



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินการดูดซับแคดเมียมในข้าวโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

Evaluation of Cadmium Uptake in Rice Using Neutron Activation Analysis

นามผู้วิจัย นางสาวปภามณูษ์ ชีประเสริฐ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์พัฒนา อนุรักษพงษ์พร, D.Tech.Sc )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธ์, Ph.D )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินการดูดซับแคดเมียมในข้าวโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

Evaluation of Cadmium Uptake in Rice Using Neutron Activation Analysis

โดย

นางสาวปภามณูช ธีประเสริฐ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปภามณูญ์ ชีประเสริฐ 2555: การประเมินการดูดใช้แคดเมียมในข้าวโดยใช้เทคนิคการ  
กระตุ้นด้วยนิวตรอน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการ  
สิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์  
สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์พัฒนา อนุรักษ์พงศธร,  
D.Tech.Sc. 89 หน้า

ข้าวเป็นหนึ่งในธัญพืชที่มีความสำคัญสำหรับทวีปเอเชีย การบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อน  
แคดเมียมเป็นระยะเวลานานเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเจ็บป่วยในมนุษย์ ซึ่งหน่วยงานด้านสุขภาพ  
และอนามัยต่าง ๆ กำลังให้ความสนใจ งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ใน  
การใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน (NAA) สำหรับการวิเคราะห์แคดเมียม ในตัวอย่างทาง  
สิ่งแวดล้อม เพื่อศึกษาการดูดใช้แคดเมียมในต้นข้าวและประเมินการสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าว  
และประเมินความเสี่ยงสุขภาพจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม ผลการวิจัยสรุป  
ได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมในการใช้เทคนิควิเคราะห์แบบ NAA ได้แก่ การกระตุ้นด้วยนิวตรอน  
ความเข้มของนิวตรอนประมาณ  $4.47 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ทิ้งไว้  
ให้รังสีสลายตัว เท่ากับ 3 วัน เมื่อทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์กับสารมาตรฐาน SRM2711  
Montana Soil ให้ค่า relative error เท่ากับ 1% ค่าความแม่นยำเท่ากับ 1%RSD และค่าความเป็น  
เส้นตรง ในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 1 – 9 ไมโครกรัม ให้ค่า correlation coefficient เท่ากับ 0.997  
โดยค่าขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างดินเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความสามารถ  
ในการดูดใช้แคดเมียม พบว่าแคดเมียมในดินถูกดูดใช้โดยพืช และมีการสะสมมากที่สุดในราก ลำ  
ต้น ใบ แกลบและเมล็ด ตามลำดับ ค่าการสะสมของแคดเมียมในตัวอย่างเมล็ดส่วนที่นำมาบริโภค  
แบบไม่ขัดสี มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม  
(CODEX,2005) ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมที่ได้รับจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนต่อสัปดาห์  
และต่อเดือน มีค่าเกินปริมาณบริโภคสูงสุด เมื่อคำนวณค่าสัดส่วนความเป็นอันตราย พบว่าการ  
บริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม จะต้องมีการเฝ้าระวังการเกิดพิษต่อผู้บริโภค และการ  
ประเมินค่าความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งพบว่ามีค่าความเสี่ยงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ U.S. EPA

Prapamon Seeprasert 2012: Evaluation of Cadmium Uptake in Rice Using Neutron Activation Analysis. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Patana Anurakpongsatorn, D.Tech.Sc. 89 pages.

Rice is one of the most important staple crops in Asia. The prolonged consumption of cadmium contaminated rice has been cause of food borne illness in human. The potential public health risk associated has become of increasing concern. Aims of this study were to study of possibility for using Neutron Activation Analysis (NAA) to analyze cadmium in environment samples, to study cadmium uptake in rice plant and evaluation of cadmium accumulated in rice grain. The assessment of health risk in human consumed the contaminated rice. The result was show that the proper condition was irradiation time for 12 hours at neutron flux  $4.47 \times 10^{11}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> and decay time for 3 days. The validation of measurement was carried out using NIST standard reference material (SRM2711 Montana Soil). The relative error for this method was 1%. The precession was 1% RSD. The linearity of cadmium calibration curve was carried out in the range of 1-9 µg with correlation coefficient of 0.997 and detection limit of 15 mg/kg for soil sample. Uptake ability showed that cadmium in soil was transported, followed by root, stem, leaf, husk and grain, respectively. Accumulation of cadmium in rice grain was higher than standard level at 0.4 mg/kg (CODEX, 2005). The cadmium intaken via rice consumption per week and month were exceeded the tolerance value. The target hazard quotient value revealed the surveillance for human health effects must be conducted. The probability of cancer risk assessment was over the standard value set by U.S. EPA.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ. พัฒนา อนุรักษ์พงศธร ประธานกรรมการ ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์ กรรมการร่วม และคุณอาภรณ์ บุษยมงคล นักเคมีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ แก้ไขปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย และการเรียนตลอดหลักสูตร และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการการวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนนักเคมีนิวเคลียร์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

ขอขอบคุณ Professor Yoneda Minoru, Laboratory of Environmental Risk Analysis, Department of Environmental Engineering Graduate School of Engineering, Kyoto University ที่สนับสนุนห้องปฏิบัติการ และคำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่เกษตรอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และคุณพะเกโพ สักกะราศิริ เจ้าของแปลงเก็บตัวอย่าง ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างดิน และ ขอขอบคุณครอบครัวเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ตลอดจนผู้ที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ที่ข้าพเจ้าไม่ได้เอ่ยนามทั้งหมด ที่คอยให้กำลังใจ และเป็นกำลังสนับสนุนให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงขึ้นมาได้โดยสมบูรณ์

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับคุณพ่อคุณแม่ และครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ปภามณูชฺ์ ชิประเสริฐ

กุมภาพันธ์ 2555

## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุป	69
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก สเปกตรัมของรังสีแกมมา	80
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณปริมาณธาตุโดยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน	82
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณขีดจำกัดของวิธีวิเคราะห์ (Limit of detection, LOD) โดยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน	84
ภาคผนวก ง ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน SRM2711 Montana Soil และ SRM1568a Rice Flour	86
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	89

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าเฉลี่ยแคดเมียมจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในดินเพื่อการเกษตรของ ประเทศฟินแลนด์	6
2	มาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้ ในบางประเทศ	10
3	พลังงานและค่าครึ่งชีวิตของธาตุบางชนิดภายหลังการกระตุ้น ด้วยนิวตรอน	23
4	ระบบจำแนกสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งตามหลัก U.S. EPA	32
5	ค่าขนาดอ้างอิงรวมทั้งค่าความชันการเกิดมะเร็งของแคดเมียม	44
6	คุณลักษณะและคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างดิน	45
7	ค่าสัมประสิทธิ์ Freundlich ( $k_d$ ) สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลัง( $1/n$ ) และ Hysteresis Index (HI)	50
8	ค่าความถูกต้องและแม่นยำของการวิเคราะห์สารมาตรฐานอ้างอิง SRM2711 (Montana Soil)	54
9	ค่าขีดต่ำสุดของวิธีวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างดินและพืช	55
10	ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างดิน	58
11	ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างรากข้าว	60
12	ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างลำต้น	61
13	ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างใบ	62
14	ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างกลีบ	63
15	ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างเมล็ดข้าว	64
16	ปริมาณชีวมวล และความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างพืช	65
17	ปริมาณแคดเมียมจากการปลูกในกระถางเปรียบเทียบกับตัวอย่าง จากพื้นที่จริง	66
18	ปริมาณที่ได้รับจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อน	67
19	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสัดส่วนความเป็นอันตราย	68

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของต้นข้าว	11
2	ทฤษฎีการกระตุ้นด้วยนิวตรอน	14
3	กัมมันตรังสีที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยนิวตรอนและลดลงจากการทิ้งให้ สลายตัว	17
4	องค์ประกอบในการวิเคราะห์เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน	18
5	กระบวนการฟิชชันของ U-235	19
6	เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่1 (ปปว.-1/1)	21
7	รูปจำลองแสดงตำแหน่งอุปกรณ์อาบรังสีภายนอกแกนปัจจุบัน ของเครื่อง ปปว.-1/1	22
8	พื้นที่นำข้าวสำหรับการเก็บตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้	27
9	ภาชนะกระตุ้นด้วยนิวตรอนทำจากอะลูมิเนียม	34
10	ชุดอุปกรณ์วัดรังสีแกมมา พร้อมหัววัดรังสีชนิด ไฮเปอร์เพียวเจอร์มาเนียม	35
11	ต้นกล้าข้าวที่พร้อมนำไปปักดำในกระถาง	37
12	ตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ผ่านการปิดผนึกด้วยความร้อน	40
13	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับแคดเมียม ความเข้มข้น 25 mg/kg	47
14	ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม ตามสมการของ Freundlich	48
15	ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม ตามสมการของ Langmuir	48
16	Hysteresis การดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดิน	49
17	ผลของระยะเวลาที่มีต่อการปลดปล่อยแคดเมียมจากดิน	50
18	การเปลี่ยนแปลงค่าการนับรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น เมื่อ กระตุ้นด้วย นิวตรอนเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง และทิ้งให้รังสีสลายตัว เป็นเวลา 2 – 5 วัน	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	การเปลี่ยนแปลงค่าการนับรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น เมื่ออาบรังสีนิวตรอนเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งให้รังสีสลายตัว เป็นเวลา 2 – 5 วัน	53
20	สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างดิน	57
21	สเปกตรัมของรังสีแกมมาของ SRM2711 Montana Soil	57
22	สเปกตรัมของรังสีแกมมาของ SRM1568a Rice Flour	59
23	สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างรากข้าว	59
24	สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างลำต้น	60
25	สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างใบ	31
26	สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างแกลบ	62
27	สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างเมล็ดข้าว (ไม่ขัดสี)	63
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	สเปกตรัมของรังสีแกมมาของสารละลายมาตรฐาน แคดเมียม 1 ไมโครกรัม	81
ค1	การหาขีดจำกัดของวิธีวิเคราะห์	85

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NAA	=	Neutron Activation Analysis
$\phi$	=	neutron flux
$A_n$	=	avogadro's number
a	=	น้ำหนักอะตอม
$\theta$	=	isotopic abundance
w	=	น้ำหนักธาตุ
$\sigma$	=	neutron cross-section
$\lambda$	=	decay constant
A	=	activity
NOAEL	=	no observed adverse effect level
LOAEL	=	lowest observed adverse effect level
RfD	=	reference dose
LOD	=	limit of detection
LOQ	=	limit of quantitation
B	=	background
n	=	จำนวนช่องของการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดพีค
m	=	จำนวนช่องของการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดสเปกตรัมซ้ายและขวา
BW	=	body weight
I	=	intake rate
TWI	=	tolerable weekly intake
PTMI	=	provisional tolerable monthly intake
THQ	=	target hazard quotients
Cs	=	ความเข้มข้นในดิน
Ce	=	ความเข้มข้นในสารละลาย

# การประเมินการดูดใช้แคดเมียมในข้าวโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

## Evaluation of Cadmium Uptake in Rice Using Neutron Activation Analysis

### คำนำ

แคดเมียม (Cadmium, Cd) เป็นธาตุที่มีความเป็นพิษสูง สำหรับการบริโภค ค่า LD<sub>50</sub> ในหนูทดลอง เท่ากับ 890 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Chemtrec, 2010) ไม่สามารถสันดาป ดูดซึมและย่อยสลายได้ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต แคดเมียมไม่ใช่ธาตุหลักที่มีความจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช ดังนั้นการสะสมทางชีวภาพของแคดเมียมในพืชจึงมีปริมาณสูงกว่าธาตุอื่นๆ แหล่งกำเนิดของการสะสมแคดเมียมในดินเกิดได้จากทั้งสาเหตุจากธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ อันได้แก่ การใส่ปุ๋ย การทำเหมืองแร่ และการทิ้งของเสียอันตรายอื่น ๆ แคดเมียมสามารถเคลื่อนย้ายจากดินเข้าสู่พืชผ่านทางราก และส่งผ่านไปยังส่วนต่างๆ (Smolder, 2001) ดังนั้นการปนเปื้อนของดินจึงส่งผลให้แคดเมียมสามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ง่าย

ข้าว (*Oryza Sativa* L.) เป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะในประเทศไทย ดังนั้นการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมปริมาณมาก หรือบริโภคติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน ก่อให้เกิดการสะสมของแคดเมียมในร่างกาย เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอาการผิดปกติหรือมีการเจ็บป่วยในมนุษย์ กิจกรรมเหมืองแร่สังกะสี เริ่มทำในประเทศไทย ปีพ.ศ.2520 บริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และในปี พ.ศ.2540 ได้พบว่าเกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินและข้าวจากบริเวณดังกล่าว ในปี พ.ศ. 2544 – 2545 พบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมในตัวอย่างดินและข้าว ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดิน อยู่ในช่วง 0.5 – 284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในตัวอย่างข้าวเท่ากับ 0.05 – 7.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Simmon *et al.*, 2005) จึงแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยการผลิตข้าวในประเทศไทยมีความเสี่ยงที่จะเป็นเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของสารพิษเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร การดูดใช้ (uptake) แคดเมียมของพืชนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งจาก ดินและพืช เช่น ความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน รูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ชนิดพืช เนื้อเยื่อของพืช อายุของพืช และอื่นๆ การทำความเข้าใจกระบวนการดูดใช้ การแพร่กระจาย และการสะสมของโลหะหนักในพืช เป็นกระบวนการที่ขาดการอธิบาย มีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการแปลความหมายซึ่งทำให้การประเมินการเคลื่อนย้ายสูงกว่าความเป็นจริง เป็นต้นว่า การใช้เกลือแคดเมียมเปรียบเทียบกับแคดเมียมที่มีอยู่แล้วในดิน การใช้แคดเมียมที่ใส่เพิ่มลงไปในดินกับแคดเมียมที่สมมูลอยู่นานแล้วในดิน (พิชิต, 2544)

เทคนิคการวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมนั้นทำได้หลายวิธี เช่น Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS), Inductively Coupled plasma (ICP), X-ray Fluorescence (XRF), Neutron Activation Analysis (NAA) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละเทคนิคนั้นมีหลักการที่แตกต่างกัน มีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เทคนิควิเคราะห์ที่ดีต้องมีความไวสูง (high sensitivity) และมีค่าขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ต่ำ (low detection limit) การวิจัยครั้งนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิควิเคราะห์แบบ Neutron Activation Analysis (NAA) วิเคราะห์แคดเมียมสำหรับตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม รวมทั้งศึกษาการดูดซับแคดเมียมของต้นข้าวเพื่อการประเมินความเสี่ยงสุขภาพจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิควิเคราะห์แบบ Neutron Activation Analysis (NAA) สำหรับการวิเคราะห์แคดเมียม ในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม
2. เพื่อศึกษาการดูดใช้แคดเมียมของต้นข้าว และประเมินการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว
3. เพื่อประเมินความเสี่ยงสุขภาพจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม

## การตรวจเอกสาร

### 1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนัก กล่าวคือ เป็นธาตุที่มีค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรขึ้นไป (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) จัดเป็นธาตุพิษที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม พบในลักษณะที่ไม่เป็นสารบริสุทธิ์ในธรรมชาติ และในสิ่งแวดล้อมแคดเมียมจะอยู่ในรูปของไอออนอิสระ เกิดเป็นสารประกอบกับสารอนินทรีย์ เช่น คลอไรด์ ซัลไฟด์ และสารประกอบไฮดรอกไซด์ หรือเกิดสารประกอบลิแกนด์กับหมู่ฟังก์ชันของสารอนินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก กรดนิวคลีอิก กรดอะมิโน เป็นต้น

#### 1.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

แคดเมียมเป็นธาตุในหมู่ IIB ของตารางธาตุ มีเลขเชิงอะตอม 48 มวลเชิงอะตอม 112.40 ความถ่วงจำเพาะ 8.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 8.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 และสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงวาเลนซ์อิเล็กตรอน (speciation) มีไอโซโทปที่เสถียร 8 ไอโซโทป มีสีเงินปนขาว มันวาวเล็กน้อย สามารถรับประจุไฟฟ้าบวกได้ น้ำหนักเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อน เป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในกรดอ่อน เช่น กรดไนตริก (Alloway, 1995) แต่สารประกอบของแคดเมียม เช่น แคดเมียมคลอไรด์ ( $CdCl_2$ ) แคดเมียมโบรไมด์ ( $CdBr_2$ ) แคดเมียมไออไดด์ ( $CdI_2$ ) แคดเมียมไนเตรท ( $Cd(NO_3)_2$ ) และแคดเมียมซัลเฟต ( $CdSO_4$ ) สามารถละลายน้ำได้ดี สารประกอบแคดเมียมที่ไม่สามารถละลายในน้ำ ได้แก่ แคดเมียมออกไซด์ ( $CdO$ ) แคดเมียมซัลไฟด์ ( $CdS$ ) แคดเมียมคาร์บอเนต ( $CdCO_3$ ) แคดเมียมอโรฟอสเฟต ( $Cd_3(PO_4)_2$ ) และแคดเมียมฟลูออไรด์ ( $CdF_2$ ) ซึ่งสามารถละลายได้ในสภาพออกซิไดซ์รุนแรง หรือในสภาวะเป็นกรด

#### 1.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน

สาเหตุของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินอาจเกิดได้จากกระบวนการทางธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ ความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในเปลือกโลก มีประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มักพบรวมอยู่กับสังกะสี เนื่องจากทั้งสองธาตุมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกัน ได้แก่ โครงสร้างไอออนิก (ionic structures) และ ความสามารถในการดึงคู่อิเล็กตรอนของอะตอมคู่ที่

เกิดพันธะที่จะรวมกันเป็น โมเลกุล (electronegativity) ที่จะบอกถึงความสามารถในการทำให้เกิดไอออน และทั้งสองธาตุยังเป็นคาลโคไฟล์ (chalcophile) ที่เสถียร โดยอัตราส่วน ระหว่างสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn:Cd) ในหินตั้งแต่ 27:1 ถึง 7000:1 ค่าเฉลี่ยโดยประมาณ 500:1 แคดเมียมพบมากจากผลพลอยได้ของการถลุงแร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite, ZnS) แร่สมิทซอไนต์ (smithsonite, ZnCO<sub>3</sub>) ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมประมาณ 0.2 – 0.4 % และสามารถพบสูงสุดถึง 5% (Alloway, 1995) และเนื่องจากวัตถุดิบกำเนิดดินที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีปริมาณแคดเมียมในดินที่แตกต่างกัน เช่น หินอัคนี มีปริมาณแคดเมียมระหว่าง 0.1 – 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินแปร มีปริมาณระหว่าง 0.1 – 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินชั้นมีปริมาณระหว่าง 0.3 – 11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยในพื้นที่ทั่วไป ความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน จะมีน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อน หรือมีการพัฒนาของวัตถุดิบกำเนิดดินที่ผิดปกติ เช่น หินดินดานสีดำ จึงทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าปกติ ซึ่งถ้าพิจารณาปริมาณแคดเมียมตามชั้นดิน (soil horizon) ดินบนจะมีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าดินชั้นล่าง เพราะมีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าทำให้แคดเมียมสามารถถูกจับได้ดีกว่า หรือเกิดจากการใช้ปุ๋ย หรือการตกสะสมของแคดเมียมจากบรรยากาศ (Alloway, 1995)

การตกสะสมของแคดเมียมจากบรรยากาศ จากการติดตามตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในบรรยากาศ ระหว่างปี 1997 - 1999 ณ สถานีตรวจวัด 8 สถานีในฟินแลนด์ บ่งชี้ว่ามีการตกสะสมของแคดเมียมจากบรรยากาศของประเทศฟินแลนด์ เท่ากับ 0.3 กรัมต่อเฮกแตร์ (Ministry of Agriculture forestry, 2000) ซึ่งโดยทั่วไปความเข้มข้นของแคดเมียมจากบรรยากาศเท่ากับ 1 – 50 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่สภาวะปกติ (ng/m<sup>3</sup>) ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากแหล่งกำเนิด โดยแหล่งกำเนิดส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและอุตสาหกรรม ซึ่งแคดเมียมจะเกิดการระเหยสู่บรรยากาศเมื่อให้อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส โดยไอของแคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิด และจะตกสะสมสู่ดินและแหล่งน้ำ (Alloway, 1995)

การปนเปื้อนของแคดเมียมจากการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งใช้วัตถุดิบคือ หินฟอสเฟต (phosphate rock) และการใช้ปุ๋ยเคมีและสารควบคุมศัตรูพืชในรูปของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช สารฆ่าเชื้อรา และฮอร์โมน ต่าง ๆ ในการจัดการทางการเกษตรปริมาณมาก พบว่าในปุ๋ยและสารเคมี เมื่อใช้เป็นระยะเวลาอันยาวนานจะส่งผลให้เกิดการสะสมในพื้นที่เกษตรกรรม รวมไปถึงการใช้สารปรับปรุงบำรุงดินอื่นๆ เช่น ปูน ปุ๋ยคอก ทั้งนี้รวมถึงจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ เช่น น้ำทิ้งและกากตะกอนจากการบำบัดน้ำทิ้ง ซึ่งจะมีปริมาณแคดเมียมสูงเพราะเป็นแหล่งรับแคดเมียมมาจากหลายแหล่ง ได้แก่ กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม การใช้สารธาตูปโภคและสิ่งสิ่งปฏิกูล เช่น ขยะมูลฝอยต่าง ๆ ที่มีชิ้นส่วนวัสดุที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น กระดาษ สีทาบ้าน ถ่านไฟฉาย กากหม้อแบตเตอรี่ และเศษภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะหนัก ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และหลุมฝังกลบ รวมไปถึง

ถึงของเสียจากการทำเหมืองแร่และถลุงโลหะ เช่น การผลิตสังกะสีจะมีกากของเสียที่สำคัญมาก คือ กากแคดเมียม

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยแคดเมียมจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในดินเพื่อการเกษตรของประเทศฟินแลนด์

แหล่งกำเนิด	g/ha/a	% ของแหล่งกำเนิดทั้งหมด
การตกสะสมจากบรรยากาศ	0.2	33.1
การใช้ปุ๋ย	0.025	4.1
การใช้ปุ๋ยเพื่อการเกษตร	0.035	5.8
ปุ๋ยคอกและมูลสัตว์	0.322	53.2
ขยะอื่นๆ	0.023	3.8

ที่มา: Ministry of Agriculture forestry (2000)

### 1.3 พฤติกรรมทางเคมีของแคดเมียมในดิน

การเปลี่ยนแปลงวาเลนซ์อิเล็กตรอนของแคดเมียมในสารละลายดิน แคดเมียมจะอยู่ในรูปไอออนแคดเมียมอิสระ ( $\text{Cd}^{2+}$ ) และจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของดินมากกว่ารูปอื่นๆ แต่แคดเมียมสามารถอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อนได้ เช่น  $\text{CdCl}^+$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{CdHCO}_3^+$ ,  $\text{CdCl}_3^-$ ,  $\text{CdCl}_4^{2-}$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$  และ  $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$  และสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (Alloway, 1995)

ความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยแคดเมียม ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยแคดเมียมจะดูดซับได้น้อย ในดินที่มีความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 4.5 – 5.5 ซึ่งมีสภาพเป็นกรด จึงทำให้สามารถเคลื่อนย้ายได้ดี โดยสภาพการละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน แต่ถ้าดินอยู่ในสภาพที่เป็นด่าง แคดเมียมจะเคลื่อนย้ายได้น้อย นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการดูดซับแคดเมียมในดิน เช่น การดูดซับบนแร่แคลไซต์ (calcite) การแข่งขันกับไอออนของโลหะอื่น ๆ การเกิดสารเชิงซ้อนกับลิแกนด์ของสารอินทรีย์ และผลของคลอไรด์ไอออน (Alloway, 1995) โดยดินที่มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูง การแพร่กระจายของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อมจะต่ำ ทางตรงกันข้ามหากดินมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ต่ำ ทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปของสารละลายมาก โอกาสแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมมาก

พิชิตและคณะ (2543) ทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียมในดิน ที่เก็บจากท้องที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย ผลการศึกษาแสดงว่าความสามารถในการดูดซับ หรือความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (buffering capacity) ของแคดเมียมแตกต่างกันมากในดินแต่ละตัวอย่าง โดยความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของดินและปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับจะสูงขึ้นเมื่อดินมี pH, อินทรีย์วัตถุ และอนุภาคดินเหนียวมากขึ้น

ดังนั้นการศึกษาดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดินจะเป็นประโยชน์ต่อการประเมินความสามารถในการเคลื่อนย้ายและการแพร่กระจายของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม ซึ่งรูปแบบของการดูดซับจะบอกได้ถึงปริมาณของแคดเมียมไอออนที่ถูกดูดซับอยู่บนอนุภาคของดิน ณ จุดสมดุลกับปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมไอออนในสารละลายดิน การปลดปล่อย หมายถึง การละลายของแคดเมียมไอออนที่ถูกดูดซับ และการเกิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis) คือรูปแบบการดูดซับและการปลดปล่อยที่ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เช่น ปริมาณไอออนที่ถูกดูดซับที่สมดุลมากกว่าปริมาณไอออนที่ปลดปล่อยออกมา หรือ ความสัมพันธ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของความเข้มข้นของสารละลาย โดยเกิดจากหลายสาเหตุ การตกตะกอนทางเคมี การรวมตัวกันระหว่างไอออนที่ถูกดักจับในอนุภาคขนาดเล็กของดิน ซึ่งจะป็นวัฏจักรของการดูดซับและการปลดปล่อย

#### 1.4 การดูดใช้แคดเมียมของพืช

โดยทั่วไปพืชจะดูดใช้แคดเมียม ในรูปของ แคดเมียมไอออนอิสระ ( $Cd^{2+}$ ) ในสารละลายดิน จึงมีปัจจัยหลายประการที่สามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดใช้แคดเมียมของพืช

##### 1.4.1 ปัจจัยจากดินที่มีผลต่อการดูดใช้แคดเมียม

สมบัติของดินมีบทบาทสำคัญต่อการดูดใช้และสะสมแคดเมียมในพืช โดยทั่วไปดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ค่าความเค็มสูง มีปริมาณแคดเมียมในดินสูง ปริมาณสารอินทรีย์ในดินต่ำ ความจุแลกเปลี่ยนแคดไอออนต่ำ ปริมาณดินเหนียวในดินน้อย จะส่งผลทำให้พืชดูดใช้แคดเมียมได้ในปริมาณมากขึ้น

##### 1.4.2 ปัจจัยจากพืชที่มีผลต่อการดูดใช้แคดเมียม

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดใช้แคดเมียม ได้แก่ สายพันธุ์ ชนิดของพืช และ อายุของพืช โดยพืชที่มีความสามารถในการดูดใช้แคดเมียมได้ดี ได้แก่ ผักกินใบ

ผักกึนราก/หัว รัชูพืช และผลไม้ ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงวาเลนซ์อ็อกซิเดชันของสาร (speciation) ของแคดเมียมในเนื้อเยื่อของพืช เกิดจากแคดเมียมสามารถรวมตัวกับ cytoplasmic protein ซึ่งประกอบไปด้วย cysteine หรือที่เรียกว่า phytochelatins กล่าวคือ ปริมาณแคดเมียมในเนื้อเยื่อของพืชสามารถกระตุ้นการเกิด phytochelatins ซึ่งโปรตีนเหล่านี้สามารถพบได้ในข้าวสาลี ผักกาดขาว ถั่ว และในพืชชนิดอื่น ๆ เป็นต้น (Alloway, 1995)

สรตนา (2548) ศึกษาการดูดใช้แคดเมียมของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว พบว่าหญ้าแฝกและทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีการปนเปื้อน และไม่แสดงอาการเป็นพิษของธาตุโลหะหนัก ส่วนข้าวไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีการปนเปื้อนสูง 21 – 35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยจะแสดงอาการลำต้น และใบเป็นสีเหลืองในระยะแตกกอ ไม่สามารถให้ผลผลิตได้ เมื่อศึกษาการดูดใช้พบว่าข้าวสามารถดูดใช้มาสะสมในรากมากกว่าที่ลำต้นและใบ

### 1.5 ผลของแคดเมียมที่มีต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

พิษของแคดเมียมที่มีต่อพืช เมื่อรากพืชดูดใช้แคดเมียมเข้าไปจะมีผลทำให้รากพืชได้รับความเสียหาย เกิดใบเหลืองซีด โดยจะเริ่มแสดงอาการที่ใบอ่อน โดยเนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบมีสีเหลืองซีด ปลายใบม้วน ต้นแคระแกรน พิษของแคดเมียมในมนุษย์ แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง คือ ทางเดินอาหารและทางเดินหายใจ

Oehme (1978) รายงานว่าในประเทศญี่ปุ่น พบประชาชนเจ็บป่วยเนื่องจากแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน โดยแคดเมียมที่มีอยู่ในวัสดุเหลือทิ้งจากเหมืองแร่สังกะสีเข้ามาปนเปื้อนในนาข้าว เป็นผลให้ข้าวดูดใช้แคดเมียมและสะสมธาตุนี้ในเมล็ด ทำให้ประชาชนที่บริโภคข้าวที่ปลูกจากนาข้าวที่มีการปนเปื้อนเกิดอาการเจ็บป่วย ในปัจจุบันคณะกรรมการอาหารยุโรป (European Commission) มีการกำหนดปริมาณบริโภคสูงสุดต่อสัปดาห์ (tolerable weekly intake, TWI) เท่ากับ 2.5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว หรือ ปริมาณแคดเมียมที่ร่างกายได้รับสูงสุดต่อเดือน (provisional tolerable monthly intake, PTMI) เท่ากับ 25 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว ตามมาตรฐาน จากโครงการความร่วมมือระหว่าง FAO/WHO ทั้งนี้การบริโภคอาหารที่มีธาตุเหล็ก สังกะสี หรือแคลเซียม ในปริมาณน้อย จะทำให้การดูดซึมแคดเมียมในลำไส้สูงขึ้น (Fox *et al.*, 1984; European Food Safety Authority [EFSA], 2011)

โดยทั่วไปเมล็ดข้าวจะมีปริมาณธาตุเหล็ก สังกะสี และแคลเซียม ในปริมาณน้อย ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ และการขัดสีข้าวจะทำให้ปริมาณเหล็ก สังกะสี และแคลเซียม

ลดลงไปอีก จึงมีผลทำให้ลำไส้ดูดซึมแคลเซียมได้มากขึ้น (Pedersen and Eggum, 1983) ซึ่งตามปกติแคลเซียมที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ในระบบทางเดินอาหารประมาณร้อยละ 10 และสามารถถูกขับออกจากร่างกายได้ ส่วนที่เหลือจะมีการหมุนเวียนในกระแสเลือดและสะสมในอวัยวะต่าง ๆ เช่น ตับ ม้าม และไต การเกิดพิษของแคลเซียม มี 2 แบบ คือ

การเกิดพิษเฉียบพลัน เมื่อร่างกายได้รับแคลเซียมในปริมาณมาก ทำให้ร่างกายไม่สามารถขับออกได้ทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะสะสมอยู่ในอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกายโดยเฉพาะตับและไต มักพบในกรณีที่หายใจเอาไอของแคลเซียม เช่น ควันทอกไซด์ของแคลเซียม ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อปอดอย่างเฉียบพลันเกิดโรคปอดอักเสบ (pneumonitis) หรือปอดบวมน้ำ (pulmonary edema) ซึ่งเป็นอันตรายต่อปอดแบบเฉียบพลันภายในเวลา 2-4 ชั่วโมง อาการที่พบคือมีอาการเจ็บหน้าอก หายใจสั้น มีกลิ่นโลหะในปาก ไอมีเสมหะเป็นฟองหรือมีเสมหะเป็นเลือด อ่อนเพลีย ปวดเจ็บขา ต่อมาปัสสาวะจะน้อยลง เริ่มมีไข้ และมีอาการของปอดอักเสบ

การเกิดพิษแบบเรื้อรัง ในกรณีที่ได้รับแคลเซียมปริมาณน้อย ๆ ติดต่อกันเป็นเวลานาน จะเกิดอาการเป็นพิษแบบเรื้อรังของแคลเซียม ได้แก่ ภาวะเป็นพิษที่ไต (nephrotoxicity) แคลเซียมมีการสะสมอยู่ใน proximal tubules ของ cortex ในไต โดยแคลเซียมจะเกาะรวมกันอยู่กับโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (metal-binding protein) ได้แก่ metallothionein (MT) ทำให้อัตราการขับแคลเซียมออกจากร่างกายต่ำ แคลเซียมจึงสะสมอยู่ในร่างกายได้เป็นเวลานาน จากนั้นจะส่งผลต่อการกรองและการดูดซึมกลับของไต ทำให้โปรตีนโมเลกุลต่ำ เช่น  $\beta_2$ -microglobulin ( $U- \beta_2$ ) ถูกขับออกมากับปัสสาวะมากกว่าปกติ (Christofersson *et al.*, 1987)

ความเป็นพิษต่อกระดูก แคลเซียมจะเข้าไปสะสมในกระดูกแทนแคลเซียม จึงลดการสะสมของแคลเซียมที่กระดูกทำให้ประสิทธิภาพในการสร้างและซ่อมแซมกระดูกน้อยลง เอนไซม์ lysyl oxidase หดประสิทธิภาพ ทำให้ไม่มีการสะสม collagen ในกระดูก เป็นผลทำให้กระดูกผุ กร่อน เสียรูป และทำให้เจ็บปวดมาก เกิดโรคอิไต-อิไต (Itai-Itai) และโรคกระดูกพรุน (osteopenia)

## 1.6 เกณฑ์มาตรฐานแคลเซียมในดิน

ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของแคลเซียมในดินที่ยอมรับได้ (maximum permitted concentration) คือค่ากำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของแคลเซียมที่อนุญาตให้มีใน

ปริมาณสูงสุดทั้งในดินและวัสดุเพื่อปรับปรุงดินในการเกษตรรวมทั้งปริมาณที่สะสมหรือตกค้างที่พบในดินหลังการใช้วัสดุดังกล่าว ในแต่ละประเทศ จะมีค่ามาตรฐานแตกต่างกันตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้ในบางประเทศ

ประเทศ	ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของแคดเมียม ในดินที่ยอมรับได้ในบางประเทศ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
สหราชอาณาจักร	3
ไทย	37
สหภาพยุโรป	1 - 3
ฝรั่งเศส	2
ฟินแลนด์	0.5

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2547); Alloway (1995)

## 2. ข้าว (*Oryza sativa* L.)

ข้าว (*Oryza sativa* L. sub.indica) เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า จัดอยู่ในวงศ์ Graminea สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น จำนวนชนิดทั้งหมดที่พบในสกุล *Oryza* มีประมาณ 20 ชนิด โดยส่วนใหญ่มีโครโมโซมเป็น 2 ชุด (diploid,  $2n=24$ ) และส่วนที่มีโครโมโซม 4 ชุด (tetraploid,  $2n=48$ ) (บุญหงส์, 2547) ข้าวที่นิยมปลูกในเอเชียปัจจุบันแบ่งเป็น 3 สายพันธุ์ ได้แก่ อินдика เมล็ดยาวเรียวยาว ผลผลิตค่อนข้างต่ำ ตอบสนองต่อปุ๋ยน้อย แต่สามารถปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี จาปอนิกา เมล็ดป้อมสั้น ผลผลิตสูง ตอบสนองต่อปุ๋ยสูง และจาวานิกา เมล็ดค่อนข้างป้อมสั้น ผลผลิตต่ำ

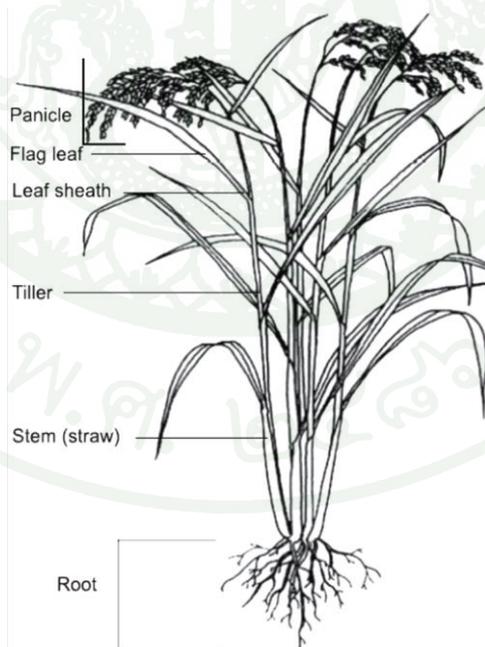
ต้นข้าวประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ได้แก่ รากข้าว เป็นระบบแบบรากฝอย (fibrous root system) รวมเป็นกระจุกไม่มีรากแก้ว รากรุ่นแรกจะงอกออกมาจากจุมูกข้าว และจะแก่ตายภายในเวลา 1 เดือน รากรุ่นที่สองจะงอกออกจากโคนต้นเมื่อต้นกล้าอายุได้ 2 สัปดาห์ นอกจากรากสองชนิดนี้แล้วยังมีรากพิเศษอีกชนิดหนึ่งที่เกิดตามข้อของต้นข้าว เรียกว่า รากแขนง หรือรากค้ำจุน (prop root) รากข้าวส่วนใหญ่จะอยู่ระดับผิวดิน และรากข้าวสามารถชอนไชยังลึกลงไปใผิวดิน

ได้ถึง 18 เซนติเมตร ลำต้นมีลักษณะเป็นปล้อง (internodes) ภายในกลวง แต่ละปล้องจะปิดหัวท้ายด้วยข้อ (node) โดยปกติต้นข้าวจะมีปล้องประมาณ 25 – 30 ปล้อง ลำต้นข้อที่ดีจะต้องหนาและเปลือกแข็ง ใบข้าวมีลักษณะเป็นแผ่นบาง แฉก และเรียวยาว จัดอยู่ในพวกใบเลี้ยงเดี่ยว เส้นใบเป็นระบบเส้นขนาน

พันธุ์ข้าวมีหลายพันธุ์ แบ่งแยกได้หลายประเภท เช่น แบ่งแยกตามการตอบสนองต่อแสง สำหรับการศึกษานี้ มุ่งศึกษาเฉพาะข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เพราะเป็นพันธุ์ข้าวที่มีการปลูกมากในพื้นที่เก็บตัวอย่าง

## 2.1 ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวเจ้าหอม ไวต่อช่วงแสง สูงประมาณ 140 เซนติเมตร ลำต้นมีลักษณะสีเขียวจาง ค่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง เมล็ดข้าวรูปร่างเรียวยาว ทนแล้ง ได้ดีพอสมควร ปลูกมากบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย เมล็ดข้าวสารใส คุณภาพในการสีได้ดี ทนต่อสภาพดินเปรี้ยว และดินเค็ม



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของต้นข้าว

ที่มา : Africarice (2009)

ปัจจุบันองค์การระหว่างประเทศต่าง ๆ กำหนดค่ามาตรฐานแคดเมียมสูงสุดในเมล็ดข้าว เท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึง 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งการกำหนดมาตรฐานรวม เฉพาะข้าวกล้องและข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้วเท่านั้น (Codex Committee on Food Additives and Contaminants [CCFAC], 2005)

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen (1992) ศึกษาการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในเมล็ดและรากของข้าวจาก ประเทศญี่ปุ่นที่มีการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักมากขึ้นแตกต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นสูงสุดของสารหนู ทองแดง โปรท ตะกั่ว และสังกะสี ในเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับ 0.2, 6.0, 5.2, 0.26, 1.0 และ 60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และความเข้มข้นสูงสุดของสารหนู แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในรากข้าวเท่ากับ 1,182, 97, 560 และ 4,510 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของธาตุโลหะหนักในข้าวขึ้นอยู่กับปริมาณการปนเปื้อนของแหล่งการปนเปื้อน

รุจ (2552) ประเมินปริมาณสังกะสีและแคดเมียมในดินที่ใช้ปลูกข้าว ในอำเภอเขาชัย จังหวัดเพชรบุรี พบว่าปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำมาก ปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินคือ 0.005 – 0.071 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณสังกะสีและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณสังกะสีและปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว

พิชิต และคณะ (2546) ศึกษาเมล็ดข้าว 80 ตัวอย่าง จากพื้นที่ความเข้มข้นของสังกะสีและแคดเมียมในดินสูง โดยความเข้มข้นของสังกะสีในดินสูงถึง 254 – 8037 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และผลการวิเคราะห์พบว่าเมล็ดข้าวกล้องมีความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ในช่วง 16.45 – 25.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีค่าเฉลี่ย 20.36 มิลลิกรัมต่อ ความเข้มข้นของสังกะสีในใบ และลำต้นข้าวอยู่ในช่วง 20.84 – 213.6 และ 64.14 – 309.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสังกะสีในดิน ความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน อยู่ในช่วง 3.77 – 284.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวกล้อง ในช่วง 0.05 – 4.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน นอกจากนี้ความเข้มข้นของแคดเมียมในใบและลำต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับแคดเมียมในดิน ผลการวิจัยบ่งชี้ว่า ข้าวที่ปลูกในดินที่มีความเข้มข้นของสังกะสี และแคดเมียมสูงสามารถควบคุมความเข้มข้นของสังกะสีในเมล็ดให้อยู่ในระดับปกติ ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับกระบวนการเมตาบอลิซึม และความต้องการธาตุอาหารของเมล็ด อย่างไรก็ตาม

ข้าวไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่และการสะสมแคดเมียมในเมล็ดได้ เป็นผลให้ในเมล็ดข้าว มีอัตราส่วน สังกะสีต่อแคดเมียม (Zn: Cd) ต่ำ

Simmons *et al.* (2005) แบ่งการศึกษาออกเป็นสองระยะ ระยะแรกในปี พ.ศ. 2541-2543 ศึกษาแปลงนาบริเวณ ต. พะเต๊ะ ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณแหล่งแร่สังกะสีจากการตรวจดินในนาข้าว 154 แปลง พบการปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน อยู่ในช่วง 3.4-284 มิลลิกรัมแคดเมียม/กิโลกรัมดิน สำหรับความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่สีแล้วจากข้าวในทีนา 9 แปลง พบว่าร้อยละ 95 ของเมล็ดข้าวที่สุ่มตัวอย่างมีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในช่วง 0.1 - 4.4 มิลลิกรัมแคดเมียม/กิโลกรัม มีปริมาณมากกว่าค่าที่พบในข้าวที่ปลูกในประเทศไทยบริเวณอื่นสูงสุดถึง 100 เท่า ระยะที่สองในปี พ.ศ. 2544-2546 ได้ขยายพื้นที่ศึกษาจากช่วงแรกมาตามลำห้วยแม่ดาว ในบริเวณ ต.แม่ดาว ซึ่งเป็นบริเวณที่ขุดน้ำจากบริเวณแรก และพบว่าความเข้มข้นแคดเมียมในดินอยู่ในช่วง 0.5 - 218.2 มิลลิกรัมแคดเมียม/กิโลกรัมดิน ซึ่งมีปริมาณสูงเกินกว่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป ซึ่งกำหนดไว้ 3 มิลลิกรัมแคดเมียม/กิโลกรัมดิน สำหรับความเข้มข้นของแคดเมียมจากตัวอย่างข้าวในนาข้าว 432 แปลง พบในช่วงน้อยกว่า 0.05-7.7 มิลลิกรัมแคดเมียม/กิโลกรัมข้าว ซึ่งประเมินได้ว่าร้อยละ 80 ของตัวอย่างข้าวมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของญี่ปุ่น และองค์การอาหารและเกษตร โดยนาข้าวที่อยู่ติดคลองชลประทาน มีการปนเปื้อนของแคดเมียมมากที่สุด และลดลงตามระยะทางที่ห่างออกไป

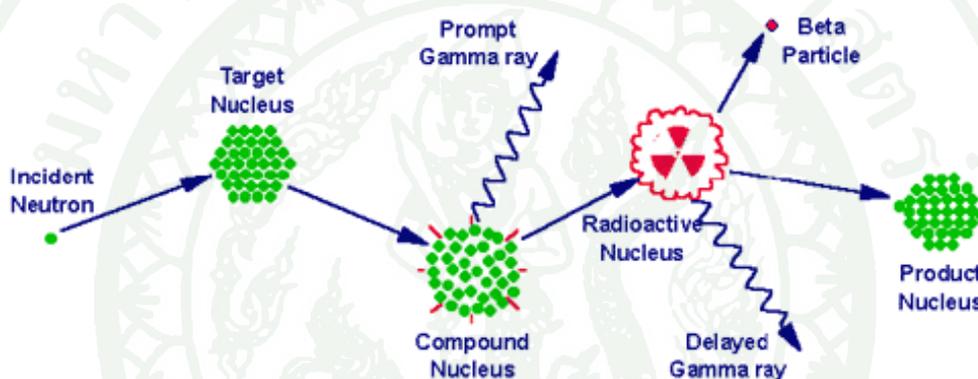
ซึ่งทั้งหมดนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Promsawad *et al.* (2008) ที่รายงานการปนเปื้อนของแคดเมียมในเมล็ดข้าว จากบริเวณห้วยแม่ดาว จังหวัดตาก เท่ากับ 7.4 - 343.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ข้าวที่ปลูกจากพื้นที่อื่นของประเทศไทยมีค่าการปนเปื้อนเท่ากับ 6.5-16 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

### 3. ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ธาตุโลหะหนักด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงนิวเคลียสของธาตุที่เสถียรในตัวอย่าง ให้มีคุณสมบัติเป็น ธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive isotopes) โดยการยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติของกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) ที่เป็นสมบัติเฉพาะของธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งจะสลายตัวกลับไปเป็นไอโซโทปเสถียรให้รังสีที่มีพลังงานและมีค่าครึ่งชีวิต (half-life) เฉพาะของธาตุนั้นๆ ทำให้สามารถทราบได้ว่าเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุใด และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานของธาตุนั้นๆ ทำให้สามารถคำนวณปริมาณของธาตุในตัวอย่างได้ ถูกค้นพบโดย Hevesy และ Levi ในปี ค.ศ. 1936 หลังจากยิงอนุภาคนิวตรอนในสารผสมของธาตุหายาก

### 3.1 ปฏิกริยาของนิวตรอนต่อนิวเคลียส

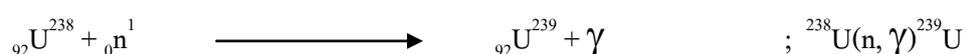
เมื่อยังอนุภาคของนิวตรอนเข้าไปภายในนิวเคลียสของธาตุแล้ว จำนวนอะตอมของไอโซโทปรังสีที่เกิด (ภาพที่ 2) จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ จำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้นด้วยนิวตรอน ปริมาณนิวตรอนที่กระตุ้น ค่า cross section และเวลาที่ใช้ในการยิงอนุภาคนิวตรอน ดังนั้นปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจึงมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคนิวตรอนที่ชนกับนิวเคลียสของธาตุ ดังนั้นถ้านิวเคลียสถูกกระตุ้นด้วยนิวตรอนที่มีพลังงานไม่เท่ากัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มากกว่า 1 ชนิด ซึ่งปฏิกริยาของนิวตรอนต่อนิวเคลียส ได้แก่



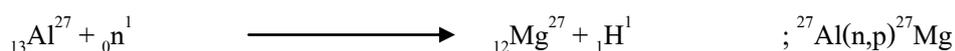
ภาพที่ 2 ทฤษฎีการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

ที่มา: Glascock (n.d.)

1. ปฏิกริยาของนิวตรอน – แกมมา ( $n, \gamma$ ) เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุแล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุเดิมพร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา ตัวอย่างเช่น



2. ปฏิกริยาของนิวตรอน – โปรตรอน (n,p) เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ อะตอมของธาตุนั้นจะเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุใหม่พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคโปรตรอนออกมา เช่น



3. ปฏิกิริยาของนิวตรอน – แอลฟา (n, α) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ อะตอมของธาตุนั้นจะเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุใหม่พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา เช่น



ซึ่งปฏิกิริยาของนิวตรอน – แกมมา (n, γ) จะเหมาะสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน เพราะทำได้สะดวก ส่วนปฏิกิริยานิวตรอน – โปรตรอน (n,p) และปฏิกิริยานิวตรอน – แอลฟา (n, α) จะนิยมใช้ในการผลิตสารไอโซโทป เนื่องจากสารไอโซโทปที่เกิดขึ้นเป็นของธาตุใหม่ ซึ่งเป็นคนละชนิดกับธาตุเดิม ทำให้สะดวกในการแยกสารไอโซโทปนั้นออกมาอย่างบริสุทธิ์

### 3.2 สมการของการเกิดและการสลายตัวของกัมมันตรังสี

การกระตุ้นด้วยนิวตรอน เกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสของธาตุเสถียรถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน ทำให้มีบางส่วนของอะตอมเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารไอโซโทปกัมมันตรังสี ซึ่งอัตราการเกิดสารไอโซโทปจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณนิวตรอนที่มาทำปฏิกิริยา (neutron flux, φ) และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวน นิวคลีโอ ซึ่งจำนวนนิวคลีโอ จะคำนวณจากเลขอาโวกาโดร (avogadro's number,  $A_n$ ) ซึ่งแสดงจำนวนอะตอมทั้งหมด ดังนั้นเมื่อหารด้วยน้ำหนักอะตอม (a) คูณน้ำหนักของธาตุ (w) จะได้จำนวนอะตอมทั้งหมดต่อกรัม นอกจากนี้ธาตุส่วนใหญ่ที่พบในธรรมชาติจะมีไอโซโทปมากกว่า 1 ไอโซโทป ดังนั้นความอุดมสมบูรณ์ของไอโซโทป (isotopic abundance, θ) จึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องพิจารณา สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ ดังสมการ

$$\text{อัตราการกระตุ้น } \alpha \text{ neutron flux } (\phi) \quad (1)$$

$$\text{อัตราการกระตุ้น } \alpha \text{ nuclei } (N) \quad (2)$$

$$\text{nuclei } (N) = \frac{w\theta A_n}{a} \quad (3)$$

ความสัมพันธ์ของอัตราการกระตุ้นกับ neutron flux และจำนวนนิวคลีไอ ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในเทอมของ ภาคตัดขวาง (neutron cross-section,  $\sigma$ ) ดังสมการ

$$\text{อัตราการกระตุ้น} = \phi \sigma N \quad (4)$$

แทนค่า N จากสมการ (3) ในสมการ (4) จะได้

$$\text{อัตราการกระตุ้น} = \frac{\phi \sigma w \theta A_n}{a} \quad (5)$$

อัตราการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารไอโซโทปกัมมันตรังสี จะมีการสลายตัวด้วยอัตราการสลายตัวค่าหนึ่งซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะ เรียกว่า ค่าครึ่งชีวิต (half-life,  $t_{1/2}$ ) ซึ่งหมายถึง ระยะเวลาที่สารกัมมันตรังสีสลายตัวแล้วเหลือเพียงปริมาณครึ่งหนึ่งจากเดิม หาได้จากสมการ

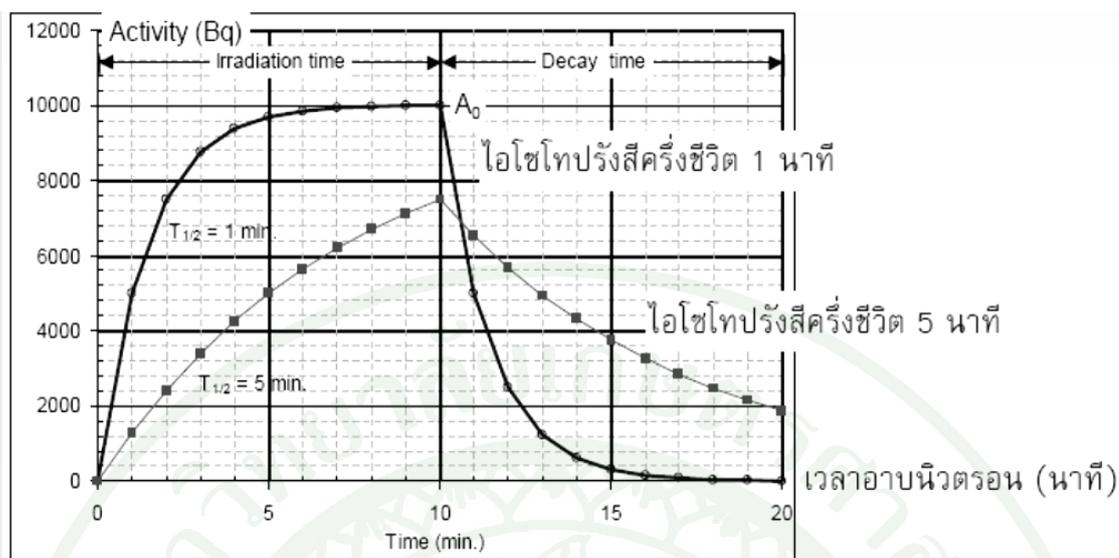
$$t_{1/2} = 0.693 / \lambda \quad (6)$$

จากสมการอัตราการกระตุ้นและสมการอัตราการสลายตัวดังกล่าว สามารถอธิบายอัตราการเกิดของสารกัมมันตรังสี ( $A_0$ ) ได้ดังสมการ

$$\text{อัตราการเกิดกัมมันตภาพรังสี} = \text{อัตราการกระตุ้น} - \text{อัตราการสลายตัว} \quad (7)$$

$$A_0 = \frac{\phi \sigma w \theta A_n}{a} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (8)$$

เมื่อ	$A_0$	= activity หรือ กัมมันตภาพของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นหน่วยเป็น Bq
	$\phi$	= neutron flux หน่วยเป็น $n/cm^2 \cdot s$
	$\sigma$	= neutron cross-section หน่วยเป็น barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ )
	$\lambda$	= ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)
	$\theta$	= สัดส่วนของธาตุที่มีอยู่ตามธรรมชาติของธาตุ (% abundance)
	w	= น้ำหนักของธาตุ
	$A_n$	= เลขอาโวกาโดร
	a	= น้ำหนักอะตอม



ภาพที่ 3 กัมมันตรังสีที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยนิวตรอนและลดลงจากการทิ้งให้สลายตัว

ที่มา: สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (ม.ป.ป.)

กัมมันตรังสีที่จะได้จากการกระตุ้นด้วยนิวตรอนขึ้นอยู่กับ saturation factor  $(1 - e^{-\lambda t})$  หรือ  $t/t_{1/2}$  ซึ่งจะต้องใช้เวลานานพอดีให้ได้กัมมันตรังสีพอจะวัดได้อย่างถูกต้อง

จากภาพที่ 3 เมื่อพิจารณาจากภาพด้านซ้าย จะเห็นว่า specific activity จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด ซึ่งค่ากัมมันตรังสีสูงสุดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเราใช้เวลาในการกระตุ้นด้วยนิวตรอนมากกว่า 10 เท่า ของค่าครึ่งชีวิต แสดงว่าถ้าใช้เวลาในการกระตุ้นด้วยนิวตรอนมากเกินไป กัมมันตรังสีก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก ทำให้เสียเวลาและอาจทำให้เกิดการแทรกสอด เพราะธาตุที่มีครึ่งชีวิตยาว ก็จะเกิดกัมมันตรังสีด้วย ส่วนทางด้านขวาของภาพ แสดงถึงการสลายตัวของไอโซโทปครึ่งชีวิตสั้นในช่วงเวลาเมื่อหยุดการกระตุ้นด้วยนิวตรอน โดยไอโซโทปครึ่งชีวิตสั้นจะมี กัมมันตรังสีเพิ่มเร็วกว่า และสลายตัวลดลงเร็วกว่าไอโซโทปครึ่งชีวิตยาว

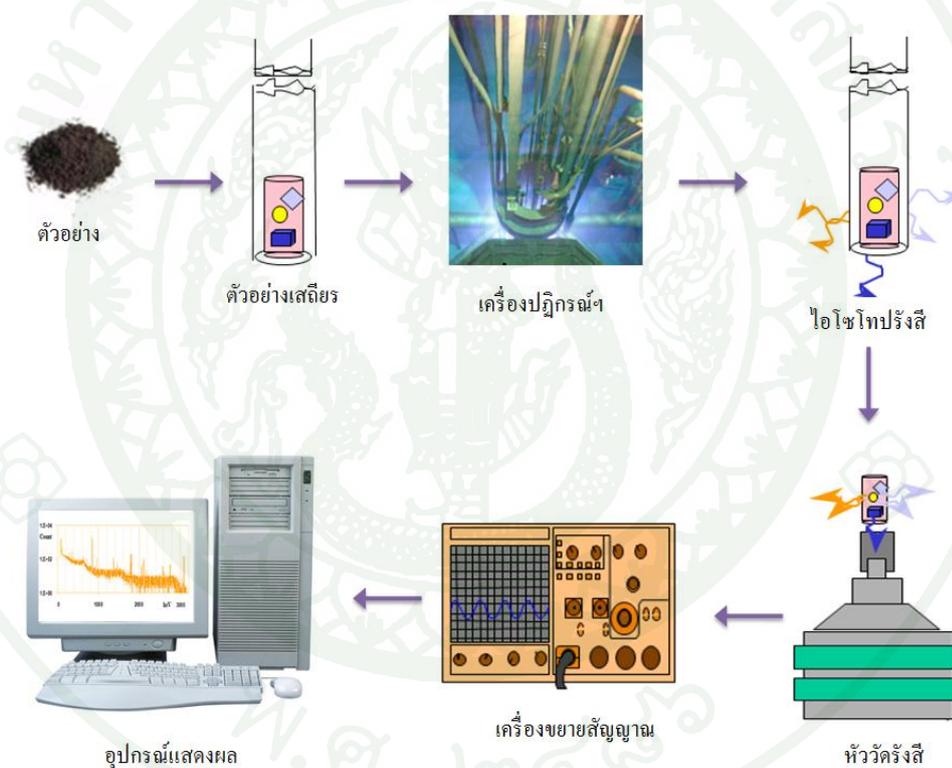
เนื่องจากการวัดตัวอย่างสารกัมมันตรังสีไม่สามารถวัดพร้อมกันได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้น ที่เวลาใดๆ สารกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น ค่ากัมมันตรังสีจะลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณกลับเพื่อให้เป็นค่ากัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น ดังสมการ

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (9)$$

เมื่อ	$A_t$	= activity หรือกัมมันตภาพองไอโซโทปรั้งสีที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ
	$A_0$	= activity หรือกัมมันตภาพองไอโซโทปรั้งสีที่เกิดขึ้น ณ เวลาเริ่มต้น
	$\lambda$	= ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)
	t	= เวลา ณ เวลาใดๆ

### 3.3 องค์ประกอบในการวิเคราะห์เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

องค์ประกอบและขั้นตอนสำหรับการวิเคราะห์เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนสามารถแสดงดังภาพที่ 4



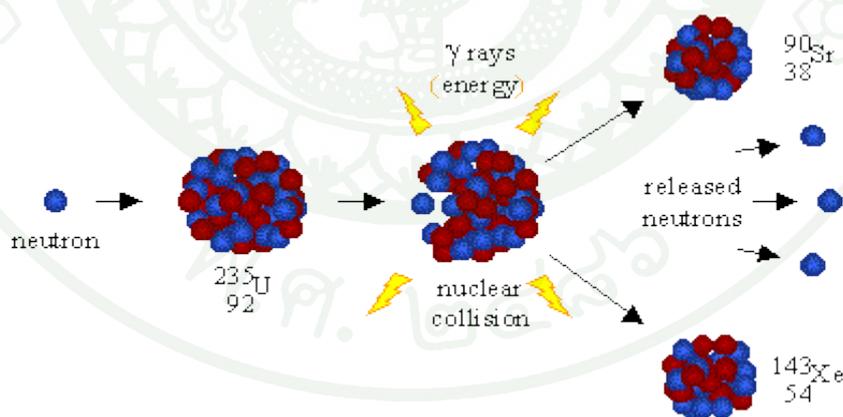
ภาพที่ 4 องค์ประกอบในการวิเคราะห์เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างและการเตรียมสารมาตรฐาน

การเตรียมตัวอย่างและสารมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนนั้น มีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยตัวอย่างและสารมาตรฐานควรจะต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกัน ความเข้มข้นของธาตุเป้าหมายใกล้เคียงกัน และเนื่องจากเทคนิคนี้มีความไวต่อการวิเคราะห์สูงการเตรียมตัวอย่างจึงต้องระมัดระวังและป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อน สำหรับปริมาณของสารตัวอย่างจะต้องมีปริมาณที่ไม่มากและไม่น้อยเกินไป สำหรับภาชนะที่ใช้ในการบรรจุสารตัวอย่างและสารมาตรฐานสำหรับการกระตุ้นด้วยนิวตรอนจะต้องทนต่อความร้อนและความดันได้พอสมควร และต้องสะอาด เช่น พลาสติกโพลีเอทิลีน ในกรณีที่กระตุ้นด้วยนิวตรอนเป็นระยะเวลานาน ควรหุ้มด้วยกระดาษอะลูมิเนียม เพื่อป้องกันการละลายติดกันของพลาสติกที่อุณหภูมิสูง

### 3.3.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอน

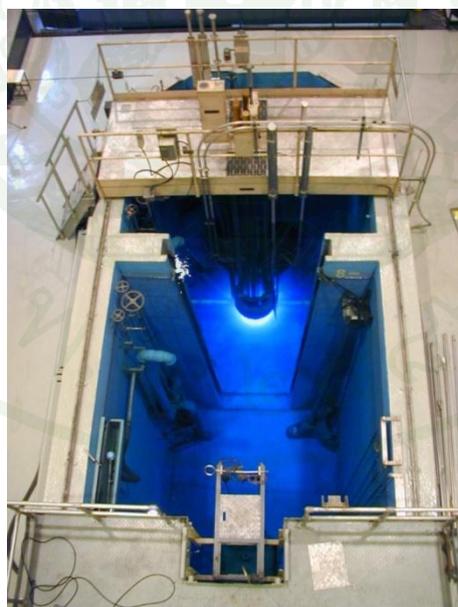
แหล่งกำเนิดนิวตรอนมีหลายประเภทแต่ที่นิยมมากในการวิเคราะห์สำหรับเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนนั้น ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูซึ่งเป็นแหล่งผลิตนิวตรอน ที่อาศัยกระบวนการฟิชชัน ของ U-235 ดังแสดงในภาพที่ 5



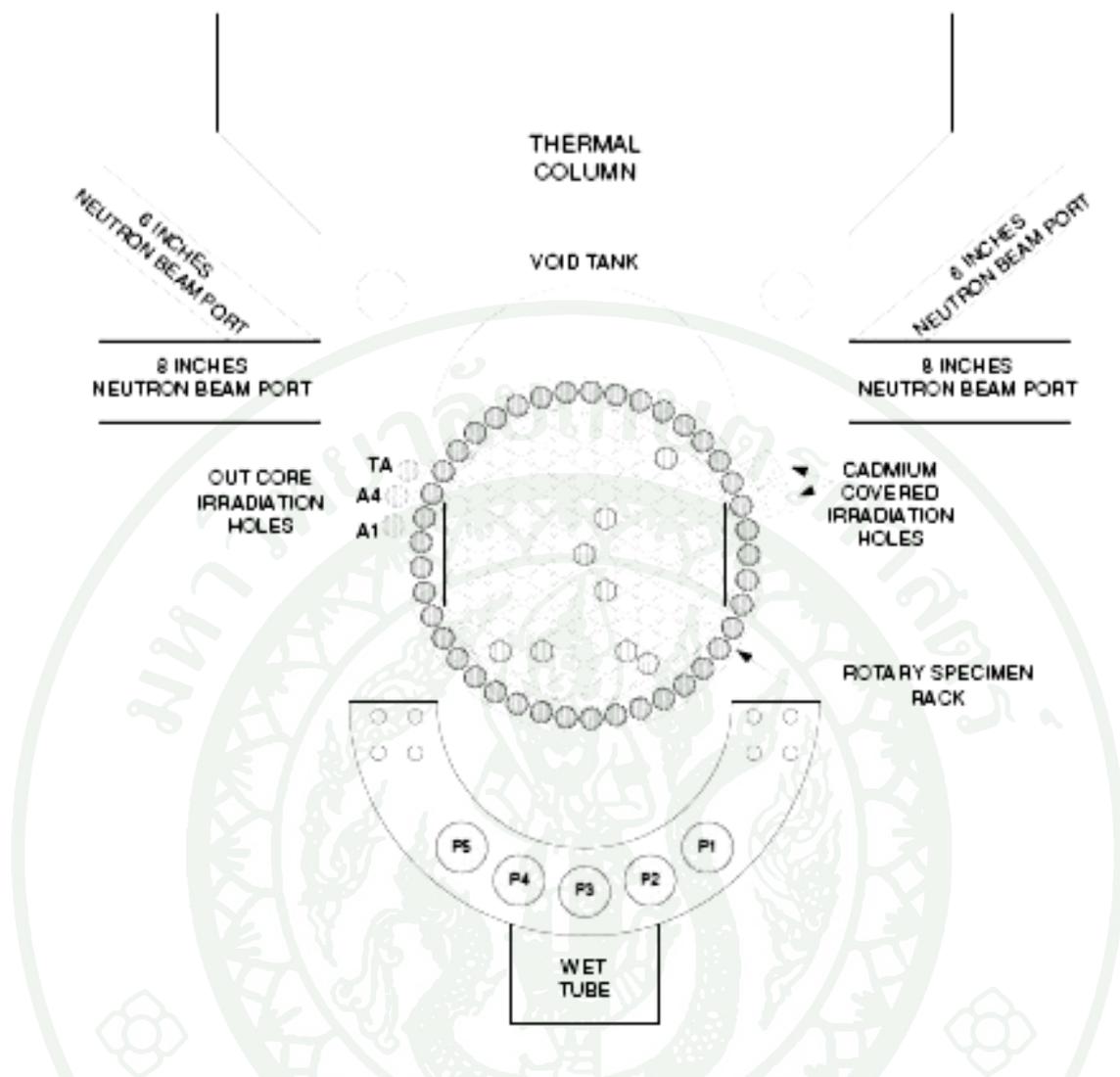
ภาพที่ 5 กระบวนการฟิชชันของ U-235

ที่มา: Carpi (2011)

กล่าวคือ  $^{235}_{92}\text{U}$  เมื่อมีการจับกับนิวตรอนแล้ว นิวเคลียสจะแตกตัวให้ นิวตรอน และพลังงานเป็นจำนวนมาก โดยอนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้นก็จะมีพลังงานแตกต่างกัน ตั้งแต่ 0-10 MeV ซึ่งสามารถจำแนกอนุภาคนิวตรอนได้ 3 ชนิด คือ นิวตรอนพลังงานต่ำ (thermal neutron component) เป็นอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 0.5 eV สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับธาตุที่จะวิเคราะห์ได้เกือบทุกชนิด ปฏิกิริยาของนิวตรอนต่อนิวเคลียส ได้แก่ ปฏิกิริยาของนิวตรอน – แกมมา ( $n, \gamma$ ) นิวตรอนพลังงานต่ำปานกลาง (epithermal neutron component) เป็นอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 0.5 eV – 0.5 MeV และ นิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron component) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 0.1 MeV จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาฟิชชันจะได้นิวตรอนเพิ่มขึ้น 2- 3 ตัว ต่อการชน 1 ครั้ง และนิวตรอนเหล่านี้จะถูกลดความเร็วลงด้วยตัวหน่วงนิวตรอน เช่น น้ำ สำหรับการควบคุมอัตราการผลิตนิวตรอนจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าแท่งควบคุม (control rods) ซึ่งทำมาจากวัสดุที่ดูดนิวตรอนได้ เช่น แคดเมียมหรือ โบรอน ดังนั้นในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์หากต้องการเริ่มทำงานก็จะนำแท่งควบคุมขึ้นจากท่อและเมื่อต้องการหยุดการทำงานก็จะหย่อนแท่งควบคุมลง โดยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในประเทศไทย ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่1 (ปปว.-1/1) ซึ่งแกนเครื่องเป็นแบบ TRIGA Mark-III ของบริษัท General Atomics (GA)



ภาพที่ 6 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่1 (ปปว.-1/1)



ภาพที่ 7 รูปจำลองแสดงตำแหน่งอุปกรณ์ภายนอกแกนปัจจุบันของเครื่องปว.-1/1

ที่มา: สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) (ม.ป.ป.)

### 3.3.3 การวัดปริมาณรังสี

การวัดรังสีแกมมาสามารถศึกษาจากกระบวนการที่รังสีแกมมาทำปฏิกิริยากับสสารที่จะทำการตรวจวัด มีปฏิกิริยาสำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric) ปฏิกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (compton) และแฟร์ โพรดักชัน (pair production) ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมสำหรับหัววัดรังสีแกมมาจะต้องมีคุณสมบัติ คือสามารถตอบสนองต่อการผลิตอิเล็กตรอนเมื่อทำปฏิกิริยากับรังสีแกมมาแล้วต้องสามารถตรวจวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นได้ โดยในการวัดกัมมันตภาพจำเป็นจะต้องเลือกหัววัดให้ถูกต้อง คำนึงถึงประสิทธิภาพในการแยกพลังงานของธาตุต่างๆ ด้วยหัววัด

รังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นหัววัดที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น lithium drifted silicon detector (Si(Li)) ซึ่งเหมาะกับการใช้ในการตรวจวัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำ และอีกแบบหนึ่งได้แก่ lithium drifted germanium detector (Ge(Li)) ซึ่งเหมาะกับการใช้วัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงๆ เพราะว่า germanium มีเลขอะตอมสูงทำให้สามารถจับรังสีแกมมาได้ดีกว่า silicon มี 2 แบบ คือ

1. แบบธรรมดา (lithium drifted germanium detector, Ge(Li)) โดยหัววัดชนิดนี้การทำงานและการเก็บรักษาจำเป็นต้องแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวตลอดเวลา
2. แบบไฮเปอร์เพียว HpGe ซึ่งสามารถเก็บที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อเวลาใช้งานต้องนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว หัววัดชนิดนี้ใช้ผลึก germanium ที่มีความบริสุทธิ์สูง

#### 3.3.4 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน สามารถบอกผลเชิงคุณภาพได้โดยอาศัยคุณสมบัติเฉพาะของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น เช่น พลังงานของรังสีที่ธาตุนั้น ๆ สลายตัว เมื่อวัดสารตัวอย่างผ่านหัววัดรังสี ผ่านเครื่องขยายสัญญาณ แปลผลด้วยเครื่องแกรมมาสเปกโตรมิเตอร์จะได้แกมมาสเปกตรัมซึ่งแต่ละพีค (peak) ที่เกิดขึ้นสามารถบอกค่าพลังงานได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ได้กับค่าพลังงานจาก chart of the nuclide ซึ่งตัวอย่างค่าพลังงานของธาตุบางชนิดจาก chart of the nuclide แสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พลังงานและค่าครึ่งชีวิตของธาตุบางชนิดภายหลังจากกระตุ้นด้วยนิวตรอน

Element	Product	Half-life	Gamma-ray Energy; kev (% intensity)
U	Np-239	2.355 days	277.6 (14.1) ; 228.18 (10.7)
As	As-76	1.097 days	559.10 (45.0)
Sb	Sb-122	2.7 days	564.37 (70)
W	W-187	23.9 hours	685.74 (26.4) ; 479.53 (21.0)
Mn	Mn-56	2.578 hours	846.81 (98.9) ; 1810.77 (27.2)
Na	Na-24	14.9 hours	1368.6 (100) ; 2753.99 (99.9)
K	K-42	12.36 hours	1524.58 (18.7)
La	La-140	1.678 days	1596.54 (95.3)
Br	Br-82	1.4708 days	776.5 (83.2) ; 554.3 (70.4)
Se	Se-75	119.77 days	264.66 (59.1) ; 136.0 (59.0)
Cr	Cr-51	27.704 days	320.08 (9.83)
Hf	Hf-151	42.39 days	482.0 (80.6) ; 345.83 (15.0)
Cs	Cs-134	2.062 years	795.87 (85.3) ; 604.71 (97.5)
K	K-42	12.36 hours	1524.58 (18.7)
Sc	Sc-46	83.83 days	889.25 (100) ; 1120.51 (100)
Fe	Sc-46	44.496 days	1099.25 (56.5) ; 1291.6 (43.2)
Co	Co-60	5.271 years	1173.24 (99.9) ; 1332.50 (100)
Rb	Rb-86	18.66 days	1076.69 (8.8)
Zn	Zn-65	244.1 days	1115.52 (50.8) ; 511.0 (2.91)
Cd	Cd-115	2.228 days	527.91 (27.5)

ที่มา : Walker et al. (1988)

### 3.3.5 การวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณ

การวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบกัน โดย  
ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน จะต้องมียุคประกอบเหมือนกันหรือคล้ายคลึงกันที่สุดทั้งทาง

กายภาพและทางเคมี และทำให้อยู่ในสภาวะเดียวกัน เช่น neutron flux เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยนิวตรอน เวลาที่ปล่อยให้สลายตัว และเวลาที่ใช้นับรังสี จากสมการ (8) แสดงการคำนวณได้ดังนี้

กัมมันตรังสีของสารมาตรฐาน

$$A_{\text{std}} = \phi \sigma w_{\text{std}} \theta (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (10)$$

กัมมันตรังสีของสารตัวอย่าง

$$A_{\text{sample}} = \phi \sigma w_{\text{sample}} \theta (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (11)$$

(10)/(11)

$$\frac{A_{\text{std}}}{A_{\text{sample}}} = \frac{w_{\text{std}}}{w_{\text{sample}}} \quad (12)$$

จากสมการ

$$A = \frac{\text{Peak Area}}{\text{Efficiency}} \quad (13)$$

เมื่อแทนค่ากัมมันตภาพ จะได้สมการ

$$w_{\text{sample}} = w_{\text{std}} \times \frac{\text{Peak}_{\text{sample}}}{\text{Peak}_{\text{std}}} \quad (14)$$

เมื่อ

$w_{\text{sample}}$  = ปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

$w_{\text{std}}$  = ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน

$\text{Peak}_{\text{sample}}$  = ค่าโฟโตพีค (photo peak) การนับรังสีของสารตัวอย่าง

$\text{Peak}_{\text{std}}$  = ค่าโฟโตพีค (photo peak) การนับรังสีของสารมาตรฐาน

### 3.4 ข้อดีของเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

เทคนิคของการวิเคราะห์การกระตุ้นด้วยนิวตรอน มี 2 แบบ คือ

1. การวิเคราะห์ด้วยการกระตุ้นด้วยนิวตรอน โดยใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสี (instrumental Neutron Activation, INAA) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานเข้ากระตุ้นด้วยนิวตรอนพร้อมกันแล้ววัดความแรงรังสีแกมมาของไอโซโทปรังสีของธาตุที่ต้องการปริมาณ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีก่อนหรือหลังการกระตุ้นด้วยนิวตรอน การวัดปริมาณจำเป็นต้องใช้เครื่องมือนับรังสีที่สามารถแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาตามขนาดพลังงาน
2. การวิเคราะห์ด้วยการกระตุ้นนิวตรอน โดยผ่านกรรมวิธีกระบวนการทางเคมี (radiochemical Neutron Activation, RNAA) เป็นการวิเคราะห์ที่ต้องนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อแยกชนิดของธาตุที่ต้องการออกมาก่อน หรือหลังจากกระตุ้นด้วยนิวตรอน แล้วจึงวัดความแรงของรังสีเทียบกับสารมาตรฐาน กรรมวิธีทางเคมีที่อาจนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การกลั่น การสกัด การตกตะกอน การทำลาย และการแลกเปลี่ยนไอออน

เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนมีข้อดี คือ เป็นเทคนิคที่มีของควมไวของการวิเคราะห์สูง (sensivity) หมายถึง ความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุหนึ่งได้ต่ำสุดเท่าใด ภายใต้สภาวะที่กำหนด ความไวของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับฟลักซ์นิวตรอน ( $\Phi$ ) ค่า cross section ( $\sigma$ ) สัดส่วนการมีอยู่ตามธรรมชาติของไอโซโทปเสถียร ถ้าสิ่งเหล่านี้มีค่ามากจะทำให้การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย ๆ ได้

ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธีทางเคมีธรรมดา ทั้งนี้เพราะเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนจะคำนึงถึงเฉพาะปริมาณรังสีที่จะเกิดขึ้น แม้ว่าจำเป็นต้องอาศัยกรรมวิธีทางเคมีเข้าช่วยก็ยังสามารถเติมไอโซโทปที่เสถียรของธาตุนั้น เป็นตัวพาเพื่อป้องกันการสูญหายของไอโซโทปรังสีของธาตุที่จะวิเคราะห์ได้ ทำให้สามารถปฏิบัติงานได้เหมือนวิธีวิเคราะห์ทางเคมีธรรมดา เนื่องจากมีธาตุนั้นมากพอ

ในการวิเคราะห์แบบ INAA สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยไม่สูญเสียตัวอย่าง รวมทั้งรูปและลักษณะ รวมทั้งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ใช้กับตัวอย่างที่เป็น

ของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ในกรณีที่ช่วงเวลาที่สั้น ๆ ผลการวิเคราะห์ให้ความถูกต้องสูง สามารถใช้เป็นวิธีการเพื่อเปรียบเทียบและอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น

### 3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tsukada *et al.* (2005) ศึกษาเปรียบเทียบ การวิเคราะห์ธาตุหลักและธาตุปริมาณน้อย ด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน (NAA) และเทคนิค ICP-MS ในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม และสรุปว่า ปริมาณความเข้มข้นของธาตุปริมาณน้อยและธาตุหลักในทั้งสองวิธี อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณ Zr ในตัวอย่างดิน ที่วัดด้วยเทคนิค ICP-MS ต่ำกว่าการวัดด้วยเทคนิค NAA นอกจากนี้ ที่ความเข้มข้นของ Cd ต่ำ ให้ค่าการเชื่อมแน่นจะต่ำกว่าการวัดด้วย เทคนิค ICP-MS

Avino *et al.* (2008) ศึกษาปริมาณ โลหะหนักจากฝุ่นในบรรยากาศ โดยในเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณจากกระดาษกรอง พบว่าธาตุที่วิเคราะห์ได้มีขีดจำกัดของวิธีวิเคราะห์ต่ำ สามารถวิเคราะห์โลหะหนักในฝุ่นขนาด PM10 ซึ่งมีปริมาณน้อยได้ดี

Kulkani *et al.* (2006) ศึกษาปริมาณธาตุ ในรากและเนื้อเยื่อของข้าวสาลีด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน SRM1573a จาก NIST และ CTA-vtl-2 Virginia tobacco leaves จาก ICHTJ พบว่าธาตุ K, Na, Ca และ Mg จะเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาในการเจริญเติบโต ส่วนธาตุ Zn, Mn และ Fe จะคงที่

Mohammed and Spyrou (2009) ศึกษาธาตุปริมาณน้อยในเมล็ดข้าว ที่ปลูกจาก 2 แห่งในประเทศแทนซาเนีย เปรียบเทียบกับตัวอย่างข้าวที่นำเข้าจากประเทศไทย ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยนิวตรอน สำหรับการวิเคราะห์ Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, V, Mn, Cu และ Br พบว่าปริมาณ Mg, Cl, K และ Ca พบว่าปริมาณธาตุจาก เมือง Morogoro มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของ Mg สูงกว่า เมือง Mbeya แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และทำการเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุที่นำเข้าจากประเทศไทย พบว่า ข้าวในปลูกในประเทศแทนซาเนีย มีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่าข้าวที่นำเข้าจากประเทศไทย

Vivek and Garg (2006) ศึกษาปริมาณธาตุในธัญพืช ผัก และเครื่องเทศ โดยใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน ผลการศึกษา พบว่าเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนสามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุได้ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ ธาตุที่มีปริมาณน้อย (Na, K, P และ Cl) และธาตุที่มีปริมาณ

น้อยมาก (Br, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Th และ Zn) ในรัญพีซ 6 ชนิด ผัก 9 ชนิด และ เครื่องเทศ 20 ชนิด

#### 4. ข้อมูลพื้นที่ศึกษา

พื้นที่นาข้าวสำหรับการศึกษาค้างนี้ เป็นพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ตั้งอยู่ที่ตำบลพระธาตุ อำเภอมะสออด จังหวัดตาก ระหว่างเส้นละติจูดที่ 16 องศา 40 ลิปดา 22.4 พิลิปดา เหนือ และเส้นลองจิจูดที่ 98 องศา 37 ลิปดา 31.53 พิลิปดา ตะวันออก พื้นที่นาข้าวดังกล่าว ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำห้วยแม่ดาว อาศัยน้ำจากห้วยแม่ดาวมาใช้สำหรับการทำนาเพียงแหล่งเดียวเนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวตั้งอยู่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน จึงทำให้สามารถทำนาได้ปีละครั้ง



ภาพที่ 8 ลักษณะพื้นที่นาข้าวสำหรับการเก็บตัวอย่างในการศึกษาค้างนี้

##### 4.1 ห้วยแม่ดาว

ต้นกำเนิดห้วยแม่ดาวมาจากคอยแม่ดาว ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของเหมืองแร่สังกะสี รูปแบบของลำธารเป็นแบบ dendritic คือ เป็นลำธารที่มีลักษณะแตกกิ่งก้านสาขา ทิศทางการไหลของน้ำจะไหลจากทิศตะวันออกสู่ทิศตะวันตก ผ่านพื้นที่ข้างเคียงบริเวณเหมืองแร่ และลงสู่พื้นที่ลุ่มต่ำด้านล่างก่อนจะบรรจบกัน และไหลลงสู่แม่น้ำเมยต่อไป มีการก่อสร้างทำนบกั้นน้ำเป็นช่วง ๆ เพื่อผันน้ำมาใช้ประโยชน์เพื่อการชลประทาน ในพื้นที่เกษตรตลอดลำน้ำ

รายงานสรุปผลการตรวจตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม บริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ภายหลังการตรวจพบว่าการแพร่กระจายของแคดเมียม ดังนี้ ตัวอย่างน้ำตลอดลำคลอง มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0.00281 – 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวอย่างดิน มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 61 – 207 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Pollution Control Department, 2004) และนอกจากนี้ยังมีงานศึกษาวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม จากการทำเหมืองแร่ สู่สิ่งแวดล้อม จนทำให้เกิดการปนเปื้อนเข้าสู่วงจรรอาหาร โดยเฉพาะจากพื้นที่ศึกษา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ดังนี้

ศักดิ์สินทร์ (2537) ศึกษาถึงปริมาณแคดเมียม และสังกะสี ในน้ำ ตะกอนดิน และหอยกาบ ในแม่น้ำปิงตอนล่าง พบว่า มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสี ในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 และ 40.51 ไมโครกรัมต่อลิตร และปริมาณแคดเมียมและสังกะสี ในตะกอนดินเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.83 และ 90.66 ไมโครกรัมต่อกกรัม ค่าสูงสุดพบที่บริเวณจุดน้ำทิ้งของโรงงานถลุงแร่สังกะสี จังหวัดตาก

นิตยาพร และ จุไร (2537) ศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียม ในพื้นที่ใกล้เคียง โรงงานถลุงแร่สังกะสี จังหวัดตาก โดยการเก็บตัวอย่างดิน 32 ตัวอย่าง และจากเหมืองแร่สังกะสี ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก 17 ตัวอย่าง วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS พบว่าดินบริเวณเหมืองแร่สังกะสี อำเภอแม่สอด มีปริมาณแคดเมียมในตะกอนดินเฉลี่ยสูง 228.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ประยูทธ (2542) ศึกษาการปนเปื้อนของสารแคดเมียมและสังกะสี ในดินบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ดาว พบว่าบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ดาวตอนล่างมีค่าเฉลี่ยแคดเมียมเท่ากับ 50.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ดาวตอนบนมีค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 0.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพื้นที่ข้างเคียงมีค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 1.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นจะเห็นได้ว่า พื้นที่ลุ่มน้ำแม่ดาวตอนบนมีค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมสูงกว่าพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ดาวตอนล่าง และพื้นที่ใกล้เคียง และมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ดาวตอนบนและพื้นที่ข้างเคียงมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงสรุปว่า กิจกรรมเหมืองแร่สังกะสีสามารถก่อให้เกิดการแพร่กระจายของแคดเมียมสู่พื้นที่ลุ่มน้ำตอนล่างได้สูงโดยมีน้ำเป็นสื่อสำคัญ

คะเนิงนิจและฉันทนา (2548) ได้รายงานไว้ว่า จากผลการศึกษาปริมาณแคดเมียมในดินจังหวัดตากช่วงปี 2541-2543 พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินจำนวน 3.4-284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมกับปัจจัยต่างๆ เช่น คุณลักษณะของดิน และแหล่งกำเนิดของการปนเปื้อน

Romken *et al.* (2009) ศึกษาระดับของแคดเมียม ในพื้นที่นาข้าว ประเทศไต้หวัน โดยได้จัดทำแบบจำลองการเคลื่อนย้ายสารจากดินสู่พืช โดยใช้ข้อมูลการทดสอบคุณภาพดิน ในการทำนายปริมาณการดูดใช้แคดเมียมโดยข้าวกล้อง

## 5. การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ (health risk assessment)

### 5.1 นิยามและความหมาย

ความเสี่ยง (risk) หมายถึง ลักษณะของสถานการณ์หรือการกระทำใด ๆ ที่มีผลลัพธ์ได้มากกว่า 2 อย่าง ซึ่งไม่สามารถบอกได้แน่นอนว่าจะเกิดขึ้นหรือไม่ และอย่างน้อยหนึ่งในผลลัพธ์นั้นไม่พึงประสงค์ (พงศ์เทพ, 2547) ดังนั้น ความเสี่ยงสุขภาพ จึงหมายถึง ความเป็นไปได้ที่จะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เนื่องจากสิ่งที่มีความเป็นอันตรายต่าง ๆ โดยสามารถประเมินความเป็นไปได้รวมทั้งระดับความรุนแรงของผลกระทบ จากการรับสัมผัส ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อสุขภาพ ซึ่งมีอีกคำหนึ่งที่มีความหมายใกล้เคียงกัน ได้แก่ สิ่งคุกคาม (hazard) หมายถึง สารเคมี หรือสภาวะที่เป็นสาเหตุ ที่ก่อให้เกิดอันตราย หรือก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพร่างกาย (อนามัย, 2552)

สรุปสิ่งคุกคามเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพหลังการรับสัมผัส ในขณะที่ความเสี่ยงเป็น โอกาสที่จะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพอันเนื่องมาจากสิ่งคุกคามเป็นสาเหตุ

การประเมินความเสี่ยง (risk assessment) หมายถึง กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ที่ผ่านกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการรับสัมผัส หรือปัจจัยอื่น ที่มาจากสิ่งคุกคาม หรือจากสิ่งแวดล้อม กับผลกระทบที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ (อนามัย, 2552)

การประเมินความเสี่ยงเป็นการประเมินความเป็นไปได้ของสารเคมีที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งจะเป็นการประเมินความเสี่ยงในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ สภาวิจัยแห่งชาติสหรัฐอเมริกาได้กำหนดขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง (อนามัย, 2552; พงศ์เทพ, 2547) ดังนี้

1. การบ่งชี้ความเป็นอันตราย (hazard identification)
2. การประเมินการรับสัมผัส (exposure assessment)
3. การประเมินการตอบสนอง (dose response)
4. การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (risk characterization)

## 5.2 การบ่งชี้ความเป็นอันตราย (hazard identification)

การบ่งชี้ความเป็นอันตราย เป็นกระบวนการพิจารณาสิ่งคุกคาม ที่มีความเป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ ซึ่งข้อมูลทุกข้อมุม ได้จากการศึกษาทางระบาดวิทยาในมนุษย์ หรือข้อมูลจากการศึกษาในสัตว์ทดลอง หรือการศึกษาทางเภสัชจลนพลศาสตร์ ที่ศึกษากลไกการออกฤทธิ์ของสารเคมี

## 5.3 การประเมินการรับสัมผัส (exposure assessment)

การประเมินการรับสัมผัส เป็นวิธีการประมาณ หรือ วัดความเข้มข้นสิ่งคุกคามทั้งหมดที่ได้รับสัมผัส ดังนั้นในการประเมินจะต้องพิจารณา ถึง ปริมาณสิ่งคุกคามที่ได้รับ ระยะเวลาในการรับสัมผัส และทางของการรับสัมผัส ในการประเมินการรับสัมผัส มีขั้นตอนดังนี้

การกำหนดลักษณะของการสัมผัส (characterizing exposure setting) เป็นการกำหนดลักษณะของการสัมผัสเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพ เช่น การกำหนดลักษณะกลุ่มประชากรที่เป็นกลุ่มเสี่ยง

การค้นหาวิถีของการรับสัมผัส (identifying exposure pathways) เป็นการพิจารณาเส้นทางที่ประชากรในกลุ่มเสี่ยงจะมีโอกาสได้รับสัมผัส ได้แก่ การค้นหาแหล่งกำเนิดและตัวกลาง การประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพและการเคลื่อนย้ายในตัวกลาง การหาจุดสัมผัสและเส้นทางเข้าสู่ร่างกาย การรวบรวมข้อมูล และการสรุปข้อมูลเส้นทางของการเข้าสู่ร่างกายอย่างครบถ้วน

การวัดการสัมผัส (quantifying exposure) เป็นการวัดขนาด ความถี่ และระยะเวลาในการรับสัมผัสของแต่ละเส้นทาง แบ่งออกเป็น การประมาณความเข้มข้นของการสัมผัส และการคำนวณปริมาณที่ได้รับ (intake, I)

## 5.4 การประเมินการตอบสนอง (assessment of dose response)

การประเมินความเป็นพิษของสารเคมีและสิ่งที่เกี่ยวข้องกับความเป็นพิษของสารเคมี กล่าวคือ เป็นกลไกการประเมินทางพิษวิทยา เพื่อบอกผลกระทบหรือผลไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ ของสารเคมี มักจะเป็นไปตามระยะเวลาที่สัมผัส ตำแหน่งที่มีการรับสัมผัส และการตอบสนองต่อสารเคมี เป็นต้น

#### 5.4.1 กลไกการเกิดพิษ

ภายหลังจากที่สารเคมีเข้าสู่ร่างกาย สารเคมีจะถูกดูดซึมเข้ากระแสโลหิต และกระจายไปยังอวัยวะต่าง ๆ ทั่วร่างกาย สามารถสะสมในอวัยวะต่าง ๆ เช่น ตับ ไต ส่งผลให้แสดงอาการเป็นพิษเมื่อสะสมในระดับที่สูงขึ้น ทั้งนี้ความเป็นพิษของสารเคมี จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเคมี และการทำปฏิกิริยาของสารเคมีกับโมเลกุลภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เช่น กลไกการเกิดพิษของแคดเมียม เมื่อมนุษย์ได้รับสัมผัสแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางรับประทานอาหาร แคดเมียมจะรวมตัวกับโปรตีน Cadmium binding protein (CdBPs) ซึ่งสามารถสะสมอยู่ในอวัยวะหลัก เช่น ตับ ตับอ่อน และต่อมไทรอยด์ (Sato and Takizawa, 1982; Torra *et al.*, 1995)

Christofersson *et al.* (1987) ศึกษาปริมาณแคดเมียมในอวัยวะต่าง ๆ ของผู้ทำงานที่มีการรับสัมผัสแคดเมียม ตลอดระยะเวลา 7 – 39 ปี พบว่า มีการสะสมแคดเมียมในชั้น cortex ของไตอยู่ในช่วง 47 – 317 ไมโครกรัมต่อกรัม สัมพันธ์กับระยะเวลาการได้รับสัมผัส

#### 5.4.2 ผลกระทบจากการรับสัมผัสสารเคมี

ลักษณะความเป็นพิษของสารเคมี มักจะจำแนกตามอวัยวะที่ได้รับผลกระทบ หรือ จำแนกตามโรคต่างๆ แต่โดยทั่วไปจะจำแนกสารเคมีได้ 2 ประเภท สารไม่ก่อมะเร็ง (non-carcinogen) และสารก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogen)

#### 5.4.3 ระบบการจำแนกประเภทสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง

การจำแนกสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งตามวิธีการ ของ United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) แสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระบบจำแนกสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งตามหลัก U.S. EPA

กลุ่ม	ประเภท
A	สารก่อมะเร็งในมนุษย์
B	มีความเป็นไปได้ที่จะก่อมะเร็งในมนุษย์ (B1) มีหลักฐานค่อนข้างจำกัดในมนุษย์ (B2) มีหลักฐานเพียงพอในสัตว์ทดลอง และไม่มีหลักฐานเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์
C	อาจเป็นไปได้ที่เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์
D	ไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์
E	ไม่มีหลักฐานว่าเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (หรือมีหลักฐานว่าไม่เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์)

ที่มา : (อนามัย, 2552)

แคดเมียมจัดอยู่ในสารก่อมะเร็งประเภท B1 นั่นคือ ยังมีหลักฐานค่อนข้างจำกัดในมนุษย์ ดังนั้นจึงควรมีการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ จากการรับสัมผัสสารดังกล่าวเข้าสู่ร่างกาย ผ่านทางการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อน

#### 5.4.4 พารามิเตอร์ในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

ในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพมีหลากหลายพารามิเตอร์ที่มีความจำเป็นสำหรับการใช้ในการคำนวณ ได้แก่

ค่าความทน (threshold) คือปริมาณสารเคมีที่สามารถรับสัมผัสได้สูงสุดโดยไม่แสดงอาการไม่พึงประสงค์ หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสารเคมี และการตอบสนองของร่างกาย กล่าวคือ หากร่างกายได้รับสัมผัสสารเคมีในปริมาณต่ำๆ ร่างกายจะไม่แสดงอาการตอบสนองใดๆ แต่หากได้รับในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ จนเกินจุดที่เรียกว่า ค่าความทน ร่างกายจะแสดงอาการไม่พึงประสงค์ให้เห็น

ค่าโนเอล (no observed effect level, NOEL) หมายถึงขนาดของสารเคมีที่ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในสัตว์ทดลอง

ค่าโนแอล (no observed adverse effect level, NOAEL) เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาในสัตว์ทดลอง ที่ได้รับสารเคมีขนาดต่าง ๆ เข้าไป และไม่ปรากฏนัยสำคัญใด ๆ ที่ชี้ว่าความเป็นพิษจากสารเคมี ใช้สำหรับผลกระทบต่อร่างกายแบบเฉียบพลันจากการรับความเข้มข้นของสารเคมีที่ได้รับมากที่สุดที่ได้รับทุกวันแล้วไม่ทำให้เกิดอาการไม่พึงประสงค์

ค่าโลเอล (lowest observed effect level, LOEL) เป็นค่าขนาดความเข้มข้นน้อยที่สุดที่ได้รับทุกวันแล้วทำให้เกิดอาการตอบสนองต่อร่างกายอย่างใดอย่างหนึ่ง

ค่าโลแอล (lowest observed adverse effect level, LOAEL) คือปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่น้อยที่สุด ซึ่งได้รับทุกวันแล้วทำให้เกิดอาการไม่พึงประสงค์ต่อร่างกายอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งมักเป็นค่าความผิดปกติที่กลับคืนสภาพได้

ค่าขนาดอ้างอิง (reference dose, RfD) หมายถึงค่าขนาดที่มากที่สุดของสารเคมีที่สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ โดยปราศจากผลกระทบต่อสุขภาพตลอดช่วงชีวิต ซึ่งคำนวณได้จากค่า โนแอล หรือค่าโลแอล แต่เนื่องจากการศึกษาในมนุษย์จะมีค่าผันแปรค่อนข้างมาก จึงมักใช้ช่วงความปลอดภัยเพื่อช่วยกำจัดค่าความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น (uncertainties) สามารถเขียนเป็นสมการในการคำนวณได้ดังนี้

$$RfD = \frac{NOAEL \text{ or } LOAEL}{(UF_1 \times UF_2 \times UF_n \times MF)} \quad (15)$$

เมื่อ

RfD = reference dose  
 UF = uncertainty factor  
 MF = Modifying factor

### 5.5 การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (risk characterization)

การอธิบายลักษณะความเสี่ยงเป็นการอธิบายขั้นสุดท้าย เป็นการทำนายความเป็นไปได้ของการเกิดผลไม่พึงประสงค์จากการรับสัมผัสสารเคมี เป็นการให้ข้อมูลด้านปริมาณและด้านคุณภาพ ซึ่งรวบรวมข้อมูลทั้งหมดจากขั้นตอนข้างต้น เพื่อนำมาทำนายความเสี่ยงของสารเคมีที่มีต่อสุขภาพ ในงานวิจัยนี้จะเน้นการอธิบายความเสี่ยงจากการรับสัมผัสแคดเมียม ซึ่งจัดเป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็ง

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน
  - 1.1 ถุงพลาสติก Polyethylene ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร
  - 1.2 ภาชนะกระตุ้นด้วยนิวตรอนทำจากอะลูมิเนียม
  - 1.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว.-1/1) ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
  - 1.4 ชุดวัดรังสีแกมมา ประกอบด้วยหัววัดรังสีชนิดไฮเปอร์เพียวเจอร์มาเนียม รุ่น 232P พร้อม Digital gamma ray spectrometer รุ่น DSPEC jr 2.0 บริษัท ORTEC
  - 1.5 Standard Reference Material รหัส 2711 Montana soil และรหัส 1568a Rice Flour ของ National Institute of standards and Technology, NIST ประเทศ สหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 9 ภาชนะกระตุ้นด้วยนิวตรอนทำจากอะลูมิเนียม



ภาพที่ 10 ชุดอุปกรณ์วัดรังสีแกมมา พร้อมหัววัดรังสีชนิดไฮเปอร์เพียวเจอร์มานเนียม

2. อุปกรณ์สำหรับการทดลองแบบกระถาง
  - 2.1 เมล็ดข้าว พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
  - 2.2 ดินจากพื้นที่ศึกษาตำบลพระธาตุ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
  - 2.3 กระถางปลูกชนิดที่ไม่มีรูระบายน้ำ
  - 2.4 อุปกรณ์สำหรับปลูก เช่น ช้อนปลูก
3. สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
  - 3.1 เครื่องชั่งละเอียด
  - 3.2 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (1000 ppm)
  - 3.3 ตู้อบแห้ง
  - 3.4 โถดูดความชื้น
  - 3.5 เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS)  
Perkin-Elmer AAnalyst 800
  - 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น ปีกเกอร์ ปิเปต กระจกนาฬิกา

## วิธีการ

### 1. การเก็บตัวอย่างและการทดลองแบบกระถาง

เก็บตัวอย่างดิน จากพื้นที่ศึกษาตำบลพระธาตุ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ระหว่างเส้นละติจูดที่ 16 องศา 40 ลิปดา 22.4 ฟลิปดา เหนือ และเส้นลองจิจูดที่ 98 องศา 37 ลิปดา 31.53 ฟลิปดา ตะวันออก โดยทำการเก็บตัวอย่าง ในระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร แบบผสมรวม โดยวิธีการเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ คุณลักษณะ ความสามารถในการดูดซับ ปริมาณแคดเมียมในดิน จะเก็บตัวอย่างตามเส้นทะแยงมุมของแปลงนาข้าว ระยะห่างจุดละ 1 เมตร สำหรับตัวอย่างดินส่วนที่ใช้สำหรับในกระถาง จะเก็บตัวอย่างแบบสุ่ม

เตรียมตัวอย่างต้นกล้าข้าว จากการเพาะเมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยการห่อด้วยผ้ารดน้ำเพื่อให้ความชื้นเป็นเวลาประมาณ 3 วัน จากนั้นนำไปหว่านลงในดิน เมื่อต้นข้าวมีอายุ 30 วัน จะได้อกล้าข้าวที่สมบูรณ์พร้อมจะนำไปปักดำ ซึ่งดินพื้นที่ศึกษา ใสในกระถางที่ไม่มีรูระบายน้ำ กระถางละ 1 กิโลกรัม จำนวน 6 กระถาง เติมน้ำในกระถาง จนระดับน้ำสูงจากผิวดินประมาณ 10 เซนติเมตร นำกล้าข้าวที่สมบูรณ์และมีขนาดใกล้เคียงกัน ปักดำในดินที่เตรียมไว้ กระถางละ 3 ต้น ให้มีระยะห่างระหว่างต้นพอประมาณ รดน้ำทุกวันจนถึงระยะเก็บเกี่ยว

### 2. การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

เก็บตัวอย่างดินจากการทดลองแบบกระถางก่อนและหลังการปลูก ผึ่งลมในที่ร่ม เลือกเศษพืชออก ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บใน โถดูดความชื้น

นำตัวอย่างต้นข้าวและเมล็ดข้าวที่เก็บจากการทดลองแบบกระถาง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และน้ำกลั่น จากนั้นนำไปผึ่งในที่ร่ม และอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดให้ละเอียดเพื่อให้ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด นำไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บใน โถดูดความชื้น



ภาพที่ 11 ต้นกล้าข้าวที่พร้อมนำไปปักดำในกระถาง

### 3. การวิเคราะห์

#### 3.1 คุณลักษณะของดิน

การวิเคราะห์คุณลักษณะของดิน ดังนี้ เนื้อดิน โดยวิธี Hydrometer, ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดย pH meter ดิน : น้ำ เท่ากับ 1:1, การแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (CEC) อินทรีย์วัตถุในดิน (Organic matter, OM) โดยวิธี Walkley-Black (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

#### 3.2 เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

##### 3.2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคดเมียม

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแคดเมียม ทำได้โดยใช้สารละลายมาตรฐาน แคดเมียม หยดลงบนกระดาษกรอง ให้มีปริมาณแคดเมียมบนกระดาษกรองเท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 9 ไมโครกรัม จากนั้นนำไประเหยแห้งด้วยหลอดอินฟราเรด นำกระดาษกรอง บรรจุลงในถุงพลาสติก Polyethylene ปิดผนึกด้วยความร้อน ห่อด้วยกระดาษฟอยล์ บรรจุลงในภาชนะอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยนิวตรอน ในท่อแกนนอกของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1

(ปปว.-1/1) ที่ตำแหน่ง Rotary Specimen Rack (Lazy Susan) ซึ่งมีความเข้มของนิวตรอน ประมาณ  $4.47 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้รังสีเกิดการสลายตัว เป็นระยะเวลา 2, 3, 4 และ 5 วัน นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมา เป็นเวลา 1800 วินาที บันทึกค่า ความแรงรังสีแกมมาในหน่วย count per second (cps) ที่พลังงาน 336.26 keV เขียนกราฟ สภาพ ไวในการวิเคราะห์ (sensitivity, S) หมายถึงอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ(R) ซึ่งในที่นี้คือ ค่าความแรงของรังสีแกมมาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (C) ตามสมการที่ 16

$$S = \frac{dR}{dC} \quad (16)$$

### 3.2.2 ความถูกต้องในการวิเคราะห์ (accuracy)

ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ทำการวิเคราะห์ Standard Reference Material, SRM ในการทดลองนี้ใช้ SRM2711 Montana soil ของสถาบัน National Institute of standards and Technology เตรียมตัวอย่างโดย ชั่ง SRM2711 Montana soil ประมาณ 0.05 กรัม บรรจุลงใน ถังพลาสติก Polyethylene ปิดผนึกด้วยความร้อน จำนวน 7 ซ้ำ เตรียมสารมาตรฐานโดยการหยด สารละลายมาตรฐานแคดเมียมบนกระดาษกรอง ให้มีปริมาณแคดเมียมบนกระดาษกรองเท่ากับ 3 ไมโครกรัม บรรจุลงในถังพลาสติก Polyethylene ปิดผนึกด้วยความร้อน จำนวน 2 ซ้ำ ห่อกระดาษ พอยล์ บรรจุลงในภาชนะอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยนิวตรอน ในท่อแกนนอกของเครื่อง ปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว.-1/1) ที่ตำแหน่ง Rotary Specimen Rack (Lazy Susan) ซึ่งมีความเข้มของนิวตรอน ประมาณ  $4.47 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  กระตุ้นด้วยนิวตรอน และปล่อยให้ เกิดการสลายตัว ตามสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.1 นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมา เป็นเวลา 1800 วินาที จากนั้นนำมาคำนวณหาระดับความถูกต้องในรูปของ ความผิดพลาดสัมพัทธ์ (relative error) ดังสมการ

$$\text{Relative error} = \frac{\text{Absolute Error}}{\text{Certified Value}} \times 100 \quad (17)$$

$$\text{Absolute Error} = |\text{Measure Value} - \text{Certified Value}| \quad (18)$$

และทดสอบค่าทางสถิติ t-test โดยการเปรียบเทียบค่า t จากการคำนวณ กับค่า t จากตาราง (critical t-value;  $t_c$ )

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{SD/\sqrt{n}} \quad (19)$$

เมื่อ	$\bar{X}$	= ค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมใน SRM ที่วิเคราะห์ได้
	$\mu$	= ค่าที่แท้จริงของปริมาณแคดเมียมใน SRM
	SD	= ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)
	n	= จำนวนครั้งที่ทำซ้ำ (n = 7)

### 3.2.3 จีตจำกัดของวิธีวิเคราะห์ (limit of detection, LOD)

จีตจำกัดของวิธีวิเคราะห์ทำได้โดย ชั่งตัวอย่างดิน ประมาณ 0.05 กรัม และ ตัวอย่างพืช (ราก, ลำต้น, ใบ, แกลบ และเมล็ดข้าว) ประมาณ 0.1 กรัม เตรียมสารมาตรฐานโดย ชั่ง SRM 2711 Montana soil ประมาณ 0.05 กรัม บรรจุลงในถุงพลาสติก Polyethylene ปิดผนึกด้วยความร้อน ห่อด้วยกระดาษฟอยล์ บรรจุลงในภาชนะอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยนิวตรอนในท่อแกนนอกของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว.-1/1) ที่ตำแหน่ง Rotary Specimen Rack (Lazy Susan) ซึ่งมีความเข้มของนิวตรอน ประมาณ  $4.47 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  กระตุ้นด้วยนิวตรอน และปล่อยให้เกิดการสลายตัว ตามสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.1 นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมา เป็นเวลา 1800 วินาที คำนวณ จากสมการ (20) (Gilmore and Hemingway, 1995)

$$\text{LOD} = 2.71 + 3.29 \sqrt{B(1 + \frac{n}{2m})} \quad (20)$$

เมื่อ	n	= จำนวนช่องของการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิด peak
	m	= จำนวนช่องของการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดสเปกตรัมทั้งซ้ายและขวา ต้องมีจำนวนเท่ากัน
	B	= ค่าการนับรังสีพื้นหลัง หาได้จากสมการ

$$B = \frac{(B1 + B2)n}{2m} \quad (21)$$

เมื่อ	B1	= ค่าการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดสเปกตรัมด้านซ้าย
	B2	= ค่าการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดสเปกตรัมด้านขวา
	n	= จำนวนช่องของการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิด peak
	m	= จำนวนช่องของการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดสเปกตรัมทั้งซ้ายและขวา ต้องมีจำนวนเท่ากัน

### 3.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างดินและตัวอย่างพืช โดยใช้ น้ำหนักของตัวอย่างดิน ประมาณ 0.05 กรัม และน้ำหนักของตัวอย่างพืช (ราก ลำต้น ใบ แกลบ และเมล็ดข้าว) ประมาณ 0.1 กรัม เตรียมสารมาตรฐาน โดย ชั่ง SRM 2711 Montana soil ประมาณ 0.05 กรัม บรรจุลงในถุงพลาสติก Polyethylene ปิดผนึกด้วยความร้อน ห่อด้วยกระดาษฟอยล์ บรรจุลงในภาชนะอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยนิวตรอน ในท่อแกนนอกของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว.-1/1) ที่ตำแหน่ง Rotary Specimen Rack (Lazy Susan) ซึ่งมีความเข้มของนิวตรอน ประมาณ  $4.47 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  กระตุ้นด้วยนิวตรอน และปล่อยให้เกิดการสลายตัว ตามสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.1 นับรังสีด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมา เป็นเวลา 1800 วินาที บันทึกค่าพลังงาน และค่าการนับรังสี เพื่อคำนวณปริมาณแคดเมียม สมการที่ (22)



ภาพที่ 12 ตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ผ่านการปิดผนึกด้วยความร้อน

$$W_{\text{sample}} = W_{\text{std}} \times \frac{M_{\text{std}} \times \text{Peak}_{\text{sample}}}{M_{\text{sample}} \times \text{Peak}_{\text{std}}} \quad (22)$$

เมื่อ	$W_{\text{sample}}$	= ปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
	$W_{\text{std}}$	= ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
	$\text{Peak}_{\text{sample}}$	= ค่าโฟโตพีคจากการนับรังสีของสารตัวอย่าง (Counts)
	$\text{Peak}_{\text{std}}$	= ค่าโฟโตพีคจากการนับรังสีของสารมาตรฐาน (Counts)
	$M_{\text{sample}}$	= น้ำหนักสารตัวอย่าง (กรัม)
	$M_{\text{std}}$	= น้ำหนักสารมาตรฐาน (กรัม)

### 3.3 กระบวนการดูดซับและปลดปล่อยแคดเมียมในดิน

ซึ่งตัวอย่างดินที่ไม่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม 10 กรัม เติมสารละลายมาตรฐาน แคดเมียมให้มีความเข้มข้น เท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เติมน้ำ 20 มิลลิลิตร เขย่าตามแนวขนาน กับพื้น นาน 0 20 60 นาที 2 4 6 8 10 และ 24 ชั่วโมง ดึงตัวอย่างของแต่ละช่วงเวลาออกมาหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาทีนาน 10 นาที จากนั้นดูดสารละลายไปกรองผ่าน กระดาษกรอง whatman no. 4 วัดปริมาณแคดเมียม ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) จากนั้น นำไป plot graph ระหว่างเวลา และความเข้มข้นที่ดูดซับอยู่บน ดิน เพื่อหา equilibrium sorption time

ซึ่งตัวอย่างดินที่ไม่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม 10 กรัม เติมสารละลายมาตรฐาน ให้มีความเข้มข้นแคดเมียม 30 25 20 15 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เขย่าตามแนวขนานกับพื้น ตามเวลาที่ได้จาก equilibrium sorption time ดึงตัวอย่างออกมาหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที จากนั้นดูดสารละลายไปกรองผ่านกระดาษ กรอง whatman no. 4 บันทึกปริมาตรสารละลาย วัดปริมาณแคดเมียม ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ปริมาณแคดเมียมที่ลดลงจากปริมาณที่ใส่ลงไปคือปริมาณ แคดเมียมที่ถูกดินดูดซับไว้ จากนั้น plot graph ระหว่างความเข้มข้นในสารละลายและความเข้มข้น ที่ดูดซับอยู่บนดิน เพื่อหา equilibrium adsorption isotherm โดยรูปแบบการดูดซับแบ่งออกเป็น การดูดซับแบบ Freundlich Isotherm มีสมการการดูดซับดังนี้

$$C_s = kC_e^{(1/n)} \quad (23)$$

เมื่อ	$C_s$	= ความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
	$C_e$	= ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$k$	= สัมประสิทธิ์การดูดซับ (ไม่มีหน่วย)

$$1/n = \text{สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลัง (ไม่มีหน่วย)}$$

และรูปแบบการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm มีสมการการดูดซับดังนี้

$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{ab} + \frac{C_e}{a} \quad (24)$$

เมื่อ	$C_s$	= ความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
	$C_e$	= ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$a$	= ค่าคงที่ Langmuir
	$b$	= ค่าสัมประสิทธิ์ความอิ่มตัว

ซั่งตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษา 10 กรัม ใช้ตัวอย่างดินจากการทดลองการดูดซับของแคดเมียมในดิน เพื่อวิเคราะห์การปลดปล่อยของแคดเมียมในดิน จากนั้นเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เขย่าตามแนวนานกับพื้น ตามเวลาที่ได้จาก equilibrium time sorption จากนั้นตั้งตัวอย่างออกมาหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที จากนั้นดูดสารละลายไปกรองผ่านกระดาษกรอง whatman no. 4 บันทึกปริมาตรสารละลายที่ได้ วัดปริมาณแคดเมียม ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ทำซ้ำอีก 3 ครั้ง คำนวณค่า Hysteresis Index (HI) เพื่อบอกถึงความสามารถในการดูดซับและการปลดปล่อย ดังสมการ

$$HI = 1/n_{\text{desorp}} : 1/n_{\text{sorp}} \times 100 \quad (25)$$

เมื่อ	$1/n_{\text{desorp}}$	= สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังของการปลดปล่อย
	$1/n_{\text{sorp}}$	= สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลังของการดูดซับ

### 3.4 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพมนุษย์

3.4.1 การคำนวณปริมาณที่ได้รับแคดเมียมจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนในแต่ละวัน สามารถคำนวณได้จากสมการ (24) (U.S. EPA, 1989)

$$I = \frac{C_{\text{metal}} \times W_{\text{food}} \times FI \times EF \times EP}{BW \times AT} \quad (26)$$

เมื่อ	I	= ปริมาณที่ได้รับต่อวัน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักร่างกาย/วัน)
	$C_{\text{metal}}$	= ความเข้มข้นโลหะในข้าว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
	$W_{\text{food}}$	= อัตราการบริโภคต่อวัน (กิโลกรัมต่อวัน)
	BW	= น้ำหนักร่างกาย (กิโลกรัม)
	FI	= สัดส่วนการบริโภคอาหารที่ปนเปื้อน (ไม่มีหน่วย)
	EF	= ความถี่ของการบริโภค (วันต่อปี)
	EP	= ระยะเวลาที่บริโภค (ปี)
	AT	= ระยะเวลาที่ใช้ในการเฉลี่ย (วัน)

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในการบริโภคอาหารที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ตามค่าความทนทานสูงสุดคณะกรรมการยุโรป (European Commission) มีการกำหนดปริมาณบริโภคสูงสุดต่อสัปดาห์ (tolerable weekly intake, TWI) เท่ากับ 2.5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว และปริมาณสารแคดเมียมที่ร่างกายได้รับต่อเดือน (provisional tolerable monthly intake, PTMI) เท่ากับ 25 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว ตามมาตรฐานจากโครงการความร่วมมือระหว่าง FAO/WHO (EFSA, 2011)

3.4.2 การหาสัดส่วนความอันตราย (target hazard quotient, THQ) การหาค่า THQ หาได้จากค่าขนาดอ้างอิงของสารจากการบริโภค หากค่า THQ น้อยกว่า 1 แสดงว่าไม่มีผลกระทบต่อประชากรผู้บริโภค การคำนวณค่า THQ จะคำนวณจากสมการ (25)

$$\text{THQ} = \frac{\text{EFr} \times \text{ED} \times \text{FI} \times \text{MC}}{\text{RfD}_0 \times \text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-3} \quad (27)$$

เมื่อ	THQ	= สัดส่วนความอันตราย (target hazard quotient)
	EFr	= ความถี่การรับสัมผัส (วันต่อปี)
	ED	= ช่วงเวลารับสัมผัส (ปี)
	FI	= ปริมาณการบริโภค (กรัมต่อคนต่อวัน)
	MC	= ความเข้มข้นในอาหาร (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
	$\text{RfD}_0$	= Reference Dose (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)
	BW	= น้ำหนักร่างกาย (กิโลกรัม)
	AT	= ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส (วัน)

3.4.3 การคำนวณความเสี่ยงเป็นการประเมินโอกาสของความเป็นไปได้ (probability) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสารเคมีที่ได้รับ (chronic daily intake, CDI) กับ ค่าความชันการเกิดมะเร็ง (carcinogen potency slope, CPS) ดังสมการ (26) (อนามัย, 2552)

$$\text{risk} = \text{slope factor (CPS)} \times \text{unit dose (CDI)} \quad (28)$$

เมื่อ CPS = ค่าความเป็นพิษ (มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว-วัน)  
 CDI = ปริมาณที่ร่างกายได้รับ (มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว-วัน)

ค่าความชันการเกิดมะเร็งนั้น เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงศักยภาพของสารเคมี ที่ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ ถ้ามีค่าความชันมาก หมายความว่าสารนั้นมีศักยภาพที่จะทำให้เกิดมะเร็งได้สูง โดยค่าขนาดอ้างอิงรวมและค่าความชันการเกิดมะเร็งของแคดเมียม แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าขนาดอ้างอิงรวมทั้งค่าความชันการเกิดมะเร็งของแคดเมียม

สารเคมี	Reference Dose (RfD)		carcinogen potency slope (CPS)	
	มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว-วัน		มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว-วัน	
	oral	inhalation	oral	inhalation
แคดเมียม	$1.00 \times 10^{-3}$	$5.70 \times 10^{-5}$	$3.80 \times 10^{-1}$	6.30

ที่มา : United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1994); The Risk Assessment Information System (RAIS) (2009)

## ผลและวิจารณ์

### 1. คุณลักษณะของตัวอย่างดิน

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวอย่างดิน มีประโยชน์เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ และใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของแคดเมียมในดิน ซึ่งคุณลักษณะของดินตัวอย่างแสดงตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณลักษณะของตัวอย่างดิน

คุณลักษณะ	ค่าเฉลี่ย (n = 3)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
pH (1:1)	7.07	0.15
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)	3.56	0.04
CEC* (cmol.kg <sup>-1</sup> )	18.4	0.66
Sand (%)	31.13	1.15
Silt (%)	34.8	0
Clay (%)	34.07	1.15
เนื้อดิน	Clay Loam	

หมายเหตุ \*cation exchange capacity

จากตารางที่ 6 สามารถอธิบายคุณลักษณะของดินมีผลต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในดิน ได้ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของตัวอย่างดินในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 7.07 ซึ่งมีค่าเป็นกลาง พืชและคณะ (2543) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของดินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของแคดเมียม พบว่าความสามารถในการดูดซับของดินจะสูงขึ้นเมื่อดินมี pH สูงขึ้น และดินจะมีอัตราการดูดซับที่สูงเมื่อดินมี pH ตั้งแต่ 7.5 ขึ้นไป ดังนั้นตัวอย่างดินสำหรับการศึกษานี้จึงมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมน้อย จึงมีโอกาสที่แคดเมียมจะเคลื่อนย้ายจากดินเข้าสู่สิ่งแวดล้อมอื่น ๆ หรือการเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารผ่านทางรากพืช

อินทรีย์วัตถุในดินมีผลต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในดิน โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุจะส่งผลทำให้แคดเมียมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร (Alloway, 1995) ทำให้

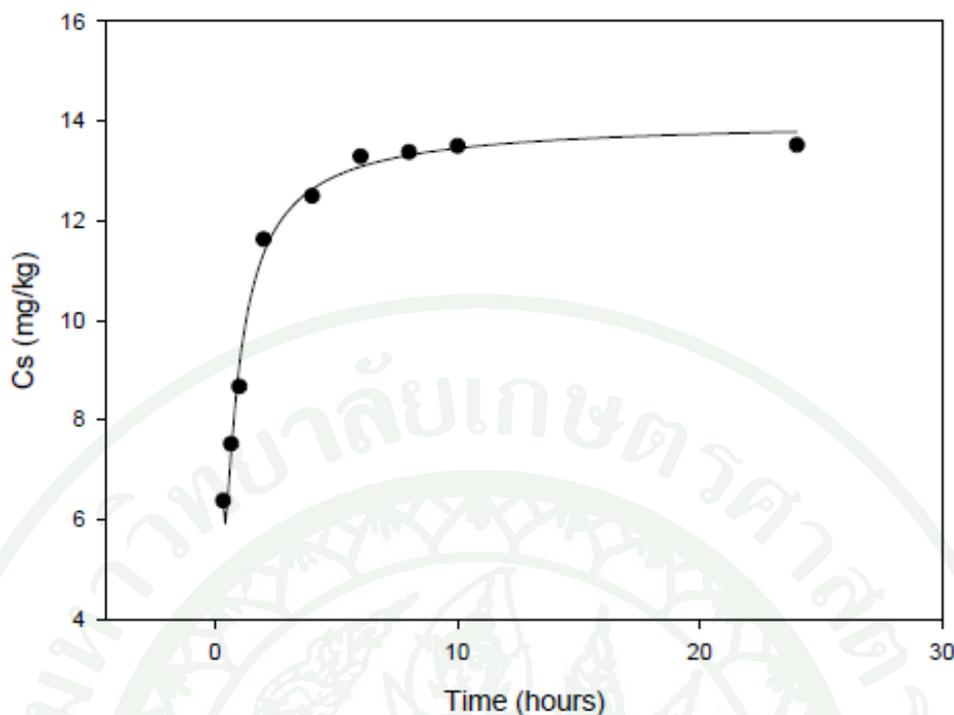
พืชไม่สามารถดูดสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมนี้ไปใช้ประโยชน์ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตัวอย่างสำหรับการทดลองนี้มีปริมาณเท่ากับ 3.56% ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่สูง (เอิบ, 2533)

ปริมาณอนุภาคดินเหนียว ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในดินเนื่องจากเนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีประจุสุทธิเป็นลบ จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับกับแคดเมียมซึ่งอยู่ในรูปของ  $Cd^{2+}$  (Alloway, 1995) ปริมาณอนุภาคดินเหนียวในตัวอย่างดินสำหรับการทดลองนี้มีปริมาณเท่ากับ 34.07%

ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณประจุบวกที่ดินดูดซับไว้ และสามารถแลกเปลี่ยนได้กับประจุบวกในสารละลาย ตัวอย่างดินสำหรับการทดลองนี้มีปริมาณเท่ากับ  $18.4 \text{ cmol.kg}^{-1}$  ซึ่งอยู่ในระดับค่อนข้างสูง (เอิบ, 2533)

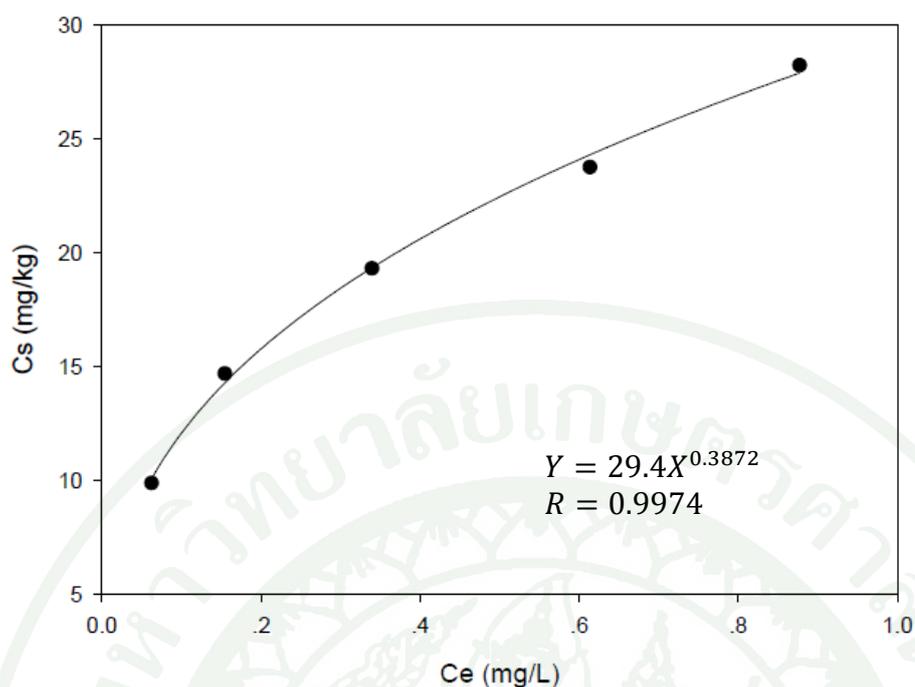
## 2. ความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยแคดเมียม

ระยะเวลาในการดูดซับแคดเมียมในดินจนกระทั่งถึงระดับสมดุล ใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในดิน เท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าแคดเมียมในสารละลายจะถูกดูดซับอยู่ในอนุภาคของดิน จนกระทั่งถึงระดับสมดุล เมื่อใช้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 5 – 6 ชั่วโมง (ภาพที่ 13) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wong *et al.* (2007) ซึ่งทำการศึกษาดูดซับแคดเมียมและสังกะสี พบว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับเท่ากับ 3.5 - 4 ชั่วโมง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงระดับสมดุลที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากการแข่งขันของไอออนของธาตุอื่นๆ เช่น สังกะสี ที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารละลายแคดเมียมเพียงอย่างเดียวจึงทำให้ไม่มีการแข่งขันในการดูดซับในพื้นที่ผิวของอนุภาคดินจากไอออนของธาตุอื่นๆ จึงทำให้มีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนกระทั่งถึงระดับสมดุลช้ากว่า

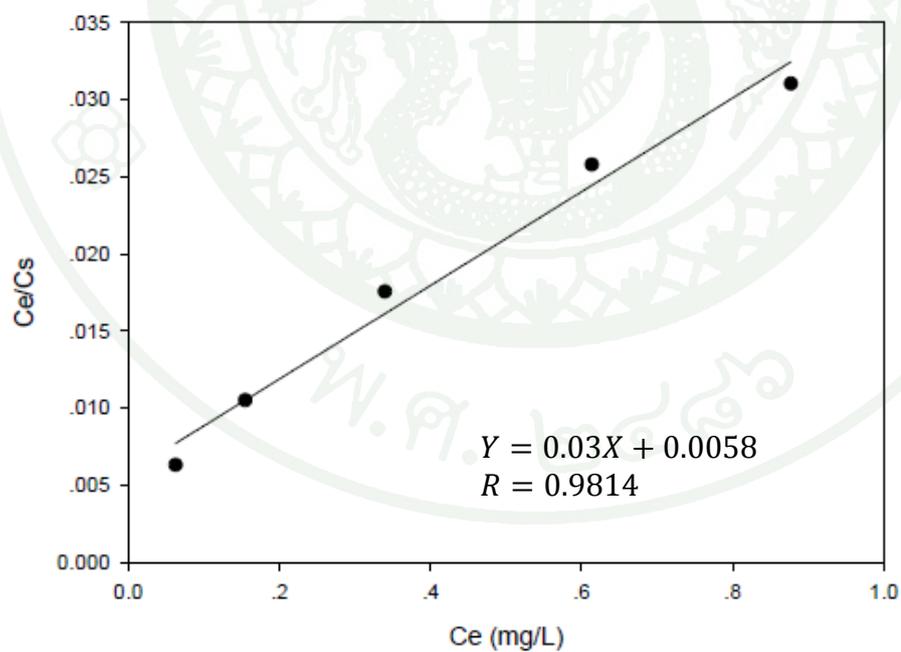


ภาพที่ 13 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับแคดเมียม ความเข้มข้น 25 mg/kg

กระบวนการดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดิน ใช้ระยะเวลาในการดูดซับแคดเมียมในดินจนกระทั่งถึงระดับสมดุล (6 ชั่วโมง) ใช้ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายตั้งแต่ 10 – 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สมการที่ใช้สำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับในดินกับความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายที่สมดุลของปฏิกิริยา ได้แก่ สมการการดูดซับของ Freundlich Isotherm (สมการที่ 22) ซึ่งการดูดซับจะเกิดเป็นชั้น หลาย ๆ ชั้น เมื่อพื้นที่ผิวของอนุภาคดินดูดซับแคดเมียมจนเต็มแล้ว แคดเมียมจะถูกดูดซับไว้ด้วยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค และสมการการดูดซับของ Langmuir Isotherm (สมการที่ 23) ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อพื้นที่ผิวของอนุภาคดินดูดซับแคดเมียมจนเต็มแล้ว แคดเมียมจะไม่สามารถถูกดูดซับได้อีก แสดงผลดังภาพที่ 14 และภาพที่ 15



ภาพที่ 14 ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม ตามสมการของ Freundlich



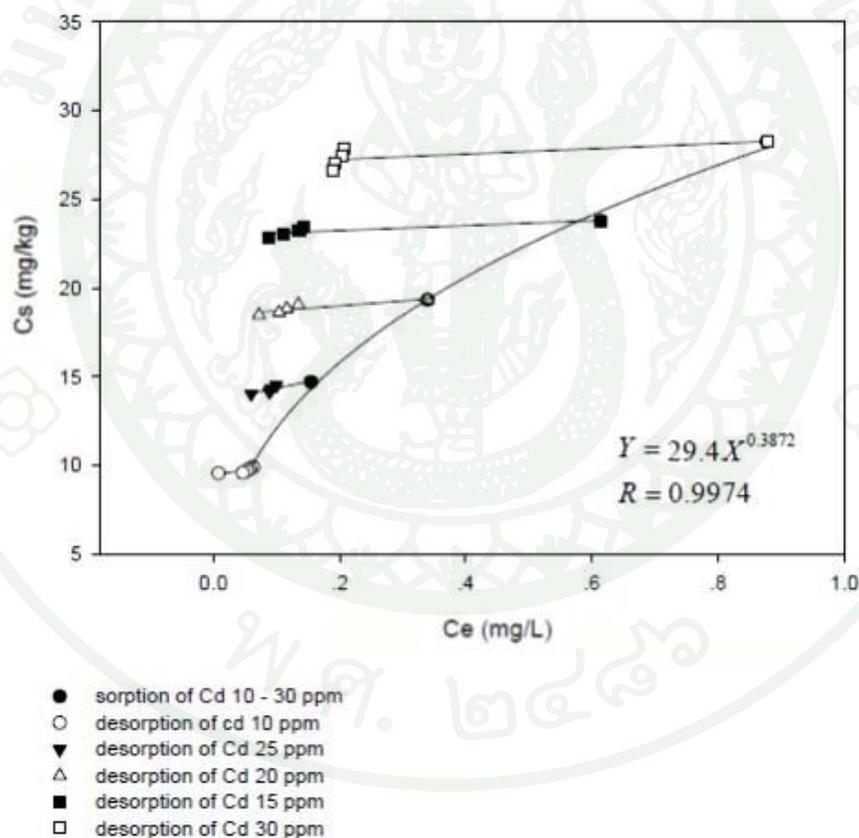
ภาพที่ 15 ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม ตามสมการของ Langmuir

จากภาพที่ 14 และภาพที่ 15 เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น ( $R$ ) ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม ตามสมการของ Freundlich ให้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นสูงกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ

แคดเมียม ตามสมการของ Langmuir ดังนั้นจึงสามารถอธิบายการดูดซับของแคดเมียมในดินได้ว่า รูปแบบการดูดซับของแคดเมียมในดินมีความสอดคล้องกับ รูปแบบการดูดซับของ Freundlich ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการการดูดซับ ได้ตามสมการ (29)

$$Y = 29.4X^{0.3872} \quad (29)$$

ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ Freundlich ( $k_f$ ) เท่ากับ 29.4 สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลัง ( $1/n_{\text{sorb}}$ ) เท่ากับ 0.39 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (R) เท่ากับ 0.997 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wong *et al.* (2007) และ Hamidpour *et al.* (2010) ที่รายงานตรงกันว่า ลักษณะการดูดซับของแคดเมียมบนตัวกลาง มีรูปแบบการดูดซับที่สอดคล้องกับ Freundlich Isotherm



ภาพที่ 16 Hysterresis การดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดิน

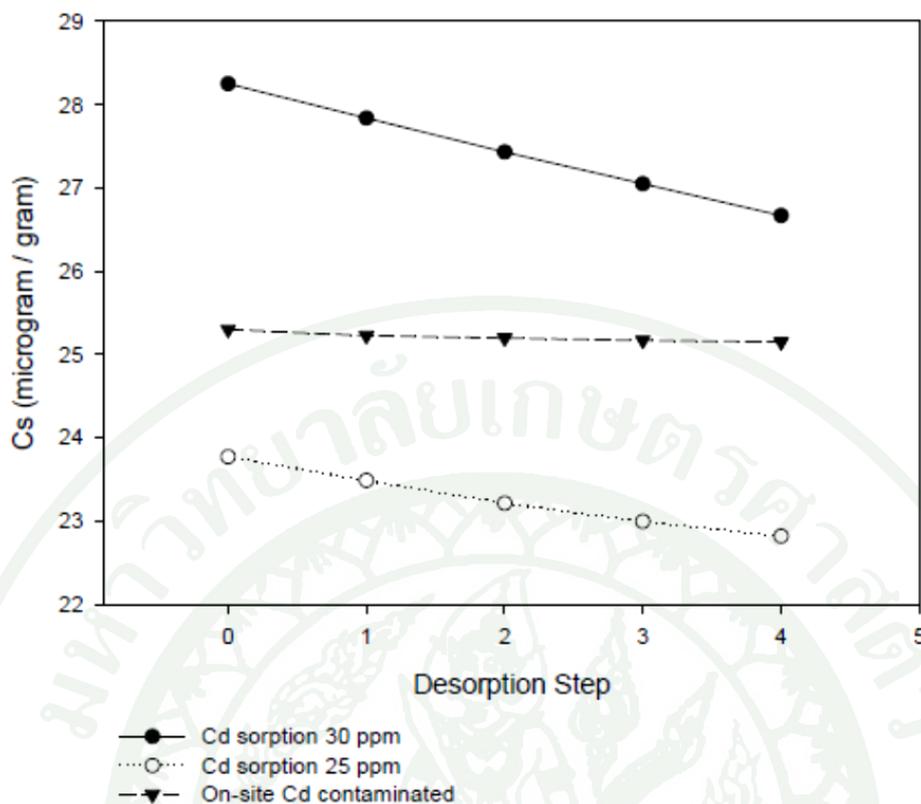
รูปแบบการปลดปล่อยแคดเมียม (ภาพที่ 16) สามารถอธิบายได้ว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล มีปริมาณลดลง ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแคดเมียมยังถูกดูดซับที่

อนุภาคของดิน โดยปริมาณของแคดเมียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคดิน หลังจากการเขย่า 4 ครั้ง เท่ากับ 3.53% ถึง 5.61% แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Freundlich ( $k_d$ ) สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลัง ( $1/n$ ) ของแต่ละความเข้มข้น แสดงดังตารางที่ 7 หรือในอีกกรณี คือการใช้ค่า Hysteresis Index (HI) บ่งชี้ปริมาณการดูดซับและการปลดปล่อย โดยใช้สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลัง ( $1/n$ ) เป็นเกณฑ์ (Hamidpour *et al.*, 2010) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกัน นั่นคือเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ Freundlich และ ค่า HI จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น แสดงว่าที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายดินสูง การปลดปล่อยแคดเมียมออกจากอนุภาคของดินจะมีมากขึ้น เนื่องจาก แคดเมียมไอออนจะเกาะกับอนุภาคของดินในลักษณะ multilayer เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมไอออนสูงขึ้นแรงดูดซับระหว่างแคดเมียมไอออนและอนุภาคของดินน้อยลง จึงทำให้แคดเมียมไอออนถูกปลดปล่อยออกมาได้มาก

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์ Freundlich ( $k_d$ ) สัมประสิทธิ์เลขชี้กำลัง ( $1/n$ ) และ Hysteresis Index (HI)

ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายดิน (mg/kg)	ค่าสัมประสิทธิ์		
	$k_d$	$1/n_{\text{desorb}}$	HI
10	9.90	0.0079	2.0
15	16.31	0.0547	14.1
20	20.87	0.0475	12.3
25	25.87	0.0523	13.5
30	53.16	0.4124	106.5

นอกจากความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายดินแล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยแคดเมียมจากดินที่ปนเปื้อน ได้แก่ ระยะเวลาที่แคดเมียมนั้นดูดซับอยู่กับดิน ทำการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการปลดปล่อยแคดเมียม โดยใช้ตัวอย่างดินที่ผ่านการดูดซับเป็นระยะเวลาสมดุล (6 ชั่วโมง) เปรียบเทียบกับตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่ ซึ่งมีระยะเวลาในการดูดซับแคดเมียมนานกว่า ซึ่งผลของระยะเวลาการดูดซับที่มีต่อการปลดปล่อยแคดเมียม แสดงตามภาพที่ 17



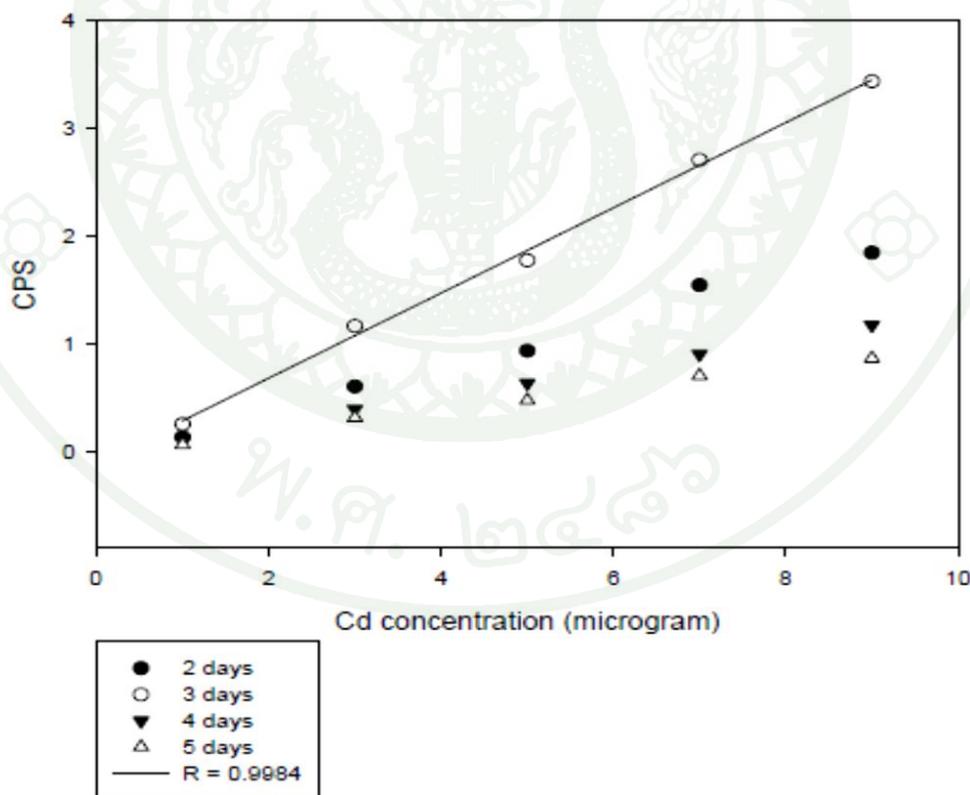
ภาพที่ 17 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการปลดปล่อยแคดเมียมจากดิน

จากภาพที่ 17 จะพบว่า ตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่ ความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 25.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การปลดปล่อยแคดเมียม จะช้ากว่าดินที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมเป็นระยะเวลาสมควร ในช่วงความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายดินก่อนการดูดซับตั้งแต่ 30 – 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงแสดงว่าระยะเวลาที่เกิดการปนเปื้อนมีผลต่อการปลดปล่อยแคดเมียม ซึ่งผลการทดลองนี้ จากงานวิจัยของ Zhao *et al.* (2009) ได้กล่าวไว้ในดินที่เกิดการปนเปื้อนใหม่ แคดเมียมจะอยู่ในรูปคาร์บอเนต ซึ่งพืชสามารถดูดใช้ได้ แต่เมื่อระยะเวลาการปนเปื้อนผ่านไป แคดเมียมจะอยู่ในรูปที่ตกค้างอยู่ในดิน พืชจึงไม่สามารถดูดใช้ได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยกับธาตุโลหะหนักชนิดอื่น ๆ เช่น สังกะสี ที่มีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกับแคดเมียม ก็พบว่า มีพฤติกรรมการปลดปล่อยก็ขึ้นอยู่กับระยะเวลา โดยที่ระยะเวลาการดูดซับมากกว่า การปลดปล่อยก็จะออกมาได้ช้ากว่าเช่นเดียวกัน

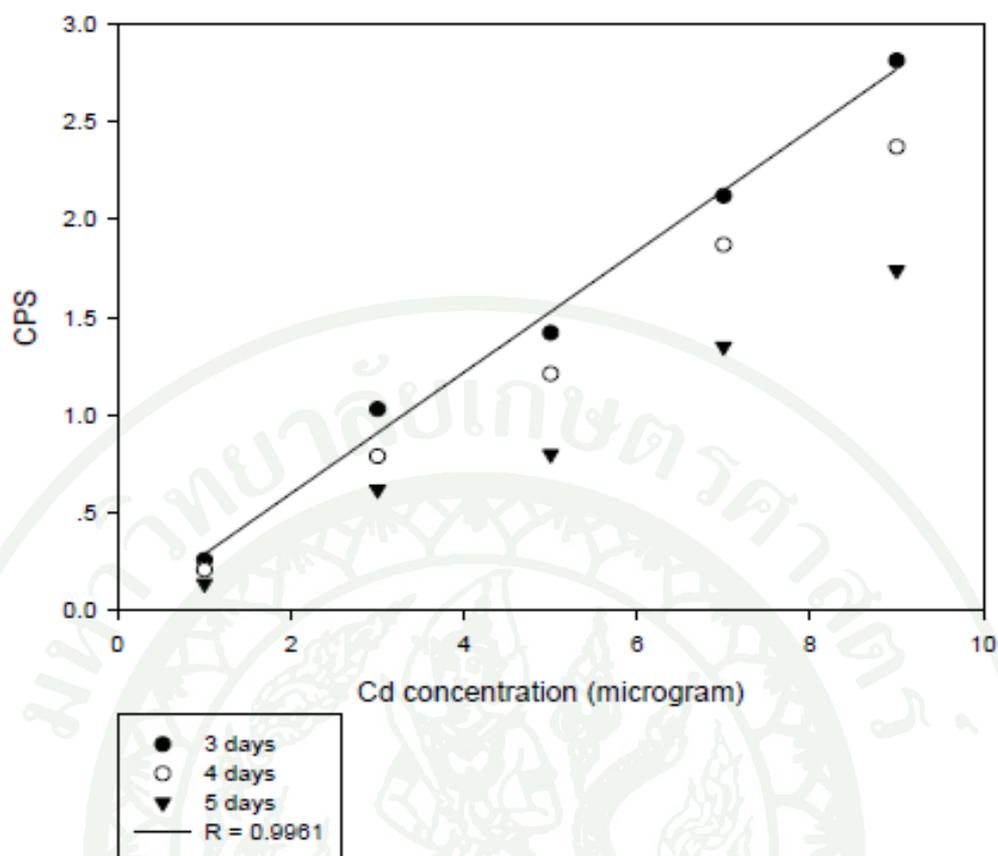
### 3. การวิเคราะห์เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

#### 3.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างดินด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัยได้แก่ ฟลักซ์นิวตรอน( $\phi$ ) ระยะเวลาในการกระตุ้นด้วยนิวตรอน และระยะเวลาที่ทิ้งให้รังสีสลายตัว การหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคดเมียมในดิน จะพิจารณาจากสภาพไวในการวิเคราะห์ (sensitivity) ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ (response) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (concentration) ซึ่งเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง สัญญาณ กับ ความเข้มข้น จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งถ้ามีความชันมาก แสดงว่า มีสภาพไวสูง การทดลองครั้งนี้ ทำการกระตุ้นด้วยนิวตรอนที่ตำแหน่งอุปกรณ์ภายนอกแกนปัจจุบันของเครื่องปว.-1/1 ที่ตำแหน่ง Rotary Specimen Rack (Lazy Susan) ความเข้มของนิวตรอนประมาณ  $4.47 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงค่าการนับรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น เมื่อกระตุ้นด้วยนิวตรอนเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง และทิ้งให้รังสีสลายตัว เป็นเวลา 2 – 5 วัน



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงค่าการนับรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น เมื่อกระตุ้นด้วยนิวตรอนเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงและทิ้งให้รังสีสลายตัว เป็นเวลา 2 – 5 วัน

ภาพที่ 18 และ 19 เมื่อพิจารณาค่าความชัน พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แคดเมียมได้แก่ การกระตุ้นด้วยนิวตรอนที่ตำแหน่งอุปกรณ์ภายนอกแกนปัจจุบันของเครื่องปว.-1/1 ที่ตำแหน่ง Rotary Specimen Rack (Lazy Susan) ความเข้มของนิวตรอนประมาณ  $4.47 \times 10^{11}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้รังสีสลายตัว เท่ากับ 3 วัน จะเห็นได้ว่าถ้าใช้เวลาในการกระตุ้นด้วยนิวตรอนมากเกินไป กัมมันตรังสีก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก ทำให้เสียเวลาและอาจทำให้เกิดการแทรกสอดเพราะธาตุที่มีครึ่งชีวิตยาว ก็จะเกิดกัมมันตรังสีด้วย

### 3.2 ความใช้ได้ของการวิเคราะห์แคดเมียมด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

การตรวจสอบความถูกต้อง (accuracy) ของการวิเคราะห์แคดเมียมด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนนั้น เป็นการตรวจสอบว่าวิธีการวิเคราะห์ มีความสามารถในการวัดได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงมากที่สุด เพื่อบ่งชี้ว่าการวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องสูง ทำได้โดยการวิเคราะห์ SRM (standard reference material) โดยใช้สถานะในการกระตุ้นด้วยนิวตรอน คือกระตุ้นด้วย

นิเวตรอนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้รังสีสลายตัว เท่ากับ 3 วัน ซึ่งในการทดลองนี้ ใช้ SRM2711 Montana Soil จำนวน 7 ซ้ำ ค่าความถูกต้องและแม่นยำของการวิเคราะห์ แสดงดัง ตารางที่ 8

**ตารางที่ 8** ค่าความถูกต้องและแม่นยำของการวิเคราะห์สารมาตรฐานอ้างอิง SRM2711 (Montana Soil)

ครั้งที่	แคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
1	41.99
2	42.03
3	41.49
4	42.55
5	41.72
6	41.65
7	42.91
เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	42.05
ร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)	1.21%RSD
ค่าอ้างอิงมาตรฐาน	41.7
ค่าความผิดพลาด	1.01%

ค่า relative error ที่ยอมรับได้สูงสุดเท่ากับ 10% ซึ่งการทดลองครั้งนี้ค่า relative error เท่ากับ 1.01% และเมื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าที่แท้จริงด้วย ค่าสถิติ t-test โดยค่า t จากการคำนวณเท่ากับ 1.80 ซึ่งน้อยกว่าค่า t จากตาราง t-distribution ( $\alpha_2, 6$ ) เท่ากับ 2.45 แสดงว่า ค่าปริมาณจริงของSRM กับค่าที่วิเคราะห์ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ความแม่นยำของการวัด (precision) เป็นการทดสอบความแม่นยำของการวิเคราะห์ซ้ำหลายๆครั้ง ซึ่งระดับความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างจะจำแนกตามระดับความเข้มข้น สำหรับการทดลองครั้งนี้ ได้ศึกษาความเข้มข้นในระดับ trace analysis, มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีระดับความแม่นยำเท่ากับ 1.21%RSD ซึ่งจัดว่ามีความแม่นยำในระดับปานกลาง (วิลาวด์, 2544)

ความเป็นเส้นตรง (linearity) เพื่อบอกถึงความสามารถของวิธีวิเคราะห์ที่จะทำให้วิเคราะห์แล้วได้ผลการวิเคราะห์ที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นในช่วงความเข้มข้นที่กำหนด การทดลองนี้ศึกษาช่วงความเข้มข้น ของสารมาตรฐานแคดเมียมจำนวน 5 ระดับ ตั้งแต่ 1 – 9 ไมโครกรัม พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r) เท่ากับ 0.998 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (วิลลาวัลย์, 2544)

### 3.3 ค่าขีดต่ำสุดของวิธีวิเคราะห์

ค่าขีดต่ำสุดของวิธีวิเคราะห์ (limit of detection, LOD) หมายถึง ค่าปริมาณต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างที่สามารถตรวจวัดได้ หาได้โดยวิธีการคำนวณจาก ค่าพื้นหลังที่ทำให้เกิดฟีดตามสมการ (20) โดยจำนวนช่องของการนับรังสีบนสเปกตรัมที่ทำให้เกิดฟีด (n) เท่ากับ 5 และจำนวนช่องของการนับรังสีของสัญญาณพื้นหลัง (background) (m) เท่ากับ 3 ในตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากลักษณะของเนื้อสารมีความแตกต่างกัน (matrix effect) สามารถแสดงค่าขีดต่ำสุดของวิธีวิเคราะห์ ได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าขีดต่ำสุดของวิธีวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างดินและพืช

ตัวอย่าง	LOD (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
ดิน	15.21±3.21
ราก	5.23±0.25
ลำต้น	5.16±0.82
ใบ	3.39±0.13
แกลบ	2.19±0.09
เมล็ดข้าว (ไม่ขัดสี)	2.07±0.01

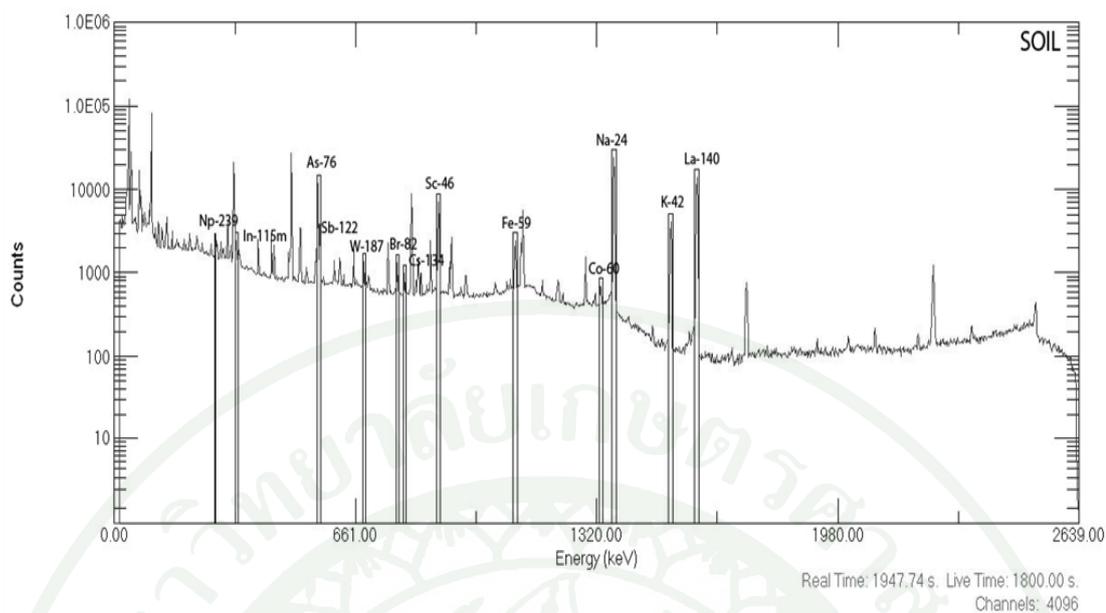
เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Yeh *et al.* (1976) ที่รายงานว่าค่าขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างข้าวเท่ากับ 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความแตกต่างกัน เพราะความเข้มข้นของนิวตรอนในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ต่างกัน ทำให้เกิดการแทรกสอดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ ส่งผลให้ปริมาณความแรงรังสีที่เกิดขึ้นในตัวอย่างไม่เท่ากัน ทำให้สัญญาณพื้นหลัง (background) มีค่าแตกต่างกัน จากงานวิจัยของ Promsawad *et al.* (2008) พบว่าเมื่อใช้เทคนิคการ

กระตุ้นด้วยนิวตรอนร่วมกับขบวนการแยกทางเคมี ในการวิเคราะห์ตัวอย่างข้าว  
ค่าขีดต่ำสุดของวิธีวิเคราะห์ จะต่ำลง เท่ากับ 6 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

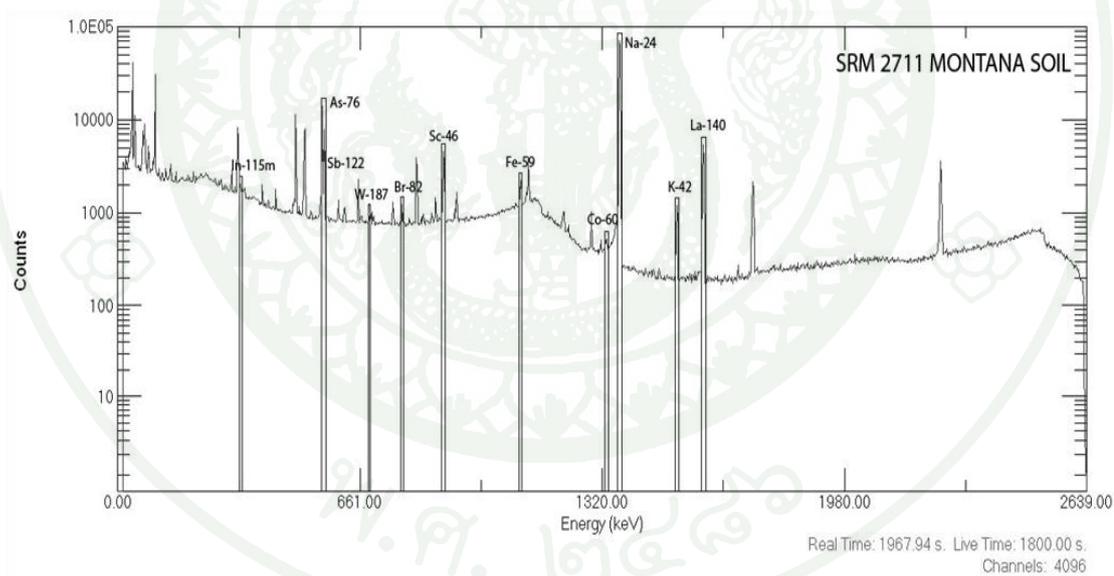
### 3.4 การใช้เทคนิคกระตุ้นด้วยนิวตรอนวิเคราะห์ตัวอย่างเชิงคุณภาพและปริมาณ

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนนั้น สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับค่าครึ่งชีวิตของธาตุ โดยแคลเซียมซึ่งเป็นธาตุเป้าหมายสำหรับการทดลองครั้งนี้ จัดเป็นธาตุที่มีครึ่งชีวิตปานกลาง ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีครึ่งชีวิตปานกลางในกลุ่มเดียวกับแคลเซียมได้ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ทำได้โดยการกระตุ้นด้วยนิวตรอนในตัวอย่างดินที่เก็บจากพื้นที่จริงและตัวอย่างต้นข้าว ตามสภาวะที่ได้จากการทดสอบสภาวะที่เหมาะสม คือการกระตุ้นด้วยนิวตรอน เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้รังสีสลายตัว เท่ากับ 3 วัน เปรียบเทียบค่าพลังงานกับค่าพลังงานจาก chart of the nuclide ของแต่ละธาตุ (ตารางที่ 3) แสดงผลในภาพที่ 20

การวิเคราะห์ตัวอย่างเชิงปริมาณ โดยการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน SRMM2711 Montana Soil แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาในภาพที่ 21 โดยที่ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องอยู่ในสภาวะเดียวกัน เช่น neutron flux เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยนิวตรอน เวลาที่ปล่อยให้สลายตัว และเวลาที่ใช้นับรังสี จากนั้นคำนวณปริมาณธาตุตามสมการ (22) แสดงผลดังตารางที่ 10



ภาพที่ 20 สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างดิน



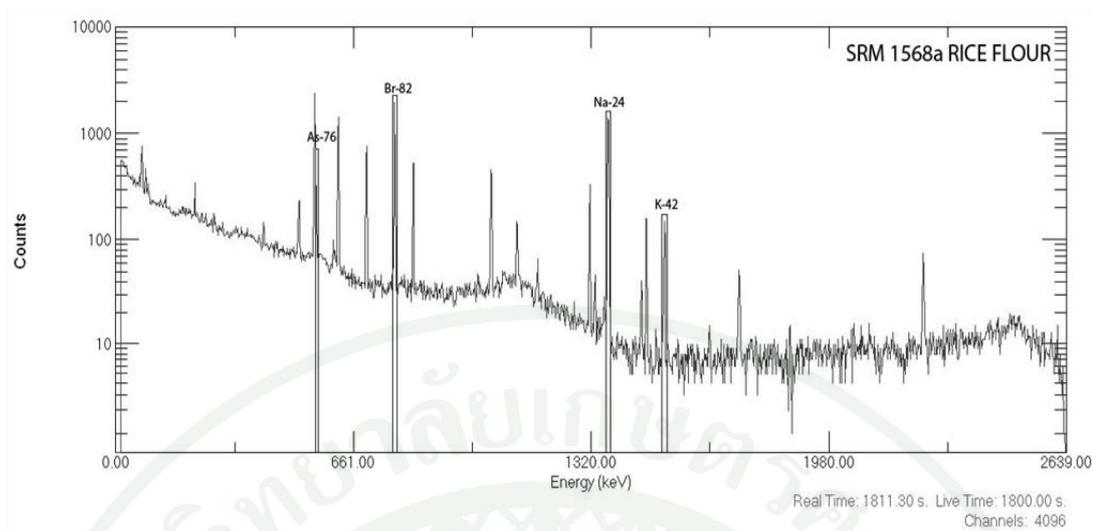
ภาพที่ 21 สเปกตรัมของรังสีแกมมาของ SRM2711 Montana Soil

ตารางที่ 10 ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างดิน (n=3)

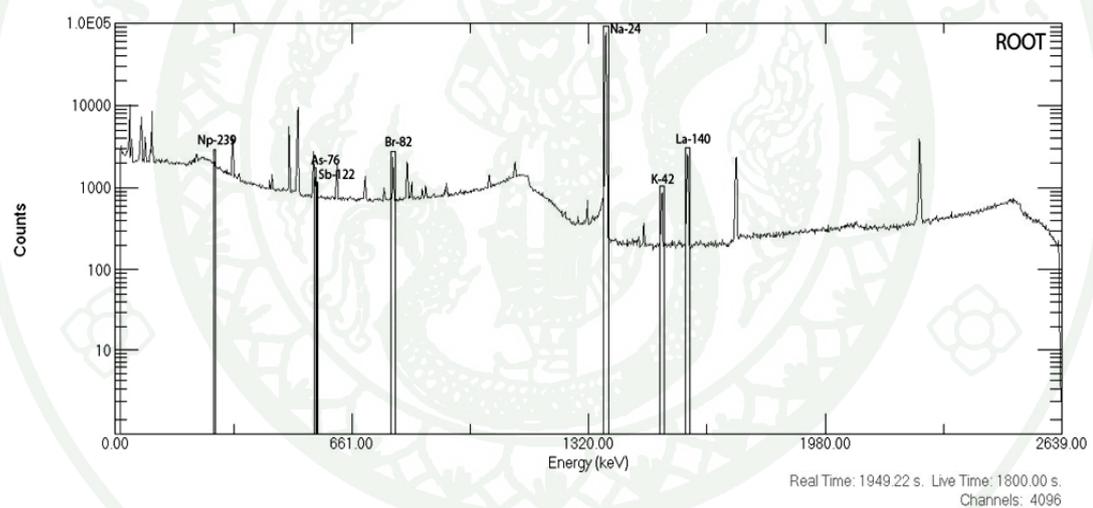
ธาตุที่พบ	ความแรงรังสี (CPS)	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
Np-239	0.83	2.91±0.77
In-115m	1.17	59.87±11.78
As-76	15.87	23.56±4.29
Sb-122	4.47	3.34±0.33
W-187	0.96	2.66±0.19
Br-82	1.08	2.20±0.22
Cs-134	0.82	8.66±0.59
Sc-46	11.59	96.73±12.40
Fe-59	3.59	2.86±0.68
Co-60	0.62	13.74±1.91
Na-24	53.04	0.06±0.01 %
K-42	9.41	1.18±0.33 %
La-140	32.86	36.76±5.06

การหาปริมาณแคดเมียมจะพิจารณาค่าพลังงาน ของธาตุอินเดียม เป็นหลัก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียสของแคดเมียม-114 เมื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอน จะกลายเป็นแคดเมียม-115 และจะสลายตัวต่อเป็น อินเดียม-115m ค่าพลังงานเท่ากับ 336.26 keV ตารางที่ 10 ตัวอย่างดิน มีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 59.87±11.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเชิงปริมาณสำหรับตัวอย่างต้นข้าว จะแบ่งออกเป็นตัวอย่าง ราก ลำต้น ใบ แกลบ และเมล็ดข้าว จะวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour สเปกตรัมของรังสีแกมมา ในสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 สเปกตรัมของรังสีแกมมาของ SRM1568a Rice Flour



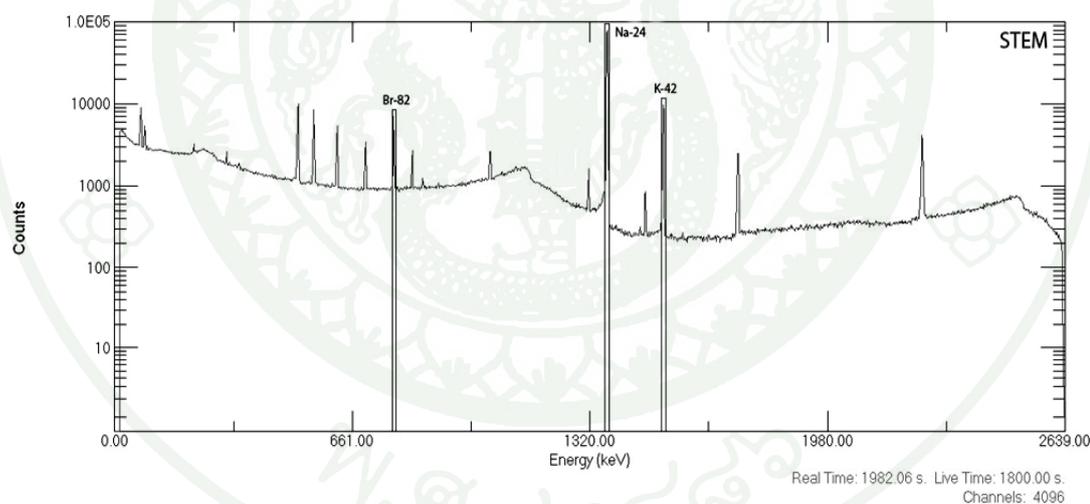
ภาพที่ 23 สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างรากข้าว

จากภาพที่ 23 สรุปรายชื่อที่พบในตัวอย่างรากข้าว ความแรงรังสี และปริมาณธาตุโดยวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour ในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างรากข้าว (n=3)

ธาตุที่พบ	ความแรงรังสี (CPS)	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
Np-239	0.67	- <sup>1/</sup>
As-76	0.71	1.25±0.13 ppm
Sb-122	0.26	- <sup>1/</sup>
Br-82	2.79	6.38±0.25 ppm
Na-24	160.77	174.22±21.69 ppm
K-42	1.60	0.32±0.05 %
La-140	5.53	- <sup>1/</sup>

หมายเหตุ -<sup>1/</sup> หมายถึง ตรวจไม่พบในสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour

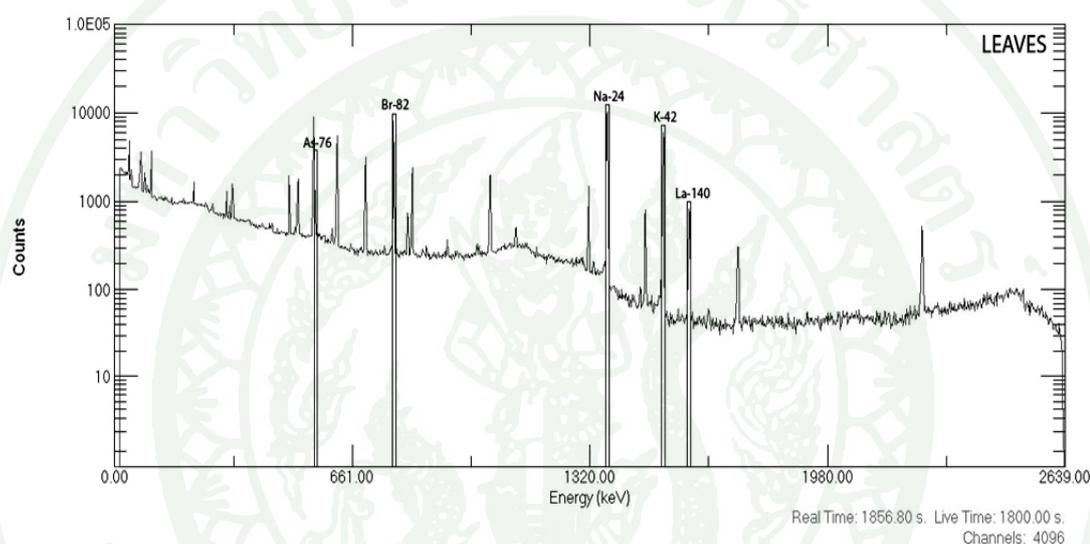


ภาพที่ 24 สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างลำต้น

จากภาพที่ 24 สรุปธาตุที่พบในตัวอย่างลำต้น ความแรงรังสี และปริมาณธาตุโดยวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างลำต้น (n=3)

ธาตุที่พบ	ความแรงรังสี (CPS)	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
Br-82	10.55	20.89±4.47
Na-24	169.48	139.12±28.82
K-42	20.59	3.09±0.57 %



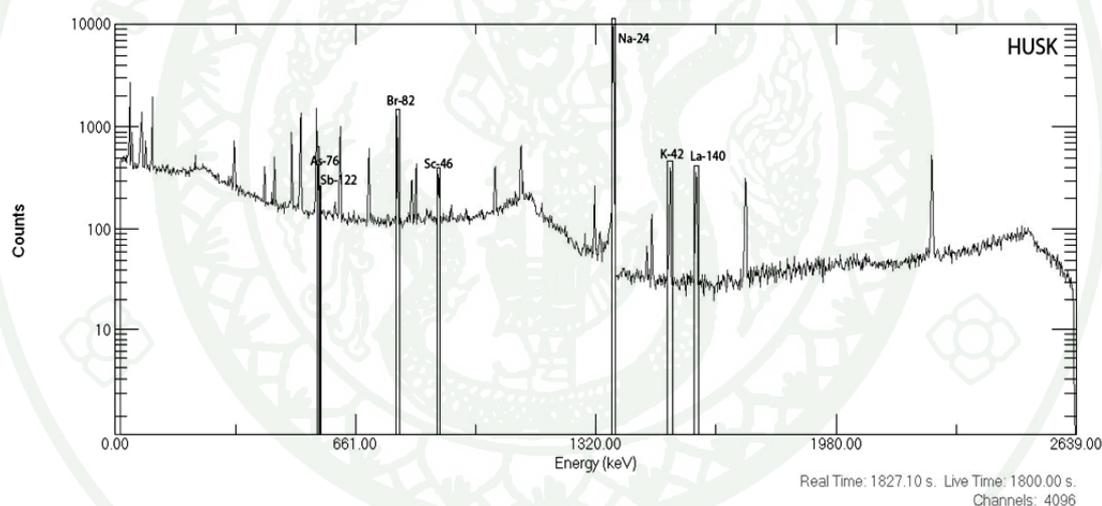
ภาพที่ 25 สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างใบ

จากภาพที่ 25 สรุปธาตุที่พบในตัวอย่างใบ ความแรงรังสี และปริมาณธาตุโดยวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างใบ (n=3)

ธาตุที่พบ	ความแรงรังสี (CPS)	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
As-76	0.41	0.07±0.08
Br-82	12.42	27.85±1.63
Na-24	21.18	22.70±2.6
K-42	12.72	2.08±0.16 %
La-140	1.74	- <sup>1/</sup>

หมายเหตุ -<sup>1/</sup> หมายถึง ตรวจไม่พบในสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour



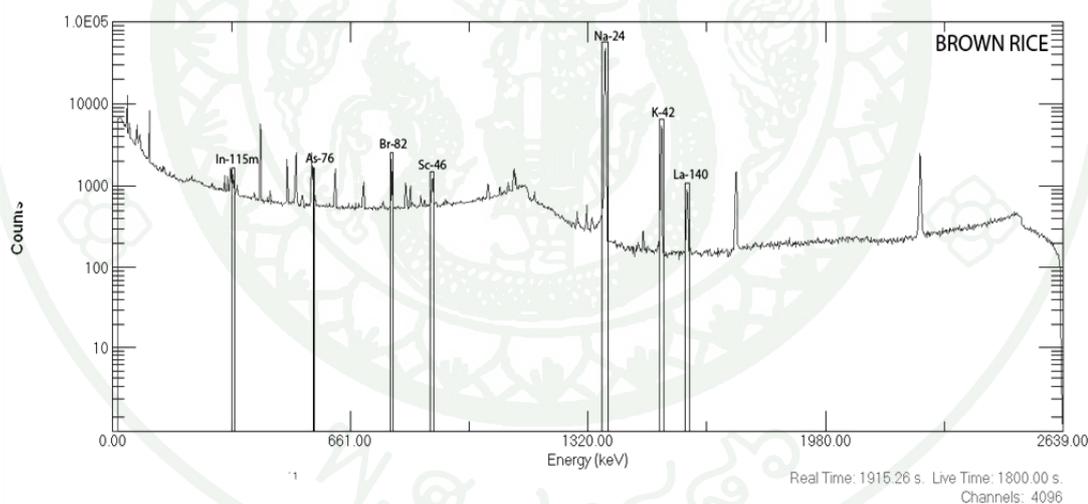
ภาพที่ 26 สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างแกลบ

จากภาพที่ 26 สรุปธาตุที่พบในตัวอย่างแกลบ ความแรงรังสี และปริมาณธาตุโดยวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างแกลบ (n=3)

ธาตุที่พบ	ความแรงรังสี (CPS)	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
As-76	0.30	0.50±0.05
Sb-122	0.12	- <sup>1/</sup>
Br-82	1.93	4.67±0.17
Sc-46	0.35	- <sup>1/</sup>
Na-24	20.89	22.10±2.2
K-42	0.79	0.17±0.04 %
La-140	0.78	- <sup>1/</sup>

หมายเหตุ -<sup>1/</sup> หมายถึง ตรวจไม่พบในสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour



ภาพที่ 27 สเปกตรัมของรังสีแกมมาในตัวอย่างเมล็ดข้าว

จากภาพที่ 27 สามารถสรุปธาตุที่พบในตัวอย่างข้าว ความแรงรังสี และปริมาณธาตุโดยวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ธาตุที่พบ ความแรงรังสี และปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างเมล็ดข้าว (n=3)

ธาตุที่พบ	ความแรงรังสี (CPS)	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
In-115m	0.06	- <sup>1/</sup>
As-76	0.07	0.18±0.03 ppm
Br-82	0.29	0.89±0.04 ppm
Sc-46	0.21	- <sup>1/</sup>
Na-24	5.37	10.08±1.7 ppm
K-42	0.49	0.22±0.02 %
La-140	0.19	- <sup>1/</sup>

หมายเหตุ <sup>1/</sup>ND หมายถึง ตรวจไม่พบในสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเชิงปริมาณสำหรับตัวอย่างต้นข้าว ได้แก่ ลำต้น ใบ แกลบ และเมล็ดข้าว พบว่า ไม่พบพืชที่แสดงค่าพลังงานของแคดเมียม ยกเว้นในตัวอย่างเมล็ดข้าวที่เก็บมาจากพื้นที่จริงที่พบพืชที่แสดงค่าพลังงานของแคดเมียม (ตารางที่ 15) แต่ตรวจไม่พบพืชที่แสดงค่าพลังงานของแคดเมียม ในสารมาตรฐาน SRM1568a Rice Flour ที่ใช้เป็นสารเปรียบเทียบ จึงไม่สามารถคำนวณปริมาณแคดเมียมที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวได้ ดังนั้นปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างต้นข้าว ได้แก่ ลำต้น ใบ แกลบ และเมล็ดข้าว จึงใช้เทคนิค ICP เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม แทนการใช้เทคนิค INAA ซึ่งปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆของต้นข้าว แสดงดังตารางที่ 16 จะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของต้นข้าว มีปริมาณที่ต่ำกว่าค่าขีดต่ำสุดของวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิค INAA ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถพบพืชที่แสดงค่าพลังงานของแคดเมียมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค INAA

#### 4. ความสามารถในการดูดใช้และสะสมแคดเมียมในต้นข้าว

จากการทดลองในกระถางพบว่า ในดินปริมาณ 1 กิโลกรัม มีปริมาณชีวมวลของข้าว และความเข้มข้นของแคดเมียม ดังแสดงในตารางที่ 16 จากนั้นสามารถคำนวณค่า transfer factor (TF) จากสมการที่ 30

$$\text{Transfer Factors (TF)} = \frac{C_{\text{plant}}}{C_{\text{soil}}} \quad (30)$$

เมื่อ  $C_{\text{plant}}$  = ความเข้มข้นของธาตุในพืช (mg/kg)  
 $C_{\text{soil}}$  = ความเข้มข้นของธาตุในดิน (mg/kg)

ตารางที่ 16 ปริมาณชีวมวล และความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างพืช (n=3)

รายการ	ตัวอย่าง				แกลบและเมล็ดข้าว
	ราก	ลำต้น	ใบ		
ความเข้มข้นแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	2.28±0.74	0.17±0.01	0.09±0.01		0.032±0.01
TF	0.18	0.01	7.15x10 <sup>-3</sup>		2.54 x10 <sup>-3</sup>

ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว พบว่าหลังการปลูกข้าว แคดเมียมในดินจะลดลงร้อยละ 34.02 กล่าวคือ ในดินก่อนการปลูกมีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 19.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หลังปลูก มีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในดินเท่ากับ 12.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคำนวณค่า พบว่า ค่า TF มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า แคดเมียมเกิดการดูดซับกับผนังเซลล์ของพืช แต่ไม่เกิดการสะสมในพืช โดยค่า TF ในราก ลำต้น ใบ แกลบและเมล็ดข้าว เท่ากับ 0.18, 0.01, 7.15x10<sup>-3</sup> และ 2.54 x10<sup>-3</sup> ตามลำดับ แสดงว่าแคดเมียมเกิดการดูดซับอยู่บริเวณผนังเซลล์ของต้นข้าว แต่ไม่เกิดการสะสมภายในเมล็ด เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Liu *et al.* (2007) ศึกษาการดูดใช้แคดเมียมในดิน โดยต้นข้าว เมื่อความเข้มข้นในดินเท่ากับ 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าค่า TF ในรากเท่ากับ 44.13 มากกว่า ในลำต้นและใบ เท่ากับ 8.05 ในเมล็ดเท่ากับ 0.32 สรุปได้ว่า แคดเมียมมีการสะสมมากในราก มากกว่าในลำต้นและใบ แต่ไม่มีการสะสมในเมล็ด ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Yap *et al.* (2009) ซึ่งทำการศึกษาการดูดใช้แคดเมียมโดยต้นข้าว เมื่อความเข้มข้นในดินเท่ากับ 0.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมจะมากที่สุดในใบและลำต้น เท่ากับ 0.203 และ 0.239 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ สำหรับกลไกที่เกิดขึ้นที่บริเวณส่วนที่เป็นราก (rhizosphere) ของต้นข้าวคือ รากข้าวจะปลดปล่อยสารอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ หรือที่เรียกว่า root exudates ซึ่ง root exudates จะแพร่ไปในดิน ค่า pH ในดินจะมีค่าลดลง สารกึ่งละลายของแคดเมียมจะเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายและการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมดีขึ้น รากข้าวสามารถดูดใช้แคดเมียมในรูปของแคดเมียมที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable) ได้มาก

(Lin *et al.*, 2003; Hu *et al.*, 2011) ปริมาณแคดเมียมจากการปลูกในกระถางกับตัวอย่างจากพื้นที่จริงมีความแตกต่างกัน สามารถเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียม ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปริมาณแคดเมียมจากการปลูกในกระถางเปรียบเทียบกับตัวอย่างจากพื้นที่จริง (n=3)

รายการ	ตัวอย่าง	ดิน	แกลบและเมล็ดข้าว	เมล็ด
ตัวอย่างจากกระถาง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		19.08±3.61	0.032±0.01	- <sup>1/</sup>
ตัวอย่างจากพื้นที่ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		59.87±11.78	4.51±0.47	1.72±0.71

หมายเหตุ <sup>1/</sup>จากการปลูกในกระถางทำให้ได้เมล็ดข้าวมีลักษณะไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ไม่สามารถแยกแกลบออกจากเมล็ดข้าวเพื่อการวิเคราะห์ได้

จากตารางที่ 16 และ 17 สามารถสรุปได้ว่าแคดเมียมในดินจะถูกดูดซับโดยพืช โดยมีการสะสมมากที่สุดที่ราก ลำต้น ใบ แกลบและเมล็ด ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าการสะสมของแคดเมียมในตัวอย่างเมล็ดส่วนที่นำมาบริโภคแบบไม่ขัดสี ที่เก็บจากพื้นที่จริง เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานความปลอดภัย พบว่าการสะสมแคดเมียมในเมล็ดนั้น มีค่าเกินกว่ามาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (CCFAC, 2005)

## 5. การประเมินความเสี่ยงสุขภาพมนุษย์จากการบริโภค

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการประเมินความเสี่ยงสุขภาพมนุษย์จากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่ง ปริมาณที่ได้รับแคดเมียมจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนสามารถคำนวณจากสมการ (26) จากการศึกษาของ Zhuang *et al.* (2009) อัตราการบริโภคข้าวต่อคน เท่ากับ 372 กรัมต่อวัน โดยน้ำหนักตัวเฉลี่ยของคนไทยมีค่าเท่ากับ ผู้ชายเท่ากับ 68.9 กิโลกรัม ผู้หญิงเท่ากับ 57.4 กิโลกรัม (National Electronics and Computer Technology Center [NECTEC], 2554) อายุเฉลี่ยของคนไทย สำหรับผู้ชาย เท่ากับ 63.5 ปี และผู้หญิงเท่ากับ 76.3 ปี (ชันทฤทัย, 2554) โดยกำหนดให้สัดส่วนการบริโภคข้าวที่ปลูกจากแหล่งปนเปื้อน เท่ากับ 100% ปริมาณที่ได้รับจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อน แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ปริมาณที่ได้รับจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อน

รายการ	ชาย	หญิง	ค่ามาตรฐาน
ปริมาณที่ได้รับจากการบริโภค (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว-วัน)	9.29	11.15	
ปริมาณที่ได้รับจากการบริโภค (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว-สัปดาห์)	65.03	78.05	
tolerable weekly intake, TWI (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว)		-	2.5 <sup>1/</sup>
ปริมาณที่ได้รับจากการบริโภคต่อเดือน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว)	278.8	334.5	
provisional tolerable monthly intake, PTMI (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว)		-	25 <sup>2/</sup>

หมายเหตุ <sup>1/</sup> European Commission

<sup>2/</sup> The Joint Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) /World Health Organization (WHO)

ที่มา: EFSA (2011)

จากตารางที่ 18 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแคดเมียมที่ได้รับจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนต่อสัปดาห์ และปริมาณแคดเมียมที่ได้รับจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนต่อเดือน มีค่าเกินปริมาณบริโภคสูงสุดตามกำหนดของ ประชาคมยุโรปและองค์การอนามัยโลก เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Simmons *et al.* (2005) ได้ทำการประเมินปริมาณแคดเมียมที่ได้รับจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อน บริเวณ อ.แม่สอด จ.ตาก พบว่ามีปริมาณเท่ากับ 20 -82 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมแคดเมียมต่อสัปดาห์ ซึ่งก็พบว่ามีค่าเกินมาตรฐานเช่นเดียวกัน

### 5.1 สัดส่วนความเป็นอันตราย (target hazard quotient, THQ)

การหาค่า THQ หาได้จากค่าขนาดอ้างอิงของสารจากการบริโภค ตามสมการ (27) ซึ่งค่าตัวแปรที่ใช้ แสดงตามตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสัดส่วนความเป็นอันตราย

สัญลักษณ์	ความหมาย	ข้อมูล	แหล่งอ้างอิง
EFr	ความถี่การรับสัมผัส (วันต่อปี)	365	Zhuang <i>et al.</i> (2009)
ED	ช่วงเวลารับสัมผัส (ปี)	70	Zhuang <i>et al.</i> (2009)
FI	ปริมาณการบริโภค (กรัมต่อคนต่อวัน)	372	Zhuang <i>et al.</i> (2009)
MC	ความเข้มข้นในอาหาร (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	1.72	ข้อมูลจากการทดลอง
RfD <sub>o</sub>	Reference Dose (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)	$1.00 \times 10^{-3}$	Zhuang <i>et al.</i> (2009)
BW	น้ำหนักร่างกาย (กิโลกรัม)	68.9 (ชาย) 57.4 (หญิง)	NECTEC, 2554
AT	ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส (วัน, 365 วันต่อปี x 70 ปี)	25550	Zhuang <i>et al.</i> (2009)

ค่า THQ ที่จัดว่ามีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคมีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่ ค่า THQ มากกว่า 10 จะต้องมีการเฝ้าระวังการเกิดพิษต่อผู้บริโภค (U.S. EPA, 2006) จากตารางที่ 19 ค่าสัดส่วนความเป็นอันตราย (THQ) จากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม เท่ากับ 9.29 สำหรับผู้ชาย และ 11.15 สำหรับผู้หญิง

แคดเมียมจัดอยู่ในสารก่อมะเร็งประเภท B1 ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะก่อมะเร็งในมนุษย์ ดังนั้นในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพมนุษย์จึงต้องมีการประเมินค่าความเสี่ยงการเกิดมะเร็ง จากสมการ (28) พบว่ามีค่าเท่ากับ  $2.98 \times 10^{-3}$  สำหรับผู้ชาย และ  $3.57 \times 10^{-3}$  สำหรับผู้หญิง หรือ ผู้ที่บริโภคข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียม มีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง 3 คน สำหรับผู้ชาย และ 4 คนสำหรับผู้หญิง ต่อผู้บริโภค 1000 คน การพิจารณาความเสี่ยงกรณีสารก่อมะเร็งค่าความเสี่ยงที่อยู่ในระดับยอมรับได้ ตามมาตรฐานของ Colorado Department of Public Health and Environment (CDPHE) เท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  และมาตรฐานของ U.S. EPA มีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-4}$  ถึง  $1 \times 10^{-6}$  ดังนั้นการประเมินค่าความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งสำหรับงานวิจัยครั้งนี้จึงมีค่าเกินมาตรฐาน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษา การประเมินการดูดใช้แคดเมียมในผลผลิตข้าวระหว่างการปลูกโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน สามารถสรุปผลการทดลองที่สำคัญได้ดังนี้

1. การใช้เทคนิควิเคราะห์แบบ Neutron Activation Analysis (NAA) สำหรับการวิเคราะห์แคดเมียม ในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม สำหรับตัวอย่างดินและข้าว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ การกระตุ้นด้วยนิวตรอนที่ตำแหน่งอุปกรณ์ภายนอกแกนปัจจุบันของเครื่องปว.-1/1 ความเข้มข้นของนิวตรอนประมาณ  $4.47 \times 10^{11}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้รังสีสลายตัวเท่ากับ 3 วัน จากนั้นทำการทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ กับ สารมาตรฐาน SRM2711 Montana Soil พบว่ามีค่า relative error เท่ากับ 1% ค่าความแม่นยำเท่ากับ 1%RSD และค่าความเป็นเส้นตรง ในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 1 – 9 ไมโครกรัม ให้ค่า correlation coefficient เท่ากับ 0.997 โดยมีค่าขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (detection limit) สำหรับตัวอย่างดิน เท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2. แคดเมียมในดินถูกดูดใช้โดยพืช และมีการสะสมมากที่สุดในราก ลำต้น ใบ แกลบและเมล็ด ค่า TF เท่ากับ 0.18, 0.01,  $7.15 \times 10^{-3}$  และ  $2.54 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าการสะสมของแคดเมียมในตัวอย่างเมล็ดที่นำมาบริโภคแบบไม่ขัดสี เกือบตัวอย่างจากพื้นที่จริง เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานความปลอดภัย พบว่าการสะสมแคดเมียมในเมล็ดนั้น พบว่ามีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการบริโภค ที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3. ปริมาณแคดเมียมที่ได้รับจากการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนต่อสัปดาห์ และต่อเดือน มีค่าเกินปริมาณบริโภคสูงสุด เมื่อคำนวณค่าสัดส่วนความเป็นอันตราย (THQ) พบว่าการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม จะต้องมีการเฝ้าระวังการเกิดพิษต่อผู้บริโภค และการประเมินค่าความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งมีค่าเท่ากับ  $2.98 \times 10^{-3}$  สำหรับผู้ชาย และ  $3.57 \times 10^{-3}$  สำหรับผู้หญิง หรือผู้ที่บริโภคข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียม มีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง 3 คน สำหรับผู้ชาย และ 4 คน สำหรับผู้หญิง ต่อผู้บริโภค 1000 คน การพิจารณาความเสี่ยงกรณีสารก่อมะเร็งค่าความเสี่ยงมีค่าสูงเกินกว่าระดับยอมรับได้ ตามมาตรฐานของ U.S. EPA มีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-4}$  ถึง  $1 \times 10^{-6}$  หรือ เท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  (Colorado Department of Public Health and Environment [CDPHE], n.d.)

### ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองจะเห็นว่า ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวสะสมเกินกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ใช้ตัวอย่างข้าวที่ยังไม่ผ่านการขัดสี ดังนั้นการลดความเสี่ยงสำหรับการบริโภคข้าวที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนอีกทางหนึ่งนั่นคือ เลือกบริโภคข้าวที่มีการขัดสี หรือเลือกที่จะบริโภคข้าวที่มาจากแหล่งผลิตที่ไม่มีการปนเปื้อน

เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม และสามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุ ในครั้งเดียวกัน โดยใช้ปริมาณตัวอย่างในการวิเคราะห์ที่น้อย ดังนั้นจึงควรมีการขยายการศึกษา ไปยังพื้นที่ปนเปื้อนอื่น ๆ หรือใช้ประโยชน์ในเชิงคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร



- \_\_\_\_\_, สุรสิทธิ์ อรรถจารุ และ สุรทิน แก้วโรจน์. 2543. การดูดซับแคดเมียมในดิน.  
วารสารดินและปุ๋ย 22: 163 – 173.
- \_\_\_\_\_, Robert Simmons, วนิตา โนบรรเทา และ สุรทิน แก้วโรจน์. 2546. ความเข้มข้นของ  
สังกะสี เหล็ก และแคดเมียมในข้าว และถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มีสังกะสีและแคดเมียมสูง.  
วารสารดินและปุ๋ย 25: 86-102.
- รุจ เกษตรสุวรรณ. 2552. ปริมาณสังกะสีและแคดเมียมในดินที่ใช้ปลูกข้าว และในเมล็ดข้าว  
แสดงถึงภาวะโภชนาการของประชากร อำเภอเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิลาวัลย์ พงษ์พิทักษ์. 2544. การทดสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบและการประยุกต์ใช้เทคนิคทาง  
สถิติ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.
- ศักดิ์สิรินทร์ ชีรพันธุ์เสถียร. 2537. แคดเมียมและสังกะสีในน้ำ ตะกอนและหอยกาบ *Hyriopsis*  
*myeriana* ของแม่น้ำปิง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). ม.ป.ป. อุปกรณ์อาบรังสีนิวตรอนของ  
เครื่องปว.-1/1. แหล่งที่มา: [http://www.tint.or.th/reactor/irradiation\\_facility.html](http://www.tint.or.th/reactor/irradiation_facility.html),  
17 กันยายน 2554.
- สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ม.ป.ป. การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน. แหล่งที่มา  
<http://www.nst.or.th>, 16 พ.ค. 2553.
- สรัดนา เสนาะ. 2548. การดูดตั้งธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดิน  
ปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย  
พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานดินค้า. กรุงเทพฯ.

อนามัย เทศกะทีก. 2552. การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

เอิบ เขียววีร์นรมณ์. 2533. ดินของประเทศไทย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Africarice. 2009. **Knowing the rice plant** Available Source:

<http://www.africarice.org/publications/PLAR/techmanual/reference8.pdf>,  
September 17, 2011.

Alloway, B.J. 1995. **Heavy metals in soils**. 2<sup>th</sup> ed. Chapman&Hall, Great Britain.

Avino, P., G. Capannesi and A. Rosada. 2008. Ultra-trace nutritional and toxicological elements in Rome and Florence drinking waters determined by Instrumental Neutron Activation Analysis. **Microchemical Journal** 97(2): 144-153.

Carpi, A. 2011. **Nuclear Chemistry**. Available Source:

[http://www.visionlearning.com/library/module\\_viewer.php?mid=59](http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=59), September 17, 2011.

Chemtrec. 2010. **Material Safety Data Sheet Cadmium MSDS**. Available Source:

<http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9923223>, September 17, 2011.

Chen, Z.S. 1992. Metal contamination of flooded soils, rice plants and surface water in Asia, pp. 85 – 109, *In* D.C. Adriano, ed. **Biogeochemistry of Trace Metals**, Lewis Publ., London.

Christoferfersson, J.O., H. Welinder, G. Spang, S. Mattson and S. Skerfving. 1987. Cadmiun Concentration in the kidney Cortex of Occupationally Exposed Workers Measured in Vivo Using X-Ray Fluorescence Analysis. **Environmental Research** 42: 489-499.

Codex Committee on Food Additives and Contaminants. 2005. **37<sup>th</sup> Session , The Netherlands, April, 2005 Request CL 2004/27-FAC.**

Colorado Department of Public Health and Environment (CDPHE). n.d. **Risk**

**Characterization** Available Source:

<http://www.cdphe.state.co.us/hm/pcd/mphra/chap7.pdf>,  
September 17,2011.

European Food Safety Authority(EFSA). 2011 .Statement on tolerable weekly intake for cadmium. **EFSA Journal** 9(2): 1-19.

Fox, M.R.S., S.H. Tao, C.L. Stone and B.E. Fry. 1984. Effects of zinc, iron and copper deficiencies on cadmium in tissue of Japanese quail. **Environmental Health Prospect** 54: 57- 65

Gilmore, G. and D.J. Hammingway. 1995. **Practical Gamma-Ray Spectrometry**. John Wiley&Sons, Chichester.

Gluscock, M.D. **Overview of Neutron Activation Analysis**. Available Source:  
[http://archaeometry.missouri.edu/naa\\_overview.html](http://archaeometry.missouri.edu/naa_overview.html), September 17, 2011.

Hamidpour, M., K. Mahmoud, A. Majid, S. Hossein, E.H. Peter, and C. Hans, 2010. Sorption hysteresis of Cd(II) and Pb(II) on natural zeolite and bentonite. **Journal of Hazardous Material** 181:686-691.

Hu, L., M. B. McBride, H. Cheng, J. Wu, J. Shi, J. Xu and L. Wu. 2011. Root-induced changes to cadmium speciation in the rhizosphere of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. **Environmental Research** 111: 356-361.

- Kulkarni, S. D., R. Acharya, A. G. C. Nair, N. S. Rajurkar and A. V. R. Reddy. 2006. Determination of Elemental Concentration Profiles in tender Wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) Using Instrumental Neutron Activation Analysis. **Food Chemistry** 95(4): 699-707.
- Lin, Q., Y.X. Chen, H.M. Chen, Y.L. Yu, Y.M. Luo and M.H. Wong. 2003. Chemical behavior of Cd in rice rhizosphere. **Chemosphere** 50: 755-761.
- Liu, W.X., L.F. Shen, J.W. Liu, Y.W. Wang and S.R. Li. 2007. Uptake of toxic heavy metals by rice (*Oryza sativa* L.) cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou city, People's Republic of China. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology** 79: 209-213
- Ministry of agricultural and forestry. 2000. **Cadmium in fertilizer risk to human health and environment** Available Source: [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/reports/finland\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/reports/finland_en.pdf), September 17, 2011.
- Mohammed, N.K. and N.M. Spyrou. 2009. Trace elemental analysis of rice grown in two regions of Tanzania. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry** 281:79-82.
- National Electronics and Computer Technology Center [NECTEC]. **มาตรฐาน SizeThai** Available Source: <http://www.sizethailand.org>, September 17, 2011.
- Oehme F.W. 1987. **Toxicity of heavy metals in the environment**. Mercel Dekker, Inc., New York.
- Pedersen, B. and B.O. Eggum. 1983. The influence of milling on the nutritive value of flour cereal grains. IV. Rice. **Qual. Plant Foods Hum. Nutr.** 33:267 – 278.

- Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment. 2004.  
**Summary of Environment samplings in Mae Sot after cadmium contamination.**  
 Pollution Control Department, Bangkok.
- Promsawad, A., A. Kongsakphaisal and S. Laoharojanaphand. 2008. Determination of Cadmium in rice by radiochemical neutron activation analysis. **KMITL Science Journal** (8):12-17.
- Romkens P.F.A.M., H.Y. Guo , C.L.Chu ,T.S. Liu ,C.F. Chiang and G.F. Koopmans .2009. Prediction of Cadmium uptake by brown rice and derivation of soil – plant transfer models to improve soil protection guidelines. **Environmental Pollution** 157 : 2435-2444.
- Sato, M. and Y. Takizawa. 1982. Cadmium-binding proteins in human organs. **Toxicology Letters** 11: 259-273.
- Simmons, R.W., P. Pongsakul, D. Saiyasitpanich and S. Klinphoklap. 2005. Elevated levels of cadmium and zinc in paddy soils and elevated levels of cadmium in rice grain downstream of a zinc mineralized area in Thailand: Implication for public health. **Environmental Geochemistry and health** 27:501-511.
- Smolders, E. 2001. Cadmium uptake by plants. **International Journal of occupational Medicine and Environmental Health** 14(2):177 – 183.
- Torra M., J. To-Figueras, M. Rodamilans, M. Brunet and J. Corbella. 1995. Cadmium and zinc relationships in the liver and kidney of humans exposed to environmental cadmium. **The Science of the Total Environment** 170: 53-57.
- The Risk Assessment Information System cadmium. 2009. **Toxicity profile**. Available Source: [http://rais.ornl.gov/tox/profiles/Cadmium\\_ragsa.html](http://rais.ornl.gov/tox/profiles/Cadmium_ragsa.html), September 17, 2011.

Tsukada, H., A. Takeda, H. Hasegawa, S. Ueda and T. Iyogi. 2005. Comparison of NAA and ICP-MS for the determination of major and trace elements in environmental sample. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry** 263(3): 773-778.

United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 1989.

**Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A)** Available Source: <http://www.epa.gov>, September 17, 2011.

\_\_\_\_\_, 1990. **National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan. Final Rule. 40 CFR 300: 55 Federal Register, 8666-8865** Available Source: <http://www.epa.gov>, September 17, 2011.

\_\_\_\_\_, 1994. **Integrated risk information system.** Available Source: <http://www.epa.gov/iris/subst/0141.htm>, September 17, 2011.

\_\_\_\_\_, 2006. **USEPA region III risk-based concentration table: technical background information.** Available Source: <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rbc/rbc1006.pdf>, September 17, 2011.

Vivek, S. and A.N. Garg. 2006. Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetable and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake. **Food chemistry** 94: 81-89.

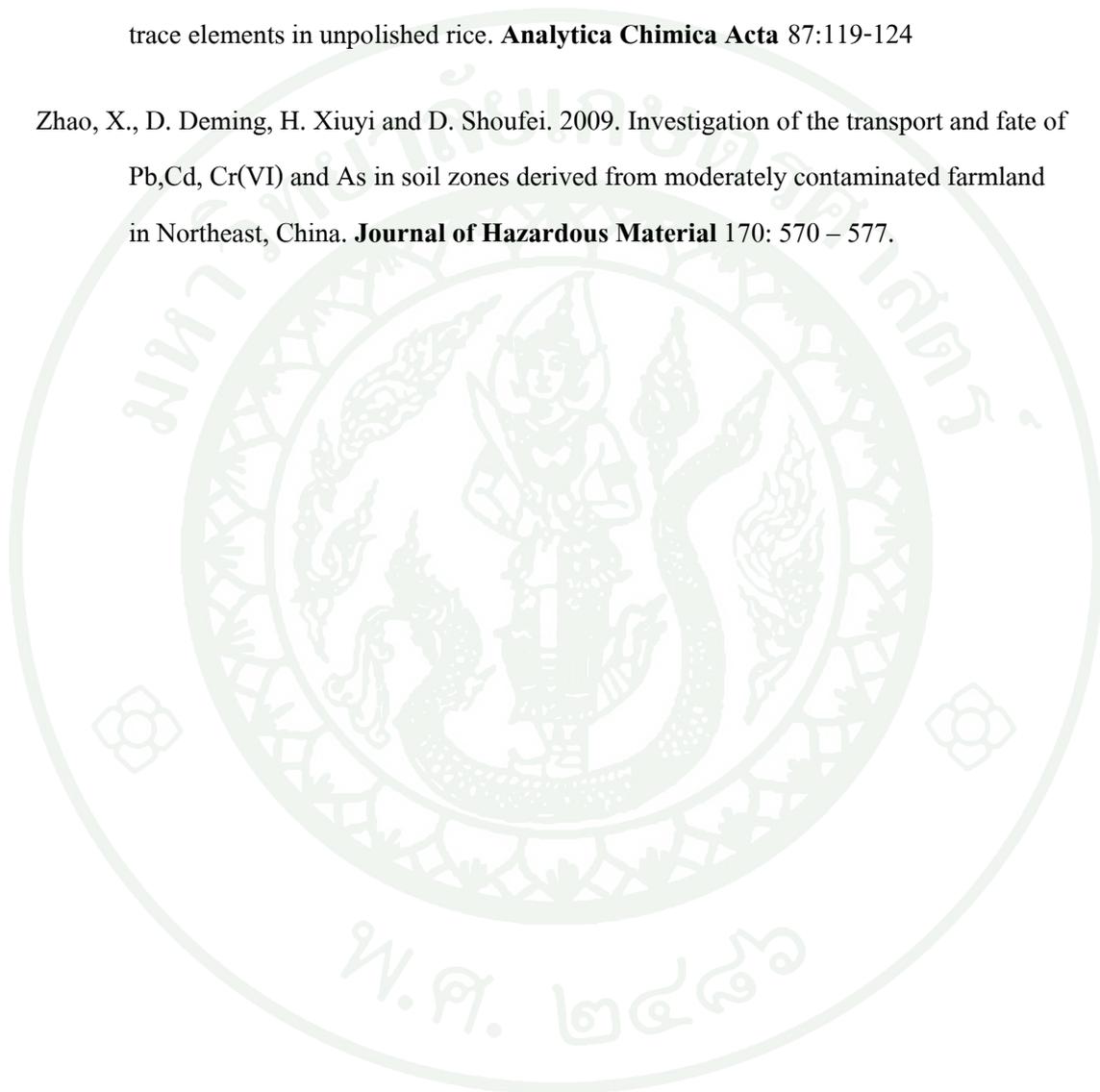
Walker, F.W., J.R. Parrington and F. Feiner. 1988. **Chart of the nuclides.** Knolls Atomic power Laboratory, Naval Reactors, United States.

Wong, J.W.C., K.L. Li, L.X. Zhou and A. Seelvam. 2007 . The Sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge. **Geoderma** 137:310-317.

Yap, D.W.,J. Adezrion, J. Khairiah, B.S. Ismil and R. Ahmad-Mahir.2009. The uptake of heavy metals by paddy plans (*Oryza sativa*) in Kota Marudu, Sabah, Malasia. **American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences** 6(1):16-19.

Yeh, S. J., P. Y. Chen, C. N. Ke, S. T. Hsu and S. Tanaka.1976. Neutron Activation Analysis for trace elements in unpolished rice. **Analytica Chimica Acta** 87:119-124

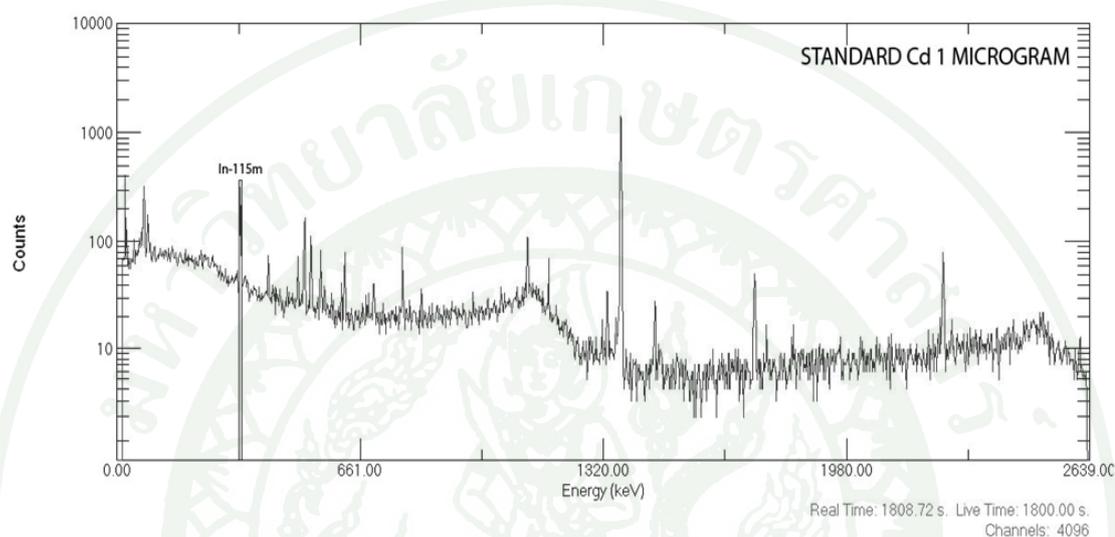
Zhao, X., D. Deming, H. Xiuyi and D. Shoufei. 2009. Investigation of the transport and fate of Pb,Cd, Cr(VI) and As in soil zones derived from moderately contaminated farmland in Northeast, China. **Journal of Hazardous Material** 170: 570 – 577.







สเปกตรัมของรังสีแกมมาของสารมาตรฐาน หลังการกระตุ้นด้วยนิวตรอนที่ตำแหน่งอุปกรณ์ภายนอกแกนปัจจุบันของเครื่องปว.-1/1 ที่ตำแหน่ง Rotary Specimen Rack (Lazy Susan) ความเข้มข้นของนิวตรอนประมาณ  $4.47 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้รังสีสลายตัว เท่ากับ 3 วัน ใช้ระยะเวลาการนับรังสีเท่ากับ 1800 วินาที



ภาพผนวกที่ ก1 สเปกตรัมของรังสีแกมมาของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 1 ไมโครกรัม



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณธาตุโดยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

การคำนวณหาปริมาณธาตุในตัวอย่าง จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบกัน โดยที่สารตัวอย่างและสารมาตรฐาน จะต้องมียอดประกอบเหมือนกันหรือคล้ายคลึงกันที่สุดทั้งทางกายภาพและทางเคมี และทำให้อยู่ในสถานะเดียวกัน จากนั้นแทนค่าลงในสูตร

$$W_{\text{sample}} = W_{\text{std}} \times \frac{M_{\text{std}} \times \text{Peak}_{\text{sample}}}{M_{\text{sample}} \times \text{Peak}_{\text{std}}}$$

เมื่อ	$W_{\text{sample}}$	=	ปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง
	$W_{\text{std}}$	=	ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน
	$\text{Peak}_{\text{sample}}$	=	ค่าไฟโตพีคจากการนับรังสีของสารตัวอย่าง
	$\text{Peak}_{\text{std}}$	=	ค่าไฟโตพีคจากการนับรังสีของสารมาตรฐาน
	$M_{\text{sample}}$	=	น้ำหนักสารตัวอย่าง
	$M_{\text{std}}$	=	น้ำหนักสารมาตรฐาน

ในการทดลองหาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างชนิดหนึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

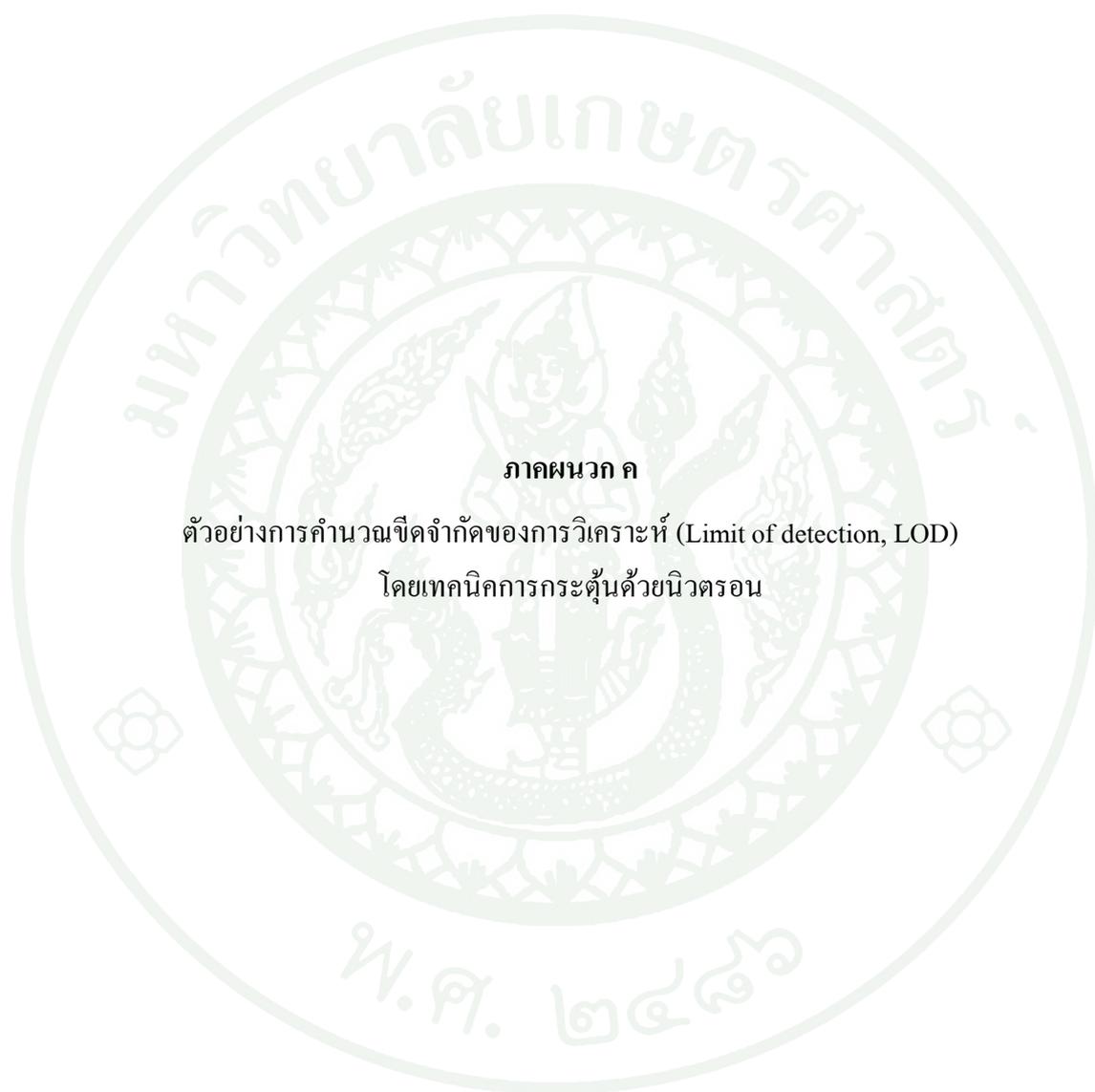
น้ำหนักสารตัวอย่าง	เท่ากับ	0.0569 กรัม
น้ำหนักสารมาตรฐานอ้างอิง(SRM2711 Montana Soil)	เท่ากับ	0.0432 กรัม
ความเข้มข้นแคดเมียมในสารมาตรฐานอ้างอิง	เท่ากับ	41.7 ไมโครกรัม/กรัม
พื้นที่ใต้พีคสารตัวอย่าง	เท่ากับ	1654
พื้นที่ใต้พีคสารมาตรฐานอ้างอิง	เท่ากับ	1133

คำนวณปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างได้ดังนี้

$$W_{\text{sample}} = 41.7 \times \frac{0.0432 \times 1654}{0.0569 \times 1133}$$

$$W_{\text{sample}} = 46.22$$

ดังนั้นความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างนี้เท่ากับ 46.22 ไมโครกรัมต่อกรัม

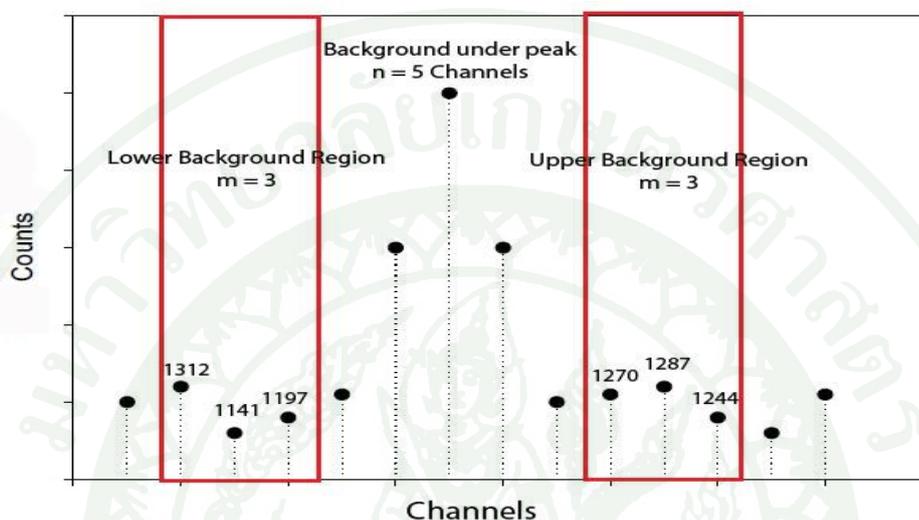


**ภาคผนวก ค**

ตัวอย่างการคำนวณขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Limit of detection, LOD)

โดยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอน

การหาขีดจำกัดของวิธีวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างหนึ่ง พบว่าได้ผลการทดลอง แสดงดังภาพผนวกที่ ค1 โดยค่า B1+B2 เท่ากับ 7451 และการศึกษาค้างนี้ได้เตรียมสารละลาย มาตรฐานแคดเมียม 3 ไมโครกรัม ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับสารตัวอย่างได้พื้นที่ พีค เท่ากับ 1077



ภาพผนวกที่ ค1 การหาขีดจำกัดของวิธีวิเคราะห์

คำนวณขีดจำกัดของวิธีวิเคราะห์โดยนำค่าที่ได้มาเทียบกับพื้นที่ได้พีคของสารมาตรฐาน

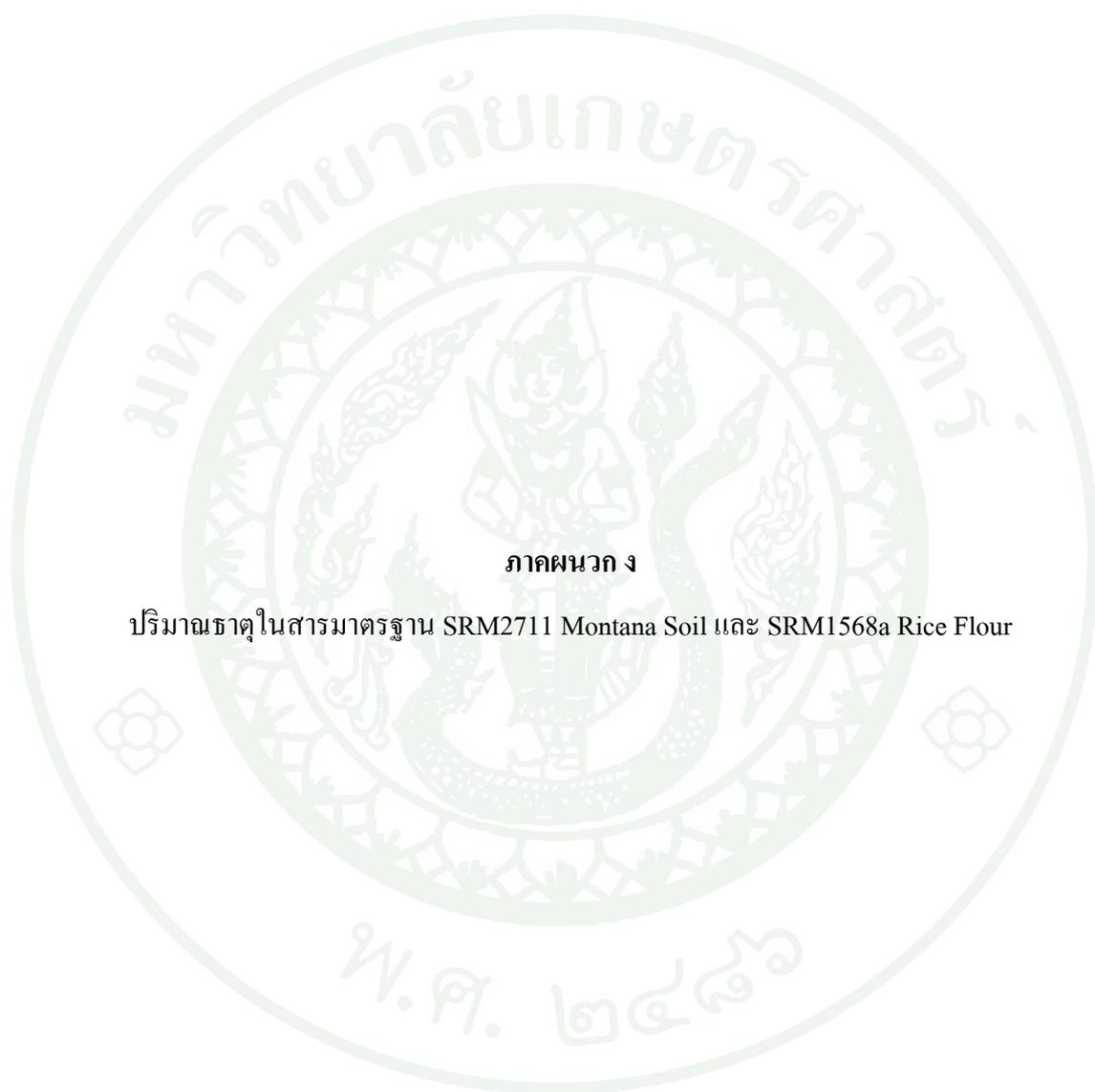
$$B = \frac{(B1 + B2)n}{2m}$$

$$B = \frac{7541 \times 5}{2 \times 3} = 6209.17$$

$$LOD = 2.71 + 3.29 \sqrt{6209.17 \left(1 + \frac{5}{2 \times 3}\right)} = 353.73$$

พื้นที่ได้พีคของแคดเมียมเท่ากับ 1077 มีแคดเมียมเท่ากับ 3 ไมโครกรัม  
 ถ้าพื้นที่ได้พีคของแคดเมียมเท่ากับ 353.73 มีแคดเมียมเท่ากับ  $3 \times 353.73 / 1077$  ไมโครกรัม  
 $= 0.98$  ไมโครกรัม

ดังนั้นค่าขีดจำกัดของวิธีวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างนี้เท่ากับ 0.98 ไมโครกรัม



**ภาคผนวก ง**

ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน SRM2711 Montana Soil และ SRM1568a Rice Flour



National Institute of Standards & Technology

## Certificate of Analysis

Standard Reference Material<sup>®</sup> 2711

Montana Soil

Moderately Elevated Trace Element Concentrations

Table 1. Certified Values

Element	Mass Fraction (%)	Element	Mass Fraction (µg/g)
Aluminum	6.53 ± 0.09	Antimony	19.4 ± 1.8
Calcium	2.88 ± 0.08	Arsenic	105 ± 8
Iron	2.89 ± 0.06	Barium	726 ± 38
Magnesium	1.05 ± 0.03	Cadmium	41.70 ± 0.25
Phosphorus	0.086 ± 0.007	Copper	114 ± 2
Potassium	2.45 ± 0.08	Lead	1162 ± 31
Silicon	30.44 ± 0.19	Manganese	638 ± 28
Sodium	1.14 ± 0.03	Mercury	6.25 ± 0.19
Sulfur	0.042 ± 0.001	Nickel	20.6 ± 1.1
Titanium	0.306 ± 0.023	Selenium	1.52 ± 0.14
		Silver	4.63 ± 0.39
		Strontium	245.3 ± 0.7
		Thallium	2.47 ± 0.15
		Vanadium	81.6 ± 2.9
		Zinc	350.4 ± 4.8

**Noncertified Values:** Noncertified values, shown below, are provided for information only. An element concentration value may not be certified, if a bias is suspected in one or more of the methods used for certification, or if two independent methods are not available.

Table 2. Noncertified Values

Element	Mass Fraction (%)	Element	Mass Fraction (µg/g)
Carbon	2	Bromine	5
		Cerium	69
		Cesium	6.1
		Chromium	47
		Cobalt	10
		Dysprosium	5.6
		Europium	1.1
		Gallium	15
		Gold	.03
		Hafnium	7.3
		Holmium	1
		Indium	1.1
		Iodine	3
		Lanthanum	40
		Molybdenum	1.6
		Neodymium	31
		Rubidium	110
		Samarium	5.9
		Scandium	9
		Thorium	14
		Tungsten	3
		Uranium	2.6
		Ytterbium	2.7
		Yttrium	25
		Zirconium	230



## National Institute of Standards &amp; Technology

## Certificate of Analysis

## Standard Reference Material® 1568a

## Rice Flour

Table 1. Certified Mass Fractions ( $w_B$ )

## Minor Elements

Element	$w_B$ (in %)
Calcium	0.0118 ± 0.0006
Magnesium	0.056 ± 0.002
Phosphorus	0.153 ± 0.008
Potassium	0.1280 ± 0.0008
Sulfur	0.120 ± 0.002

## Trace Elements

Element	$w_B$ (in mg/kg)	Element	$w_B$ (in mg/kg)
Aluminum	4.4 ± 1.0	Mercury	0.0058 ± 0.0005
Arsenic	0.29 ± 0.03	Molybdenum	1.46 ± 0.08
Cadmium	0.022 ± 0.002	Rubidium	6.14 ± 0.09
Copper	2.4 ± 0.3	Selenium	0.38 ± 0.04
Iron	7.4 ± 0.9	Sodium	6.6 ± 0.8
Manganese	20.0 ± 1.6	Zinc	19.4 ± 0.5

Table 2. Noncertified Mass Fractions ( $w_B$ )

## Trace Elements

Element	$w_B$ (in mg/kg)	Element	$w_B$ (in mg/kg)
Antimony	0.0005	Lead	<0.010
Bromine	8	Tin	0.0047
Chlorine	300	Tungsten	0.0012
Cobalt	0.018	Uranium	0.0003
Iodine	0.009	Vanadium	0.007

The values shown in this table are not certified because they are not based on the results of either two or more independent reliable methods or a definitive method of known high accuracy. These values are included for information only and therefore no uncertainty limits are provided.

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวปภามณูษ์ ชีประเสริฐ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	31 ตุลาคม 2529
สถานที่เกิด	สมุทรปราการ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนโครงการส่งเสริม การวิจัยร่วมแบบทวิภาคี (Bilateral Research Cooperation) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุนบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2552) โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัย และพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พ.ศ. 2552)