว่าฟิล์มชนิด CN-85B จึงเลือกใช้ฟิล์มชนิด LR-115 type IIB เพื่อการวิจัยในลำดับต่อไป ผลการวัดความหนาแน่นรอยที่เกิดจากอนุภาคแอลฟาในแนวรัศมีให้ผลสอดคล้องกับการคำนวณโดยโปรแกรมการคำนวณแบบส่งผ่านหลายกลุ่ม ANISN ภายใต้เงื่อนไขแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) แสดงว่าฟิล์มชนิด LR-115 type IIB สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดนิวตรอนที่มีราคาถูกลงได้



**Neutron Dosimetry of Pu-Be Neutron Source in Water Phantom Using SSNTDS  
and Multigroup Transport Calculations**

Changkian, S. Chittakran, T. Bhongsuwan, T.

Physics department, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkla  
90110

**Abstract**

Two different types of SSNTDS CN-85B and LR-115 Type IIB were used to record alpha tracks which were generated from eighteen curies of  $^{238}\text{Pu}-^9\text{Be}$  neutron source that immersed in water phantom tank with a cylindrical shape. The source is located at Physics department, Faculty of Science, Prince of Songkla University. The films were placed radially in water phantom starting from the origin up to the distance 50 cm. with 5 cm. interval. After one week, the films were collected and etched with 2.5 N NaOH at  $60^\circ\text{C}$  about 25 and 90 minutes etc. in order to enlarge the latent alpha registration tracks. The track density per unit area of each film was determined by optical microscope at 400x magnifications. We found that LR-115 Type IIB film is more sensitive to record alpha track than CN-85B film and we have used LR-115 Type IIB film for further studies. The results showed that the profile of alpha track densities in the radial direction are in good agreement with neutron dose rate calculations using program ANISN under point source condition. This implies that a low cost films LR-115 Type IIB can be used as a neutron dosimeter.

## 1. บทนำ

แหล่งกำเนิดนิวตรอนได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางเช่น การวิเคราะห์สารโดยไม่ทำลาย การวัดความหนาและความหนาแน่นวัสดุในขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม การตรวจวัดความชื้นในดินและในวัสดุ การประยุกต์ใช้ในงานพิสูจน์หลักฐาน การประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ ซึ่งแหล่งกำเนิดที่ใช้มีทั้งชนิดที่เป็นไอโซโทปรังสีและแหล่งกำเนิดประเภทเครื่องเร่งอนุภาค ตลอดจนถึงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ผลจากการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจวัดปริมาณรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีนั้น ๆ เพื่อผลในด้านความปลอดภัยในการทำงานทางรังสีหรือเพื่อผลในการประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้านที่ต้องควบคุมปริมาณรังสีให้อยู่ในระดับที่กำหนด

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดฟลักซ์นิวตรอนหรือโดสนิวตรอนนั้นที่นิยมใช้ทั่วไปคือหัววัดชนิดบรรจุแก๊ส เช่น BF<sub>3</sub> การวัดโดยวิธีการก่อกัมมันต์นิวตรอน ฯลฯ (Kiefer an Maushart, 1972)

การวัดโดยวิธีใช้ฟิล์มตรวจจรรังสีแบบกัทรอยได้รับการศึกษาและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในการวัดโดสนิวตรอนอีกวิธีหนึ่ง หลังจากที่มีการค้นพบว่า เมื่ออนุภาคที่มีประจุ เช่นอนุภาคแอลฟา หรือนิวเคลียสของธาตุอื่นเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุแข็งที่เป็นฉนวน อนุภาคนั้นจะคายพลังงานให้แก่อะตอมของวัตถุนั้น ๆ ตามแนวทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไป ทำให้โครงสร้างของวัตถุได้รับความเสียหายเกิดเป็นร่องรอย (Track) ที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ ร่องรอยนี้ถูกตรวจพบโดยตรงครั้งแรกโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน

(Transmission electron microscope) ต่อมาพบว่าโครงสร้างที่ถูกทำลายนี้ถ้านำไปกัดโดยสารละลายเคมีที่เหมาะสม (Etching) สามารถทำให้ร่องรอยนี้ขยายกว้างขึ้นจนแสงผ่านได้ และสามารถมองเห็นโดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดธรรมดาทั่วไป (Fleischer et al , 1965)

วิธีนี้เป็นหลักการวัดปริมาณรังสีหรืออนุภาคอย่างง่าย และมีราคาถูก จึงมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสาขาต่าง ๆ เช่น วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ ภูมิศาสตร์ใต้ทะเล รังสีคอสมิก และฟิสิกส์แห่งดวงดาว (Astrophysics) เป็นต้น (สมพร จองคำ, 2534) ซึ่งการศึกษาในด้านต่าง ๆ มีความจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้ฟิล์มกัทรอยให้เหมาะสมกับชนิดและพลังงานรังสีนั้น ๆ เนื่องจากฟิล์มแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ไวต่อรังสีแตกต่างกันเช่นเซลลูโลสไนเตรต (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>9</sub>N<sub>2</sub>) วัดรังสีได้ถึงระดับโปรตอนพลังงาน 0.55 MeV (Fleischer et al , 1975) ขณะ

ที่โพสิโทฟิชั่น ( $\text{CH}_2$ ) วัดได้ต่ำสุดเพียงแอลฟาพลังงาน 1 MeV เป็นต้น และยังมีให้เลือกใช้ทั้งฟิล์มชนิดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์อีกด้วย

ฟิล์มตรวจจับรังสีแบบกัทรอยมีการผลิตเพื่อการค้ามากมายหลายชนิด สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้ฟิล์มกัทรอยของโกดักซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกัน 2 ชนิดด้วยกันคือ CN-85 B ซึ่งเป็นฟิล์มชนิด เซลลูโลสไนเตรต ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_9\text{N}_2$ ) และฟิล์ม LR-115 type IIB ซึ่งเป็นฟิล์มเซลลูโลสไนเตรตสีแดง ( $\text{C}_{12}\text{H}_{14}\text{O}_{18}\text{N}_4$ ) โดยฟิล์มทั้งสองจะมีลิเทียมเตตราโบเลต ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) เป็นตัวเปลี่ยนนิวตรอน (neutron converter) เคลือบอยู่บนผิวหน้าอีกชั้นหนึ่งเพื่อให้ฟิล์มมีคุณสมบัติในการวัดนิวตรอนเทอร์มัล (Thermal neutron) ได้ดี (Spurny, 1986) เนื่องจากค่าภาคตัดขวาง (Cross section) ของปฏิกิริยา  $\text{Li}^6(n,\alpha)\text{H}^3$  และ  $\text{B}^{10}(n,\alpha)\text{Li}^7$  ต่อนิวตรอนเทอร์มัลสูง ซึ่งการมีตัวเปลี่ยนนี้ช่วยให้การวัดมีความไวมากขึ้นแม้จะมีปริมาณรังสีจากนิวตรอนอยู่น้อย

การศึกษาโดสนิวตรอนนั้นสามารถศึกษาได้โดยตรงจากการนับปริมาณของร่องรอยที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอนตกกระทบแผ่นฟิล์ม โดยศึกษาร่องรอยที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตร

## 2.วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

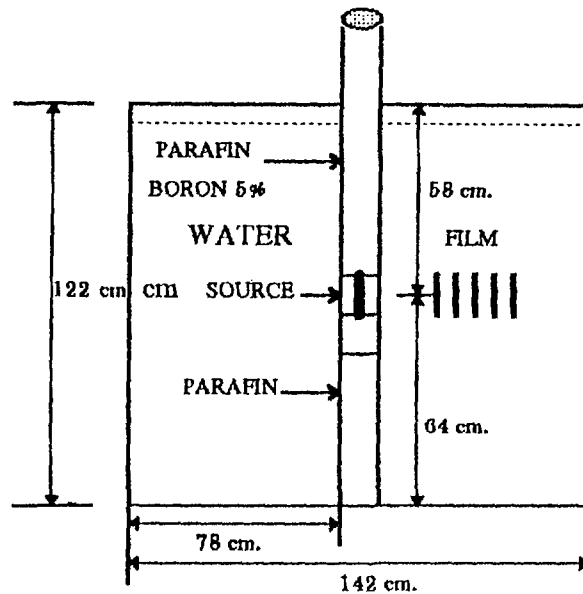
### 2.1 วัสดุอุปกรณ์สำหรับอบรังสีนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสี

- แหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดพลูโตเนียม-เบอริเลียม ความแรง 16.9 คูรี
- แผ่นฟิล์มขนาด 1 x 2 ตารางเซนติเมตร
- แท่งตะกั่วขนาดเล็ก
- ลวดทองแดงสำหรับแขวนแผ่นฟิล์ม

#### วิธีอบรังสีนิวตรอน

1. เตรียมฟิล์มแต่ละชนิดให้พร้อมโดยตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 1 x 2 ตารางเซนติเมตร และห่อด้วยพลาสติกกันน้ำเพื่อไม่ให้สารที่เคลือบไว้บนผิวฟิล์มละลายไปในน้ำขณะทำการวัด
2. นำแผ่นฟิล์มที่จะทำการวัดไปแขวนไว้ที่ระยะต่างๆจากแหล่งกำเนิดโดยให้ฟิล์มอยู่ในระดับเดียวกับแหล่งกำเนิดที่ติดตั้งในถังน้ำของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังรูปที่ 1 ทิ้งไว้ 1 สัปดาห์



รูปที่ 1 แสดงการจัดวางแผ่นฟิล์มเพื่ออาบรังสี

## 2.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับกัตขยายรอย

- แผ่นบันทึกรอย
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- เครื่องต้มน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิได้
- บีกเกอร์ขนาด 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

### เงื่อนไขการกัตขยายรอยของฟิล์มแต่ละชนิดมีดังนี้

ฟิล์มชนิด CN-85B กัตรอยโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 นาที ส่วนฟิล์มชนิด LR-115 type IIB ใช้เวลาในการกัตรอย 90 นาที (Pilcher et al, 1972) ฟิล์มทั้งสองจะต้องนำมาล้างน้ำสะอาดก่อนการกัตรอย เพื่อให้สารที่เคลือบอยู่บนฟิล์มหลุดออกไปให้หมดก่อนจึงนำไปกัตรอยตามเงื่อนไขดังกล่าวได้

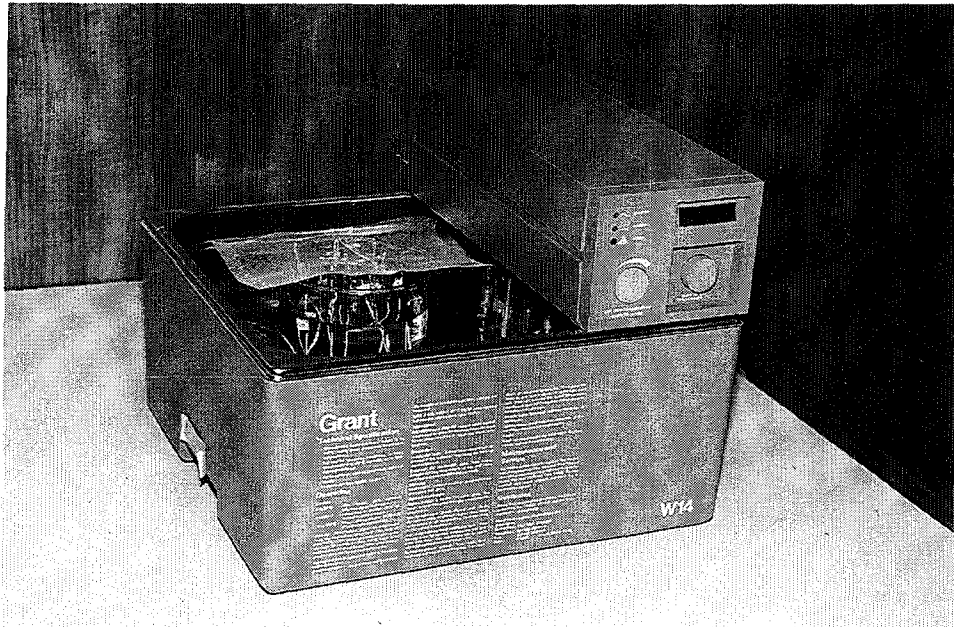
ขั้นตอนการกัตรอย

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.5 นอร์มอล ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำบีกเกอร์ไปแช่ในเครื่องต้มน้ำโดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องไว้ที่

60 องศาเซลเซียส

2. เมื่ออุณหภูมิของสารละลายอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส จึงนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากการอาบรังสีไว้แล้วแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยแขวนฟิล์มให้ห่างกันพอประมาณและทำเครื่องหมายฟิล์มแต่ละแผ่นตามระยะที่วางในการอาบรังสี พร้อมด้วยฟิล์มที่ไม่ได้อาบรังสีอีกหนึ่งชิ้นเพื่อเป็นการวัดแบคกราวด์ แล้วจึงจับเวลาการกัดรอยตามเงื่อนไขของฟิล์มแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2

3. นำฟิล์มที่กัดรอยเสร็จแล้วไปล้างน้ำสะอาดเพื่อหยุดปฏิกิริยาของสารเคมี แล้ววางทิ้งไว้ให้แห้ง นำไปวางบนกระจกสไลด์



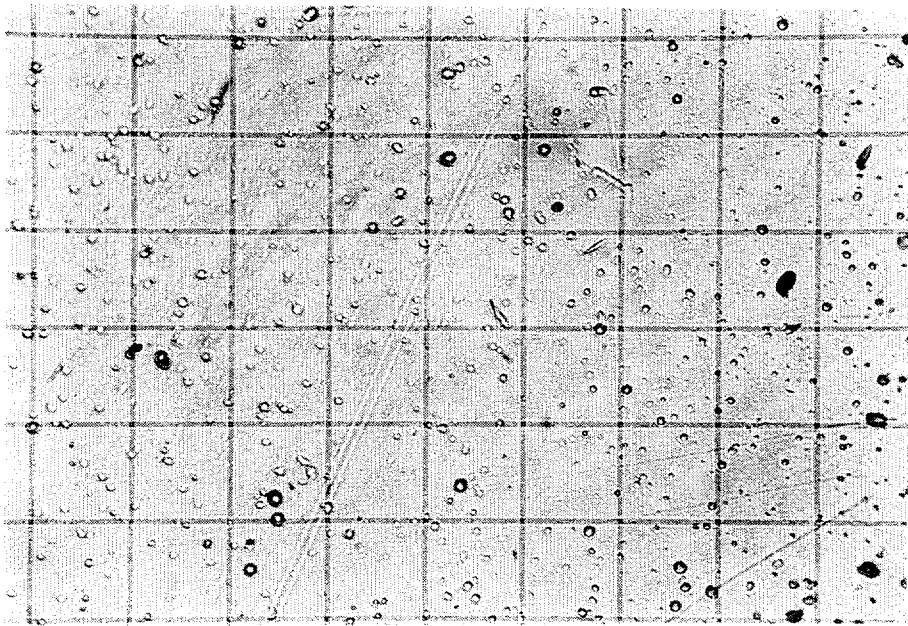
รูปที่ 2 แสดงการกัดขยายรอยของฟิล์มตรวจจับรังสี

### 2.3 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการนับรอยด้วยกล้องจุลทรรศน์

- กล้องจุลทรรศน์ชนิด 2 ตา กำลังขยาย 400 เท่า ยี่ห้อ Olympus รุ่น PM6
- Ocular micrometer เป็นแผ่นกระจกมีเสกกลเป็นตารางสี่เหลี่ยมติดไว้ที่เลนส์ตาเพื่อสะดวกในการนับ
- แผ่นกระจกสไลด์ ขนาดมาตรฐานทั่วไป สำหรับเป็นฐานวางแผ่นบันทึกรอย

### วิธีนับด้วยกล้องจุลทรรศน์

นำแผ่นฟิล์มที่ประกอบบนแผ่นสไลด์เรียบร้อยแล้ววางบนฐานของกล้องจุลทรรศน์ ปรับโฟกัสจนเห็นรอยอนุภาคชัดเจนที่เลนส์กำลังขยายต่ำแล้วจึงปรับมาที่กำลังขยาย 400 เท่า ปรับความคมชัดอีกครั้งจึงทำการนับจำนวนรอยอนุภาคที่ปรากฏในตารางสี่เหลี่ยมทั้งหมดดังรูปที่ 3 จากนั้นจึงแปลงเป็นความหนาแน่นรอยอนุภาคต่อตารางเซนติเมตร ตามความสัมพันธ์ที่หาได้ว่าที่ กำลังขยาย 400 เท่า พื้นที่ที่นับได้คือ  $6.25 \times 10^{-4}$  ตารางเซนติเมตร บันทึกผลการนับที่ได้จากฟิล์มตามระยะต่างๆแล้วนำค่าทั้งหมดไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับรอยอนุภาคที่นับได้ต่อตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3 แสดงรอยอนุภาคที่ผ่านการกัดขยายรอยแล้ว

### 2.4. การคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANISN และ SABINE-3

1 ANISN การคำนวณโดยโปรแกรม ANISN นั้นทำการคำนวณโดยเครื่องพีซีโดยมีโปรแกรมจัดเตรียม input ไฟล์ ชื่อ APE ซึ่งใช้เงื่อนไขแหล่งกำเนิดรังสีแบบจุด(point source) มีปริมาณรังสี  $5.34 \times 10^5$  นิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร-วินาที ทำการคำนวณโดยมีรูปแบบคำสั่งดังนี้

ANISN <input file> output file/R3200

ตารางที่ 1 แสดงผลการนับรอยด้วยกล้องจุลทรรศน์ของฟิล์มทั้งสองชนิด

DISTANCE (cm.)	CN-85B (Tracks/cm. <sup>2</sup> -hr)	ERROR (Tracks/cm. <sup>2</sup> -hr)	LR-115IIB (Tracks/cm. <sup>2</sup> -hr)	ERROR (Tracks/cm. <sup>2</sup> -hr)
0	1.73e+04	407	2.3e+04	468
5	1e+04	310	1.43e+0	369
10	6029	240	5714	233
15	3724	188	4867	215
20	2162	143	3476	182
25	857	90	2267	147
30	343	57	1448	117
35	286	52	667	80
40	305	54	410	62
45	210	45	238	48
50	38	19	105	32

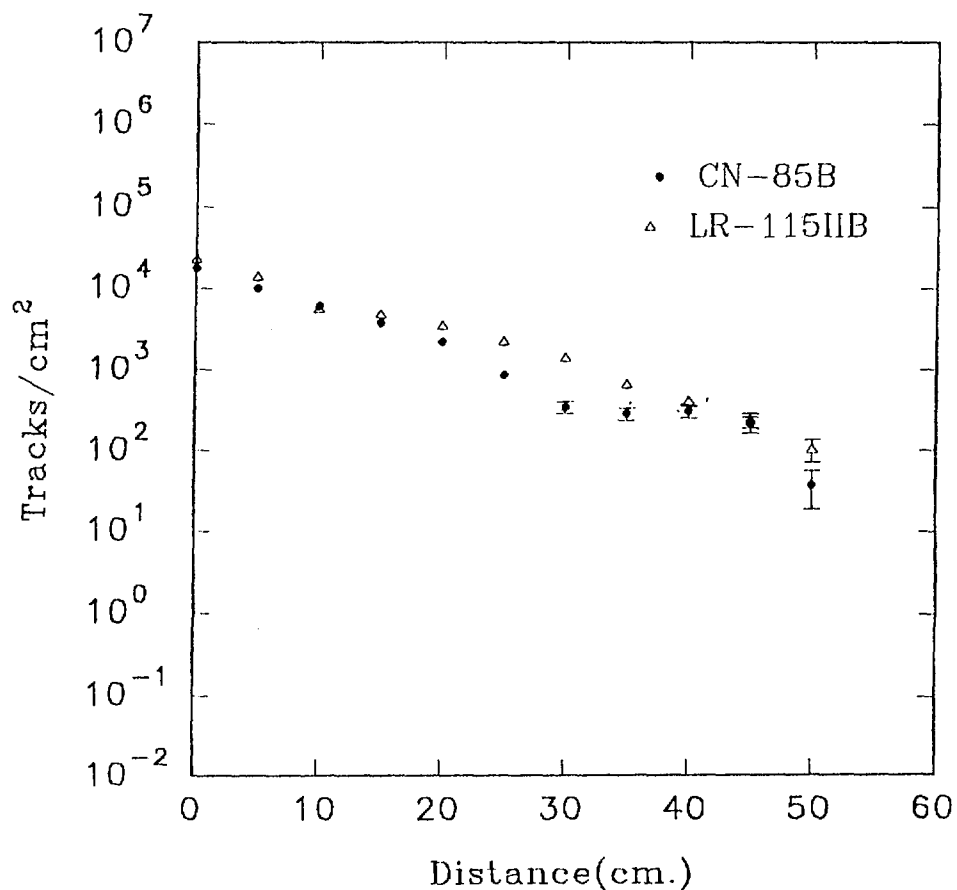


2 SABINE-3 การคำนวณโดสนิวตรอนตามโปรแกรมนี้ใช้นข้อมูลแหล่งกำเนิดรังสี  $\text{Pu}^{238}\text{-Be}^9$  ที่การเกิดฟิชชัน  $2.16 \times 10^5$  ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

### 3. ผลการศึกษาวิจัย

#### 3.1 ผลการนับรอยบนแผ่นฟิล์มทั้ง 2 ชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์

การนับแผ่นฟิล์มแต่ละแผ่นด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้น เราใช้การนับแบบสุ่มตามบริเวณต่างๆบนแผ่นฟิล์ม 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย จะได้จำนวนรอยต่อพื้นที่ตารางสี่เหลี่ยม (Ocular micrometer) ที่ติดกับเลนส์ใกล้ตา ในการทดลองครั้งนี้วัดพื้นที่ของตารางสี่เหลี่ยมที่ติดกับเลนส์ใกล้ตาได้เป็น  $6.25 \times 10^{-4}$  ตารางเซนติเมตร ที่กำลังขยาย  $40 \times 10$  จากนั้นแปลงให้เป็นจำนวนรอยต่อหนึ่งตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง ได้ผลตามตารางที่ 1 และรูปที่ 4



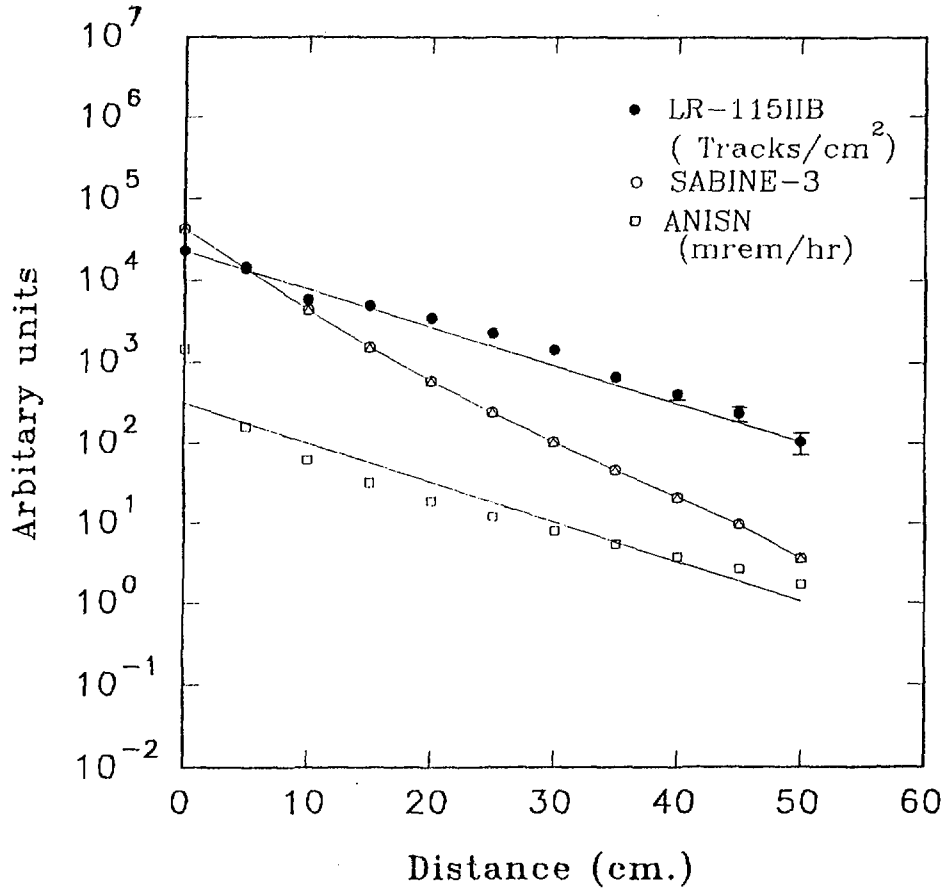
รูปที่ 4 แสดงผลการวัดของฟิล์มทั้ง 2 ชนิดที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ความลึก 58 เซนติเมตรจากปากถึงหุ่นจำลองชนิดน้ำ

### 3.2 ผลการคำนวณโดยโปรแกรม ANISN และ SABINE -3

การคำนวณด้วยโปรแกรม ANISN ใช้เงื่อนไขการคำนวณเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) แล้วนำผลการคำนวณจากเงื่อนไขดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์กับผลการทดลอง ผลการคำนวณโดยโปรแกรม SABINE-3 เป็นการคำนวณฟลักส์นิวตรอนและโดสนิวตรอน โดยใช้เงื่อนไขการคำนวณเหมือนการวัดจริงทุกประการทั้งขนาดและรูปร่างของแหล่งกำเนิด ผลการคำนวณจากโปรแกรมทั้งสองแสดงตามตารางที่ 2 และนำข้อมูลจากตารางที่ 2 มาเขียนกราฟร่วมกับผลการวัดที่ได้จากฟิล์มชนิด LR-115 type IIB แสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม ANISN และ SABINE-3

DISTANCE (cm.)	ANISN (mrem/hr)	SABINE-3 (mrem/hr)
0	1454.6	43150
5	157.97	13890
10	61.1	4329
15	31.8	1540
20	18.87	593.2
25	12.02	242.5
30	7.99	103.8
35	5.47	46.02
40	3.81	21
45	2.67	9.698
50	1.71	3.642

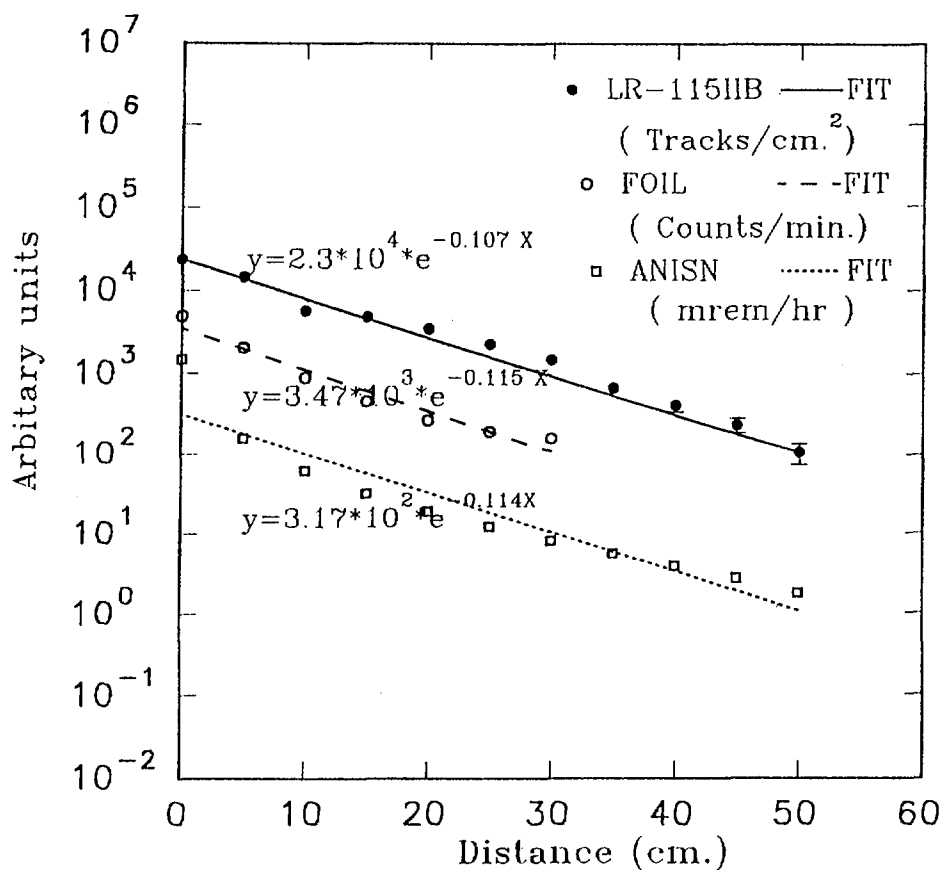


รูปที่ 5 แสดงผลการวัดของฟิล์ม LR-115 type IIB; การคำนวณโดยโปรแกรม ANISN และ SABINE-3 ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ความลึก 58 เซนติเมตรจากปากถังหุ่นจำลองชนิดน้ำ

### 3.3 เปรียบเทียบผลการวัดโดยฟิล์มกัตรอย, การวัดโดยวิธีอาบรังสีแผ่น

#### อินเดียมบาง ๆ และผลการคำนวณโดยโปรแกรม ANISN

ผลการวัดโดยใช้ฟิล์มกัตรอย LR-115 type IIB วัดอนุภาคนิวตรอนที่ระยะ 0-50 เซนติเมตรจากแนวกึ่งกลางหุ่นจำลองชนิดน้ำ, การวัดโดยวิธีอาบรังสีแผ่นอินเดียมบาง ๆ ( วัสดุห้วงรักษ์, 2529 ) และผลการคำนวณโดสนิวตรอนโดยโปรแกรม ANISN แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงผลการวัดของฟิล์ม LR-115 type IIB , การวัดโดยวิธีอบรังสีแผ่น  
อินเดียมบาง ๆ และการคำนวณโดยโปรแกรม ANISN ที่ระยะห่างจากแหล่ง  
กำเนิดนิวตรอนที่ความลึก 58 เซนติเมตรจากปากถึงหุ่นจำลองชนิดน้ำ

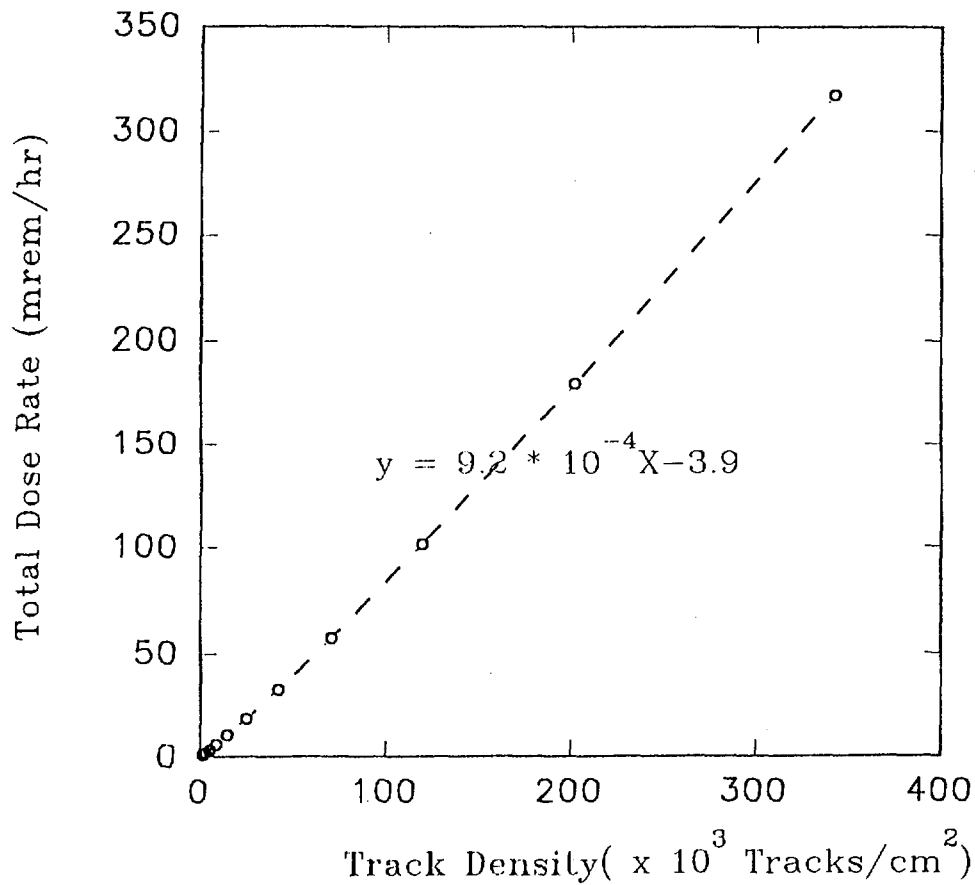
#### 4. บทวิจารณ์และสรุปผล

จากการศึกษาการใช้ฟิล์มตรวจจบบังสีแบบกัทรอยในการวัดฟลักซ์นิวตรอนหรือโดส  
นิวตรอนในหุ่นจำลองชนิดน้ำเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแบบหลายกลุ่มโดยโปรแกรม ANISN  
และ SABINE-3 ให้ผลสรุปดังนี้

1 ชนิดของฟิล์มตรวจจบบังสีมีผลต่อการวัดโดยมีความไวต่อรังสีต่างกัน ดังนั้นการ  
เลือกใช้ฟิล์มให้เหมาะสมจึงมีผลต่อความถูกต้องของผลการวัดโดสนิวตรอนอย่างหนึ่ง ในการวิจัย  
ครั้งนี้พบว่า LR-115 type IIB มีความไวต่อรังสีนิวตรอนดีกว่าฟิล์มชนิด CN-85B

2 ผลการวัดรอยอนุภาคนิวตรอนกับฟิล์มตรวจจบบังสีชนิด LR-115 type IIB ให้ผล  
สอดคล้องกับผลการคำนวณโดยโปรแกรม ANISN โดยใช้เงื่อนไขแหล่งกำเนิดแบบจุด  
(point source)

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างโดสนิวตรอนกับความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนฟิล์ม  
 กัตรอย LR-115 type IIB เป็นดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโดสนิวตรอนกับความหนาแน่น  
 ของรอยอนุภาคบนฟิล์มกัตรอย LR-115 type IIB

ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$Y = 9.2 \times 10^{-4} X - 3.9$$

โดยที่ Y = โดสนิวตรอน (mrem/hr)

X = ความหนาแน่นของรอยอนุภาค (Tracks/cm. $^2$ )

## 5. เอกสารอ้างอิง

1. ทิพวิมล ทองอ่อน ,2530. "การประยุกต์ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์และออกแบบ  
เครื่องกำบังรังสีนิวตรอน", วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. วิลาศ ห่วงรักษ์ ,2529. "การวัดการกระจายของเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ  
ภายในสระน้ำทดลองที่บรรจุแหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบ Pu-Be", มหาวิทยาลัย  
สงขลานครินทร์
3. สมพร จงคำ ,2534 . "Solid State Nuclear Track Detector(SSNTD)", ข่าวพ.ป.ส. ปีที่6  
ฉบับที่1
4. Bradley D. A. ,Chong C.S.,Ahmat Saat,Abdul Ghani Sidik and Ghose A.M., 1987.  
"Response of LR-115 Type II and CR-39 Plastic Tracks  
Detectors to Am-Be and 14.1 MeV Neutrons", Appl. Radiat. Isot. ,  
Vol 38 : 943-947
5. Durrani S. A. ,1982, " The use of solid-state nuclear track detectors in radiation  
dosimetry ,Medicine and Biology" , Nuclear Tracks , Vol. 6 :209-228
6. Enge W., 1980, Introduction to plastic Nuclear Track Detectors, Nuclear Tracks vol. 4,  
No. 4, pp. 283-308
7. Flescher R.I., Price ,P.B. ,and Walker ,R.M., 1965, Solid State Track Detector,  
Applications to Nuclear Science and Geophysics, Annual Reviews, vol.15,  
No.1
8. Flescher R.I., Price ,P.B. ,and Walker ,R.M., 1975, Nuclear Tracks in Solid :Principles  
and Applications., University of California Press ,Berkeley

9. Jonsson G. ,1992 . "Statistics and error consideration at the application of SSNTD - technique in Radon measurement", 16 th International Conference on nuclear track in solids : in Beijing
  
10. Kiefer H. and Maushart R., 1972, Radiation Protection Measurement, Pergamon Press.
  
11. Maiorino J.R. ,1986, Computer-code ANISN Multiplying Media and Shielding Calculation.
  
12. Petoussi N. , Durrani S. A. ,Fremlin J.H. and Mast H.U. , 1986 , " Neutron-beam depth-dose dosimetry and spectrometry in water phantom using SSNTDs and multigroup transport calculations", Nuclear Tracks Radiat. Meas. , Vol. 11: 59-66
  
13. Pilcher V.E., Jones C.C. and Ellmers G.R.,1972 "Particle tracks in Cellulose Nitrate", American Journal of Physics 40 , p.679-683
  
14. Ponti C. and Vanheusden R. ,1974 , SABINE-3 an improved version of the shielding code sabine
  
15. Sawamura T. and Yamazaki H. , 1981 , "Fast-neutron induced tracks in cellulose nitrate", Nuclear Tracks , Vol. 5 : 271-277
  
16. Spurny F. ,Bardy J.M.,Medioni R., Portal G. and Turek K. , 1986, " Development of fast neutron detector for multielement personal neutron track dosimeter", Nuclear Tracks ,Vol. 12 : 585-588
  
17. Sujak P. , 1986 , "On the use of Kodak LR-115 IIB for neutron dosimetry at nuclear power plant ", Nuclear Tracks , Vol. 12 :565-568