



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

ภาควิชา

เรื่อง การดูดซึมและกระจายซีเซียม-134 ในแฝก 2 แหล่งพันธุ์

Absorption and Distribution of Cs-134 in Two Vetiver Ecotypes

นามผู้วิจัย นางธัญรัศม์ อัครวุฒิชยานนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ศาสตราจารย์นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

สิขสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซึมและกระจายซีเซียม-134 ในแฝก 2 แหล่งพันธุ์

Absorption and Distribution of Cs-134 in Two Vetiver Ecotypes

โดย

นางรัชฎีรัมย์ อัครวุฒิชยานนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชัยวัฒน์ อัครวุฒิชยานนท์ 2556: การดูดซึมและกระจายซีเซียม-134 ในแฝก 2 แหล่งพันธุ์  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขาวิชารังสีประยุกต์และ  
ไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
ศาสตราจารย์นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, Ph.D. 88 หน้า

ศึกษาการดูดซึมและกระจายซีเซียม-134 ของแฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี  
โดยปลูกแฝกสองแหล่งพันธุ์ในสารละลายซีเซียม-134 ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ และ  
ที่ระยะเวลาปลูกต่าง ๆ ก่อนการทำภาพถ่ายรังสีในตัว โดยใช้อิมเมจิงเพลต MS 2040 ยี่ห้อ  
Fujifilm และเครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต (imaging plate reader) รุ่น BAS 2500 ยี่ห้อ Fujifilm แล้ว  
วัดกัมมันตภาพจำเพาะในต้นและรากแฝก โดยเครื่องวัดรังสีแกมมาหัววัดเจอร์มานเนียม  
ความบริสุทธิ์สูง (High-Purity Germanium; HPGe) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า แฝกทั้งสองแหล่งพันธุ์  
ดูดซีเซียม-134 และสะสมซีเซียม-134 ไว้ในรากมากกว่าต้นแฝก กัมมันตภาพจำเพาะในรากและ  
ต้นแฝก มีค่าระหว่าง 70.36-137.55 และ 19.80-85.84 kBq g<sup>-1</sup> ตามลำดับ ความสามารถในการดูด  
ซีเซียม-134 ของแฝกที่แสดงโดยค่าสัญญาณ photo-stimulated luminescence (PSL) ในหน่วย  
ของ (PSL mm<sup>-3</sup>) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแฝกปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของซีเซียม-134 เพิ่มขึ้น  
หลังจากปลูกแฝกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 and 7.5 MBq L<sup>-1</sup> นาน 5 วัน  
แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี สามารถลดความเข้มข้นของซีเซียม-134 ได้ร้อยละ 44.08, 30.79 และ  
30.33 ตามลำดับ ในขณะที่ แฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรีลดความเข้มข้นของซีเซียม-134 ได้ร้อยละ 35.38,  
23.18 และ 21.28 ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ปลูกแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีในสารละลายซีเซียม-134  
กัมมันตภาพ 278.50 Bq นาน 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน พบว่า แฝกสามารถดูดซีเซียม-134 ได้มากขึ้น  
เมื่อระยะเวลาปลูกนานขึ้น และสามารถลดกัมมันตภาพของซีเซียม-134 ได้ร้อยละ 1.99, 6.81,  
11.41, 21.86, 29.30 และ 34.52 ตามลำดับ

Thunyras Akharawutchayanon 2013: Absorption and Distribution of Cs-134 in Two Vetiver Ecotypes. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Professor Nualchavee Roongtanakiat, Ph.D. 88 pages.

Absorption and distribution of Cs-134 in Ratchaburi and Surat Thani vetiver ecotypes were investigated. The plantlets of both vetiver ecotypes were cultured in 3 different levels of Cs-134 solutions and various periods before performing autoradiograph using an imaging plate MS 2040 (Fujifilm) and Fujifilm BAS 2500 imaging plate reader. The specific activities of vetivers' shoot and root parts also were determined by a gamma ray spectrometer using the High Purity Germanium (HPGe) detector. The results revealed that both vetiver ecotypes could absorb Cs-134 and accumulated more in roots than in shoots. The specific activity values in root and shoot parts ranged from 70.36-144.09 and 19.80-86.21 kBq g<sup>-1</sup>, respectively. The Cs-134 absorption ability of vetiver as shown by a photo-stimulated luminescence (PSL) signals (PSL mm<sup>-2</sup>) increased as Cs-134 concentration in culture solution increased. After culture in Cs-134 concentrations of 2.5, 5.0 and 7.5 MBq L<sup>-1</sup> for 5 days, the Surat Thani ecotype reduced Cs-134 concentration to 44.08, 30.79 and 30.33 %, respectively, which was higher than that of Rachaburi ecotype (35.38, 23.18 and 21.28 %, respectively). The Surathani vetiver ecotype plantlets were also cultivated in Cs-134 solution with activity of 278.50 Bq for 3, 6, 9, 12, 15 and 18 days. It was shown that the vetiver could absorb Cs-134 higher amount with longer cultivating time and reduced Cs-134 activity 1.99, 6.81, 11.41, 21.86, 29.30 and 34.52 %, respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ ที่ปรึกษาโครงการวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ซึ่งคอยดูแลเอาใจใส่ ให้คำแนะนำทั้งด้านงานวิจัยและด้านการดำเนินชีวิต ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิจัยประกอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งความกรุณาอื่น ๆ ที่ท่านได้แนะนำมา กราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ อรุณี วงศ์ปิยะสถิตย์ ที่กรุณาเป็นผู้ทรงคุณวุฒิการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิรณัฐ จอมพุก ที่กรุณาเป็นประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนสำเร็จการศึกษา และรวมทั้งเจ้าของผลงานวิจัยที่ข้าพเจ้านำมาใช้อ้างอิงประกอบการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่อการเรียนมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณสุทัศน์ เทียงตรงจิตต์ อดีตผู้จัดการศูนย์จัดการกากกัมมันตรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในการเพิ่มพูนความรู้ทางการศึกษา และขอขอบคุณ คุณนิคม ประเสริฐเชี่ยวชาญ ผู้จัดการศูนย์จัดการกากกัมมันตรังสี ณ ปัจจุบัน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยนี้บรรลุผลสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย ภายใต้โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ผนวท.) และขอขอบคุณ ดร. พิรียาธร สุวรรณมาลา หัวหน้าโครงการวิจัยที่รับผิดชอบโครงการวิจัยรองรับ

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และบุตรสาวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่เป็นกำลังใจอย่างดี และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปทุกคน ที่เป็นกำลังใจเสมอมา ประโยชน์ใดอันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

ฉัตรชัย อัครวุฒิชยานนท์

ตุลาคม 2556

## สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	44
สรุปและเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	79
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	88

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1	รังสีและพลังงานของรังสีจากการสลายตัวของซีเซียม-134	5
2	รังสีและพลังงานของรังสีจากการสลายตัวของซีเซียม-137	7
3	ข้อแตกต่างระหว่างแฟลกลุ่มและแฟกคอน	15
4	กัมมันตภาพสารละลายรังสีมาตรฐานซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	38
5	ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 604.92 keV	38
6	ค่าเฉลี่ย PSL mm <sup>-2</sup> รอบต้นแฟกแหล่งพันธุราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	52
7	ค่าเฉลี่ย PSL mm <sup>-2</sup> ในตำแหน่งต่าง ๆ ของแฟกแหล่งพันธุราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	55
8	กัมมันตภาพเริ่มต้นของสารละลายซีเซียม-134	56
9	กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในสารละลายหลังการปลูกแฟกแหล่งพันธุราชบุรี และสุราษฎร์ธานี	56
10	น้ำหนักต้นและรากแฟกแห้ง หลังจากปลูกในสารละลายซีเซียม-134 เป็นเวลา 5 วัน	59
11	กัมมันตภาพจำเพาะในต้นและรากแฟกแหล่งพันธุราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	60
12	กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย ในต้นและรากแฟกแหล่งพันธุราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	61
13	ค่าเฉลี่ย PSL mm <sup>-2</sup> รอบต้นแฟกแหล่งพันธุสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	69
14	ค่าเฉลี่ย PSL mm <sup>-2</sup> ในตำแหน่งต่าง ๆ ของแฟกแหล่งพันธุสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	71
15	กัมมันตภาพของสารละลายซีเซียม-134 หลังการปลูกแฟกแหล่งพันธุสุราษฎร์ธานีที่ระยะเวลาต่าง ๆ	71

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	น้ำหนักต้นและรากแฝกแห้ง หลังจากปลูกในสารละลายซีซีเอ็ม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	74
17	กัมมันตภาพกัมมันตภาพจำเพาะในต้นและรากแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายกัมมันตรังสีซีซีเอ็ม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	75
18	กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยในต้นและรากแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายกัมมันตรังสีซีซีเอ็ม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	76

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนการสลายตัวของซีเซียม-134 โดยการสลายตัวให้อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา	5
2	แผนการสลายตัวของซีเซียม-134 โดยการจับอิเล็กตรอน	6
3	แผนการสลายตัวของซีเซียม-135	6
4	แผนการสลายตัวของซีเซียม-137	7
5	การเกิดไอออนไนเซชัน (ก) และกลไกการเกิดคู่อิออนของผลึกเจอร์มาเนียม (ข)	21
6	โครงสร้างหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงชนิดเพลนนา	21
7	ซิงเกิลเอสเคปพีค และดับเบิลเอสเคปพีค	22
8	ระบบการวัดรังสี	23
9	ระบบอุปกรณ์การวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา	25
10	โฟโตพีค ของรังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV และการคำนวณการแยกขีดพลังงาน	26
11	เครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต	28
12	อิมเมจิงเพลต (ก) และโครงสร้าง (ข)	29
13	กลไกการเรืองแสงของอิมเมจิงเพลต	30
14	การแปลงสัญญาณของข้อมูลจากอิมเมจิงเพลต	31
15	กระบวนการใช้งานอิมเมจิงเพลต	32
16	แผนการสลายตัวของซีเซียม-134 โดยการสลายตัวให้อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา	34
17	ระบบวัดรังสีแกมมาหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (ก) และถังบรรจุไนโตรเจนเหลว (ข)	34
18	แผนการสลายตัวของซีเซียม-135	34
19	หลอดไฟอินฟราเรด (ก) และตัวอย่างสารกัมมันตรังสีมาตรฐาน ซีเซียม-134 (ข)	35
20	ชุดเก็บและอัดตัวอย่างพรรณพืช	35
21	เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อแฟก (ก) และปลูกแฟกลงดิน (ข)	36
22	สารละลายมาตรฐานซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	37

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	แฟลกแหล่งพันธุ์ราชบุรี (ก) และสุราษฎร์ธานี (ข) ที่ปลูกในสารละลาย ที่มีความเข้มข้นซีเซียม-134 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	41
24	แฟลกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 5.0 MBq L <sup>-1</sup>	41
25	ตัดแยกส่วนรากแฟลก (ก) และต้นแฟลก (ข)	42
26	แฟลกแหล่งพันธุ์ราชบุรี (ก) และสุราษฎร์ธานี (ข) ที่ปลูกในสารละลาย ซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	44
27	แฟลกแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 (ก), 5.0 (ข), 7.5 (ค) MBq L <sup>-1</sup> ที่อบแห้ง	45
28	แฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 (ก), 5.0 (ข), 7.5 (ค) MBq L <sup>-1</sup> ที่อบแห้ง	46
29	ภาพถ่ายรังสีในตัวของแฟลกแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 (ก), 5.0 (ข) และ 7.5 (ค) MBq L <sup>-1</sup>	48
30	ภาพถ่ายรังสีในตัวของแฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลาย ซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 (ก), 5.0 (ข) และ 7.5 (ค) MBq L <sup>-1</sup>	49
31	พื้นที่การอ่านสัญญาณ PSL ครอบคลุมทั้งต้นและรากแฟลก (ก) และ ตำแหน่งการอ่านค่า PSL (ข)	50
32	ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL mm <sup>-2</sup> ของแฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี และ ราชบุรีกับความเข้มข้นของสารละลายปลูก ซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	52
33	กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในสารละลายที่ลดลง หลังจากปลูกแฟลก ในสารละลาย ซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L <sup>-1</sup>	57
34	แฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 3 (ก), 6 (ข), 9 (ค), 12 (ง), 15 (จ) และ 18 (ฉ) วัน	62
35	แฟลกแหล่งสุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 12 (ก), 15 (ข) และ 18 (ค) วัน ที่อบแห้ง	63

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	แฟลกแหล่งสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 12 (ง), 15 (จ) และ 18 (ฉ) วัน ที่อบแห้ง	64
37	ภาพถ่ายรังสีในตัวของแฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ในสารละลายกัมมันตรังสีซีเซียม-134 นาน 3 (ก), 6 (ข) และ 9 (ค) วัน	66
38	ภาพถ่ายรังสีในตัวของแฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ในสารละลายกัมมันตรังสีซีเซียม-134 ปลูกนาน 12 (ง), 15 (จ) และ 18 (ฉ) วัน	67
39	ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL $\text{mm}^{-2}$ ของแฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี กับระยะเวลาที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ต่าง ๆ กัน	69
40	กัมมันตภาพในสารละลายซีเซียม-134 หลังการปลูกแฟลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	72

## การดูดซึมและกระจายซีเซียม-134 ในแฝก 2 แหล่งพันธุ์

### Absorption and Distribution of Cs-134 in Two Vetiver Ecotypes

#### คำนำ

การปนเปื้อนมลพิษในสิ่งแวดล้อม อาจเกิดขึ้นจากการใช้สารเคมี ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง การทิ้งขยะมูลฝอย สิ่งปฏิกูลจากอาคารบ้านเรือน การระบายน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การปล่อยก๊าซพิษจากยานพาหนะ ภูเขาไฟระเบิด ไฟไหม้ป่า สิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลกระทบต่อพืช สัตว์ และมนุษย์ นอกจากนี้การปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี (radioactive contamination) ที่อาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ก็เป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องมีวิธีที่จะบำบัดอย่างเหมาะสม โดยทั่วไปการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้ประโยชน์จากสารกัมมันตรังสี ในด้านต่าง ๆ การทิ้งกากกัมมันตรังสีลงสู่ดินหรือในแม่น้ำลำคลอง การทดลองอาวุธนิวเคลียร์ และอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทรีไมล์ไอส์แลนด์ (Three Mile Island) รัฐเพนซิลเวเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบิล (Chernobyl) เมืองพริตยาด ประเทศยูเครน และล่าสุดวิกฤตการณ์ที่ประเทศญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2011 จากแผ่นดินไหวขนาด 9 ริกเตอร์ ตามมาด้วยคลื่นยักษ์สึนามิ (tsunami) ที่ทำให้เกิดความเสียหายระดับรุนแรงมาก กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะ ไดอิจิ (Fukushima Daiichi) จังหวัดฟูกูชิมะ (Lozano *et al.*, 2011) อุบัติเหตุเหล่านี้ทำให้สารกัมมันตรังสีแพร่ไปสู่ดิน น้ำ และอากาศ แล้วสามารถเข้าสู่ระบบห่วงโซ่อาหารได้

การบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้ทั้งวิธีกายภาพและเคมี ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีสีเขียว โดยใช้พืชลดหรือกำจัดมลพิษในสิ่งแวดล้อม เรียกว่า พืชบำบัด (phytoremediation) (นวลฉวี, 2552) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ประหยัด สามารถใช้ได้ในพื้นที่กว้าง และบำบัดมลพิษได้หลากหลาย (นวลฉวี, 2552; Soudek *et al.*, 2005) พืชที่ใช้ในงานพืชบำบัด ต้องมีความทนทานและเจริญเติบโตดีในแหล่งมลพิษ (Truong, 1999; Roongtanakiat and Chairroj 2001a; 2001b) และสามารถดูดซับสารมลพิษได้ดี เช่น แดงกวา สามารถสะสมและดูดซับตะกั่วในดินได้ดี (Takeda *et al.*, 2010) ผักกาด และคาโนลา (Canola) บำบัดเซเลเนียม (Bañuelos *et al.*, 1997) ต้นยาสูบสามารถบำบัดปรอทได้ (Meagher *et al.*, 2000) สำหรับธาตุกัมมันตรังสี มีรายงานว่าต้นไธม์ ยูคาลิปตัส และถั่ว สามารถบำบัดยูเรเนียม-238 ทอเรียม-230 เรเดียม-226 และตะกั่ว-210 (Rodriguez *et al.*, 2010) ทานตะวัน และต้นรัก สามารถบำบัดซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 ใน

ดินและน้ำ (Soudek *et al.*, 2006; Eapen *et al.*, 2006) ในขณะที่แพงพวยฝรั่งก็สามารถบำบัด ซิเซียม-137 (Fulekar *et al.*, 2010) ได้เช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้พืชที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของงานพฤษบำบัด

หญ้าแฝกหรือแฝก (*Vetiveria* spp.) เป็นพืชในวงศ์ Poaceae ที่เป็นที่รู้จักกันดีในด้านการอนุรักษ์ดินและน้ำ เนื่องจากมีรากยาวและหนาแน่น หยั่งลึกลงดิน สามารถปรับเข้ากับสภาพแวดล้อม วิกฤตต่าง ๆ ได้ดี (นวลฉวี, 2552) ผลงานวิจัยของ Truong and Baker (1998) และ Roongtanakiat and Chairroj. (2001a; 2001b) แสดงให้เห็นว่าแฝกมีศักยภาพในการบำบัดโลหะหนักในดินได้แก่ แมงกานีส สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม Xia *et al.* (2001) และ Roongtanakiat *et al.* (2003) ใช้แฝกบำบัดโลหะหนักจากน้ำชะขยะ เช่น ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง นิกเกิล และโครเมียม แฝกยังสามารถบำบัดโลหะหนักจากดินเหมืองแร่ (Roongtanakiat *et al.*, 2008) และบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก (Wong *et al.*, 2003, Roongtanakiat *et al.*, 2007) นอกจากนี้ Singh *et al.* (2006) ยังรายงานไว้ว่า แฝกสามารถบำบัดสารกัมมันตรังสี ซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 ได้อีกด้วย

## วัตถุประสงค์

1. เปรียบเทียบความสามารถดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก 2 แหล่งพันธุ์
2. ศึกษาการกระจายของซีเซียม-134 ในส่วนของต้นและรากแฝก
3. ศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของซีเซียม-134 และระยะเวลาการปลูก ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก
4. เพื่อศึกษาการทำภาพถ่ายรังสีในตัวของซีเซียม-134

## การตรวจเอกสาร

### ซีเซียม

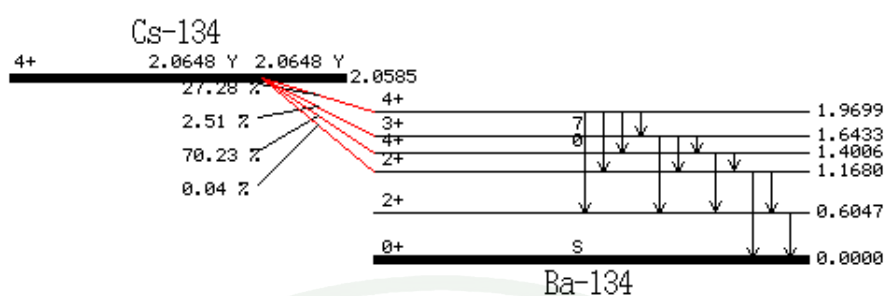
ซีเซียม มี 40 ไอโซโทป มีเลขมวลระหว่าง 112-151 มีเพียงหนึ่งไอโซโทปที่อยู่ในสถานะเสถียร (stable state) และเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ คือ ซีเซียม-133 ส่วนซีเซียม-135 เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาวที่สุด (2.3 ล้านปี) ซีเซียม-137 มีครึ่งชีวิต 30.1671 ปี และ ซีเซียม-134 มีครึ่งชีวิต 2.0652 ปี ไอโซโทปอื่น ๆ มีครึ่งชีวิตน้อยกว่า 2 สัปดาห์ และส่วนใหญ่จะมีครึ่งชีวิตเป็นชั่วโมง ดังนั้นจะมีเพียงสามไอโซโทปเท่านั้น ได้แก่ ซีเซียม-134 ซีเซียม-135 และซีเซียม-137 ที่มีค่าครึ่งชีวิตนานเพียงพอ ที่ก่อให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม (U.S. Department of Energy, 2007)

### ซีเซียมกัมมันตรังสี

สารกัมมันตรังสีที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น เมื่อมีการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ หรือการเกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ จะมีสารกัมมันตรังสีซีเซียม-134 และซีเซียม-137 ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต และมีความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์เป็นอย่างสูง

#### 1. ซีเซียม-134

ซีเซียม-134 มีครึ่งชีวิต 2.0652 ปี เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชัน (fission product) อาจสลายตัวให้อนุภาคบีตา (beta decay) หลังการสลายให้อนุภาคบีตาแล้ว นิวไคลด์ยังคงอยู่ในสถานะกระตุ้น จึงปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่าง ๆ และได้นิวไคลด์ลูกเป็นแบเรียม-134 ในสถานะพื้น (ภาพที่ 1) ซึ่งมีพลังงานและสัดส่วนการสลายตัว ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้ ซีเซียม-134 อาจสลายตัวโดยการจับอิเล็กตรอน (electron capture, EC) แล้วได้นิวไคลด์ลูกเป็นซีนอน-134 (ภาพที่ 2)



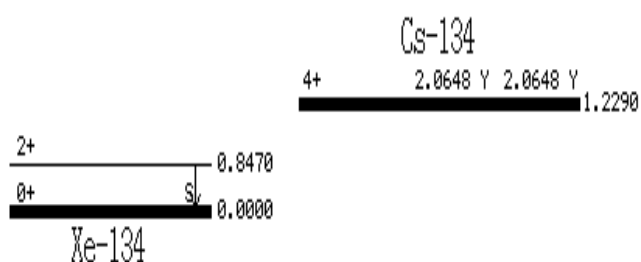
ภาพที่ 1 แผนการสลายตัวของซีเซียม-134 โดยการสลายตัวให้อนุภาคบีตา และรังสีแกมมา

ที่มา: Korea Atomic Energy Research Institute (2000)

ตารางที่ 1 รังสีและพลังงานของรังสีจากการสลายตัวของซีเซียม-134

ประเภทรังสี	พลังงาน (MeV)	ร้อยละการสลายตัว
บีตา	0.658	70.2
	0.415	2.5
	0.089	27.3
แกมมา	0.475	1.5
	0.563	8.4
	0.475	1.5
	0.563	8.4
	0.569	15.4
	0.605	97.6
	0.796	85.5
	0.802	8.7
	1.168	1.8
	1.365	3.0

ที่มา: Korea Atomic Energy Research Institute (2000)

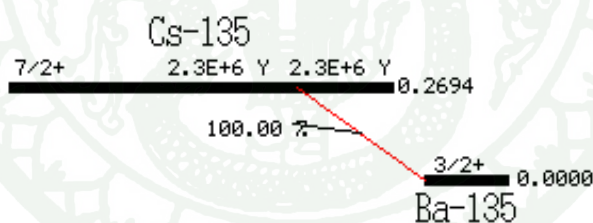


ภาพที่ 2 แผนการสลายตัวของซีเซียม-134 โดยการจับอิเล็กตรอน

ที่มา: Korea Atomic Energy Research Institute (2000)

## 2. ซีเซียม-135

ซีเซียม-135 มีครึ่งชีวิต 2.3 ล้านปี เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชันเช่นเดียวกับซีเซียม-134 สลายตัวทั้งหมดให้อนุภาคบีตาพลังงานต่ำ (0.269 MeV) มีแบเรียม-135 (ภาพที่ 3) เป็นนิวไคลด์ลูก ความเป็นอันตรายของซีเซียม-135 จะน้อยกว่าซีเซียม-134 และซีเซียม-137



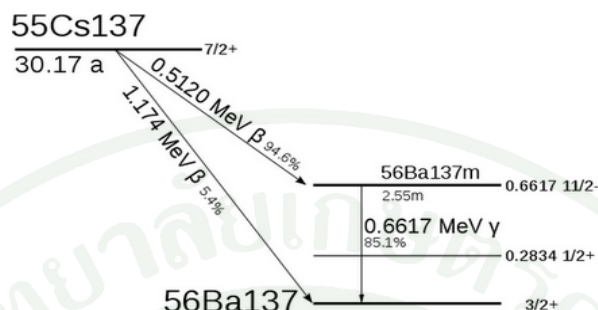
ภาพที่ 3 แผนการสลายตัวของซีเซียม-135

ที่มา: Korea Atomic Energy Research Institute (2000)

## 3. ซีเซียม-137

ซีเซียม-137 มีครึ่งชีวิต 30.17 ปี เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาฟิชชันเช่นเดียวกับซีเซียม-134 และซีเซียม-135 จากแผนการสลายตัวของซีเซียม-137 (ภาพที่ 4) อธิบายได้ว่า ร้อยละ 5.4 ให้อนุภาคบีตาพลังงาน 1.174 MeV แล้วได้แบเรียม-137 ในสถานะพื้น ร้อยละ 94.6 สลายตัวให้อนุภาคบีตา

พลังงาน 0.512 MeV ได้แบเรียม-137m ในสถานะกึ่งเสถียร (metastable state) ซึ่งจะลงสู่สถานะพื้น โดยให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV



ภาพที่ 4 แผนการสลายตัวของซีเซียม-137

ที่มา: Wikipedia (2011)

ตารางที่ 2 รังสีและพลังงานของรังสีจากการสลายตัวของซีเซียม-137

ประเภทรังสี	พลังงาน (MeV)	ร้อยละการสลายตัว
บีตา	1.174	5.4
	0.512	94.6
แกมมา	0.662	85.1

ที่มา: Korea Atomic Energy Research Institute (2000)

การควบคุมความปลอดภัยของซีเซียมทำได้ยาก เนื่องจากเกลือของซีเซียมละลายน้ำได้ดี จึงเคลื่อนย้ายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย ซีเซียม-137 ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่น การถ่ายภาพด้วยรังสี วัดความชื้น วัดความหนาแน่นที่ใช้ในอุตสาหกรรม การก่อสร้าง ตรวจสอบการไหลของของเหลวในท่อและถัง วัดความหนาของแผ่นโลหะ ความหนาของกระดาษและแผ่นฟิล์ม นอกจากนี้ในการแพทย์ยังใช้ซีเซียม-137 เพื่อการบำบัดรักษาโรคมะเร็งอีกด้วย

## ความเสี่ยงต่อสุขภาพของซีเซียมกัมมันตรังสี

เมื่อซีเซียมทำปฏิกิริยากับน้ำ จะได้ซีเซียมไฮดรอกไซด์ (cesium hydroxide) ที่ละลายน้ำ ซีเซียมมีคุณสมบัติในทางชีววิทยาคือคล้ายกับโพแทสเซียม (potassium) และรูบิเดียม (rubidium) เมื่อเข้าไปในร่างกาย ซีเซียมจะกระจายไปทั่วร่างกาย โดยมีความเข้มข้นสูงที่กล้ามเนื้อและกระดูก (Wikipedia, 2011) การสัมผัสกับซีเซียมกัมมันตรังสี จะเป็นการเพิ่มความเสี่ยงในการเป็นมะเร็ง หากได้รับในปริมาณที่สูงยิ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงในการเสียชีวิตสูง

## การปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสี

### สาเหตุของการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี

การปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสี เกิดขึ้นจากมนุษย์ด้วยความตั้งใจ และ/หรืออุบัติเหตุ เช่น จากการทดสอบพลังงานนิวเคลียร์ (Mahara, 1993) การกำจัดกากนิวเคลียร์ (Gauthier-Lafaye, 2002) การผลิตอาวุธนิวเคลียร์ (Whicker *et al.*, 1990) อุบัติเหตุที่เกิดจากการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Clark and Smith, 1988; Konshin, 1992) สาเหตุดังกล่าวก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีที่มีอันตราย ซึ่งส่วนใหญ่มาจากฝุ่นกัมมันตรังสี (radioactive fallout) ทำให้เกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม ดิน น้ำ และอากาศ (U.S. Department of Energy, 2007)

### ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี

การปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม นอกจากจะเกิดจากฝุ่นกัมมันตรังสีแล้ว ยังอาจเกิดขึ้นได้จากการปล่อยของเสียกัมมันตรังสีลงสู่แหล่งน้ำ ภายหลังจากการผ่านโรงงานบำบัดกากกัมมันตรังสี จากอุบัติเหตุ หรือด้วยความจงใจของผู้ใช้สารกัมมันตรังสีเอง โดยไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดเสียก่อน ซึ่งในปัจจุบันแนวโน้มของการใช้สารกัมมันตรังสีมีมากขึ้น ทั้งชนิดและความแรงของสารกัมมันตรังสี จึงทำให้เกิดกากกัมมันตรังสีเพิ่มตามไปด้วย สารกัมมันตรังสีเมื่อเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ดิน น้ำ พืช และอากาศ มนุษย์อาจได้รับสารกัมมันตรังสีโดยตรง จากการรับประทานน้ำ สัตว์น้ำ หรือพืช และอีกทางหนึ่งของการได้รับสารกัมมันตรังสี คือ ลักษณะของห่วงโซ่อาหาร วัวที่กินพืชหรือหญ้าที่ปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีเข้าไป สารกัมมันตรังสี จะผ่านทางสายเลือด (blood stream) เข้าสู่ต่อมน้ำนม แล้วมนุษย์ดื่มน้ำนมวัว ที่ปนเปื้อนนั่นเข้าสู่ร่างกาย

จากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้าเชอร์โนบิล มีพื้นที่ที่ต้องถูกจำกัดเป็นบริเวณกว้างกินเนื้อที่ 23,000 ตารางกิโลเมตร เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีสูง กิจกรรมทางด้านเกษตรไม่สามารถทำได้ สัตว์เลี้ยง น้ำ อากาศ ได้รับปริมาณรังสีสูง ทำให้มีสัตว์มากมายที่ต้องตาย นอกจากนี้สัตว์เลี้ยงถูกด้วยนม นก ปลา และสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำหลายชนิด พืชการและมีความผิดปกติของโครโมโซม การปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีครั้งนี้ ยังส่งผลกระทบต่อไปยังประเทศแถบยุโรปและสแกนดิเนเวีย เช่น ออสเตรีย บัลแกเรีย โครเอเชีย สาธารณรัฐเช็ก ฟินแลนด์ เยอรมนี กรีซ ฮังการี อิตาลี มอลโดวา นอร์เวย์ โปแลนด์ โรมาเนีย สโลวาเนีย สวีเดน สวิตเซอร์แลนด์ และประเทศอังกฤษ และทวีปเอเชีย เช่น ตุรกี จอร์เจีย อาร์เมเนีย สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ และจีน รวมทั้งทวีปแอฟริกาเหนือ และอเมริกาเหนือ ซึ่งส่วนใหญ่ในประเทศเหล่านี้ ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนในอาหาร เช่น นม หรือเนื้อสัตว์ ที่ผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (IAEA, 2011) สำหรับอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะ รัฐบาลประเทศญี่ปุ่นรายงานว่า มีการปนเปื้อนของนิวไคลด์กัมมันตรังสี เช่น ไอโอดีน-131 ซีเซียม-137 เป็นจำนวนมากในดิน ผัก สัตว์ หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสัตว์ ทุ่งหญ้าสำหรับเลี้ยงสัตว์ บางแห่งมีการปนเปื้อนเกินเกณฑ์มาตรฐาน (IAEA, 2011) ทำให้เกิดการสูญเสียงบประมาณเป็นจำนวนมาก เพื่อใช้กอบกู้สถานการณ์ และบำบัดสารกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อน

### งานวิจัยเกี่ยวกับการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี และการบำบัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี

มีนักวิจัยมากมายที่พยายามศึกษา สาเหตุของการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ต่อสิ่งมีชีวิต และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการปนเปื้อนนั้น ๆ พร้อมทั้งหาวิธีการบำบัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี ตัวอย่างที่นักวิจัยศึกษาและหาวิธีการบำบัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี มีดังนี้

Persson and Holm (2011) ได้ตรวจวัดปริมาณ พอลิเนียม-210 และตะกั่ว-210 ในสิ่งแวดล้อม พบว่า ปริมาณพอลิเนียม-210 ในบรรยากาศ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณน้ำฝน ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ และนอกจากจะพบพอลิเนียม-210 และตะกั่ว-210 ในดิน น้ำดื่ม มอส ลูกพีช และยาสูบ แล้วยังพบในเนื้อกวางเรนเดีย และเนื้อกวางคาริบูอีกด้วย ซึ่งเป็นการรับสารกัมมันตรังสีโดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร จากการกินไลเคน

Rodriguez *et al.* (2010) ศึกษาการส่งผ่านยูเรเนียม-238 ทอเรียม-230 เรเดียม-226 และตะกั่ว-210 จากดินสู่ต้นไม้ในทะเลเมดิเตอร์เรเนียน โดยใช้ต้นโอ๊ค ยูคาลิปตัส และถั่ว พบว่าค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีสูงขึ้นไปของพืชทุกชนิด และกัมมันตภาพที่สูงที่สุดพบในยูคาลิปตัส แสดงให้เห็นว่าพืชดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการบำบัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ และ

จากรายงานของ (Cerne *et al.*, 2010) ทดลองการดูดไขมันด้วยวิธีเรเนียม-238 เรเดียม-226 ตะกั่ว-210 และโพแทสเซียม-40 โดยใช้ต้นอ้อ ที่บริเวณใกล้เคียงกับเหมืองแร่ยูเรเนียม พบว่าต้นอ้อมีความสามารถในการดูดไขมันโคลด์กัมมันตรังสีได้ทุกตัว และสะสมยูเรเนียม-238 เรเดียม-226 และ ตะกั่ว-210 ที่ใบมากกว่าที่ต้น ยกเว้นโพแทสเซียม-40 สะสมที่ต้นมากกว่าใบ

Baeza *et al.* (2005) ศึกษาการกระจายของนิ่วโคลด์กัมมันตรังสี ในส่วนต่าง ๆ ของเห็ดที่อายุต่างกัน พบว่าการดูดไขมันซีเซียม-134 สตรอนเชียม-85 และโคบอลต์-60 สูงสุดพบในส่วนของต้นที่โตเต็มวัย คือ อายุประมาณ 55 วัน และกัมมันตภาพลดลงเมื่อเห็ดอายุมากขึ้น ส่วนการกระจายของนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีภายในดอกจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน คือ ในหมวกและใต้หมวกเห็ด การกระจายของนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีจะเพิ่มเป็นทวีคูณ ส่วนที่ลำต้นพบการกระจายเพียงเล็กน้อย พืชน้ำจืดก็สามารถใช้บำบัดนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีได้เช่นกัน จากการศึกษาของ Hornik *et al.* (2008) ได้วิเคราะห์การดูดไขมันและการกระจายของ ซีเซียม-137 และโคบอลต์-60 ในราก ต้น และใบของพืชน้ำจืด *Bacopa monnieri* และสาหร่าย *Egeria densa* เพื่อประเมินความเข้มข้นของธาตุอาหารในกระบวนการสะสมทางชีวภาพ พบว่า พืชน้ำจืดทั้งสองชนิดสามารถสะสมซีเซียม-137 และโคบอลต์-60 ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่าย *Egeria densa* มีประสิทธิภาพสูงในการสะสมนิ่วโคลด์กัมมันตรังสีทั้งสองชนิด

Eapen *et al.* (2006) ศึกษาการบำบัดซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 ด้วยต้นรัก โดยการปลูกต้นรักในสารละลายซีเซียม-137 สารละลายสตรอนเชียม-90 และสารละลายที่มีนิ่วโคลด์ทั้งสองชนิดรวมกัน วัดกัมมันตภาพของสารละลายทุกวันเป็นเวลา 7 วัน เมื่อเวลาผ่านไปกัมมันตภาพในสารละลายทั้งหมดนั้นลดลง ในขณะที่ Soudek *et al.* (2006) วิเคราะห์การดูดไขมันและการกระจายของซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 โดยใช้ทานตะวัน และศึกษาอิทธิพลของธาตุอาหารพืช พบว่าการดูดไขมันของซีเซียม-137 สูงขึ้นหากมีธาตุอาหารโพแทสเซียมและแอมโมเนียม ในขณะที่การดูดไขมันของสตรอนเชียม-90 จะเพิ่มขึ้น หากมีธาตุอาหารแคลเซียม และจากภาพถ่ายรังสีในต้น การกระจายของซีเซียม-137 พบมากที่เส้นใบและใบอ่อนของพืช ในขณะที่สตรอนเชียม-90 พบมากที่ใบ ลำต้น ราก และปากใบ

หลังจากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะ เมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2554 มีการตรวจสอบการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี ในบริเวณต่าง ๆ เช่น จากรายงานของ Lozano *et al.* (2011) ได้ตรวจวัดปริมาณไอโอดีน-131 ไอโอดีน-132 เทเลเนียม-132 ซีเซียม-134 และซีเซียม-137 ในอากาศทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของคาบสมุทรไอบีเรีย (Iberian Peninsula) พบว่า มีกัมมันตภาพสูงขึ้น ซึ่ง

สอดคล้องกับรายงานของ Manolopoulou *et al.* (2011) ได้เก็บตัวอย่างอากาศและน้ำฝนของ ประเทศกรีซตอนเหนือ ในขณะที่ Pittauerova *et al.* (2011) เก็บตัวอย่างน้ำฝน ตะกอนแม่น้ำ ดิน ภูเขา และน้ำนมวัว ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของสาธารณรัฐเยอรมนี เพื่อวัดปริมาณของ ไอโอดีน-131 ซีเซียม-134 และ ซีเซียม-137 หลังจากเกิดอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะ พบว่า มีกัมมันตภาพสูงขึ้นเช่นกัน

## หญ้าแฝก

### ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของแฝกและแหล่งพันธุ์แฝกในประเทศไทย

หญ้าแฝกเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้า เช่นเดียวกับข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย ขึ้นเป็นกอหนาแน่น เจริญเติบโตโดยการแตกกออย่างรวดเร็ว มีระบบรากฝอยที่ยาว แข็งแรง รากยังลึกลงไปในดิน ในแนวตั้ง รากหญ้าแฝกเปรียบเสมือนกำแพงใต้ดิน ซึ่งทำหน้าที่เกาะยึดดิน สงวนน้ำในดิน กรองและดูดซับธาตุอาหารพืช ดูดซับสารเคมีก่อนที่จะไหลลงสู่แหล่งน้ำ ลดมลพิษให้กับสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถปลูกเป็นแนวช่วยเก็บกักตะกอนดิน ป้องกันการตื้นเขินของแหล่งน้ำ พบกระจายอยู่ทั่วไปหลายพื้นที่ตามธรรมชาติจากที่ลุ่มจนถึงที่ดอนแหล่งเดิมของการกระจายสันนิษฐานว่าอยู่บริเวณตอนกลางและตอนใต้ของประเทศอินเดีย กรมพัฒนาที่ดิน (2549) ได้อธิบายลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของแฝกไว้ดังนี้

ลำต้น หญ้าแฝกเป็นหญ้าที่ขึ้นเป็นกอ ใบยาวตั้งตรง มักพบขึ้นอยู่เป็นกลุ่มใหญ่หรือกระจายอยู่ไม่ไกลมากนัก กอหญ้าแฝกจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ โคนกอเบียดกันแน่นเป็นลักษณะเฉพาะอันหนึ่ง ที่แตกต่างจากหญ้าอื่นค่อนข้างชัดเจน ส่วนโคนของลำต้นจะแบนเกิดจากส่วนของโคนใบที่จัดเรียง พับซ้อนกัน ลำต้นแท้จะมีขนาดเล็กซ่อนอยู่ในกอใบบริเวณคอต้น การแตกกอของแฝกจะมีการแตกหน่อใหม่ทดแทนต้นเก่าอยู่เสมอ โดยจะแตกหน่อออกทางด้านข้าง ทำให้กอมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ

ใบ จะแตกออกจากโคนกอ มีลักษณะแคบยาว ขอบขนานปลายสอบแหลม แผ่นใบกว้าง โดยเฉพาะใบแก่ขอบใบและเส้นกลางใบมีหนามละเอียด หนามบนใบที่ส่วนโคนและกลางแผ่นใบจะมีน้อย แต่จะมีมากที่บริเวณปลายใบ มีลักษณะตั้งทะแยงปลายหนามชี้ขึ้นไปทางปลายใบ ด้านท้องใบจะมีสีจางกว่าด้านหลังใบ

ราก เป็นส่วนสำคัญและเป็นลักษณะพิเศษของหญ้าแฝกที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นหลัก ระบบราก ของหญ้าแฝกจะแตกต่างจากรากหญ้าส่วนใหญ่ทั่วไป คือ มีรากที่สานกันแน่นหยั่งลึก แนวตั้งลงในดินไม่แผ่ขนาน มีรากแกน รากแขนง โดยเฉพาะมีรากฝอยจำนวนมากสานกันแน่นหยั่งลึกลงในดินแนวตั้ง

ช่อดอก มีลักษณะเป็นรวง ก้านช่อดอกยาวกลมสูงประมาณ 100-150 เซนติเมตร ในต้นที่สมบูรณ์จะสูงจากพื้นดินเกินกว่า 200 เซนติเมตร เฉพาะส่วนช่อดอกหรือรวงสูงประมาณ 20-30 เซนติเมตร แผลกว้างเต็มที่ 10-15 เซนติเมตร ช่อดอกของหญ้าแฝกส่วนใหญ่มีสีม่วงซึ่งเป็นลักษณะปกติประจำแต่ละชนิดพันธุ์

ดอก มีลักษณะคล้ายกระสวย ขอบขนานรูปไข่ ปลายสอบ ดอกหญ้าแฝกเรียงตัวเป็นคู่ ลักษณะคล้ายกัน และขนาดใกล้เคียงกัน แต่ละคู่ประกอบด้วยดอก แบบมีก้านและไม่มีก้าน ขนาดของดอกกว้าง 1.5-2.5 มิลลิเมตร ยาว 2.5-3.5 มิลลิเมตร ผิวบนด้านหลังขรุขระมีหนามแหลม ขนาดเล็ก โดยเฉพาะที่บริเวณขอบ ส่วนด้านล่างเป็นผิวเรียบ

เมล็ดและต้นอ่อน ดอกหญ้าแฝกเมื่อได้รับการผสมแล้ว ดอกที่ไม่มีก้านดอกซึ่งเป็นดอกสมบูรณ์ก็จะติดเมล็ด เมล็ดมีสีน้ำตาลอ่อน เมล็ดจะตกอยู่ข้าง ๆ กอ ไม่ปลิวระบัดเหมือนหญ้าอื่น ๆ เมล็ดหญ้าแฝกมีความสามารถในการงอก อยู่ในช่วงระยะเวลาจำกัด เพียงช่วงสั้น ๆ และจะแห้งฝ่อไปเอง บางสายพันธุ์ซึ่งนำเข้ามาจากต่างประเทศไม่มีเมล็ด จึงทำให้หญ้าแฝกไม่สามารถจะแพร่กระจายกลายเป็นวัชพืชร้ายแรงได้

สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (กปร., 2545) ได้สรุปคุณสมบัติของหญ้าแฝก ดังนี้

1. แฝกมีการแตกกอจำนวนมาก เบียดเสียดกันอย่างหนาแน่น และแข็งแรงกอดตั้งตรง สามารถปลุกติดต่อกันให้เป็นแถวหน้ากระดานเรียงหนึ่งได้ง่าย เปรียบเสมือนกำแพงด้านทานตะกอนดินที่ถูกน้ำกัดเซาะและพัดพามาให้ตกทับถมด้านหน้าแถวแฝก และชะลอความเร็วของน้ำ ทำให้น้ำเอ่อและไหลซึมลงไปได้ดิน

2. ถ้าต้นเหนือดินซึ่งมีข้อถี่และข้อที่เกิดจากการย่างปล้อง เมื่อแฝกมีอายุใกล้ออกดอกจะแตกหน่อและรากใหม่ออกมาเสมอ เมื่อตะกอนดินทับถมจึงสามารถตั้งกอใหม่ได้

3. กอแฝกสามารถตัดต้นและใบให้แตกหน่อใหม่เขียวสดอยู่เสมอ ต้นและใบใช้เป็นวัสดุคลุมดินรักษาความชุ่มชื้น และเพิ่มแร่ธาตุอาหารพืชให้แก่ดินเมื่อย่อยสลายแล้ว เช่นเดียวกับปุ๋ยหมัก หากแฝกแก่ต้นและใบจะแห้ง เมื่อถูกไฟเผาจะแตกหน่อใหม่เขียวสดขึ้นมาทันที ไม่จำเป็นต้องปลูกใหม่ ผลพลอยได้จากแฝกคอง สามารถตัดใบไปกรองเป็นดับแฝกชื้อขายทำลังคาได้ แฝกหอมใบอ่อน ใช้เป็นอาหารสัตว์เลี้ยงวัวเลี้ยงควายได้ ซึ่งจะต้องตัดในช่วงอายุ 2 ถึง 4 สัปดาห์ หลังจากตัดครั้งก่อน เช่น แฝกกลุ่มพันธุ์กำแพงเพชร 2 นอกจากนี้พันธุ์แฝกหอมจากอินเดียใช้เลี้ยงปลาจีนได้ ใบแฝกหอม เมื่อตากแห้งดีแล้วนำไปทำพวงหรีดหรือดอกไม้ประดิษฐ์ เครื่องถักจักสาน เช่น หมวก ตะกร้า

4. แฝกมีรากที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เส้นโหดยังลึกลงไปดิน และแตกแขนงเป็น รากฝอยประสานกันแน่นเหมือนตาข่ายหรือร่างแห เกาะยึดดินให้มีความแข็งแรงมั่นคง การปลูกแฝก ติดต่อกันระบบรากจะเป็นเสมือนม่านใต้ดิน ชะลอการไหลซึมของน้ำใต้ดินทำให้ความชื้นในดิน เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการกัดเซาะของน้ำที่ทำให้เกิดร่องขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดขึ้นจากด้านล่างของแนวลาดชันย้อนขึ้นมาด้านบน เมื่อถึงแนวแฝกก็จะหยุดเพียงแค่นั้น ซึ่งกรณีดังกล่าว คันดินไม่สามารถจะหยุดยั้งได้

5. รากแฝกยังสามารถดูดซึมสารเคมี แร่ธาตุอาหารพืชที่ถูกชะล้างลงไปดิน เช่น ปุ๋ยเคมี สารเคมีป้องกันและกำจัดแมลงศัตรูพืชเก็บไว้ในต้นแฝก เป็นการป้องกันไม่ให้สารเคมี เหล่านั้นไหลลงไปยังแหล่งน้ำ และปลอดภัยจากการเกิดมลภาวะของน้ำทำให้น้ำมีคุณภาพ

6. การกระจายพันธุ์ของแฝก พันธุ์แฝกที่ได้รับการคัดเลือกแล้วจะมีการกระจายพันธุ์ด้วย เมล็ดน้อย หรือแทบไม่มีเลย จึงไม่มีลักษณะของวัชพืช พันธุ์จากอินเดีย ออสเตรเลีย สามารถปลูก ได้ในสวนผลไม้และพื้นที่เกษตรทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการดูแลรักษาเสมอ จะไม่ปรากฏว่ามีแฝกต้นเล็ก ๆ ที่ออกจากเมล็ดขึ้นในบริเวณกอแฝกเลย

7. การขยายผล การปลูกแฝกสามารถปลูกได้ทุกสภาพพื้นที่ แฝกเป็นพืชที่ค่อนข้างมี ข้อจำกัดน้อย ยกเว้นบางพื้นที่ ซึ่งมีปัญหารุนแรงของพื้นที่มาก เช่น พื้นที่เค็มจัด เช่น พื้นที่พรุเก่า จะต้องทำการปรับสภาพดินด้วยการใส่ปูนหรือหินปูนเสียก่อน พื้นที่สูงที่ท้องฟ้าปิดเกือบตลอดปี ซึ่งมีความเข้มของแสงแดดไม่เพียงพอ แต่แก้ไขได้โดยการใช้พันธุ์ท้องถิ่นที่เหมาะสมกับพื้นที่ นั้น ๆ

นักพฤกษศาสตร์พบว่ามิเผกกระจายอยู่ทั่วโลกประมาณ 12 สายพันธุ์ ในประเทศไทยได้ตรวจสอบพบว่า มีอยู่ 2 สายพันธุ์ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2549) ประกอบด้วย เผกกลุ่ม และเผกคอน

เผกกลุ่ม (*Chrysopogon zizanoioides* (L) Roberty) หรือเผกหอม เป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี มีการกระจายทั่วไป ขึ้นได้ดีในทุกสภาพพื้นที่ พบได้ในพื้นที่ลุ่ม มีความชื้นสูงหรือมีน้ำขัง ใบชี้ตรง เมื่อยาวเต็มที่ มีความยาว 45-100 เซนติเมตร กว้าง 0.6-1.2 เซนติเมตร หลังใบมีสีเขียวเข้ม ลักษณะโค้งมนถึงเหลี่ยม เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมากทำให้ดูมัน มีการแตกตะเกียงและแตกแขนงลำต้น เผกกลุ่มที่อายุประมาณ 1 ปี จะมีรากที่หยั่งลึกได้ประมาณกว่า 1 เมตร ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพของดินและความสมบูรณ์ของดินเผก เผกกลุ่มที่พบในประเทศไทยทั้งหมด 11 แหล่งพันธุ์ ประกอบด้วย แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร 2 เชียงราย สุราษฎร์ธานี ศรีลังกา เชียงใหม่ ตรัง 1 ตรัง 2 สงขลา 1 สงขลา 2 สงขลา 3 และแม่ฮ่องสอน

เผกคอน (*Chrysopogon nemoralis* (Balansa) Holttum) หรือเผกพื้นบ้าน พบได้ทั่วไปในที่ค่อนข้างแล้ง สามารถขึ้นได้ในที่แดดจัดและที่ร่มรำไร กอจะเตี้ยกว่าหญ้าเผกกลุ่ม ใบหยาบมีไขเคลือบน้อยทำให้ดูกร้าน ใบเมื่อยาวเต็มที่ จะโค้งลงคล้ายตะไคร้ มีใบยาว 35-80 เซนติเมตร กว้าง 0.4-0.8 เซนติเมตร ใบสีเขียว หลังใบพับเป็นสามเหลี่ยม ท้องใบสีเขียวกับด้านหลังใบ แต่มีสีเขียวที่เส้นกลางใบ มีลักษณะแข็งเป็นนูนทางหลังใบ ไม่มีการแตกตะเกียงและแตกแขนงลำเผกกลุ่มที่พบในประเทศไทยทั้งหมด 11 แหล่งพันธุ์ ประกอบด้วย แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร 2 เชียงราย สุราษฎร์ธานี ศรีลังกา เชียงใหม่ ตรัง 1 ตรัง 2 สงขลา 1 สงขลา 2 สงขลา 3 และแม่ฮ่องสอน

ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างเผกกลุ่มและเผกคอนได้ดังตารางที่ 3

### ตารางที่ 3 ข้อแตกต่างระหว่างแฟกกลุ่มและแฟกคอน

แฟกกลุ่ม	แฟกคอน
<b>ลักษณะกอ</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง</li> <li>- มีการแตกตะเกียงและแตกแขนงลำต้นได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นพุ่ม ใบยาว ปลายแผ่โค้งลงคล้ายกอก</li> <li>- ตะไคร้ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม</li> <li>- ปกติไม่มีการแตกตะเกียง และแขนงลำต้น</li> </ul>
<b>ใบ</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใบสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ท้องใบออกสีขาว มีรอยกั้นขวางในเนื้อใบ ส่องกับแดดเห็นชัดเจน</li> <li>- เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมาก ทำให้ดูนุ่มมัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใบสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันสามเหลี่ยม ท้องใบสีเขียวกับด้านหลังใบแต่ ซีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็น รอยกั้นในเนื้อใบ</li> <li>- เนื้อใบหยาบ สากคาย มีไขเคลือบน้อย ทำให้ดูร่วน ไม่เหนียวมัน</li> </ul>
<b>ช่อดอกและดอก</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ส่วนใหญ่มีสีม่วง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีได้หลายสี ตั้งแต่สีขาว ครีมน ถึงม่วง</li> </ul>
<b>ราก</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความหอม เนื่องจากมีน้ำมันหอมระเหย ซึ่งเป็นสารพวก Alkaloids</li> <li>- สามารถหยั่งลึกได้ ประมาณ ตั้งแต่ 100-300 ซม.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีความหอม</li> <li>- มีรากสั้นกว่า โดยทั่วไปจะหยั่งลึก ประมาณ 80-100 ซม.</li> </ul>

ที่มา: ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2555)

### การใช้ประโยชน์จากแฟกด้านอนุรักษ์ดินและน้ำ

การอนุรักษ์ดินและน้ำ คือ การใช้น้ำหรือการจัดการทรัพยากรดินและน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ โดยป้องกันการชะล้างการพังทลายของดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดินให้สามารถทำการเกษตรได้ตลอดไป การอนุรักษ์ดิน ทำเพื่อรักษาความสามารถในการผลิตของดินให้ยืนนานและเพิ่มผลผลิตต่อหน่วยเนื้อที่ดิน ลดอัตราการกัดกร่อนของดิน เพิ่มหรือรักษาระดับปริมาณของธาตุอาหารและ

อินทรีย์วัตถุในดิน ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ปรับปรุงโครงสร้างของดินให้อยู่สภาพที่เหมาะสม ทำให้สามารถใช้น้ำอย่างประหยัด หลักการอนุรักษ์น้ำ เพื่อลดการป้องกันการสูญเสียน้ำโดยการระเหยของน้ำบนผิวดิน เพิ่มแหล่งกักเก็บน้ำเพื่อให้ดินมีความชุ่มชื้นนานที่สุด ให้มีการใช้น้ำอย่างประหยัดและเกิดประโยชน์สูงสุด

พระราชกรณียกิจของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเกี่ยวกับการนำแผลมาใช้ในการอนุรักษ์ดิน และน้ำ ซึ่งแผลเป็นพืชที่มีรากที่ยังลึกและแผ่กระจายลงไปตรง ๆ ในดิน ทำให้อุ้มน้ำและยึดเหนี่ยวดิน ได้มั่นคง และมีลำต้นชิดติดกันแน่น ทำให้ดักตะกอนดินและรักษาหน้าดินได้ดี จึงมีพระราชดำริให้ทดลองปลูกหญ้าแผลเพื่อป้องกันการชะล้างหน้าดิน นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาประโยชน์ของแผล เพื่อนำไปใช้อนุรักษ์ดินและน้ำในด้านต่าง ๆ เช่น สุภา และคณะ (2547) ได้วิจัยเกี่ยวกับ การพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันการชะล้างพังทลายของดินในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังแบบเกษตรกรรมมีส่วนร่วม เพื่อเกษตรยั่งยืนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เกษตรกรที่ปลูกมันสำปะหลังในพื้นที่ค่อนข้างลาดเท ส่วนใหญ่จะเลือกแถบหญ้าแผล ในการป้องกันการชะล้างพังทลายของดิน การวิจัยการนำแผลช่วยยึดเกาะดิน โดย พิทักษ์ และคณะ (2542) นำแผลไปปลูกบนพื้นที่ลาดชัน พบว่าการปลูกแผลช่วยในการป้องกันการสูญเสียดิน ได้ดีกว่าแนวที่ไม่มีปลูกแผล นอกจากนี้แล้วแผลยังสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงมีทศน์ภายในประเทศให้สวยงาม พร้อมทั้งอนุรักษ์ดินและน้ำไปพร้อมกันด้วย (Truong *et al.*, 2000)

แผลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ ได้อีก อาทิเช่น งานศิลปหัตถกรรม โดยใบแผลสามารถนำมาผลิตเป็นภาชนะและเครื่องประดับต่าง ๆ เช่น ตะกร้า กระเป๋า กระดาษ แจกัน เครื่องตกแต่งบ้าน นอกจากนี้แล้วใบแผลยังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุคลุมหลังคา วัสดุปลูกพืช และวัสดุคลุมดิน และพบว่ารากแผลกลุ่มสามารถสกัดทำเป็นน้ำมันหอมระเหยได้อีกด้วย

### งานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีพฤษบำบัด โดยใช้หญ้าแผล

พฤษบำบัด สามารถนำไปใช้ในการบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ น้ำเสีย (Soudek *et al.*, 2005) ชนิดของพืชมีส่วนสำคัญในกระบวนการพฤษบำบัด จำเป็นต้องใช้พืชที่มีความทนทานต่อมลพิษได้สูง หญ้าแผลเป็นพืชที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง (นวลฉวี, 2552) นอกจากมีคุณสมบัติในการทนความความแห้งแล้ง น้ำท่วม ยังสามารถทนทานต่อโลหะหนัก ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายที่ได้นำแผลซึ่งมีศักยภาพในการเป็นพฤษบำบัดมาใช้ในการบำบัดโลหะหนักจากดิน (Truong, 1999; Roongtanakiat and Chairroj 2001a; 2001b)

น้ำเสีย (Roongtanakiat *et al.*, 2007) ดินหางแร่ (Truong, 1999; Roongtanakiat *et al.* 2007) ดินเหมืองแร่สังกะสี (Roongtanakiat *et al.* 2009) น้ำชะขยะ (Roongtanakiat *et al.* 2003) ตัวอย่างงานที่นักวิจัยใช้แฟกเป็นพอกขบำบัดมีดังนี้

มนต์ชัย (2548) ปลุกแฟกด้วยเทคนิคแทนลายน้้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชน เพื่อคัดเลือกกลุ่มพันธุ์แฟกที่เหมาะสมเพื่อใช้ในระบบจำลอง ผลการทดลองพบว่า แฟกกลุ่มพันธุ์สงขลา 3 และสุราษฎร์ธานี มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ฟอสฟอรัสทั้งหมด และออร์โธฟอสเฟต สูงเป็น 2 อันดับแรก รวมทั้งมีการเจริญเติบโตและสะสมธาตุอาหาร ในโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด สูงด้วย จึงได้นำแฟกทั้ง 2 แหล่งพันธุ์ มาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า สามารถเจริญเติบโต และมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้เป็นอย่างดี

คารินทร์ และคณะ (2551) ใช้แฟก 3 แหล่งพันธุ์ ได้แก่ แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ศรีลังกา และแหล่งพันธุ์สงขลา 3 เพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยปลุกแฟกลักษณะแพลลอยน้ำ ผลการทดลองพบว่า แฟกทั้ง 3 แหล่งพันธุ์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง โดยค่าไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด บีโอดี ออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยในการทำน้ำทิ้งโรงนมเสีย ภายหลังการบำบัด ในสัปดาห์ที่ 6, 10 และ 14 มีค่าลดลง และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในสัปดาห์ที่ 14 นอกจากนี้ ยังสามารถลดค่าไนไตรต์ ไนเตรต ความนำไฟฟ้าของแข็งละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอย และเหล็ก ได้อีกด้วย จึงกล่าวได้ว่าหญ้าแฟกมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนมได้

Makris *et al.* (2006) ได้รายงานว่่า ในสหรัฐอเมริกา มีการปนเปื้อนในดินและน้ำของ 2, 4, 6 trinitrotoluene (TNT) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และเป็นส่วนประกอบในการผลิตวัตถุระเบิด ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมมาก เมื่อทดลองนำหญ้าแฟกมาปลูกในน้ำที่มีธาตุอาหารพืชละลายอยู่ เพื่อบำบัดการปนเปื้อนของ TNT ซึ่งได้ผลว่า ภายใน 8 วัน ปริมาณ TNT ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงจนไม่มีความเป็นพิษ เช่นเดียวกับ Das *et al.* (2009) นำหญ้าแฟกมาบำบัด TNT โดยมีปฏิกิริยาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของ TNT พบว่า ที่ระยะเวลา 12 วัน หญ้าแฟกสามารถลดปริมาณ TNT ในดินที่ใส่ปุ๋ยยูเรีย ซึ่งมีส่วนประกอบของ TNT ที่ 40 และ 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ลงได้ร้อยละ 27 และ 7.5 ตามลำดับ

Truong (2000) รายงานการประยุกต์ใช้หญ้าแฝกบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น ปรอท อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล เซเลเนียม และสังกะสี ในทะเลสาบและเมือง โยโล (Yolo Countries) แคลิฟอร์เนียเหนือ ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า แฝกมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศ และฟื้นคืนสู่สภาพเดิมได้หลังจากเกิดผลกระทบต่าง ๆ เช่น ภัยแล้ง น้ำท่วม ความเค็มของดิน ความเป็นกรดและด่าง และความร้อน นอกจากนี้อาจจำแนกการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในแฝกได้ 3 กลุ่ม โดยดูจากการกระจายของโลหะหนักในต้นและรากแฝก คือ (1) เคลื่อนย้ายได้น้อยมาก (ร้อยละ 1-5) ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และปรอท (2) เคลื่อนย้ายได้ปานกลาง (ร้อยละ 16-33) ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และเซเลเนียม และ (3) โลหะหนักที่กระจายในต้นและรากได้เท่า ๆ กัน (ร้อยละ 40) ได้แก่ สังกะสี

Roongtanakiat *et al.* (2003) รายงานผลจากการนำหญ้าแฝกมาใช้โลหะหนักจากน้ำชะขยะ ฟังกลบ อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และโลหะหนักอยู่สูง ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง นิกเกิล และโครเมียม ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ถูกนำไปปลูกบริเวณบ่อขยะ พบว่า หญ้าแฝกสามารถดูดใช้โลหะหนัก โดยความเข้มข้นของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นในต้นและรากแฝก และความเข้มข้นของโลหะหนักในดินก็ลดลงด้วย แต่หากมีน้ำชะขยะที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และโลหะหนักสูงมาก หญ้าแฝกจะตาย แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำหญ้าแฝกไปใช้ในการบำบัดมลพิษของหลุมฝังกลบเก่า เพื่อฟื้นฟูสภาพของดินได้

Singh *et al.* (2006) ใช้หญ้าแฝกบำบัดนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 จากสารละลายและกากนิวเคลียร์ระดับต่ำ หญ้าแฝกอายุ 1 เดือนมีความสามารถในการดูดใช้นิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ เนื่องจากซีเซียม-137 มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับโพแทสเซียม ดังนั้นโพแทสเซียมในสารละลายมีผลให้หญ้าแฝกมีความสามารถในการดูดใช้ซีเซียม-137 ลดลง การสะสมของซีเซียม-137 พบที่รากมากกว่าที่ต้น ในขณะที่สตรอนเชียม-90 มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับแคลเซียม ปริมาณแคลเซียมในสารละลายจึงมีผลทำให้แฝกมีความสามารถในการดูดใช้สตรอนเชียม-90 ลดน้อยลงเช่นกัน นิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสองชนิดนี้ มีการสะสมที่ต้นมากกว่าที่รากแฝก ในการบำบัดกากนิวเคลียร์ระดับต่ำ แฝกอายุ 2 เดือน สามารถดูดใช้กากกัมมันตรังสีระดับต่ำได้ และถูกสะสมไว้ที่รากมากกว่าที่ต้นเช่นกัน

## การวัดรังสี

ในการตรวจวัดรังสีจะอาศัยคุณสมบัติการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างรังสีกับวัตถุ มาใช้เป็นหลักการเพื่อสร้างหัววัด ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดรังสี โดยรังสี จะทำอันตรกิริยากับวัตถุภายในหัววัดรังสีแล้วถ่ายทอดพลังงานออกมา และเปลี่ยนพลังงานที่ออกมา ให้อยู่ในรูปที่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งพลังงานที่ออกมาต้องเป็นสัดส่วน โดยตรงกับปริมาณรังสีที่เข้าสู่ หัววัด (นวลฉวี, 2536) การตรวจวัดรังสีสามารถใช้เครื่องมือได้หลายประเภท ได้แก่ เครื่องวัดรังสี ชนิดบรรจุแก๊ส (gas filled detector) ได้แก่ ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ (ionization chamber) เครื่อง นับรังสีแบบสัดส่วน (proportional counter) เครื่องนับรังสีไกเกอร์มูลเลอร์ (geiger-muller counter) เครื่องวัดรังสีชนิดเปล่งแสงวับ (scintillation detector) ได้แก่ เครื่องนับรังสีจากแสงวับแบบของแข็ง (solid scintillation counter) เครื่องนับรังสีจากแสงวับแบบของเหลว (liquid scintillation counter) เครื่องวัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ (semiconductor detector) ได้แก่ หัววัดแบบลิเทียมดริฟ (lithium drifted detector) หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (high purity germanium detector, HPGe)

การใช้หัววัดชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของรังสีที่วัดเป็นหลัก และความเหมาะสมของ หัววัดรังสีกับงานที่ตรวจวัด (ชิตารัตน์, 2548) ในการวิจัยนี้ใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ คือ เครื่องวัดรังสีแกมมาหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High-Purity Germanium; HPGe) รุ่น GMX60-P4-83 ของบริษัท ORTEC นอกจากนี้ในส่วนของ การแสดงความสามารถดูดซับซีเซียม-134 และกระจายไปในส่วนต่าง ๆ ทั้งต้นและรากแฝก สามารถทำได้จากการทำภาพถ่ายรังสีในตัว (autoradiography) โดยใช้อิมเมจิงเพลต (imaging plate) MS 2040 ยี่ห้อ Fujifilm จากนั้นอ่านภาพ และสัญญาณ PSL (photo stimulated luminescence) ด้วยเครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต (imaging plate reader) รุ่น BAS 2500 ยี่ห้อ Fujifilm

### หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง

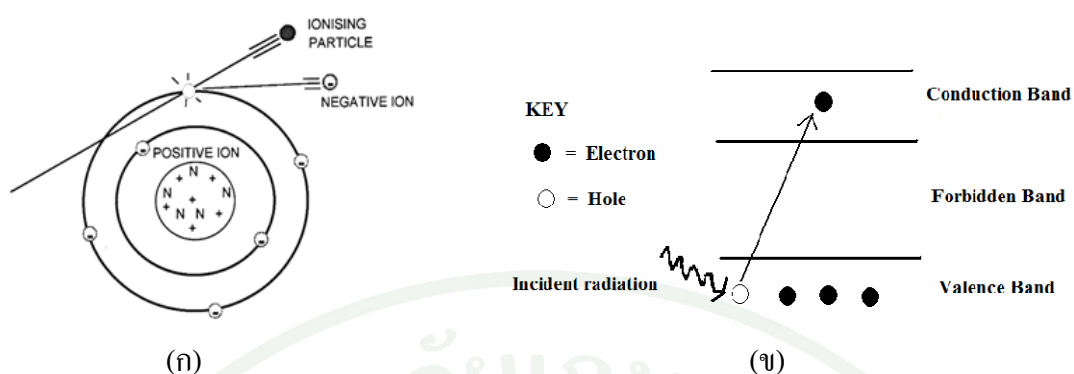
#### หลักการทำงาน

หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำ เมื่อรังสีกระทบสารกึ่งตัวนำจะเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล (electron-hole pair) การเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอน โฮล จะทำให้มีสัญญาณพัลส์เกิดขึ้น จากนั้นสัญญาณพัลส์ ก็จะผ่านเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณ วงจรนับและวิเคราะห์สัญญาณ โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม (นวลฉวี, 2536) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

การวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่มีอยู่ในตัวอย่าง ด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง ซึ่งเป็นหัววัดประเภทสารกึ่งตัวนำ มีหลักการพื้นฐาน คือ เมื่อกัมมันตภาพรังสีแกมมาตกกระทบที่หัววัด หัววัดจะได้รับพลังงานจากรังสีแล้วเกิดไอออนไนเซชัน อิเล็กตรอนซึ่งปกติอยู่ในชั้นระดับแถบเวเลนซ์ (valence band) เมื่อได้รับพลังงานมากพอ จะข้ามช่วงห่างของแถบพลังงานทั้งสอง เรียกว่าแถบต้องห้าม (forbidden band) หรือแถบช่องว่าง (band gap) โดยรังสีจะเคลื่อนที่ขึ้นไปอยู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้นคือแถบการนำ (conduction band) เรียกว่า เกิดการกระตุ้น (excitation) ของอิเล็กตรอน ทำให้ตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ว่างลง เรียกว่า โฮล (hole) ดังนั้น หลังการเกิดไอออนไนเซชันของหัววัดนี้ สิ่งที่เกิดขึ้น คือ คู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) หรือเปรียบได้กับการเกิดคู่ของไอออนขึ้นมา (ภาพที่ 5) โดยโฮลจะทำหน้าที่คล้ายประจุบวก ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ในสนามไฟฟ้า แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน การเคลื่อนที่ของประจุทั้งสองจะบ่งถึงการนำไฟฟ้าของสารนั้น (นวลฉวี, 2536) ดังนั้นปริมาณคู่อิออนที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณกัมมันตภาพรังสี และเมื่อให้ความต่างศักย์กับหัววัด คู่อิออนจะเคลื่อนย้าย ทำให้มีสัญญาณพัลส์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้

### ประเภทของหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง

หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง จะใช้เทคนิคการทำให้ผลึกมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยใช้ผลึก Ge ขนาดใหญ่ มีความบริสุทธิ์มากขึ้น จึงไม่จำเป็นต้องแพร่ Li เข้าไปแทนที่สารเจือปน และสามารถเก็บได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ต้องการไนโตรเจนเหลวในการให้ความเย็นกับระบบของหัววัดในการทำงาน รวมทั้งมีความสามารถในการแยกพลังงานในช่วง 550-700 eV (Carchon *et al.*, 2007) แบบของหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง ที่มีอยู่ทั่วไป คือ เพลนนา (planar) โคแอกเซียล (coaxial) และเวลล์ไทป์ (well-type) สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง ชนิดเพลนนา (ภาพที่ 6) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดกว้าง มีความหนา 5-15 mm. เหมาะสำหรับวัดรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาพลังงานต่ำ (3 keV – 1 MeV) หน้าต่างมักทำจากโบรอนที่มีความหนาประมาณ 0.3  $\mu\text{m}$ . (นวลฉวี, 2553)



ภาพที่ 5 การเกิดไอออนไนเซชัน (ก) และกลไกการเกิดคู่อิออนของผลึกเจอร์มาเนียม (ข)

ที่มา: IAEA and ANSTO (2006)

โครงสร้างของหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงชนิดเพลนนา จะต่อเข้ากับผิวสัมผัสทั้งสองด้าน บริเวณหน้าสัมผัส n เกิดจากการระเหยและการแพร่ลิเทียม ที่บริเวณด้านบนเป็นผิวบาง ๆ หรืออาจสอดแทรกอะตอมผู้ให้ (donor atom) เข้าไปตรง ๆ โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค ส่วนบริเวณหน้าสัมผัส p เกิดจากการสอดแทรกอะตอมผู้รับ (accepter atom) เมื่อป้อนความต่างศักย์กลับขั้ว โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส n เป็นบวกสัมพันธ์กับผิวสัมผัส p ซึ่งเมื่อความต่างศักย์มากขึ้นจะส่งผลให้สนามทั่วไปทั้งหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ถ้าค่าความต่างศักย์สูงขึ้นเพียงพอที่จะทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่พอจะทำให้ประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ก็จะทำให้ไอเล็กตรอนเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วย หัววัดเจอร์มาเนียมที่มีความบริสุทธิ์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน (Knoll, 2000)

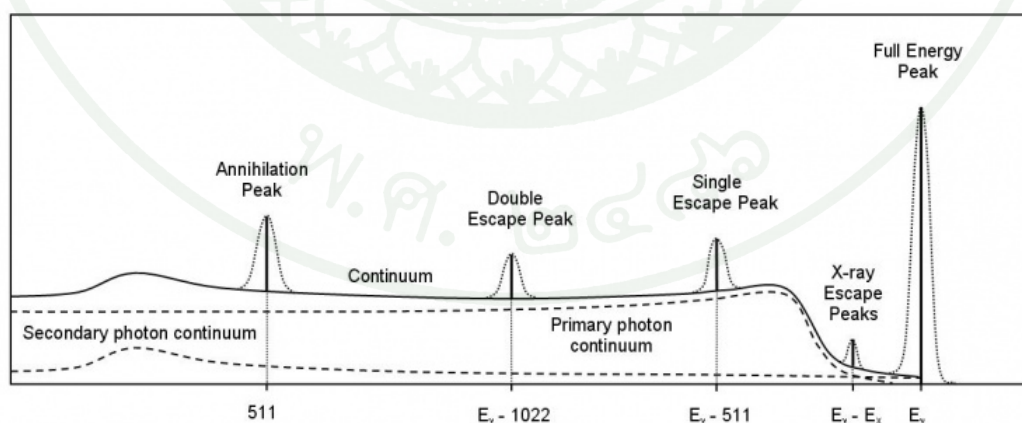


ภาพที่ 6 โครงสร้างหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงชนิดเพลนนา

ที่มา: Knoll (2000)

## สเปกตรัมของรังสีแกมมา

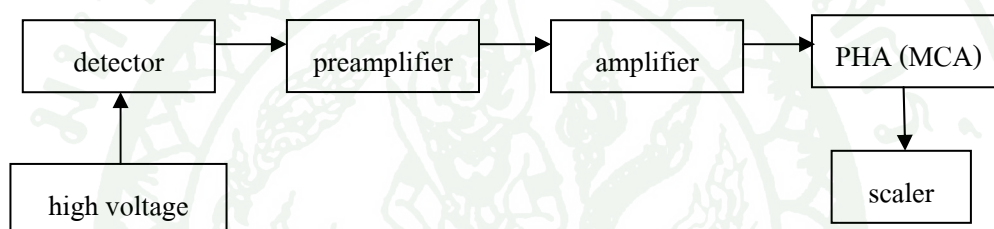
การเกิดสเปกตรัมของรังสีแกมมา สัมพันธ์กับอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับหัววัด ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (compton effect) และ แพร์โพรดักชัน (pair production) รังสีแกมมาพลังงานต่ำมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ได้มาก และเมื่อมีพลังงานสูงขึ้นก็จะมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน และแพร์โพรดักชันเพิ่มขึ้น (นวลณี, 2553) เมื่อโฟตอนพลังงานเดียว ถ่ายเทพลังงานทั้งหมดสู่หัววัด จะมีผลให้เกิดพีคพลังงานเต็ม (full energy peak) หรือ โฟโตพีค (photo peak) ในสเปกตรัมของรังสี การดูดกลืนพลังงานของรังสีไว้ทั้งหมดจะเกิดขึ้นได้ เมื่อรังสีกระทบหัววัดแล้วเกิดปรากฏการณ์ต่อไปนี้ เกิดอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เพียงครั้งเดียว เกิดการกระเจิงคอมป์ตัน (compton scattering) หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งครั้ง แต่ท้ายที่สุดโฟตอนที่กระเจิงจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดไปโดยอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก และเกิดอันตรกิริยาแพร์โพรดักชัน ร่วมกับการเกิดแอนนิฮิเลชัน เมื่อรังสีมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV เนื่องจากการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอนต้องใช้พลังงาน 1.02 MeV เป็นอย่างต่ำ และต่อมาโพสิตรอนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ พร้อมทั้งผลิตรังสีแกมมา 2 โฟตอน ที่มีพลังงานโฟตอนละ 0.511 MeV เมื่อโฟตอนทั้งสองถูกดูดกลืนไว้ จะเกิดโฟโตพีคในสเปกตรัม หากเพียงโฟตอนเดียวที่ถูกดูดกลืนไว้ ก็จะเกิด ซิงเกิลเอสเคปพีค (single escape peak) และเมื่อผลึกสารกึ่งตัวนำไม่สามารถดูดกลืนโฟตอนไว้ได้เลย พีคที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า ดับเบิลเอสเคปพีค (double escape peak) (นวลณี, 2536) (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 ซิงเกิลเอสเคปพีค และดับเบิลเอสเคปพีค

## ระบบการวัดรังสี (radiation detection system)

ระบบการวัดรังสีแกมมาประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 8 รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่าโฟตอน การวัดโฟตอนจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาในวัสดุ คืออิเล็กตรอนจะถูกผลิตขึ้นเมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับวัสดุที่ใช้ทำหัววัด แล้วจ่ายพลังงานให้กับหัววัดและผลิตสัญญาณพัลส์ (pulse) ซึ่งขึ้นกับเส้นทางของโฟตอน ดังนั้นระบบวัดรังสีจึงประกอบด้วยส่วนที่เป็นหัววัด และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำหน้าที่วัดปริมาณผลที่เกิดเนื่องจากรังสีที่ตกกระทบหัววัด แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ในรูปของกระแสไฟฟ้า ประจุไฟฟ้า หรือศักย์ไฟฟ้า อย่างใดอย่างหนึ่ง



ภาพที่ 8 ระบบการวัดรังสี

1. แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage supply, HV) ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้ากับหัววัดรังสี โดยจะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ให้เป็นกระแสตรง (DC) ซึ่งสามารถปรับค่าได้ และจะต้องมีเสถียรภาพในการรักษาศักย์ไฟฟ้าทางสัญญาณออก (output signal) (Knoll, 2000)

2. วงจรขยายส่วนหน้า (preamplifier) ทำหน้าที่รวมประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสี แล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณพัลส์ พร้อมขยายสัญญาณพัลส์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และทำหน้าที่ปรับอิมพีแดนซ์ (impedance) เพื่อรักษาสัญญาณพัลส์ให้เคลื่อนที่ผ่านสายไฟฟ้าโดยไม่เกิดการสูญเสีย (นวลฉวี, 2536)

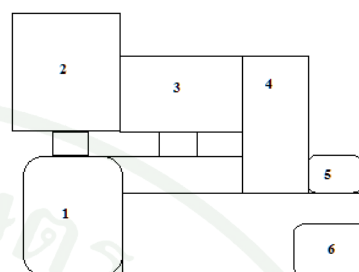
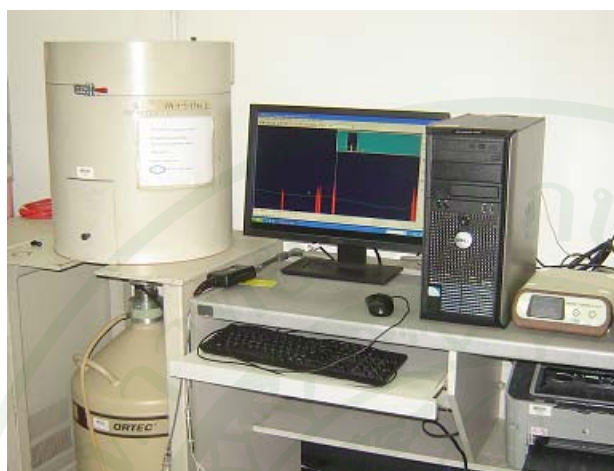
3. วงจรขยาย (amplifier) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกจากภาคขยายส่วนหน้า โดยมีหน้าที่หลักคือรับสัญญาณพัลส์ที่ได้จากภาคขยายส่วนหน้า แล้วนำมาปรับแต่งสัญญาณให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการซบเซาของสัญญาณ พร้อมทั้งขยายสัญญาณพัลส์ให้ใหญ่ขึ้น ให้เหมาะสมสำหรับการคัดเลือกและวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณต่อไป

อุปกรณ์คัดเลือก และวิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์ การคัดเลือกสัญญาณพัลส์ เพื่อตัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการออกจากระบบการนับ เช่น สัญญาณรบกวน สัญญาณจากรังสีพื้นหลังพลังงานต่ำ ใช้การเปรียบเทียบความสูงของสัญญาณพัลส์กับค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน หรือระดับดิสคริมิเนเตอร์ (discriminator level) ถ้าสัญญาณพัลส์ที่เข้ามามีความสูงเกินกว่าระดับดิสคริมิเนเตอร์ที่ตั้งไว้ จะเกิดสัญญาณออก (output signal) ถ้าต่ำกว่า ก็ไม่เกิดสัญญาณออก ส่วนการวิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์ จะบันทึกจำนวนของสัญญาณพัลส์ที่มีความสูงต่าง ๆ เพื่อแสดงสเปกตรัมของรังสีที่ตรวจวัด อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์ (pulse height analyzer; PHA) จำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

อุปกรณ์วิเคราะห์แบบช่องเดียว (single channel analyzer, SCA) ประกอบด้วย 2 ดิสคริมิเนเตอร์ คือ upper level discriminator (ULD) และ lower upper level discriminator (LLD) การแยกความสูงใน SCA อาศัยการเปรียบเทียบความสูงของสัญญาณกับค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่ถูกจัดเอาไว้ด้วย LLD และ ULD ผลต่างระหว่าง LLD และ ULD เรียกว่า หน้าต่าง (window) ซึ่งจะเลือกช่วงสัญญาณที่ต้องการวัด ถ้าสัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามาทางอินพุตมีความสูงอยู่ในหน้าต่าง หรืออยู่ระหว่าง LLD และ ULD เครื่อง SCA จะให้สัญญาณออก เป็นสัญญาณลอจิก สเปกตรัมของรังสีได้จากการนับจำนวนพัลส์ที่ความกว้างหน้าต่าง ๆ กัน ในเวลาที่เท่ากัน จากนั้นก็นำข้อมูลความสูงของสัญญาณพัลส์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนพัลส์กับความกว้างหน้าต่าง SCA มีความสามารถในการวิเคราะห์ต่ำ และต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ จึงไม่เหมาะกับการวิเคราะห์ไอโซโทปที่มีอายุสั้น (นวลจวี, 2536)

อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (multi channel analyzer, MCA) (ภาพที่ 9) ทำหน้าที่คล้ายกับนำเอา SCA หลายชิ้นมาต่อกัน ทำให้เห็นรูปสัญญาณทั้งหมด นั่นคือสามารถเห็นสเปกตรัมของรังสีที่เข้ามาตกกระทบกับหัววัดได้ทั้งหมดในเวลาเดียวกัน (วิรุฬห์ และ สุวิทย์, 2536) MCA เป็นวงจรวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ที่มีขีดความสามารถสูงกว่า SCA ทั้งในด้านความเร็ว การเก็บข้อมูล ความละเอียดของงาน การแสดงระดับพลังงาน การสื่อสารสะดวก และไม่จำเป็นต้องนำข้อมูลที่ได้ออกไปเขียนกราฟ สามารถบันทึกข้อมูล จำนวนอนุภาคแต่ละระดับพลังงานที่เข้ามากระทบหัววัดได้อย่างอัตโนมัติ และแสดงสเปกตรัมที่จอแสดงผล (นวลจวี, 2536) MCA จะแสดงผลของการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา ซึ่งจะมีลักษณะสเปกตรัมแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิด และกัมมันตภาพของสารรังสีที่ตรวจวัดนอกจากนี้ลักษณะสเปกตรัม ยังแสดงถึงความสามารถของหัววัดรังสีในการวัดรังสีที่ถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือ (Debertin and Helmer, 1998)

4. เครื่องนับ (scaler) หรือเคาท์เตอร์ (counter) ทำหน้าที่บันทึกจำนวนสัญญาณในช่วงเวลาที่แน่นอน หรือบันทึกเวลาที่สะสมเพื่อให้ได้จำนวนสัญญาณที่ต้องการ



1. ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว
2. lead shield
3. จอแสดงผล
4. CPU
5. DSpec
6. เครื่องพิมพ์

ภาพที่ 9 ระบบอุปกรณ์การวัดกัมมันตภาพรังสีแกมมา

#### ความสามารถแยกพลังงาน

รังสีแกมมาที่สลายจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีพลังงานเฉพาะค่า หากหัววัดดูดกลืนพลังงานจากรังสีแกมมาทั้งหมด ในทางทฤษฎีจะได้สเปกตรัมแบบเส้น (line spectrum) แต่ในความเป็นจริงแล้วจะได้ฟีกที่มีความกว้าง การที่มีโฟโตฟีกกว้างบ่งบอกถึงความสามารถในการแยกพลังงาน (energy resolution) ได้ไม่ดี (Ahmet, 2008) หากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายให้รังสีแกมมาสลายให้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน ในสเปกตรัมจะแสดงโฟโตฟีกเท่ากับจำนวนพลังงานของรังสีแกมมาหรือไม่ นั่นขึ้นอยู่กับความสามารถในการแยกพลังงานของหัววัด ซึ่งแสดงได้จากค่าการแยกพลังงาน ดังสมการที่ 1

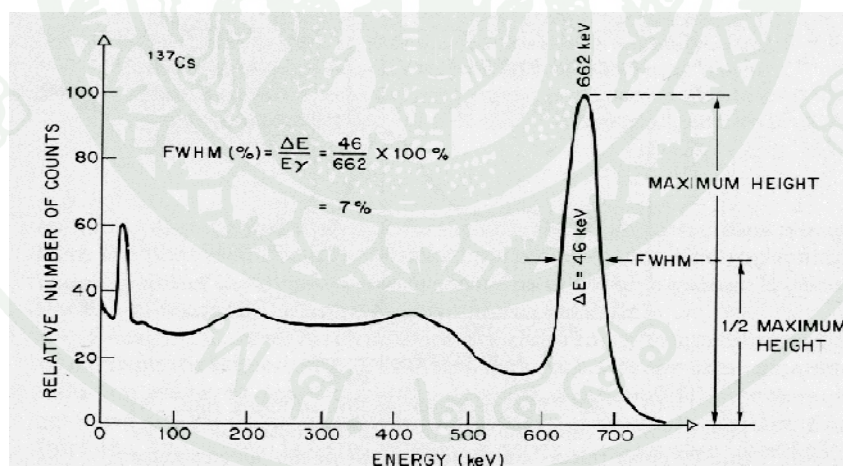
$$\text{Resolution} = \frac{\text{FWHM}}{E} \quad (1)$$

เมื่อ FWHM = ความกว้างของฟีกที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงฟีก (KeV)  
E = พลังงานของรังสีแกมมา (KeV)

ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งความสูงของพีค ทำให้โดยวัดค่านับวัดสูงสุดที่ยอดของโฟโตพีค และอ่านค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งนี้ จากนั้นหาตำแหน่งของพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของค่านับวัดของโฟโตพีค ซึ่งค่าพลังงานที่ได้จะมี 2 ค่า คือ ค่าที่อยู่ด้านซ้ายและด้านขวาของโฟโตพีค และจะได้ค่าความแตกต่างของพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของค่านับวัด ( $\Delta E$ ) (ภาพที่ 10) ซึ่งปกติโฟโตพีคจะมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ (gaussian) (Gilmore and Heminway, 2004)

### การหาค่ากัมมันตภาพรังสี

การหาค่ากัมมันตภาพรังสีของตัวอย่าง ต้องทราบค่าประสิทธิภาพ (efficiency) การวัดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นๆ ซึ่งค่าประสิทธิภาพการวัดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ตำแหน่งการวางตัวอย่างบนหัววัด ขนาด รูปทรงและเมทริกซ์ของตัวอย่าง ชนิด และการกระจายตัวของสารกัมมันตรังสีในตัวอย่าง โดยประสิทธิภาพการวัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี เป็นสัดส่วนของค่านับวัดรังสีเกมมาบนพื้นที่ของโฟโตพีคต่อกัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสีที่ทำการวัดประสิทธิภาพของหัววัด มีค่าแตกต่างกันสำหรับรังสีแต่ละพลังงาน โดย



ภาพที่ 10 โฟโตพีค ของรังสีเกมมาพลังงาน 0.662 MeV และการคำนวณการแยกชัดพลังงาน

ที่มา: Lewellen (2008)

เมื่อวัดรังสีที่มีพลังงานสูงขึ้น พบว่า ประสิทธิภาพของหัววัดจะมีค่าลดลง เช่นเดียวกับ ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดยังมีระยะห่างกันมาก จะทำให้ประสิทธิภาพของหัววัดมีค่าลดลง (Ahmet, 2008)

$$\text{ประสิทธิภาพ (\%)} = \frac{(N/t)}{100 (a \times A)} \quad (2)$$

เมื่อ	N	คือ นับสุทธิของฟีกที่พลังงานนั้นๆ (count)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการนับ (sec)
	a	คือ อัตราส่วนของโฟตอนที่ปล่อยออกมาต่อการสลายตัว (gamma emission ratio)
	A	คือ กัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมาตรฐาน (เบ็กเคอเรล)

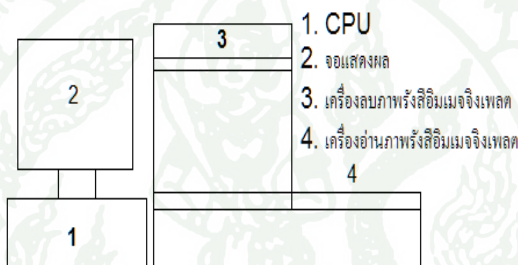
จากสมการที่ 2 เมื่อทราบค่าประสิทธิภาพการวัดของแต่ละชนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่มีในตัวอย่าง สามารถคำนวณหา กัมมันตภาพรังสี ได้ดังสมการ (3)

$$A = \frac{(N/t)}{(100 \times a) \times \text{ประสิทธิภาพ (\%)}} \quad (3)$$

### การทำภาพถ่ายรังสีในตัว (autoradiography)

วิทยาการทางด้านรังสี มีส่วนในการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การพัฒนาของเครื่องถ่ายภาพทางรังสี เพื่อใช้กับงานด้านรังสีวินิจฉัย รังสีรักษา และเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ในงานทางด้านรังสี เริ่มตั้งแต่เอกซเรย์เครื่องแรกที่ผลิตโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน (Wilhelm Konrad Roentgen) จนเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์เอกซเรย์ (computerized tomography) เครื่องแมกเนติกเรโซแนนซ์ (magnetic resonance imaging) และเครื่องดิจิตอลเอกซเรย์ (digital x-ray apparatus) จนกระทั่งในปี 1971 การนำเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อการสร้างภาพทางด้านรังสี ซึ่งเรียกว่าการสร้างภาพด้วยระบบดิจิตอล (digital imaging) ใช้หลักการเรียงแสงของฉากรับภาพรังสี แต่มีเทคนิคเช่นเดียวกับฟิล์มเอกซเรย์ คือ ใช้วัสดุพิเศษทำแผ่นรับภาพคล้ายฟิล์ม ไม่ต้องผ่านขบวนการล้างฟิล์ม แต่นำไปผ่านเครื่องอ่านแผ่นรับภาพรังสีแทน ซึ่งแสดงผลข้อมูลออกมาเป็นระบบดิจิตอลด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อใช้งานแล้วยังนำแผ่นรับภาพนั้นมาใช้ได้อีกไม่จำกัดจำนวนครั้ง

เครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต (imaging plate reader) รุ่น BAS 2500 ยี่ห้อ Fujifilm สำหรับอ่านภาพและสัญญาณ PSL (photo stimulated luminescence) ของแผ่นที่อัดแห้งโดยใช้ อิมเมจิงเพลต (imaging plate) MS 2040 ยี่ห้อ Fujifilm



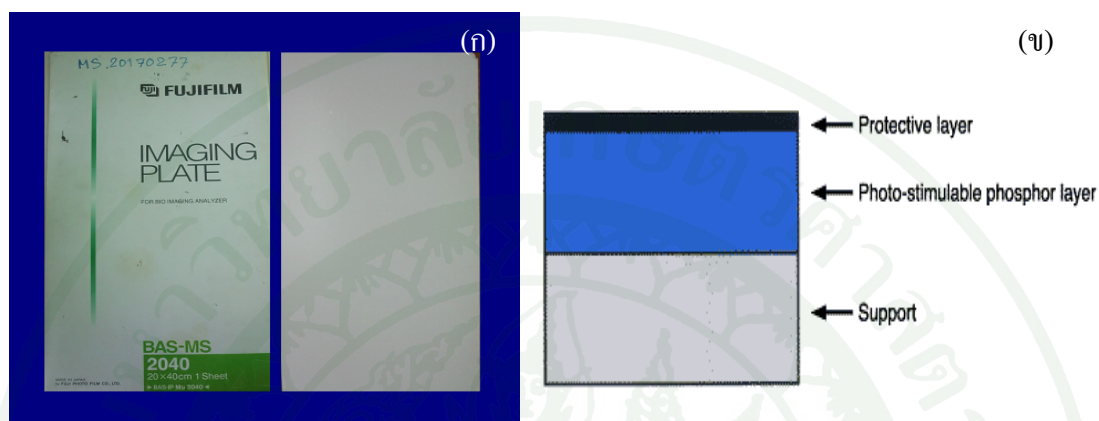
ภาพที่ 11 เครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต

#### หลักการทํางาน

อุปกรณ์หลักในระบบวัดนี้ประกอบด้วย อิมเมจิงเพลต เครื่องอ่านอิมเมจิงเพลตคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ภาพถ่ายทางรังสี การทํางานของอุปกรณ์ต่าง ๆ มีดังนี้

อิมเมจิงเพลต (imaging plate) MS 2040 ยี่ห้อ Fujifilm BAS-IP MS ขนาด  $20 \times 40$  เซนติเมตร ลักษณะแผ่นเป็นสีขาว โครงสร้างของแผ่นมีความยืดหยุ่น ประกอบด้วยผลึกสารเรืองแสงขนาดเล็กขนาดผลึกประมาณ  $5 \mu\text{m}$  เป็นสารประกอบ แบเรียมฟลูออโรโบรไมด์ (barium fluorobromide) ที่เจือด้วยยูโรเปียม (bivalent europium) เล็กน้อย ทำหน้าที่เป็น luminescence center มีสูตรโมเลกุลเป็น  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  เคลือบอยู่บนแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ (polyester) โครงสร้างของแผ่นอิมเมจิงเพลตมี 3 ชั้น ได้แก่ชั้นแผ่นฐาน (support layer) ชั้นแผ่นฐานที่ทำจากแผ่นโพลีเอสเตอร์ (polyester) มีความหนา 2 มิลลิเมตร ชั้นของผลึกเรืองแสง (photo-stimulate phosphor layer) เป็นชั้นของผลึกเรืองแสง เคลือบด้วยสารเรืองแสงชนิด  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  และชั้น protective

layer เป็นชั้นที่ป้องกันการกระทบกระเทือนของผลึกเรืองแสง จากกระบวนการบันทึกและอ่านภาพ โดยเคลือบทับด้วยสารโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต (polyethyl-ene terephthalate) ชั้นนี้มีความหนา 10  $\mu\text{m}$  (ภาพที่ 12)



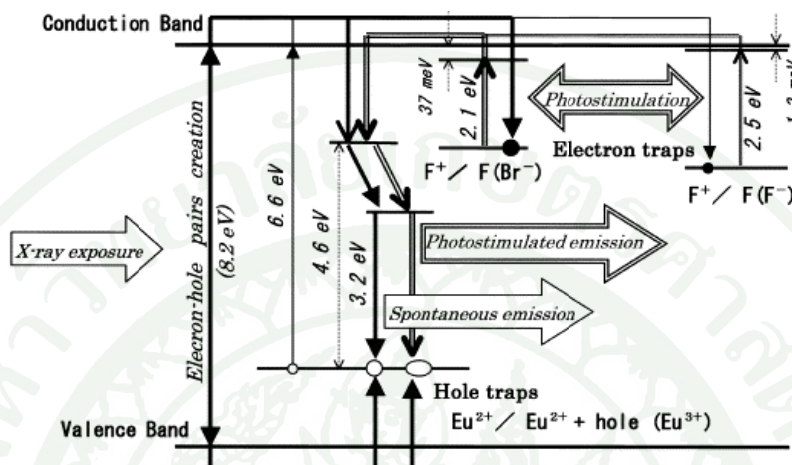
ภาพที่ 12 อิมเมจิงเพลต (ก) และโครงสร้าง (ข)

ที่มา: Glenn (1989)

หลักในการบันทึกภาพของอิมเมจิงเพลตมีดังนี้ จากโครงสร้างของอิมเมจิงเพลต ชั้นที่บันทึกภาพคือชั้นผลึกเรืองแสงซึ่งเป็นกลุ่มของผลึกขนาดเล็กประมาณ 5  $\mu\text{m}$  เป็นกลุ่มของสารแบเรียมฟลูออไรด์โบรไมด์เจือยูโรเปียม ( $\text{BaF}(\text{Br}, \text{Cl}, \text{I}):\text{Eu}^{2+}$ ) เนื่องจากผลึกเรืองแสงนี้ไม่ได้เป็นผลึกที่บริสุทธิ์ เพราะว่ามีกรเจือด้วยยูโรเปียมและสารฮาโลเจนไอออน ดังนั้นจึงเกิดบริเวณแตรป (trape) ขึ้นระหว่างแถบเวเลนซ์ (valance band) และแถบการนำ (conduct band) (ภาพที่ 13) ซึ่งเป็นบริเวณที่พร้อมรับการถ่ายโอนพลังงานรังสี ถ้าพิจารณาในรูป บริเวณ hole traps นั้นเกิดจากการเจือยูโรเปียม ส่วนบริเวณ electron traps เกิดจากสารฮาโลเจน หรือที่เรียกว่า F-center ซึ่งจะดักจับอิเล็กตรอนโดยตำแหน่งแลตทิซ (lattices) ที่ว่างของฮาโลเจน คือ  $\text{F}(\text{Br}, \text{Cl}, \text{I})$  หรือ  $\text{F}(\text{F})$

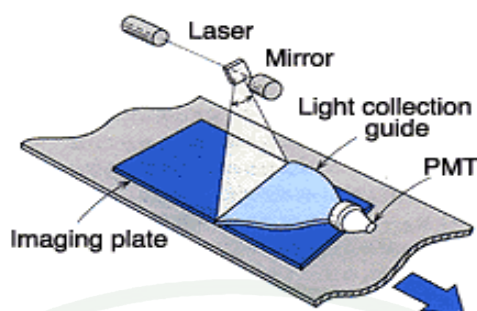
เมื่อฉายรังสีให้กับอิมเมจิงเพลต จะส่งผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จำนวนมากมาย โดยจะเป็นสัดส่วนกับการดูดกลืนพลังงานของสารรังสี  $\text{Eu}^{2+}$  จะเกิดการไอออไนซ์เป็นเอกซิตรอน (Exitron) กลายเป็น  $\text{Eu}^{3+}$  อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออไนซ์ จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า โดยอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานอยู่ระดับ 6.6 eV จะสามารถเคลื่อนที่สู่แถบการนำ ส่วนอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่ำกว่า 6.6 eV จะไม่สามารถเคลื่อนที่สู่แถบการนำได้ ก็จะคืนสู่

สถานะพื้น ของ  $\text{Eu}^{3+}$  เป็น  $\text{Eu}^{2+}$  ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่สู่แถบการนำก็จะลดระดับพลังงานลงสู่ F-center และถูกกักไว้ นั่นก็คือการเก็บบันทึกปริมาณรังสีนั่นเอง ดังนั้นประสิทธิภาพในการบันทึกปริมาณรังสีจะขึ้นกับปริมาณของ F-center



ภาพที่ 13 กลไกการเรืองแสงของอิมเมจิงเพลต

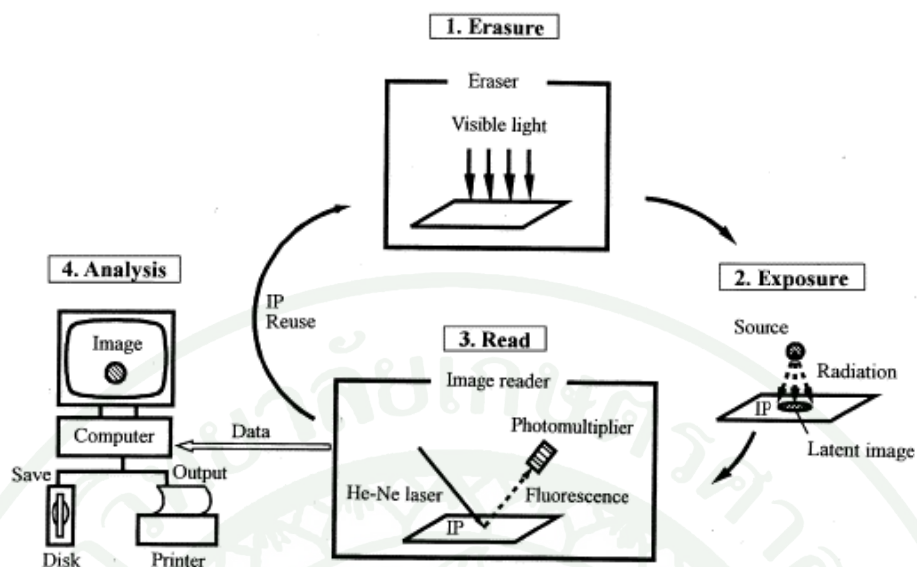
เมื่อเราถ่ายภาพบนอิมเมจิงเพลตแล้ว แผ่นจะบันทึกภาพเป็นไปตามกลไกข้างต้น เมื่อนำอิมเมจิงเพลตไปผ่านเครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต เครื่องอ่านจะอ่านภาพที่เก็บบันทึกไว้ที่แผ่นบันทึกภาพ ด้วยการใช้แสงเลเซอร์กระตุ้น เพื่อให้แผ่นบันทึกภาพเกิดการเปล่งแสงออกมา แสงเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นนี้ มีความยาวคลื่นประมาณ  $633 \mu\text{m}$  โดยปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดเลเซอร์ชนิด He-Ne (Helium-neon) ถ้าเลเซอร์ที่ตกกระทบบนอิมเมจิงเพลตแต่ละจุด จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้ที่ F-center ได้รับพลังงานแล้วเคลื่อนที่สู่แถบการนำ แล้วจะกลับคืนสู่สถานะพื้น ซึ่งจะหยุดอยู่ที่สถานะพัก ซึ่งเป็นแตรระหว่างระดับแถบเวเลนซ์และแถบการนำ ก่อนที่จะกลับลงสู่สถานะพื้น โดยจะปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วง  $390 \mu\text{m}$  แสงที่ปล่อยออกมานี้เรียกว่า photo stimulated luminescence (PSL) แล้วอิเล็กตรอนก็จะกลับไปรวมตัวกับ  $\text{Eu}^{3+}$  คืนสถานะของไอออนเป็น  $\text{Eu}^{2+}$  ดังเดิม ตัวตรวจวัดแสงทวีคูณแบบหลอดสุญญากาศ (photomultiplier tube, PMT) จะทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงที่ปล่อยออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบระบบดิจิทัล (ภาพที่ 14) ความเข้มของแสงจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้ในบริเวณ F-center สัญญาณดิจิทัลที่ได้ จะถูกส่งต่อเข้าระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อจะสร้างภาพในลักษณะ 2 มิติ และสามารถปรับภาพตามความต้องการได้



ภาพที่ 14 การแปลงสัญญาณของข้อมูลจากอิมเมจิงเพลต

การลบพลังงานที่ถูกบันทึกในอิมเมจิงเพลต ด้วยเครื่องลบสัญญาณแบบดิจิทัล ซึ่งจะทำการลบพลังงานที่ตกค้างบนแผ่นอิมเมจิงเพลตให้หมดไป โดยการสแกนด้วยความยาวคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสงสูง อิมเมจิงเพลตที่ผ่านเครื่องลบสัญญาณแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกไม่จำกัดครั้ง กระบวนการในการใช้อิมเมจิงเพลต คือ เมื่อนำอิมเมจิงเพลตฉายรังสีตามเวลาที่ต้องการแล้วก็นำไปผ่านเครื่องอ่านภาพอิมเมจิงเพลต ซึ่งจะได้ภาพออกมาในลักษณะ 2 มิติ และได้ผลการวิเคราะห์ออกมาเป็นระบบดิจิทัล หลังจากนั้นก็นำอิมเมจิงเพลตผ่านเครื่องลบสัญญาณซึ่งทำให้เราสามารถนำกลับมาใช้ได้ไม่จำกัดครั้ง (ภาพที่ 15)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีในตัว แสดงค่าการสะสมซีเซียม-134 ในแผ่นทำให้เห็นภาพความสามารถของแผ่น ในการดูดสารกัมมันตรังสี เช่นเดียวกับการทดลองของ Soudek *et al.* (2003) ใช้ฟิล์มเอ็กซเรย์ ซึ่งต้องผ่านกระบวนการล้างฟิล์มที่ต้องใช้สารเคมี ส่วนการใช้อิมเมจิงเพลต ใช้เครื่องอ่านภาพ ที่สามารถทำได้รวดเร็วและสะดวกกว่า แสดงให้เห็นว่า อิมเมจิงเพลตนอกจากจะนำมาใช้ในด้านการแพทย์ (Furutani *et al.*, 2006, Hirota *et al.*, 2001, Ito *et al.*, 2001) ด้านสิ่งแวดล้อม (Hatan *et al.*, 2012, Sugiyama *et al.*, 2005) ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อังศุมาลิน และคณะ, 2552) แล้ว ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านชีววิทยา และการเกษตรได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 15 กระบวนการใช้งานอิมเมจิงเพลต

ที่มา: Hirota (2001)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. แฝกที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แหล่งพันธุราชนูรี และสุราษฎร์ธานี
2. สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน ซีเซียม-134 กัมมันตภาพ 4 MBq ผลิตโดยบริษัท CERCA LEA ประเทศฝรั่งเศส
3. เครื่องวัดรังสีแกมมาหัววัดเจอร์มานเนียมความบริสุทธิ์สูง (High-Purity Germanium; HPG $\epsilon$ ) รุ่น GMX60-P4-83 ของบริษัท ORTEC ประกอบด้วยถังบรรจุไนโตรเจนเหลว วงจรขยาย ส่วนหน้า วงจรขยาย แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูง และ อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์
4. เครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต (imaging plate reader) รุ่น BAS 2500 ยี่ห้อ Fujifilm
5. อิมเมจิงเพลต (imaging plate) MS 2040 ยี่ห้อ Fujifilm ตัวแผ่นเป็นสีขาว ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร
6. หลอดอินฟราเรด (IR lamp)
7. ชุดเก็บและอัดตัวอย่างพรรณพืช
8. อุปกรณ์การป้องกันทางรังสี เช่น ตู้ดูดควัน (fume hood) แถงตะกั่ว และอุปกรณ์สำหรับกำบังรังสี หน้ากาก ถุงมือ ถึงขยะสำหรับเก็บกากกัมมันตรังสี



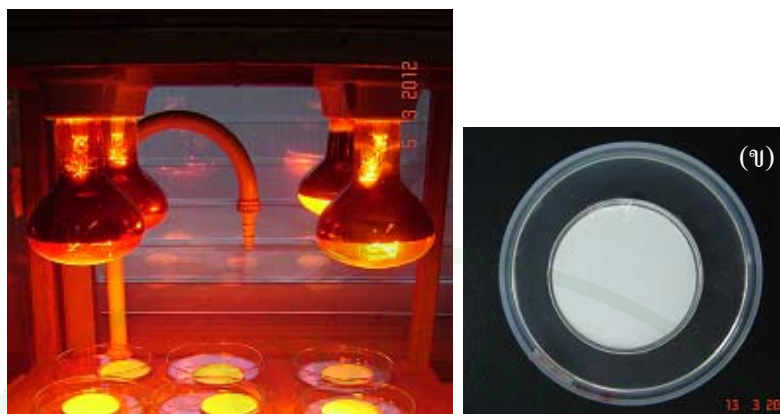
ภาพที่ 16 สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน ซีเซียม-134



ภาพที่ 17 ระบบวัดรังสีแกมมา หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (ก) และถังบรรจุไนโตรเจนเหลว (ข)



ภาพที่ 18 ระบบเครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต (ก) และอิมเมจิงเพลต (ข)



ภาพที่ 19 หลอดไฟอินฟราเรด (ก) และตัวอย่างสารกัมมันตรังสีมาตรฐาน ซีเซียม-134 (ข)



ภาพที่ 20 ชุดเก็บและยึดตัวอย่างพรรณพืช

## วิธีการ

ก่อนดำเนินการทดลอง ได้เตรียมตัวอย่างต้นกล้าแฝกและเตรียมสารละลายซีเซียม-134 เพื่อปลูกแฝกดังนี้

### การเตรียมตัวอย่างแฝก

1. เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อแฝกโดยเตรียมต้นกล้าแฝก แหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ใช้สูตรอาหารเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช (Murashige and Skoog, 1962) (ภาพที่ 21ก) เมื่อได้ต้นกล้าแฝกที่สมบูรณ์แล้ว จึงนำออกจากขวดแล้วปลูกไว้ในกระบะเพาะชำ ภายในเรือนทดลอง นานประมาณ 2 เดือน (ภาพที่ 21ข)
2. เลือกกล้าแฝกที่มีลักษณะแข็งแรง มีขนาด ความสูง และปริมาณรากใกล้เคียงกัน เพื่อนำไปปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ต่อไป



ภาพที่ 21 เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อแฝก (ก) และปลูกแฝกลงดิน (ข)

### การเตรียมสารละลายปลูกแฝก

ใช้สารละลายกัมมันตรังสีมาตรฐานซีเซียม-134 ผลิตโดยบริษัท CERCA LEA ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งใบรับรองระบุไว้ว่า มีค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพ  $292.5 \text{ kBq.g}^{-1}$  ผลิตเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2554 เตรียมสารละลายปลูกแฝกให้มีความเข้มข้นซีเซียม-134 2.5, 5.0 และ  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  จากสารละลายกัมมันตรังสีมาตรฐานดังกล่าว และวัดสเปกตรัมของซีเซียม-134 โดยเครื่องวัดรังสีแกมมา

ห้ววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง พร้อมคำนวณกัมมันตภาพของซีเซียม-134 และประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมาห้ววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง ดังนี้

1. เติมสารละลายมาตรฐานซีเซียม-134 ปริมาณ 1.3500, 2.7000 และ 4.0499 กรัม ลงในภาชนะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 เซนติเมตร สูง 5.8 เซนติเมตร ที่บรรจุน้ำกลั่น 138.6500, 137.3000 และ 135.9501 กรัม ตามลำดับ จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นซีเซียม-134 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup> ตามลำดับ ดังภาพที่ 22

2. หยดสารละลายกัมมันตรังสีซีเซียม-134 0.1 มิลลิลิตร ของแต่ละความเข้มข้น บนกระดาษกรองที่อยู่ในจานนับรังสี ดังภาพที่ 19 (ข) แล้วทำให้แห้งด้วยหลอดไฟอินฟราเรด ก่อนนำไปวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาจากซีเซียม-134 ด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาห้ววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง ใช้เวลานับวัด 600 วินาที

3. คำนวณประสิทธิภาพ และคำนวณกัมมันตภาพรังสีซีเซียม-134 จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ



ภาพที่ 22 สารละลายมาตรฐานซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

ตารางที่ 4 กัมมันตภาพสารละลายรังสีมาตรฐานซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

ความเข้มข้น (MBq L <sup>-1</sup> )	ค่านับสุทธิ (count)	อัตรานับ/วินาที (cps)	กัมมันตภาพ (Bq)
2.5	7,765	12.94	217.73
	8,175	13.63	229.23
	8,224	13.71	230.60
5	14,361	23.94	402.69
	16,333	27.22	457.98
	16,364	27.27	458.85
7.5	24,603	41.01	689.87
	20,834	34.72	584.19
	25,878	43.13	725.63

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 604.92 keV

ความเข้มข้นสารละลายซีเซียม-134 (MBq L <sup>-1</sup> )	ตัวอย่าง	ค่านับสุทธิ (count) (604.72 keV)	ประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีแกมมา
2.5	1	7,765	5.96
	2	8,175	6.27
	3	8,224	6.31
5.0	1	14,361	5.51
	2	16,333	6.26
	3	16,364	6.28
7.5	1	24,603	6.29
	2	20,834	5.33
	3	25,878	6.62
<b>ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของเครื่องวัด</b>			<b>6.09</b>

## การดำเนินการทดลอง

ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 การทดลอง ได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารกัมมันตรังสีต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก 2 แหล่งพันธุ์ และการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการปลูกต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก

### การทดลองที่ 1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารกัมมันตรังสี ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก 2 แหล่งพันธุ์

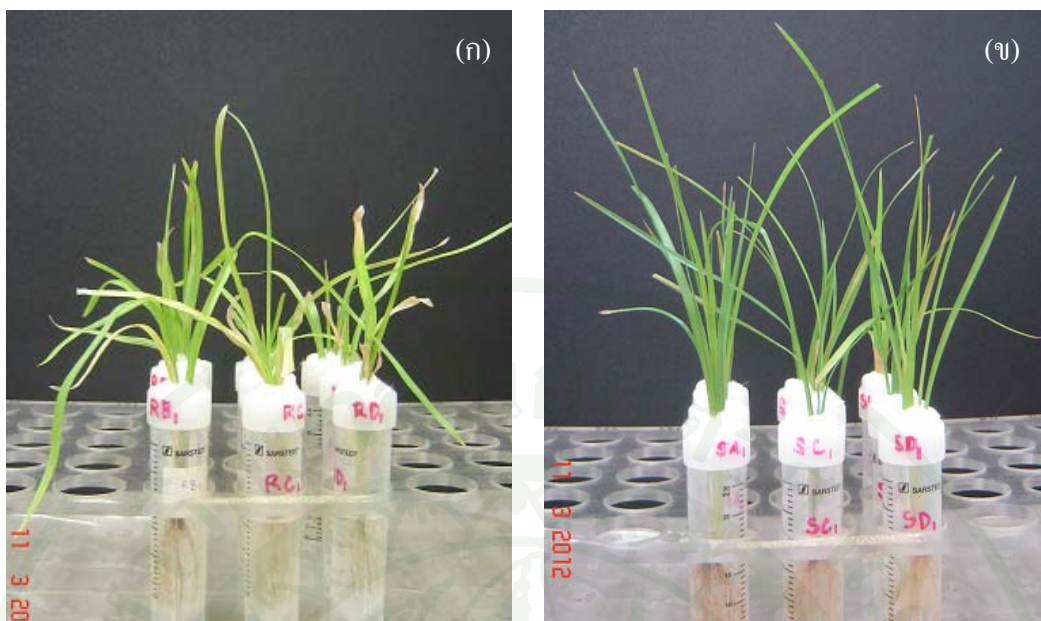
ในการทดลองนี้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารกัมมันตรังสี ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก 2 แหล่งพันธุ์ ได้แก่ แหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของซีเซียม-134 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup> โดยการทดลองมี 3 ซ้ำ แบ่งสารละลายกัมมันตรังสีซีเซียม-134 ที่มีความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup> เพื่อปลูกแฝก 1 ต้น ใน 1 หลอดทดลอง จำนวนหลอดทดลองรวมทั้งสิ้น 18 หลอด ซึ่งการปลูกแฝกดำเนินการทดลองดังนี้

1. คัดเลือกต้นกล้าแฝกที่เตรียมไว้และทราบน้ำหนัก ปลูกในสารละลาย ดังภาพที่ 23 ควบคุมอุณหภูมิ 25-28 องศาเซลเซียส ช่วงแสง 12 ชั่วโมง/วัน
2. หลังจากปลูกลานาน 5 วัน นำแฝกออกจากสารละลาย ชั่งน้ำหนักแฝกและสารละลายที่เหลืออยู่
3. ล้างรากแฝกให้สะอาดจนปราศจากสารกัมมันตรังสี โดยปล่อยน้ำประปาไหลผ่าน 3-4 ชั่วโมง ซับให้แห้ง
4. นำแฝกไปอัดด้วยเครื่องอัดแห้ง ใส่ตู้อบอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง
5. ทำภาพถ่ายรังสีในตัว แสดงการกระจายของซีเซียมกัมมันตรังสีในต้นแฝก โดยนำแฝกทั้ง 2 แหล่งพันธุ์ที่อัดแห้งแล้ว ทาบบนอิมเมจิงเพลต นาน 10 นาที
6. อ่านภาพและสัญญาณ PSL ด้วยเครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต

## การทดลองที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการปลูก ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก

การทดลองมี 3 ซ้ำ จำนวนหลอดทดลองรวมทั้งสิ้น 18 หลอด ซึ่งการปลูกแฝกดำเนินการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายซีเซียม-134 ที่เหลืออยู่จากการทดลองที่ 1 โดยนำสารละลายซีเซียม-134 ทุกความเข้มข้นมารวมกัน จะมีความเข้มข้นซีเซียม-134 ประมาณ  $5.0 \text{ MBq L}^{-1}$  ใช้หลอดทดลองปริมาตร 20 มิลลิลิตร รวม 18 หลอด
2. คัดเลือกต้นกล้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่เตรียมไว้ และทราบน้ำหนัก ปลูกในสารละลาย ดังภาพที่ 24 ควบคุมอุณหภูมิ 25-28 องศาเซลเซียส ช่วงแสง 12 ชั่วโมง/วัน
3. ปลูกแฝกในสารละลายนาน 3 6 9 12 15 และ 18 วัน
4. หลังจากปลูกแฝกนาน 3 วัน นำแฝกชุดแรกออกจากสารละลายปลูก ชั่งน้ำหนักแฝกและสารละลายที่เหลืออยู่
5. แฝกชุดที่ 2 ถึงชุดที่ 6 ทำลักษณะเดียวกับข้อ 4 คือ หลังจากปลูกนาน 6 9 12 15 และ 18 วัน นำแฝกออกจากสารละลายปลูก ชั่งน้ำหนักแฝกและสารละลายที่เหลืออยู่
6. ล้างรากแฝก โดยปล่อยน้ำประปาไหลผ่าน 3-4 ชั่วโมง ชับให้แห้ง
7. นำแฝกไปอัดด้วยเครื่องอัดแห้ง ใส่ตู้อบอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง
8. ทำภาพถ่ายรังสีในตัว แสดงการกระจายของซีเซียมกัมมันตรังสีในต้นแฝก โดยนำแฝกทั้ง 2 แหล่งพันธุ์ที่อัดแห้งแล้ว ทาบบนอิมเมจิงเพลต
9. อ่านค่าสัญญาณ PSL ด้วยเครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต



ภาพที่ 23 แผลงแหล่งพันธุ์ราชบุรี (ก) และสุราษฎร์ธานี (ข) ที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้น ซีเซียม-134 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>



ภาพที่ 24 แผลงในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 5.0 MBq L<sup>-1</sup>

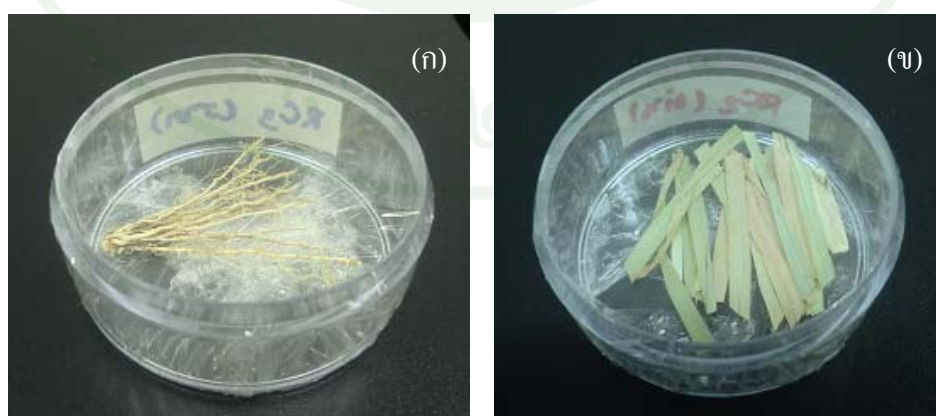
### การวัดกัมมันตภาพรังสีซีเซียม-134 ในสารละลายหลังการปลูก

สารละลายที่ปลูกแฟกทุกคำรับทดลอง ต้องวัดกัมมันตภาพก่อนปลูกและหลังปลูก เพื่อดูประสิทธิภาพในการบำบัดของแฟก โดย

1. คุดสารละลายปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในงานนับรังสี
2. ทำให้แห้งด้วยหลอดไฟอินฟราเรด
3. วัดกัมมันตภาพ ด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาห้ววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง ใช้เวลานับวัด 600 วินาที
4. คำนวณกัมมันตภาพซีเซียม-134 ในตัวอย่างจากสมการที่ (3)

### การวัดกัมมันตภาพจำเพาะในต้นและราก

1. ตัดแยกส่วนรากและต้น ชั่งน้ำหนักชิ้นส่วน ดังภาพที่ (25)
2. วัดกัมมันตภาพของรากและต้น ด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาห้ววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง โดยใช้เวลานับวัด 600 วินาที



ภาพที่ 25 ตัดแยกส่วนรากแฟก (ก) และต้นแฟก (ข)

3. คำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่าง จากสมการที่ (4)

$$A = \frac{(N/t)}{a \times \text{ประสิทธิภาพ} (\%) \times W} \quad (4)$$

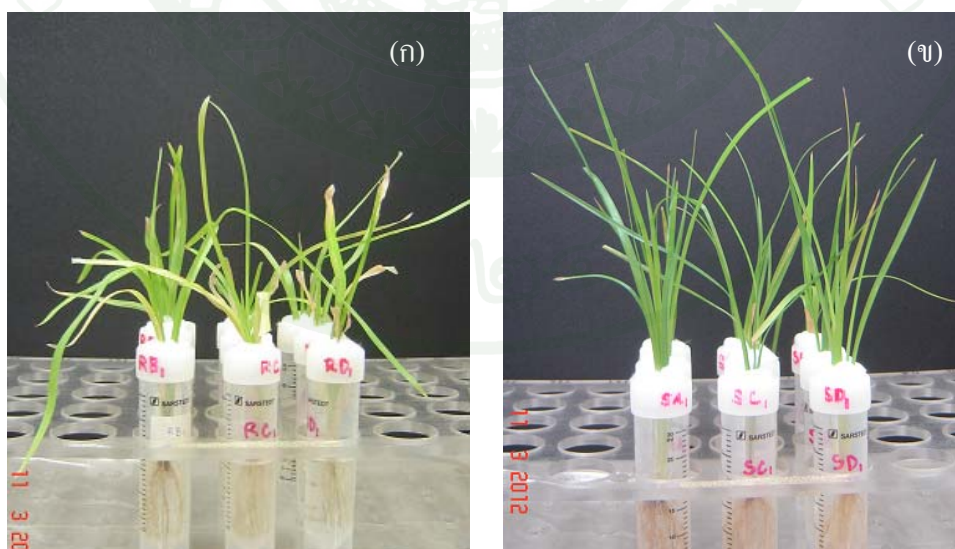
เมื่อ	A	คือ	กัมมันตภาพจำเพาะ (Bq g <sup>-1</sup> )
	N	คือ	นับสุทธิของพีคที่พลังงานนั้น ๆ ต่อวินาที (count)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการนับ (s)
	a	คือ	อัตราส่วนของโฟตอนที่ปล่อยออกมาต่อการสลายตัว
	W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

## ผลและวิจารณ์

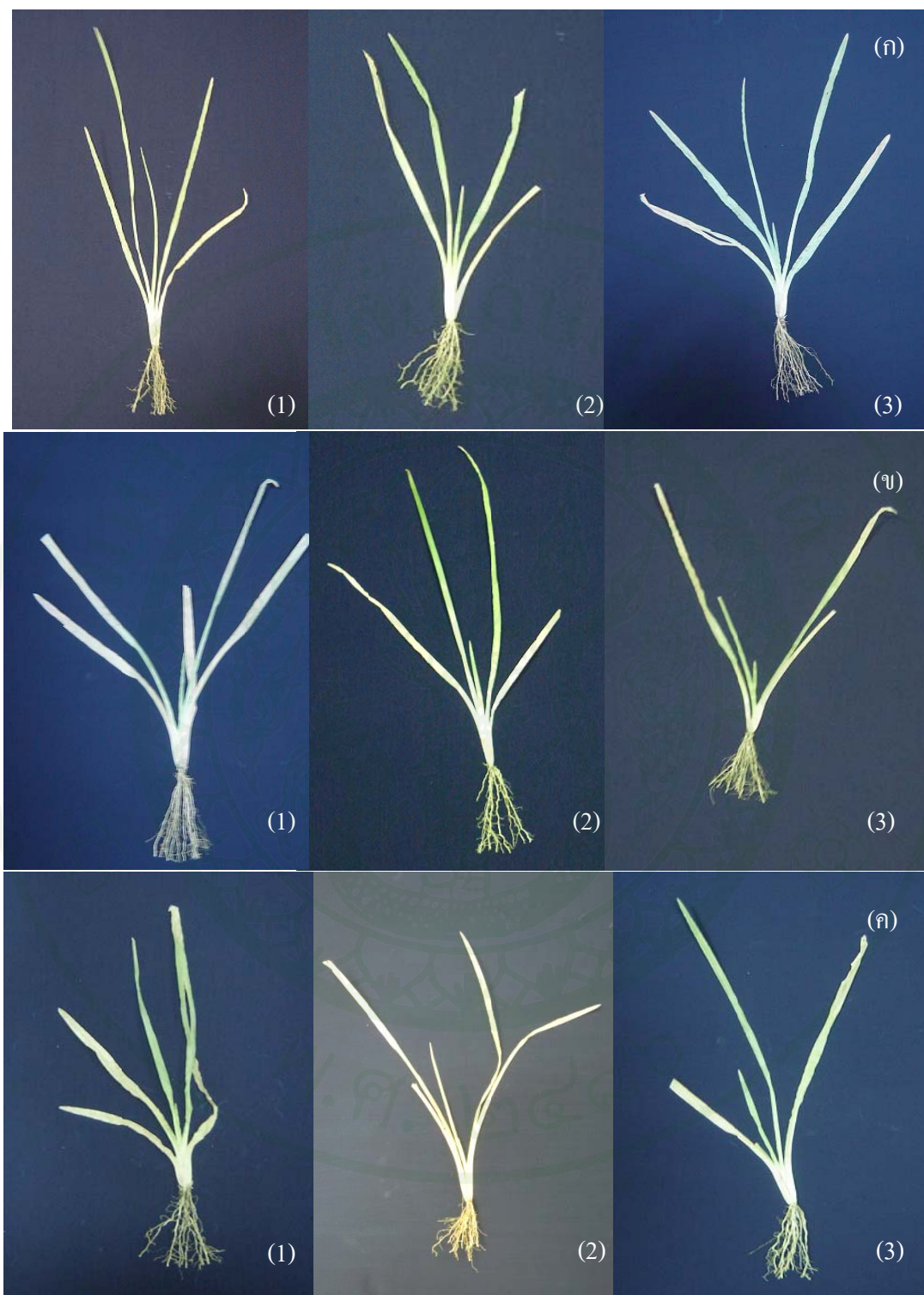
### 1. การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารกัมมันตรังสี ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของ แฝก 2 แหล่งพันธุ์

#### 1.1 การกระจายของซีเซียม-134 ในดินและรากแฝก โดยการทำภาพถ่ายรังสีในตัว โดยอิมเมจิงเพลต

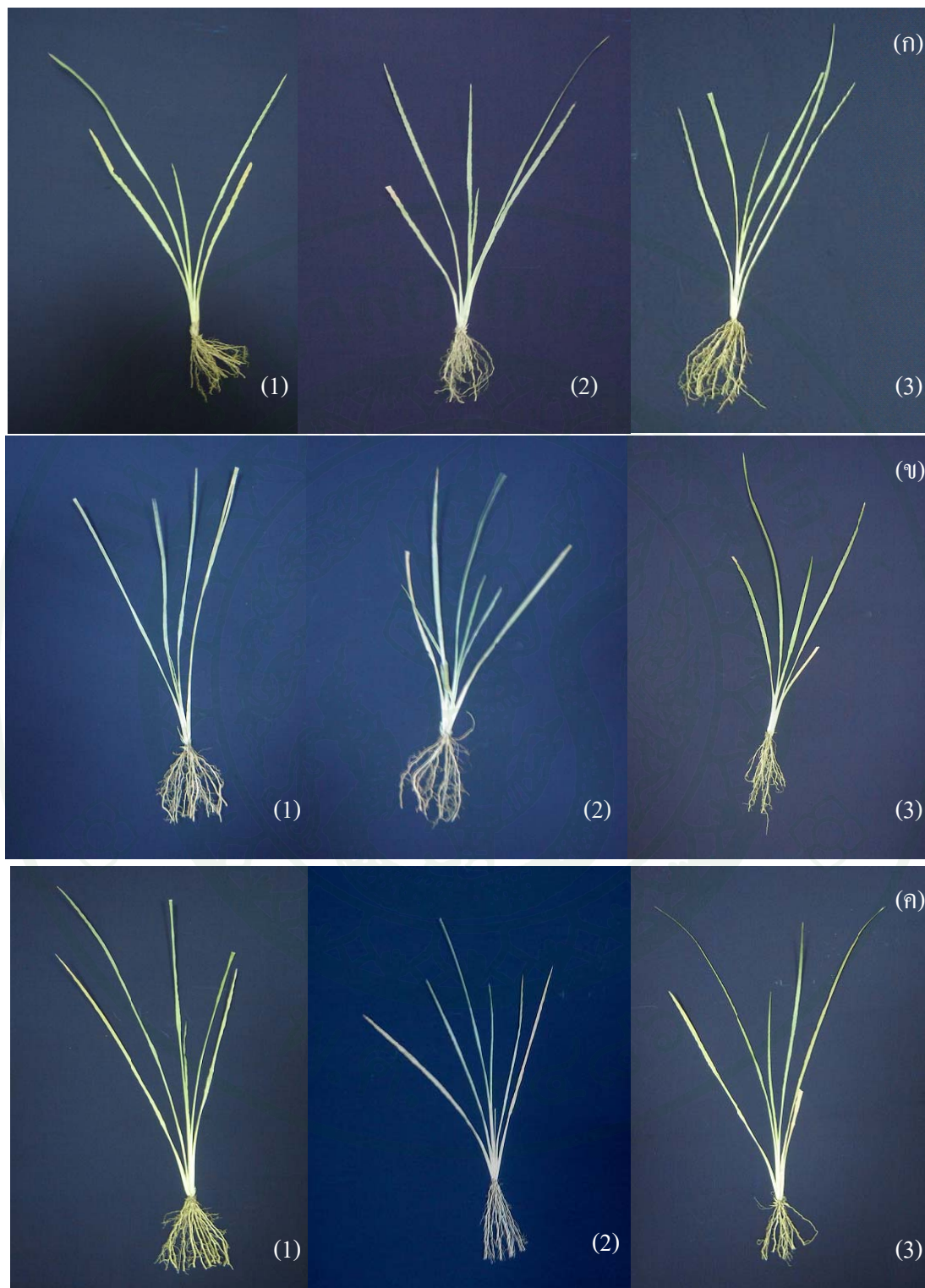
แฝกทั้ง 2 แหล่งพันธุ์ คือ แฝกพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup> โดยปลูกนาน 5 วัน แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ใบและลำต้นเขียว เจริญเติบโตดี ส่วนแฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรี ลำต้นซีดขาว ใบเป็นสีน้ำตาลเล็กน้อย (ภาพที่ 26) จากนั้นนำแฝกออกจากสารละลายปลูก ล้างรากแฝก โดยปล่อยน้ำประปาไหลผ่าน 3-4 ชั่วโมง แล้วนำแฝกไปอัดด้วยเครื่องอัดแห้ง ใส่ตู้อบอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง (ภาพที่ 27 และ 28) แล้วทำภาพถ่ายรังสีในตัว แสดงการกระจายของซีเซียมกัมมันตรังสีในดินแฝก โดยทาบบนอิมเมจิงเพลตที่เคลือบด้วยแผ่นฟิล์มถนนอาหาร ป้องกันการเปรอะเปื้อนทางรังสีนาน 10 นาที แล้วอ่านภาพและสัญญาณ PSL ด้วยเครื่องอ่านอิมเมจิงเพลต



ภาพที่ 26 แฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรี (ก) และสุราษฎร์ธานี (ข) ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup>



ภาพที่ 27 แผลงแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 (ก),  
5.0 (ข), 7.5 (ค)  $\text{MBq L}^{-1}$  ที่อบแห้ง

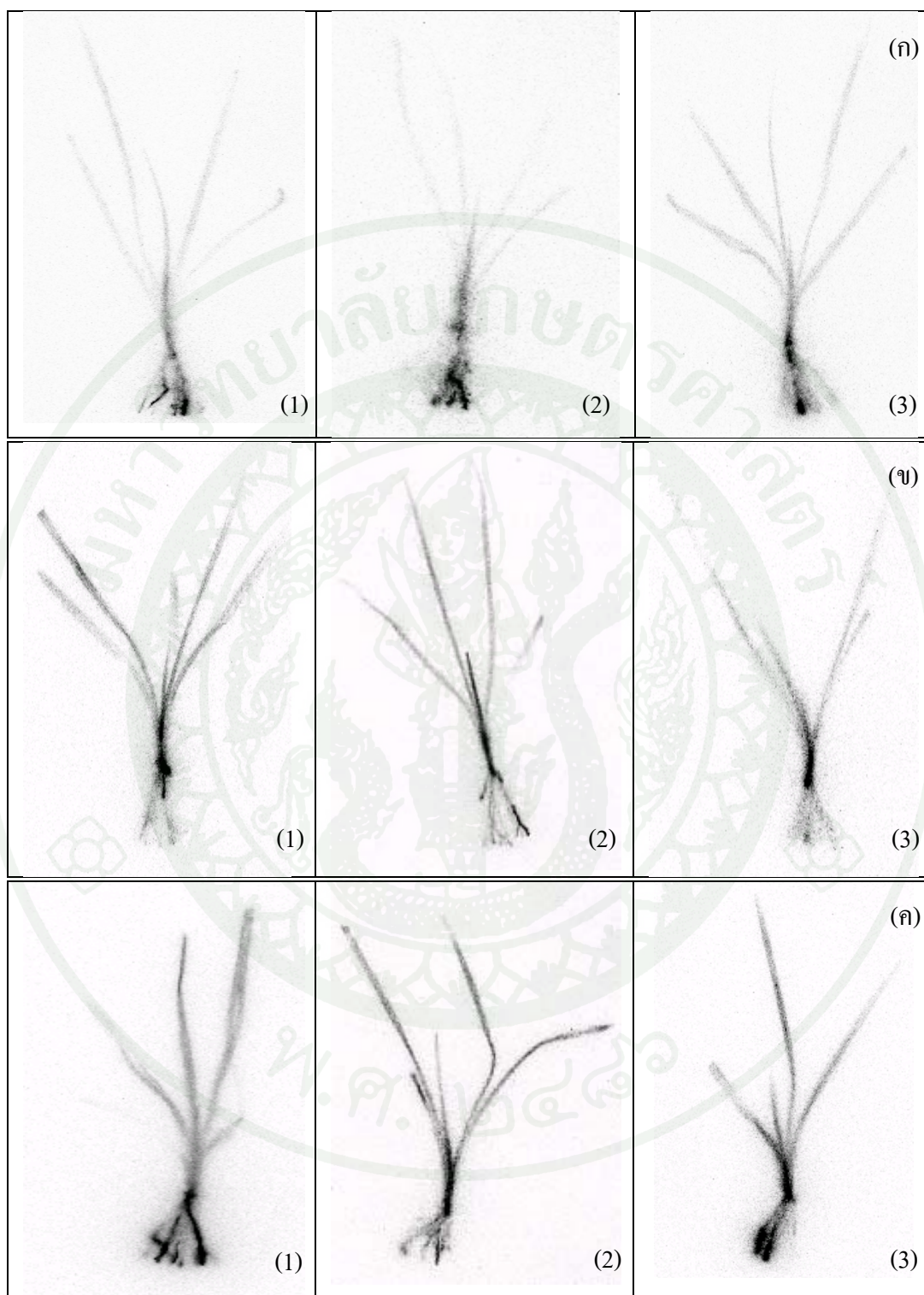


ภาพที่ 28 แผลกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น  
2.5 (ก), 5.0 (ข), 7.5 (ค)  $\text{MBq L}^{-1}$  ที่อบแห้ง

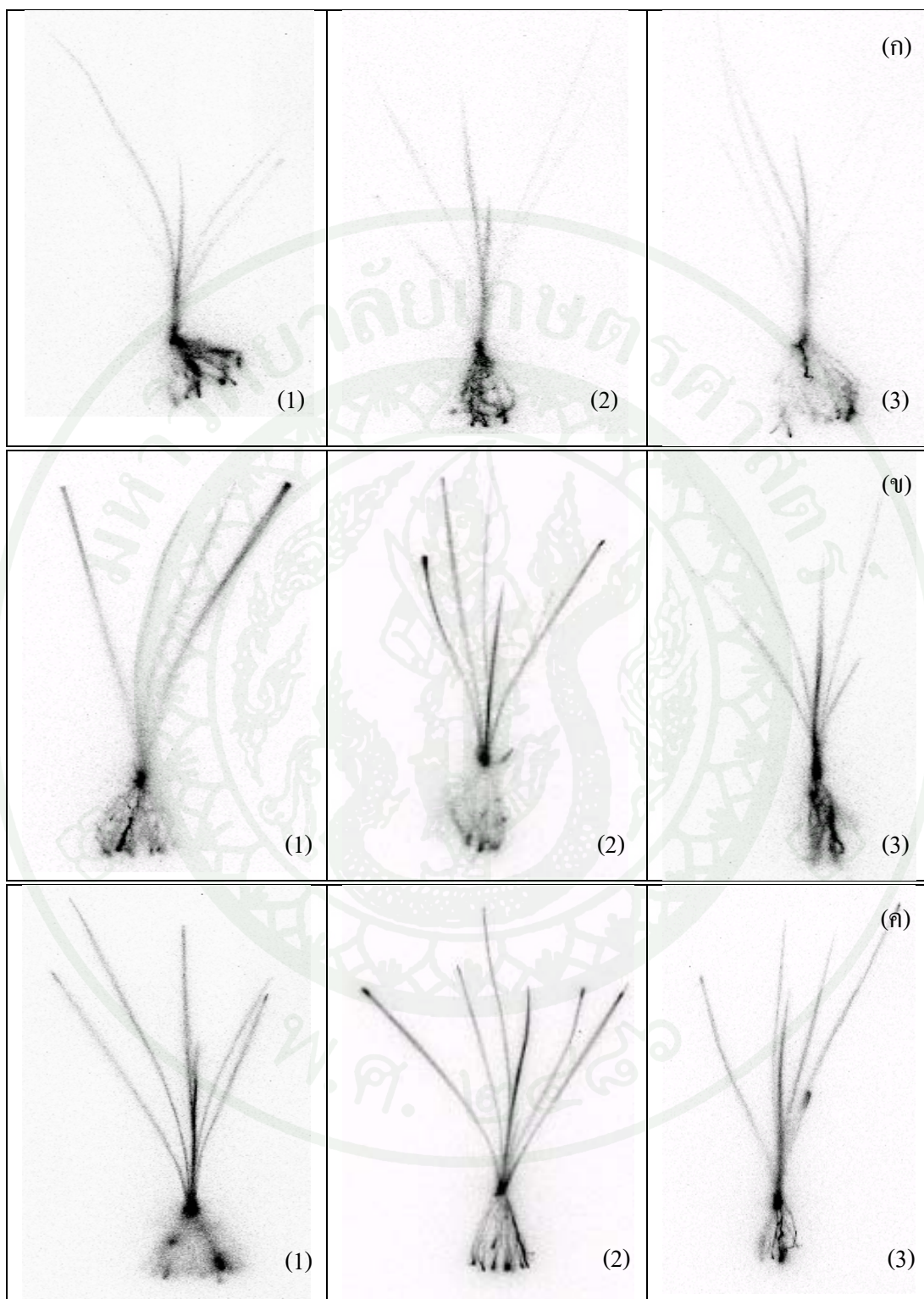
ผลการถ่ายภาพรังสีในตัวของแฟกโดยใช้อิมเมจิงเพลต ความเข้มหรือความดำของภาพแสดงถึงปริมาณการบำบัดซีเซียม-134 ในส่วนต่าง ๆ ของแฟก เห็นได้ว่า แฟกทั้งสองแหล่งพันธุ์สามารถดูดซีเซียม-134 ได้ และกระจายไปในส่วนต่าง ๆ ทั้งต้นและราก (ภาพที่ 29 และ 30) แฟกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น  $2.5 \text{ MBq L}^{-1}$  ให้ภาพที่มีความเข้มมากในบริเวณรากและส่วนของลำต้นที่ใกล้กับราก ส่วนของใบจะเห็นเป็นภาพจาง ๆ เท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแฟกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ไม่ปรากฏภาพที่ปลายใบเลย (ภาพที่ 30 ก) เมื่อแฟกปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของซีเซียม-134 มากขึ้น ( $5.0$  และ  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$ ) ภาพของแฟกมีความเข้มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงถึงการสะสมซีเซียม-134 เพิ่มขึ้น ทั้งในส่วนของต้นและราก และซีเซียม-134 สามารถเคลื่อนย้ายไปได้จนถึงปลายใบของแฟกทั้งสองแหล่งพันธุ์

ความเข้มของภาพถ่ายรังสีในตัวที่รากแฟกโดยใช้อิมเมจิงเพลต จะเห็นว่าความเข้มรากแฟกเป็นแถบดำ ซึ่งเกิดจากรากรวมกันเป็นกลุ่มไม่แผ่ขยายออก สามารถดูภาพแฟกอัดแห้งในภาพที่ 29 และ 30 ประกอบ นอกจากนี้แล้วใบแฟกบางใบที่มีความเข้มมากกว่าใบอื่น ๆ เนื่องจากใบที่เกิดใหม่มีวนซ้อนทับกันอยู่ ยังไม่แผ่ขยายเต็มที่ และที่ปลายใบแฟกบางภาพ มีความเข้มมาก ซึ่งแสดงถึงการสะสมซีเซียม-134 มาก ลักษณะนี้เกิดจากปลายใบที่ขาด จึงเป็นบริเวณที่สะสมของซีเซียม-134 มากกว่าบริเวณอื่น ดังในภาพที่ 30 (ข) และ (ค)

จากภาพที่ 29 และ 30 ไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่า รากแฟกของแฟกแหล่งพันธุ์ราชบุรี และแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้นใดสามารถดูดหรือสะสมซีเซียม-134 ได้มากที่สุด หรือไม่สามารถกล่าวได้ว่า แฟกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ความเข้มข้นมากที่สุด จะมีดูดซีเซียม-134 ได้ดีกว่าความเข้มข้นอื่น ๆ และแหล่งพันธุ์ใดมีความสามารถในการดูดหรือสะสมซีเซียม-134 ได้ดีกว่ากัน



ภาพที่ 29 ภาพถ่ายรังสีในตัวของแฟกแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 (ก), 5.0 (ข) และ 7.5 (ค) MBq L<sup>-1</sup>



ภาพที่ 30 ภาพถ่ายรังสีในตัวของแฟกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 (ก), 5.0 (ข) และ 7.5 (ค) MBq L<sup>-1</sup>

แม้ว่าภาพถ่ายทางรังสี แสดงการสะสมของซีเซียม-134 ยังไม่สามารถกล่าวได้ว่าแฝก แหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีการสะสมและกระจายซีเซียม-134 จากรากไปสู่ใบ มากกว่าแฝกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น  $5.0$  และ  $2.5 \text{ MBq L}^{-1}$  แต่แนวโน้มโดยรวมเป็นเช่นนั้น คือ การสะสมของซีเซียม-134 ในรากจะมีมากที่สุด และพบในต้น ใบ ตามลำดับ เพื่อให้ข้อมูลมีมากขึ้น จึงต้องวัดสัญญาณ PSL ที่ได้จากเครื่องอ่านภาพรังสีอิมเมจิงเพลต แสดงในหน่วย PSL  $\text{mm}^{-2}$  โดยกำหนดพื้นที่การอ่านสัญญาณ PSL ครอบคลุมทั้งต้นและรากแฝกก่อน แล้วจึงอ่านในตำแหน่งต่าง ๆ บนภาพถ่ายทางรังสีรวม 6 ตำแหน่ง (ภาพที่ 31) ดังนี้

ตำแหน่งที่ 1 ราก

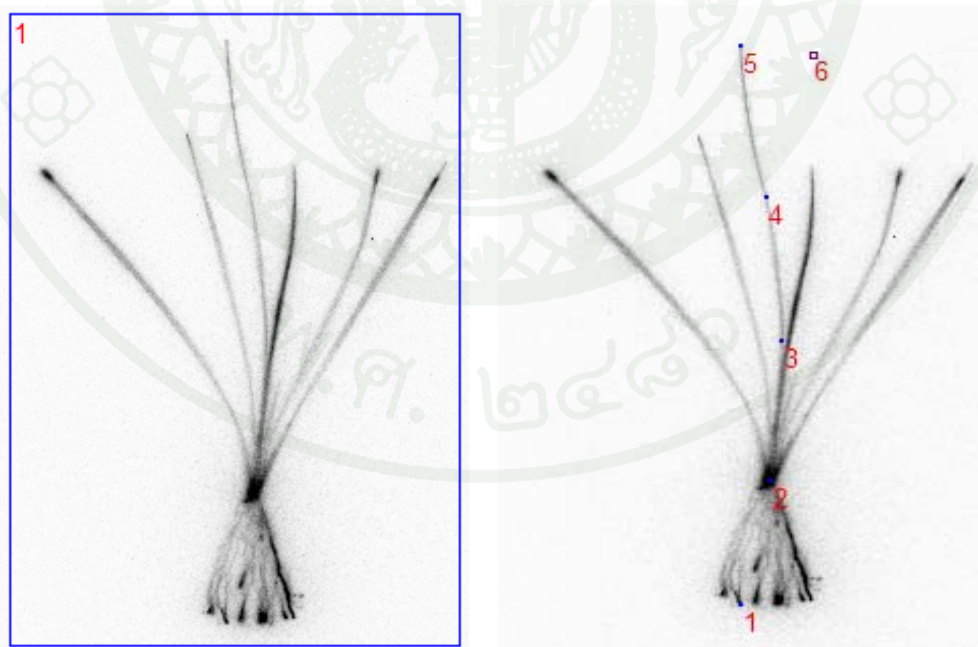
ตำแหน่งที่ 2 ลำต้น (รอยต่อระหว่างรากและใบ)

ตำแหน่งที่ 3 ใบ ที่อยู่ส่วนต้น ระยะห่าง  $1/3$  ของความยาวใบ คือ ใบตำแหน่งที่ 1 (ใบ/1)

ตำแหน่งที่ 4 ใบ ที่อยู่ส่วนกลาง ระยะห่าง  $2/3$  ของความยาวใบ คือ ใบตำแหน่งที่ 2 (ใบ/2)

ตำแหน่งที่ 5 ใบ ที่อยู่ส่วนปลายของใบ คือ ใบตำแหน่งที่ 3 (ใบ/3)

ตำแหน่งที่ 6 ค่ารังสีพื้นหลัง



ภาพที่ 31 พื้นที่การอ่านสัญญาณ PSL ครอบคลุมทั้งต้นและรากแฝก (ก) และ ตำแหน่งการอ่านค่า PSL (ข)

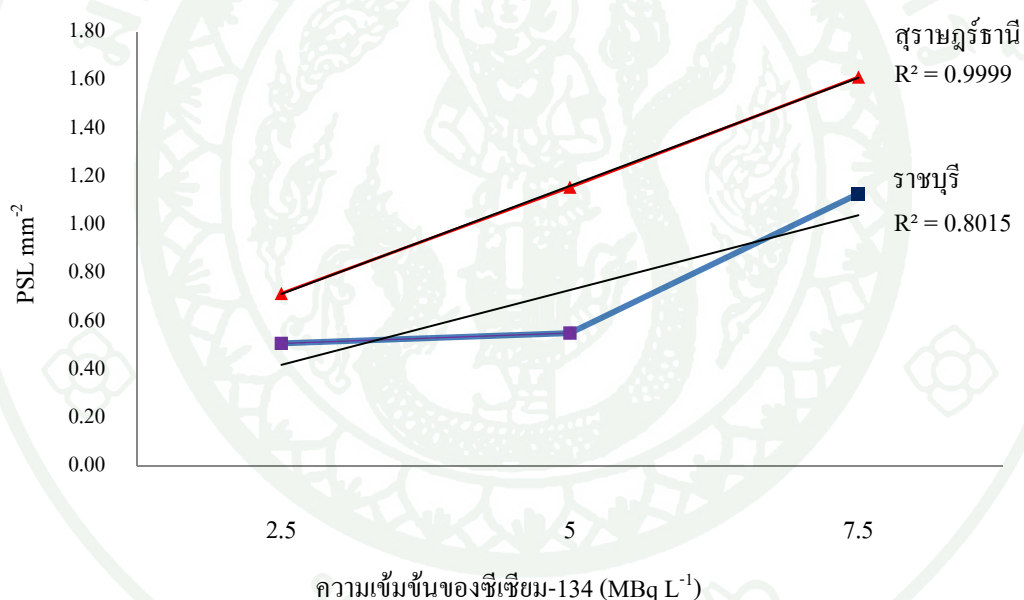
การวัดสัญญาณ PSL จากเครื่องอ่านภาพรังสีอิมเมจิงเพลต ในหน่วย PSL mm<sup>-2</sup> ซึ่งแสดงถึงการกระจายของซีเซียมกัมมันตรังสีในส่วนต่าง ๆ ของดินแฝก แต่ละภาพถ่ายได้วัดรังสีพื้นหลังของอิมเมจิงเพลตด้วยทุกครั้ง โดยรังสีพื้นหลังของแฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรี มีค่าระหว่าง 0.30-0.96 PSL mm<sup>-2</sup> และรังสีพื้นหลังของภาพแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีค่าระหว่าง 0.29 -0.97 PSL mm<sup>-2</sup> ซึ่งผลการวัดสัญญาณ PSL ได้หักค่าสัญญาณรังสีพื้นหลังแล้ว (ตารางที่ 6 และ 7)

เมื่อวัดสัญญาณ PSL ในพื้นที่รอบดินแฝกจากเครื่องอ่านภาพอิมเมจิงเพลต ที่แสดงในหน่วย PSL mm<sup>-2</sup> ซึ่งหักลบค่ารังสีพื้นหลังแล้ว แสดงให้เห็นว่า แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่มีความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> ให้ค่า PSL mm<sup>-2</sup> เฉลี่ย 0.71, 1.15 และ 1.61 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าแฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ให้ค่า PSL mm<sup>-2</sup> เฉลี่ย 0.51, 0.55 และ 1.13 ตามลำดับ โดยค่า PSL mm<sup>-2</sup> กับค่าความเข้มข้น (MBq L<sup>-1</sup>) มีความสัมพันธ์เชิงเส้น ทั้งของแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีและแหล่งพันธุ์ราชบุรี ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (determination coefficient, R<sup>2</sup>) เท่ากับ 0.9999 และ 0.8015 ตามลำดับ (ภาพที่ 32)

เห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของซีเซียม-134 เพิ่มขึ้น แฝกก็สามารถดูดซีเซียม-134 ได้เพิ่มขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนจากภาพถ่ายรังสีในดินที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งความสามารถดูดซีเซียม-134 ที่เพิ่มมากขึ้นนี้ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเข้มข้นซีเซียม-134 ที่เพิ่มขึ้นด้วย ลักษณะดังกล่าวนี้เป็นไปทำนองเดียวกันกับ การใช้แฝกบำบัดโลหะหนัก และ 2, 4, 6 trinitrotoluene (TNT) ซึ่ง Das *et al.* (2009) รายงานว่า เมื่อความเข้มข้นของ TNT ในดินเพิ่มขึ้น แฝกสามารถสะสม TNT ได้เพิ่มขึ้นด้วย ส่วน Roongtanakiat and Chairaj. (2001); Roongtanakiat *et al.* (2003) ก็รายงานว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น แฝกสามารถสะสมโลหะหนักได้มากขึ้น ส่วนงานวิจัยที่ใช้พืชอื่นแล้วให้ผลในทำนองเดียวกันนี้ เช่น การใช้ยูคาลิปตัสบำบัดสารกัมมันตรังสีและโลหะหนัก (Rodriguez *et al.*, 2010) วัชพืชรากยาว redroot pigweed ผักกาด และถั่วเทปารี บำบัดซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 (Fuhrmann *et al.*, 2002)

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ย PSL mm<sup>-2</sup> รอบต้นแฟกแหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกใน สารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้น (MBq L <sup>-1</sup> )	PSL mm <sup>-2</sup>
ราชบุรี	2.5	0.51
	5.0	0.55
	7.5	1.13
สุราษฎร์ธานี	2.5	0.71
	5.0	1.15
	7.5	1.61



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL mm<sup>-2</sup> ของแฟกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีและราชบุรี กับความเข้มข้นของสารละลายปลูก ซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

จากตารางที่ 7 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย PSL mm<sup>-2</sup> แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> มีการกระจายซีเซียม-134 ในทุกส่วนของแฟกได้แก่ ราก ต้น และใบ โดยบริเวณที่แสดงค่า PSL mm<sup>-2</sup> สูงที่สุดจะมีทั้งในส่วนของรากแฟกและต้นแฟก โดยที่ตำแหน่งใบ/1 มีค่า PSL mm<sup>-2</sup> มากกว่า ตำแหน่งใบ/2 และตำแหน่งใบ/3 ตามลำดับ ในทุก ๆ ความเข้มข้นเช่นกัน

แผ่นแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น  $2.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในรากมากกว่าดินและใบ คือ 39.83, 33.27, 3.26, 2.16 และ 1.10 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ซีเซียม-134 มีการกระจายจากรากไปสู่ใบตามลำดับ เช่นเดียวกับแผ่นแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในรากมากกว่าดินและใบ คือ 65.29, 58.03, 17.87, 13.50 และ 5.73 ตามลำดับ แต่ที่ความเข้มข้น  $5.0 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในดินมากกว่ารากและใบ คือ 44.95, 35.98, 9.95, 7.67 และ 1.83 ตามลำดับ

แผ่นแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น  $2.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในดินมากกว่ารากและใบ คือ 63.49, 41.63, 3.01, 1.37 และ 1.10 ตามลำดับ เช่นเดียวกับความเข้มข้น  $5.0 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในดินมากกว่ารากและใบ คือ 73.93, 51.64, 7.47, 3.88 และ 2.51 ตามลำดับ แต่ที่ความเข้มข้น  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในรากใกล้เคียงกับค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในดินแต่มากกว่าใบ คือ 73.57, 73.25, 13.73, 8.92 และ 5.89 ตามลำดับ

ในรากแผ่นทั้งสองแหล่งพันธุ์ เมื่อพิจารณาค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  พบว่า ในรากแผ่นแหล่งพันธุ์ราชบุรีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0,  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  คือ 39.83, 35.98 และ 65.29 ตามลำดับ ขณะที่แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในราก คือ 41.63, 51.64 และ 73.57 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า รากแผ่นทั้งสองแหล่งพันธุ์ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 มีการสะสมปริมาณซีเซียม-134 ได้

จากค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ระหว่างรากและดินของแผ่นทั้งสองแหล่งพันธุ์ ไม่สามารถบอกได้ว่าค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในรากมากกว่าในดิน หรือในดินมากกว่าในราก แต่โดยภาพรวมแล้วในทุกความเข้มข้นค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในรากและดินมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นจาก 2.5, 5.0 และ  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะการกำหนดพื้นที่การอ่านสัญญาณ PSL ณ ตำแหน่งรากและดินไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน เนื่องจากรากบางส่วนของแผ่นซ้อนทับกันเป็นกลุ่ม ไม่แยกออกเป็นรากเดี่ยว เช่นเดียวกับการกำหนดพื้นที่การอ่านสัญญาณ PSL ณ ตำแหน่งดิน อาจเนื่องจากบริเวณดินแผ่นนั้น ๆ มีการซ้อนทับกันของใบก่อนที่ใบจะงอกยาวออกไป ซึ่งพิจารณาได้จากภาพถ่ายรังสีในตัวของแผ่นดังรูปที่ 29 และ 30 เมื่อพิจารณาค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ทั้ง 5 ตำแหน่งของแผ่นที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ในแต่ละความเข้มข้น เห็นได้ชัดเจนว่า บริเวณรากและดินของแผ่นทั้งสองแหล่งพันธุ์ มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  สูงกว่าที่ใบอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เนื่องจากรากทำหน้าที่ดูดน้ำและธาตุต่าง ๆ และดินเป็นบริเวณรอยต่อของรากและใบ เมื่อเปรียบเทียบค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่รากกับดิน แหล่งพันธุ์ราชบุรีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 เข้มข้น 2.5 และ  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่ราก

มากกว่าดิน แต่ที่ความเข้มข้น  $5.0 \text{ MBq L}^{-1}$  ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่ดินมากกว่าราก ส่วนแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5 และ  $5.0 \text{ MBq L}^{-1}$  ให้ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่ดินมากกว่าราก ส่วนที่ความเข้มข้น  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่ตำแหน่งรากและดินมีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ใกล้เคียงกัน

พิจารณาค่าเฉลี่ย PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในใบที่ตำแหน่ง ใบ/1 ใบ/2 และใบ/3 ของแฟกทั้งสองแหล่งพันธุ์ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0,  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  พบว่า แฟกมีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ทั้งสามตำแหน่งเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่มากขึ้น แฟกแหล่งพันธุ์ราชบุรี มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่ตำแหน่ง ใบ/1 คือ 3.26, 9.95 และ 17.87 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง ใบ/2 คือ 2.16, 7.67 และ 13.50 ตามลำดับ และที่ตำแหน่งใบ/3 คือ 1.10, 1.83 และ 5.73 ตามลำดับ สำหรับแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่ตำแหน่ง ใบ/1 คือ 3.01, 7.47 และ 13.73 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง ใบ/2 คือ 1.37, 3.88 และ 8.92 ตามลำดับ และที่ตำแหน่งใบ/3 1.10, 2.51 และ 5.89 ตามลำดับ โดยภาพรวมแล้ว ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ทั้งสามตำแหน่งของแฟกแหล่งพันธุ์ราชบุรีมีค่ามากกว่าค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ของแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ยกเว้นที่ตำแหน่งใบ/3 ที่ความเข้มข้น 5.0 และ  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ของแฟกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีมากกว่าราชบุรี และที่  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  มีค่าเท่ากัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่วัดในตำแหน่งต่างๆ ของแฟกแหล่งพันธุ์ราชบุรี และสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0,  $7.5 \text{ MBq L}^{-1}$  จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายซีเซียม-134 เพิ่มขึ้น ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  เพิ่มขึ้นเกือบทุกตำแหน่งของแฟกทั้งสองแหล่งพันธุ์ (ราก ดิน ใบ/1 ใบ/2 และ ใบ/3) ซึ่งสอดคล้องกับการวัดสัญญาณ PSL รวมของแฟกทั้งต้นที่แสดงไว้ในตารางที่ 6 และการทดลองของ Soudek *et al.* (2001) ใช้ต้นทานตะวันที่ปลูกในระบบไฮโดร โพรนิคส์คูดไอโอไดน-125 ซึ่งสามารถกระจายไปในส่วนต่าง ๆ ของต้นทานตะวัน และพบการสะสมไอโอไดน-125 มากที่สุดในราก กระจายไปสู่ต้นและใบ และใช้ทานตะวันคูดซีเซียม-137 และสทอรอนเซียม-90 อีกด้วย Soudek *et al.* (2006) การทำภาพถ่ายรังสีในตัว เพื่อศึกษาการดูดสารกัมมันตรังสีชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า พืชแต่ละชนิดสามารถดูดสารกัมมันตรังสีได้ แต่ความสามารถในการดูดสารกัมมันตรังสีก็อาจแตกต่างกัน หรือพืชชนิดเดียวกันแต่ต่างแหล่งพันธุ์หรือดินปลูกต่างกัน ก็อาจดูดสารกัมมันตรังสีได้แตกต่างกัน (Savinkov *et al.*, 2006)

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ย PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นแหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5  $\text{MBq L}^{-1}$

แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้น ( $\text{MBq L}^{-1}$ )	PSL $\text{mm}^{-2}$				
		ราก	ต้น	ใบ/1	ใบ/2	ใบ/3
ราชบุรี	2.5	39.83 ± 5.23	33.27 ± 15.64	3.26 ± 0.86	2.16 ± 0.60	1.10 ± 0.24
	5.0	35.98 ± 3.93	44.95 ± 7.84	9.95 ± 1.38	7.67 ± 1.79	1.83 ± 0.58
	7.5	65.29 ± 18.50	58.03 ± 9.80	17.87 ± 5.97	13.50 ± 4.76	5.73 ± 1.84
สุราษฎร์ธานี	2.5	41.63 ± 4.20	63.49 ± 7.85	3.01 ± 0.36	1.37 ± 0.23	1.10 ± 0.13
	5.0	51.64 ± 7.71	73.93 ± 4.66	7.47 ± 2.16	3.88 ± 1.24	2.51 ± 1.09
	7.5	73.57 ± 15.00	73.25 ± 4.30	13.73 ± 2.41	8.92 ± 1.05	5.89 ± 1.68

## 1.2 กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในสารละลายก่อนและหลังปลูกแผ่น

หลังปลูกแผ่น ได้ปรับปริมาตรของสารละลายทุกตัวอย่างทดลองให้เท่ากัน (20 ml) ก่อนดูดสารละลายซีเซียม-134 ปริมาตร 0.01 ml หยดบนกระดาษกรองที่อยู่ในจานนับรังสี ทำให้แห้ง แล้ววัดอัตรานับด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาหวัคเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง คำนวณเป็นค่ากัมมันตภาพของสารละลายจากสมการที่ (3) และกัมมันตภาพที่ลดลงจากค่าเริ่มต้นเมื่อปลูกแผ่น (ตารางที่ 9)

ความเข้มข้นของสารละลายซีเซียม-134 ที่ 2.5, 5.0 และ 7.5  $\text{MBq L}^{-1}$  มีกัมมันตภาพ 225.85, 439.84 และ 666.56 Bq ตามลำดับ (ตารางที่ 8) หลังจากปลูกแผ่นแหล่งพันธุ์ราชบุรี กัมมันตภาพในสารละลายลดลงเหลือ 145.95, 337.88 และ 524.69 Bq ตามลำดับ ดังนั้น กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ลดลง 79.90, 101.96 และ 141.87 Bq ตามลำดับ (ตารางที่ 9) คิดเป็นร้อยละ 21.28, 23.18 และ 35.38 ตามลำดับ (ภาพที่ 33)

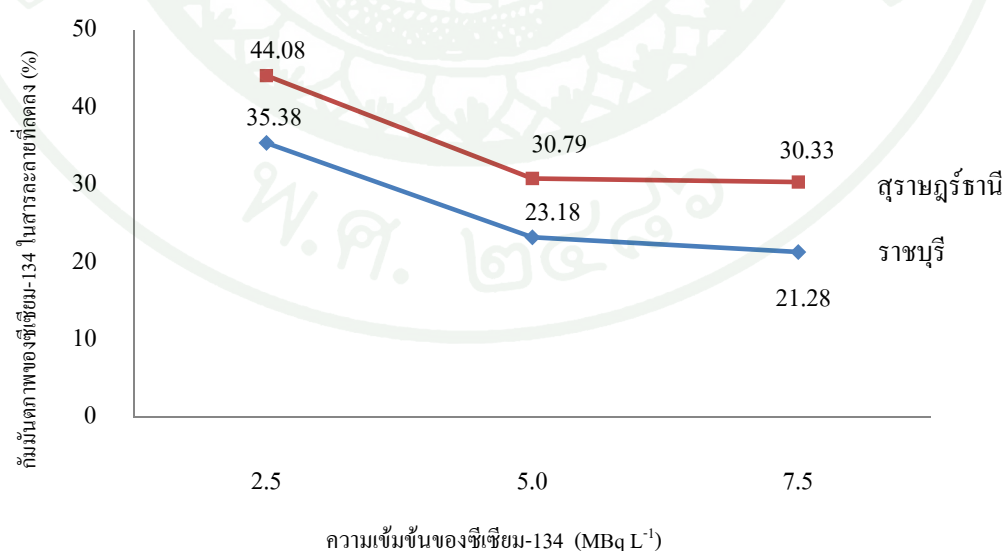
ในการคำนวณทำนองเดียวกัน จากข้อมูลที่ได้จากแผ่นแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี กัมมันตภาพของสารละลายซีเซียม-134 หลังจากปลูกแผ่นลดลงเหลือ 126.30, 304.39 และ 464.37 Bq ตามลำดับ คิดเป็นกัมมันตภาพของซีเซียม-134 ที่ลดลง คือ 99.55, 135.45 และ 202.19 Bq ตามลำดับ (ตารางที่ 9) คิดเป็นร้อยละ 30.33, 30.79 และ 44.08 ตามลำดับ (ภาพที่ 33)

ตารางที่ 8 กัมมันตภาพเริ่มต้นของสารละลายซีเซียม-134

ความเข้มข้น (MBq L <sup>-1</sup> )	ค่านับสุทธิ (count)	อัตรานับ/วินาที (cps)	กัมมันตภาพ (Bq)
2.5	8,055 ± 206	13.42	225.85
5	15,686 ± 937	26.14	439.84
7.5	23,772 ± 2,141	39.62	666.56

ตารางที่ 9 กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในสารละลายหลังการปลูกแฟกแหล่งพื้นฐราชบุรีและสุราษฎร์ธานี

แหล่งพื้นที่	ความเข้มข้น (MBq L <sup>-1</sup> )	ค่านับสุทธิ (count)	อัตรานับ/วินาที (cps)	กัมมันตภาพในสารละลาย (Bq)	กัมมันตภาพที่ลดลง (Bq)
ราชบุรี	2.5	5,204.89 ± 122.36	8.67	145.95	79.90
	5	12,050.00 ± 651.95	20.08	337.88	101.96
	7.5	18,712.00 ± 119.27	31.19	524.69	141.87
สุราษฎร์ธานี	2.5	4,504.11 ± 312.28	7.51	126.30	99.55
	5	10,855.56 ± 401.19	18.09	304.39	135.45
	7.5	16,560.89 ± 851.90	27.60	464.37	202.19



ภาพที่ 33 กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในสารละลายที่ลดลง หลังจากปลูกแฟกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

จากข้อมูลดังกล่าว สรุปได้ว่า เมื่อปลูกแฝกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup> แผลงพันธุ์ราชบุรีสามารถบำบัดซีเซียม-134 ได้ร้อยละ 21.28, 23.18 และ 35.38 ตามลำดับ และแผลงพันธุ์สุราษฎร์ธานีสามารถบำบัดซีเซียม-134 ได้ร้อยละ 30.33, 30.79 และ 44.08 ตามลำดับ กล่าวได้ว่าแฝกทั้งสองแผลงพันธุ์สามารถบำบัดซีเซียม-134 ได้ และแผลงพันธุ์สุราษฎร์ธานีบำบัดซีเซียม-134 ได้มากกว่าแผลงพันธุ์ราชบุรี โดยมากกว่าประมาณร้อยละ 7-9

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า แผลงพันธุ์แฝกที่แตกต่างกัน มีผลต่อการดูดสารกัมมันตรังสี หรือสารมลพิษแตกต่างกันด้วย ดังรายงานของ Roongtanakiat and Chairroj (2001) กล่าวว่า แฝกแผลงพันธุ์กำแพงเพชร แผลงพันธุ์ราชบุรี และแผลงพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักที่แตกต่างกัน ทำนองเดียวกันกับงานของ Roongtanakiat *et al.* (2007) อธิบายว่าแฝกแผลงพันธุ์กำแพงเพชร แผลงพันธุ์ศรีลังกา และแผลงพันธุ์สุราษฎร์ธานี สามารถบำบัดโลหะหนักในน้ำและดินเหมืองแร่ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักของแฝกแต่ละแผลงพันธุ์จะแตกต่างกัน

ผลสรุปจากการวัดกัมมันตภาพของสารละลายซีเซียม-134 หลังปลูกแฝกสอดคล้องกับผลการวัดค่า PSL mm<sup>-2</sup> ของแฝกทั้งสองแผลงพันธุ์ โดยแผลงพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่มีความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> ให้ค่า PSL mm<sup>-2</sup> เฉลี่ยสูงกว่าแผลงพันธุ์ราชบุรี ในทุก ๆ ความเข้มข้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผลงพันธุ์สุราษฎร์ธานีสามารถบำบัดซีเซียม-134 ได้มากกว่าแผลงพันธุ์ราชบุรี

1.3 กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในดินและรากแฝกที่ปลูกในสารละลายความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

ต้นกล้าแฝกทั้งสองแผลงพันธุ์ที่อบแห้งผ่านการทำภาพถ่ายรังสีในตัว และอ่านสัญญาณ PSL แล้ว ตัดแยกส่วนต้น (ต้นและใบ) และราก ชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนของแฝก ต้นและรากของแฝกแผลงพันธุ์ราชบุรีมีน้ำหนักระหว่าง 0.0855-0.1425 กรัม และ 0.0419-0.0810 กรัม ตามลำดับ ขณะที่แผลงพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีน้ำหนักต้นและรากระหว่าง 0.0999-0.1764 กรัม และ 0.0546-0.1299 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 10) เห็นได้ว่า น้ำหนักต้นแฝก (ต้นและใบ) จะมากกว่าน้ำหนักรากแฝกในทุกตัวอย่างและทุกความเข้มข้น

ได้วัดรังสีของดินและราก ด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาที่วัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง โดยใช้เวลานับวัด 600 วินาที คำนวณกัมมันตภาพได้จากสมการที่ (3) พบว่า กัมมันตภาพของดินและรากที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นจาก 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup> ตามลำดับ และแนวโน้มของแฟกต์ทั้งสองแหล่งพันธุ์ มีกัมมันตภาพในรากมากกว่าต้น ยกเว้น ที่ความเข้มข้น 7.5 MBq L<sup>-1</sup> มีกัมมันตภาพในรากและต้นใกล้เคียงกัน และแหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ความเข้มข้น 5.0 MBq L<sup>-1</sup> กัมมันตภาพในต้นมากกว่าราก ทั้งนี้ กัมมันตภาพที่ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน อาจเนื่องจากการตัดชิ้นส่วนของรากและต้นที่ไม่เท่ากันทุกต้น เพราะดินและรากจะอยู่ติดกันมีรอยต่อไม่ชัดเจน เมื่อตัดแยกชิ้นส่วนแล้วชั่งน้ำหนักจึงมีความไม่แน่นอนได้

จากน้ำหนักของดินและรากแฟกต์ นำมาคำนวณกัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างแฟกต์ จากสมการที่ (4) เมื่อพิจารณากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยในดินแฟกต์แหล่งพันธุ์ราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> มีค่า 19.80, 52.58 และ 83.33 kBq g<sup>-1</sup> ตามลำดับ และในรากมีค่า 70.36, 72.19 และ 134.41 kBq g<sup>-1</sup> ตามลำดับ ส่วนแฟกต์แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะในต้นเท่ากับ 22.27, 63.77 และ 85.84 kBq g<sup>-1</sup> ตามลำดับ และในรากมีค่า 101.88, 124.81 และ 137.55 kBq g<sup>-1</sup> ตามลำดับ (ตารางที่ 12)

เมื่อเปรียบเทียบกัมมันตภาพจำเพาะของแฟกต์แหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี สรุปได้ว่า กัมมันตภาพจำเพาะของดินและรากที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นจาก 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup> ตามลำดับ และแฟกต์แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> กัมมันตภาพจำเพาะในต้นและราก

ตารางที่ 10 น้ำหนักต้นและรากแฝกแห้ง หลังจากปลูกในสารละลายซีเซียม-134 เป็นเวลา 5 วัน

แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้น (MBq L <sup>-1</sup> )	ตัวอย่าง	นน. ต้นแฝกแห้ง (g)	นน. รากแฝกแห้ง (g)	นน. ต้นและราก แฝกแห้ง (g)
ราชบุรี	2.5	1	0.1425	0.0602	0.2027
		2	0.1021	0.0810	0.1831
		3	0.1339	0.0729	0.2068
	5	1	0.1378	0.0641	0.2019
		2	0.0857	0.0419	0.1276
		3	0.0922	0.0554	0.1476
	7.5	1	0.0855	0.0462	0.1317
		2	0.1112	0.0764	0.1876
		3	0.1003	0.0771	0.1774
สุราษฎร์ธานี	2.5	1	0.1093	0.0730	0.1823
		2	0.1609	0.0891	0.2500
		3	0.1238	0.0778	0.2016
	5	1	0.1321	0.0915	0.2236
		2	0.1185	0.0714	0.1899
		3	0.0999	0.0546	0.1545
	7.5	1	0.1764	0.1299	0.3063
		2	0.1334	0.0768	0.2102
		3	0.1206	0.0556	0.1762

มากกว่าแหล่งพันธุ์ราชบุรี และทั้งสองแหล่งพันธุ์มีกัมมันตภาพจำเพาะในรากมากกว่าต้น (ตารางที่ 11 และ 12) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh *et al.* (2006) รายงานว่าแฝกสามารถบำบัด ซีเซียม-137 โดยสะสมซีเซียม-137 ที่รากมากกว่าต้น สำหรับพืชอื่นก็มีแนวโน้มสะสมสารกัมมันตรังสี ไว้ในส่วนของราก ดังรายงานของ Eapen *et al.* (2006) รายงานว่า ต้นรักสะสมซีเซียม-137 ที่ราก มากกว่าต้น Hornik *et al.* (2008) ค้นพบสาหร่ายเดนซ่า และต้นพรมมิ (*Bacopa monnieri*) สามารถ สะสมซีเซียม-137 และโคบอลต์-60 ไว้ที่รากเป็นส่วนมาก

ตารางที่ 11 กัมมันตภาพจำเพาะในดินและรากแฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้น (MBqL <sup>-1</sup> )	ตัวอย่าง	กัมมันตภาพ (Bq)		กัมมันตภาพจำเพาะ (Bq g <sup>-1</sup> )	
			ต้น	ราก	ต้น	ราก
ราชบุรี	2.5	1	3,088.94	5,142.69	21,676.77	85,426.76
		2	2,075.17	4,468.38	20,324.91	55,165.18
		3	2,331.27	5,139.58	17,410.49	70,501.77
	5	1	6,663.20	5,464.62	48,354.14	85,251.50
		2	6,360.20	3,550.43	74,214.68	84,735.71
		3	3,241.45	2,581.10	35,156.74	46,590.32
	7.5	1	8,781.84	9,657.28	102,711.54	209,032.06
		2	8,130.69	7,761.48	73,117.68	101,590.06
		3	8,312.16	7,140.45	74,149.54	92,612.78
สุราษฎร์ธานี	2.5	1	2,753.38	8,830.51	25,191.06	120,965.96
		2	2,681.29	6,381.90	16,664.33	71,626.28
		3	3,087.93	8,795.49	24,942.90	113,052.60
	5	1	7,195.38	8,916.21	54,469.16	97,444.87
		2	9,124.99	8,011.99	77,004.16	112,212.78
		3	5,977.45	8,997.16	59,834.32	164,783.11
	7.5	1	13,062.07	13,196.58	74,048.00	101,590.27
		2	11,252.77	11,194.08	91,189.39	145,756.28
		3	11,130.29	9,191.11	92,290.97	165,307.77

ตารางที่ 12 กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย ในต้นและรากแฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรีและสุราษฎร์ธานี  
ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0 และ 7.5 MBq L<sup>-1</sup>

แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้น (MBq L <sup>-1</sup> )	กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย (kBq g <sup>-1</sup> )	
		ต้น	ราก
ราชบุรี	2.5	19.80 ± 2.18	70.36 ± 15.13
	5	52.58 ± 19.87	72.19 ± 22.17
	7.5	83.33 ± 16.80	134.41 ± 64.78
สุราษฎร์ธานี	2.5	22.27 ± 4.85	101.88 ± 26.50
	5	63.77 ± 11.77	124.81 ± 35.39
	7.5	85.84 ± 10.23	137.55 ± 32.64

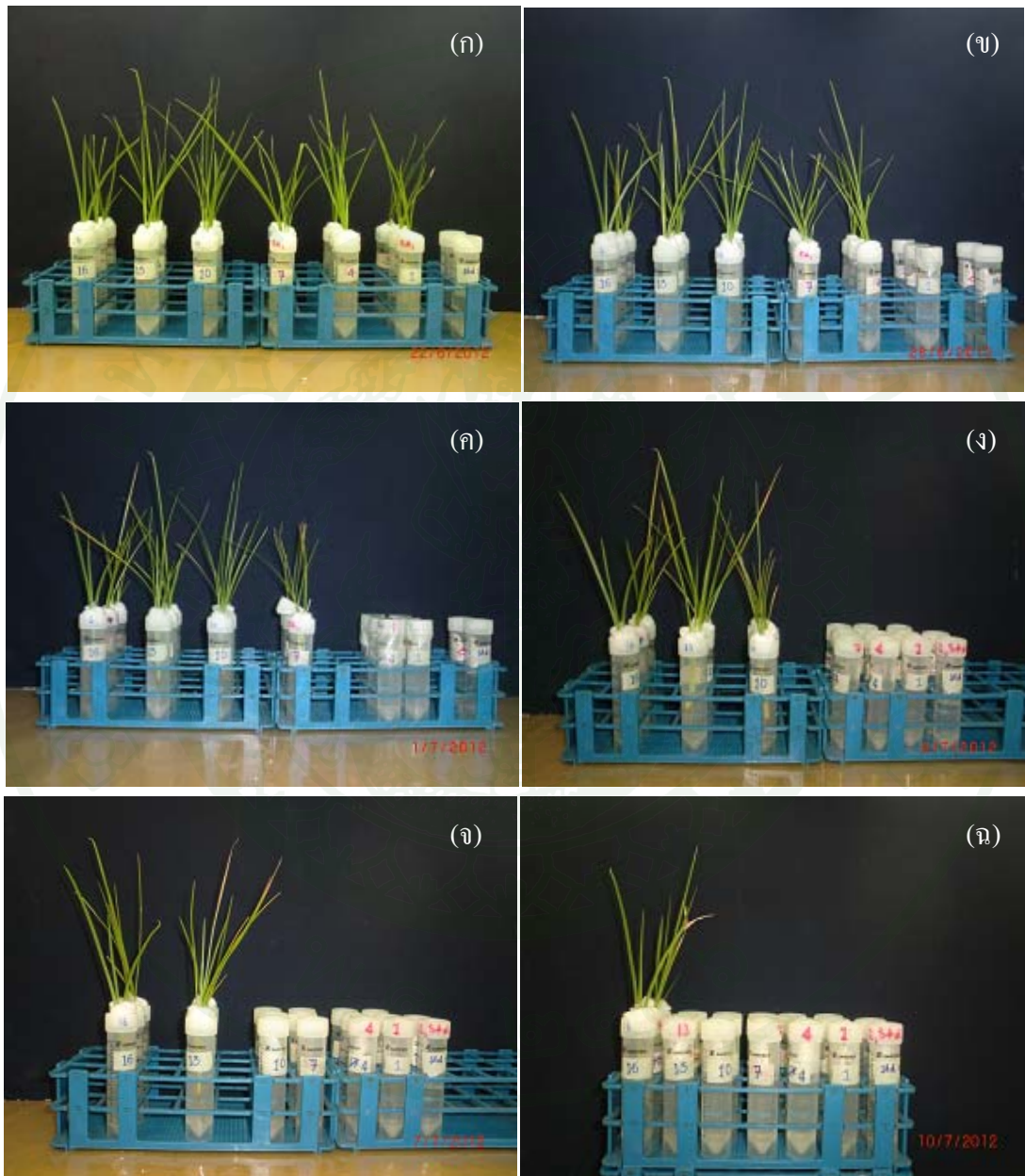
ผลสรุปจากการวัดกัมมันตภาพจำเพาะในต้นและราก ของแฝกทั้งสองแหล่งพันธุ์ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> สอดคล้องกับผลการวัดค่า PSL mm<sup>-2</sup> และกัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในสารละลายก่อนและหลังปลูกแฝก ของแฝกทั้งสองแหล่งพันธุ์ โดยแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่มีความเข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5 MBq L<sup>-1</sup> ให้ค่า PSL mm<sup>-2</sup> เฉลี่ยและกัมมันตภาพของซีเซียม-134 สูงกว่าแหล่งพันธุ์ราชบุรีในทุก ๆ ความเข้มข้น และพบในรากมากกว่าต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีสามารถบำบัดซีเซียม-134 ได้มากกว่าแหล่งพันธุ์ราชบุรี

## 2. การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการปลูก ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก

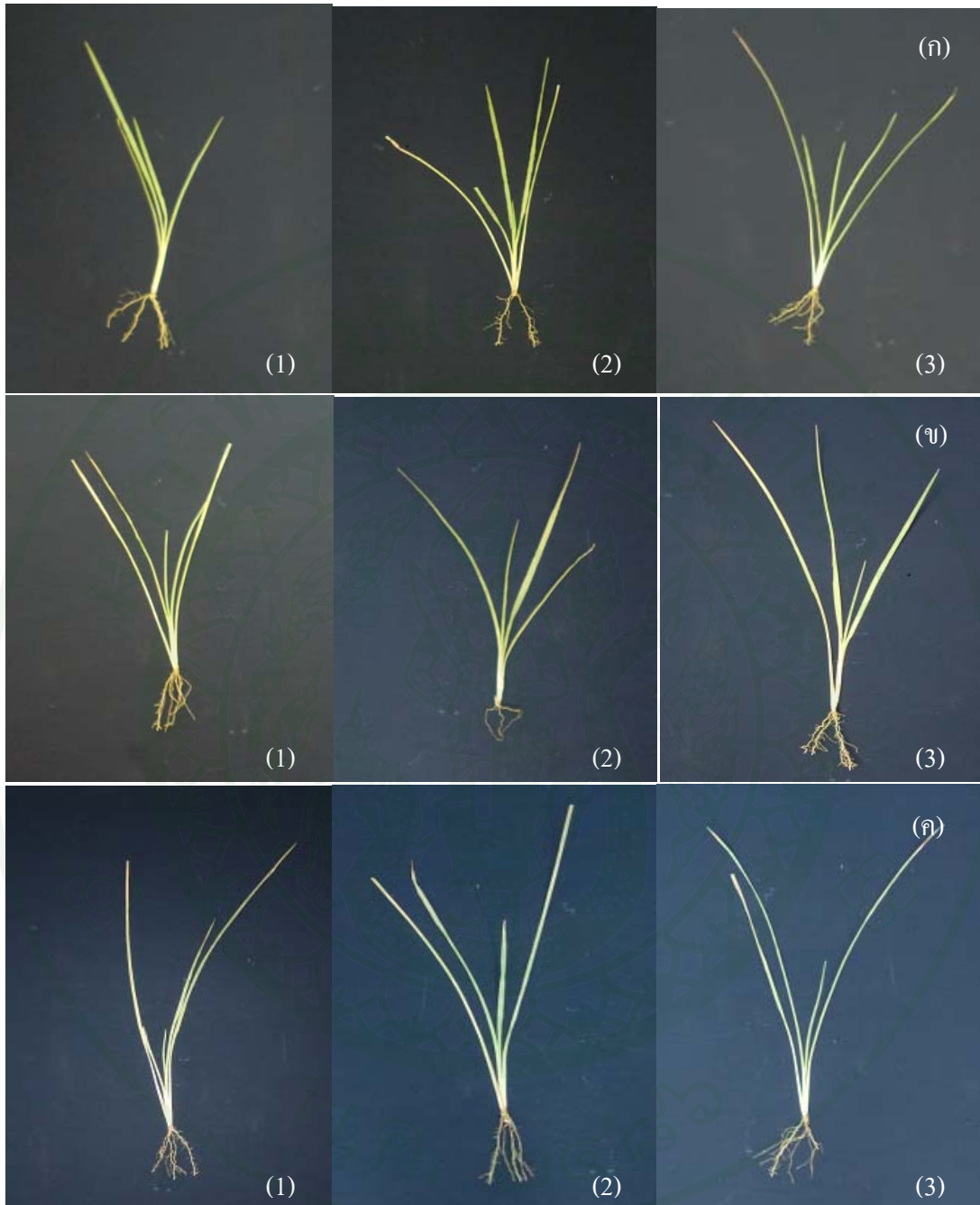
2.1 การกระจายของซีเซียม-134 ในต้นและรากแฝก โดยการถ่ายภาพถ่ายรังสีในตัว  
โดยอิมเมจิงเพลต

นำแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ซึ่งเตรียมจากสารละลายที่เหลืออยู่จากการทดลองที่ 1 โดยนำสารละลายซีเซียม-134 ทุกความเข้มข้นมารวมกัน ปลูกแฝกนาน 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ใบและลำต้นเขียว เจริญเติบโตดี (ภาพที่ 34) จากนั้นนำแฝกออกจากสารละลายปลูก ล้างรากแฝก โดยปล่อยน้ำประปาไหลผ่าน 3-4 ชั่วโมง แล้วนำแฝกไปอัดด้วยเครื่องอัดแห้ง ใส่ตู้อบอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง (ภาพที่ 35

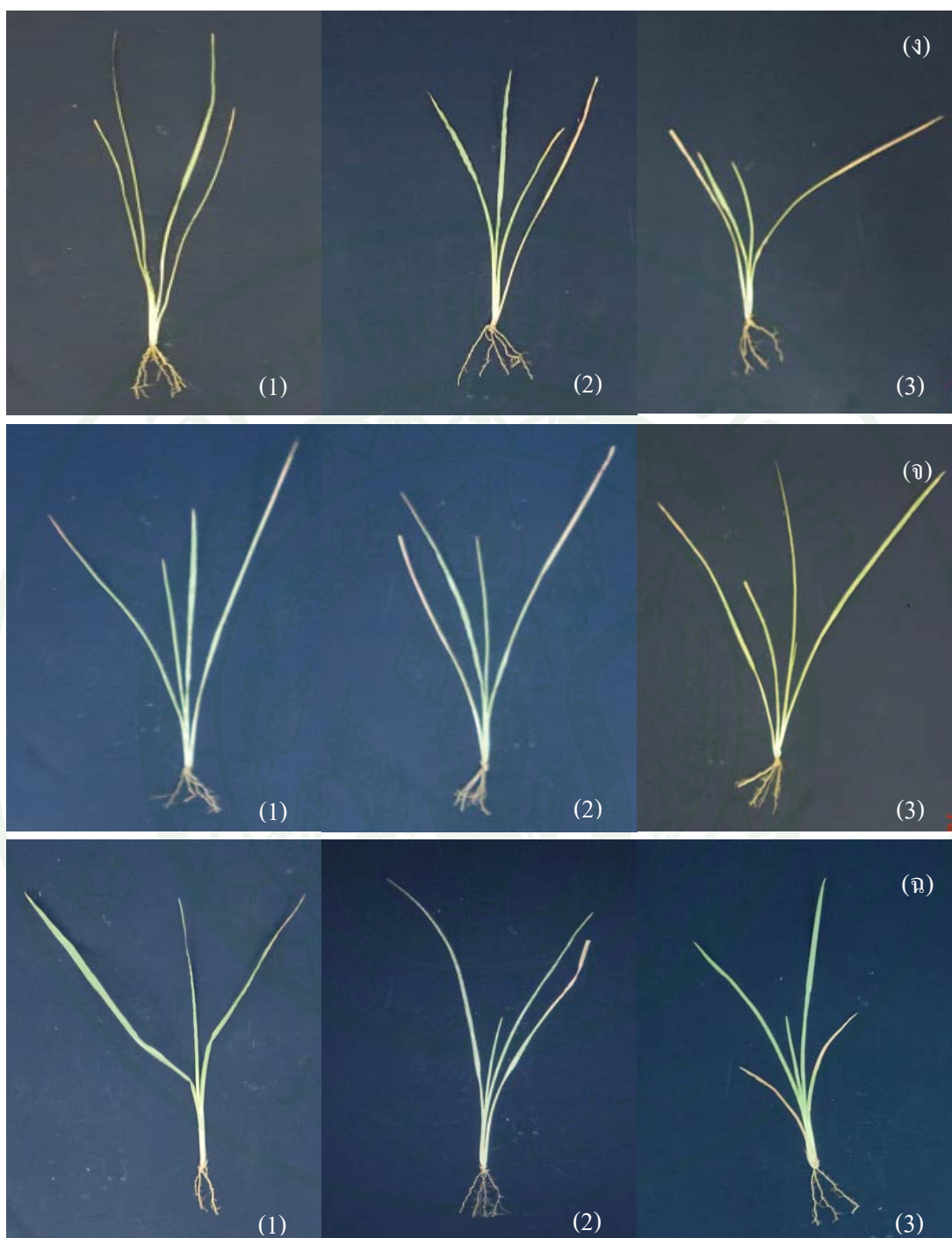
และ 36) แล้วทำภาพถ่ายรังสีในตัวแสดงการกระจายของซีเซียมกัมมันตรังสีในดินแฝก โดยทาบแฝกบนอิมเมจิงเพลตที่เคลือบด้วยแผ่นฟิล์มถนอมอาหาร ป้องกันการเปราะเปื้อนทางรังสีนาน 10 นาที อ่านภาพและสัญญาณ PSL



ภาพที่ 34 แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 3 (ก), 6 (ข), 9 (ค), 12 (ง), 15 (จ) และ 18 (ฉ) วัน



ภาพที่ 35 แปลงแหล่งสุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีซีเอ็ม-134 นาน 12 (ก), 15 (ข) และ 18 (ค) วัน ที่อบแห้ง



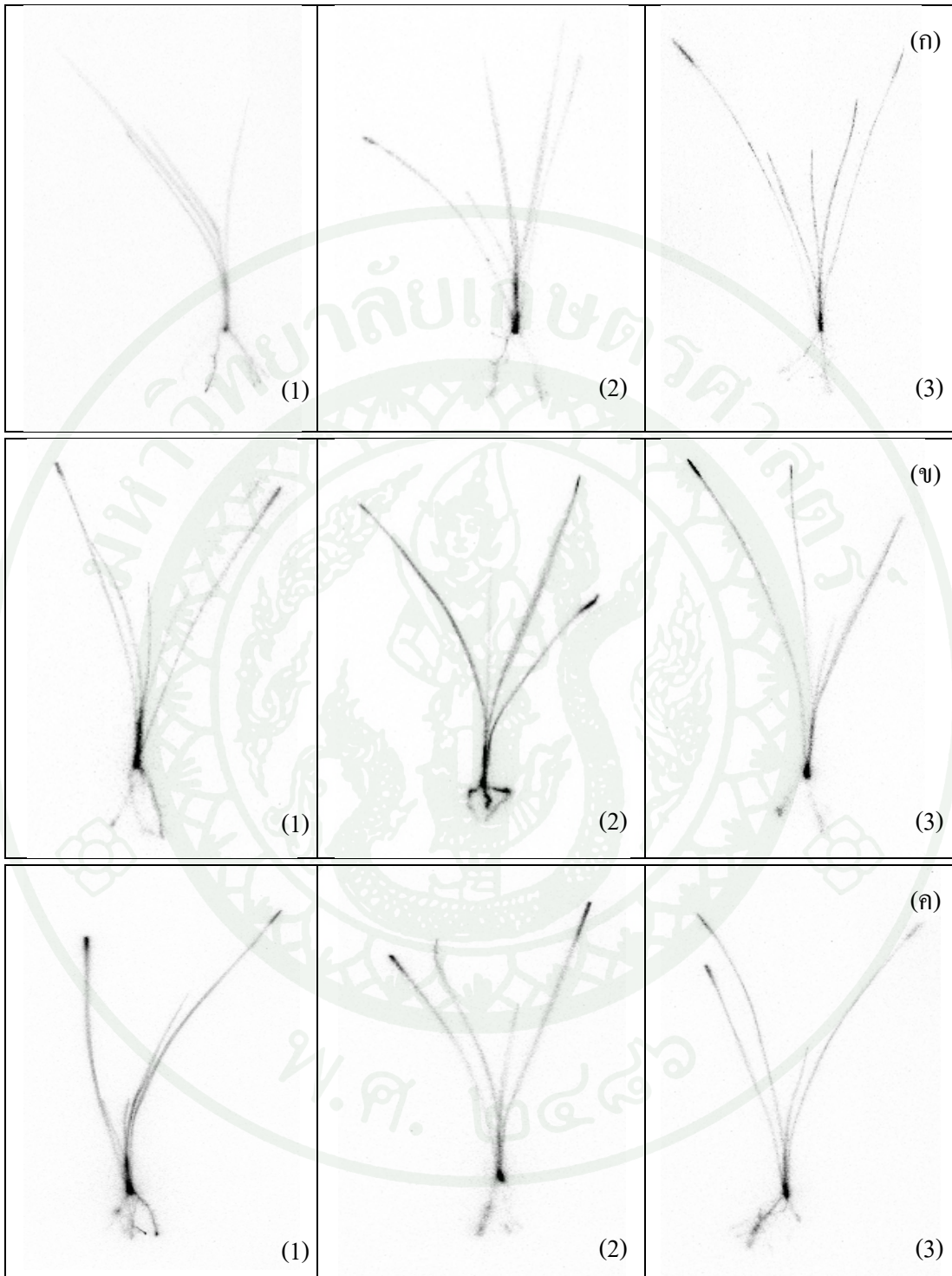
ภาพที่ 36 แปลงแหล่งสุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีซีเอ็ม-134 นาน 12 (ง), 15 (จ) และ 18 (ฉ) วัน ที่อบแห้ง

ผลการถ่ายภาพรังสีในตัวของแฟกโดยใช้อิมเมจิงเพลต ความเข้มหรือความดำของภาพแสดงถึงปริมาณการดูดและการบำบัดซีเซียม-134 ของแฟก และกระจายไปในส่วนต่าง ๆ ทั้งต้นและราก (ภาพที่ 37 และ 38) แฟกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ให้ภาพที่มีความเข้มในทุกส่วนของแฟกได้แก่ ราก ลำต้นและใบ ส่วนของใบและรากแฟกที่ปลูกนาน 3 วัน จะเห็นเป็นภาพจาง ๆ เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับแฟกที่ปลูกในระยะเวลาอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แฟกที่ปลูกนาน 18 วัน

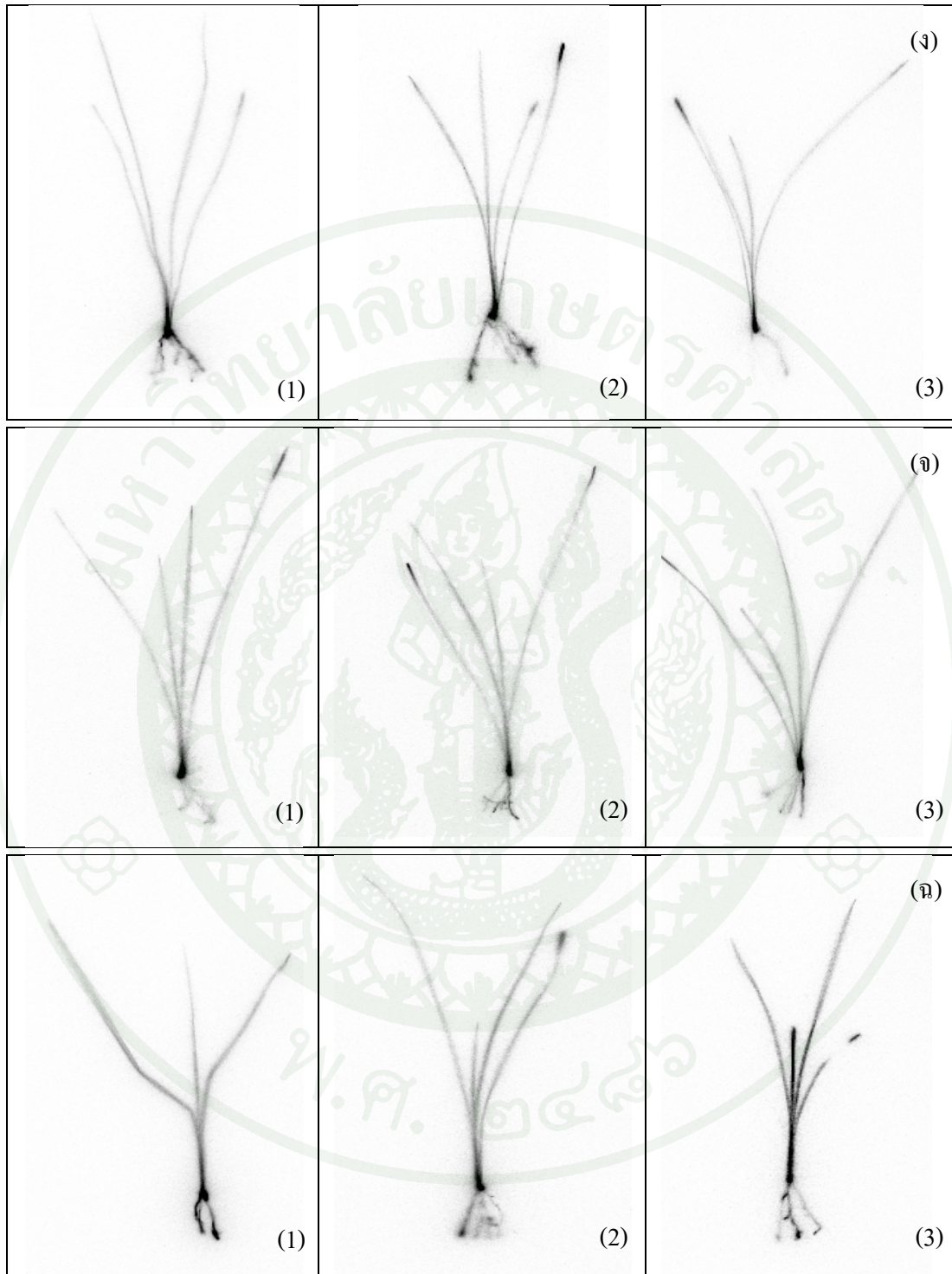
ใบแฟกบางใบที่มีความเข้มมากกว่าใบอื่น ๆ เนื่องจากใบที่เกิดใหม่มีวุ้นซ้อนทับกันอยู่ ยังไม่แผ่ขยายเป็นใบเต็มที เมื่อนำมาถ่ายภาพทางรังสีจะเห็นภาพที่มีความเข้มมาก ซึ่งแสดงถึงการสะสมซีเซียม-134 มาก เช่นเดียวกับปลายใบแฟกบางภาพมีความเข้มมาก ซึ่งลักษณะนี้เกิดจากปลายใบที่ขาด จึงเป็นบริเวณที่สะสมของซีเซียม-134 มากกว่าบริเวณอื่นอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 37 และ 38 ความเข้มของภาพถ่ายรังสีในตัวไม่มีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าแฟกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน ดูหรือสะสมซีเซียม-134 ได้มากที่สุดที่ระยะเวลาใด เนื่องจากความเข้มของภาพถ่ายรังสีในตัวของแฟกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ปลูกนาน 6 วัน ต้นที่ 2 มีความเข้มชัดมากกว่าแฟกต้นอื่นในระยะที่ปลูกเท่ากันและมีความเข้มชัดใกล้เคียงกับแฟกที่ปลูกที่ระยะเวลาอื่น ๆ ซึ่งแฟกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ปลูกนาน 18 วัน ควรจะมีแนวโน้มของความเข้มหรือความดำของภาพมากกว่าแฟกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ปลูกนาน 15, 12, 9, 6 และ 3 วัน ตามลำดับ

แม้ว่าภาพถ่ายทางรังสี แสดงการสะสมของซีเซียม-134 ยังไม่สามารถสรุปว่า แฟกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 18 วัน มีการสะสมและกระจายซีเซียม-134 จากรากไปสู่ใบ มากกว่าแฟกที่ปลูกนาน 15, 12, 9, 6 และ 3 วัน ตามลำดับ แต่แนวโน้มโดยรวมเป็นเช่นนั้น เพื่อให้ข้อมูลมีมากขึ้น จึงต้องวัดสัญญาณ PSL ที่ได้จากเครื่องอ่านภาพรังสีอิมเมจิงเพลตแสดงในหน่วย PSL  $\text{mm}^{-2}$  โดยกำหนดพื้นที่การอ่านสัญญาณ PSL ครอบคลุมทั้งต้นและรากแฟกก่อน แล้วจึงอ่านในตำแหน่งต่าง ๆ บนภาพถ่ายทางรังสีรวม 6 ตำแหน่งเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 (ภาพที่ 31)



ภาพที่ 37 ภาพถ่ายรังสีในตัวของผลแห้งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ในสารละลายกัมมันตรังสี ซีเซียม-134 นาน 3 (ก), 6 (ข) และ 9 (ค) วัน



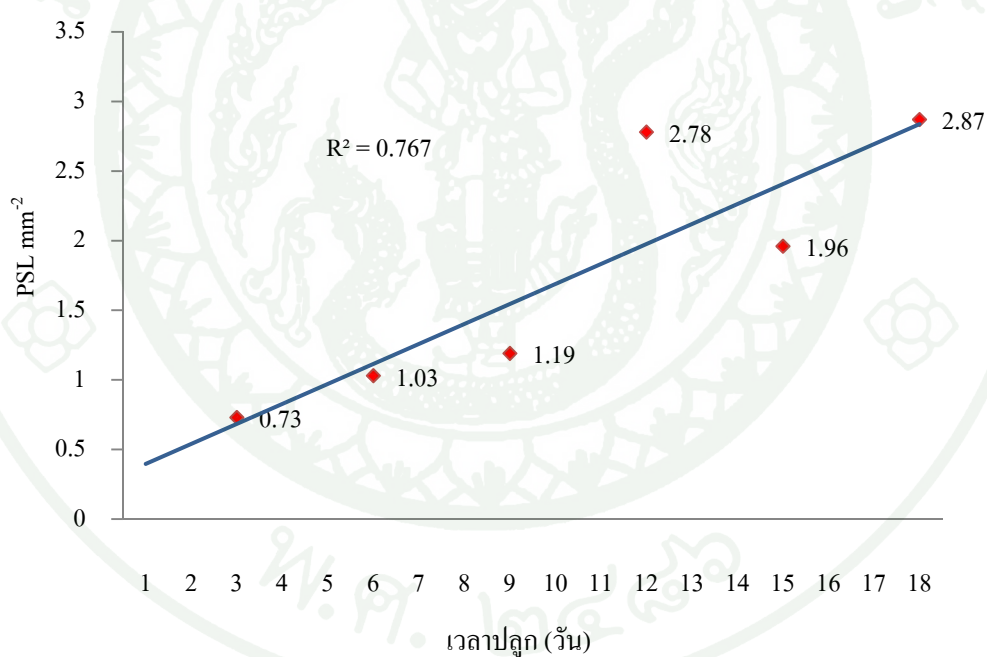
ภาพที่ 38 ภาพถ่ายรังสีในตัวของแผ่นแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ในสารละลายกัมมันตรังสี ซีเซียม-134 ปลูกนาน 12 (ง), 15 (จ) และ 18 (ฉ) วัน

การวัดสัญญาณ PSL จากเครื่องอ่านภาพรังสีอิมเมจิงเพลต โดยแสดงในหน่วย PSL mm<sup>-2</sup> ได้วัดรังสีพื้นหลังของอิมเมจิงเพลตทุกครั้ง โดยรังสีพื้นหลัง มีค่าระหว่าง 0.29-0.37 PSL mm<sup>-2</sup> ซึ่งผลการวัดสัญญาณ PSL ได้หักค่าสัญญาณรังสีพื้นหลังแล้ว (ตารางที่ 13) เมื่อวัดสัญญาณ PSL ในพื้นที่รอบต้นแฝกจากเครื่องอ่านภาพอิมเมจิงเพลต แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน ให้ค่า PSL mm<sup>-2</sup> 0.73, 1.03, 1.19, 2.78, 1.96 และ 2.87 ตามลำดับ ระยะเวลาปลูกมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า PSL mm<sup>-2</sup> ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (determination coefficient, R<sup>2</sup>) เท่ากับ 0.7678 (ภาพที่ 39)

เห็นได้ว่า เมื่อปลูกแฝกในสารละลายซีเซียม-134 นานขึ้น แฝกก็สามารถดูดซีเซียม-134 ได้เพิ่มขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนจากภาพถ่ายรังสีในต้นที่มีความเข้มมากขึ้น ยกเว้น แฝกที่ปลูกนาน 12 วัน มีค่า PSL mm<sup>-2</sup> น้อย สูงกว่าแฝกที่ปลูกนาน 15 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการชอนทับกันของต้นและใบที่กำลังงอกใหม่ และชอนทับกัน ดังนั้น ค่า PSL mm<sup>-2</sup> น้อย ของแฝกที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 18 วันควรเพิ่มขึ้นมากกว่าของแฝกที่ปลูกนาน 15, 12, 9, 6 และ 3 วัน ตามลำดับ ซึ่งความสามารถดูดซีเซียม-134 ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อปลูกแฝกนานขึ้นนี้ เป็นไปทำนองเดียวกันกับใช้แฟกบ้ำบัด 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) ของ Konstantinos *et al.* (2006) ซึ่งรายงานว่าการเวลาผ่านไปนานขึ้น แฝกสามารถสะสม TNT ได้เพิ่มขึ้นด้วย ส่วน Anguissola *et al.* (1993) รายงานว่า สามารถบำบัดซีเซียม-134 ในข้าวสาลีได้มากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป หรือสามารถลดกัมมันตภาพของซีเซียม-134 ลงได้เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ในทำนองเดียวกันนี้ Grazyna *et al.* (2003) ศึกษาการสะสมของ ซีเซียม-137 ในชิ้นส่วนของดินเทียนแดง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การสะสมของซีเซียม-137 ในใบของดินเทียนแดงมีเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ย PSL mm<sup>-2</sup> รอบต้นแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลาย ซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

แหล่งพันธุ์	ระยะเวลาปลูก (วัน)	PSL mm <sup>-2</sup>
สุราษฎร์ธานี	3	0.73
	6	1.03
	9	1.19
	12	2.78
	15	1.96
	18	2.87



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย PSL mm<sup>-2</sup> ของแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี กับระยะเวลา ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ต่าง ๆ กัน

ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในตารางที่ 14 แสดงให้เห็นว่า แผลกแหล่งพันธุ์สุรายุทธ์ธานีที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 มีการกระจายของซีเซียม-134 ในทุกส่วนของแผล ได้แก่ ราก ต้น และใบ โดยบริเวณที่แสดงค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  สูงที่สุดจะมีในส่วนของต้นแผลทุก ๆ ระยะเวลาปลูกแผล และใบ ตำแหน่งที่ 1 (ใบ/1) มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  มากกว่า ใบตำแหน่งที่ 2 (ใบ/2) และใบตำแหน่งที่ 3 (ใบ/3) ตามลำดับ เห็นได้ว่า มีการกระจายของซีเซียม-134 จาก ตำแหน่งใบ/1 ใบ/2 และใบ/3 ซึ่งเป็นตำแหน่งสูงที่สุดของใบ

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ PSL  $\text{mm}^{-2}$  ที่วัดในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผลแหล่งพันธุ์สุรายุทธ์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 จะเห็นได้ว่า เมื่อปลูกแผลนานขึ้น ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  เพิ่มขึ้นเกือบทุกตำแหน่งของแผลที่ปลูกในระยะเวลาต่าง ๆ ยกเว้น แผลที่ปลูกนาน 12 วัน มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  เฉลี่ย สูงกว่าแผลที่ปลูกนาน 15 วัน เนื่องจากความเข้มข้นหรือการสะสมซีเซียม-134 ในลำต้นแผลที่ปลูกนาน 12 วัน อาจมีมากกว่าแผลที่ปลูกนาน 15 วัน สามารถดูได้จากภาพที่ 38 (ง) และ (จ) ประกอบ

เห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลานานขึ้น แผลสามารถดูดสารกัมมันตรังสีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวัดสัญญาณ PSL รวมของแผลทั้งต้นที่แสดงไว้ในตารางที่ 13 เช่นเดียวกับการทดลองของ Soudek *et al.* (2001) ได้ใช้ต้นทานตะวันที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์คู่อิโอไดน-125 ซึ่งสามารถกระจายไปในส่วนต่างๆ ของต้นทานตะวัน และพบการสะสมไอโอไดน-125 มากที่สุดในราก กระจายไปสู่ต้นและใบ และจากการทดลองอีกครั้งของ Soudek *et al.* (2006) ใช้ต้นทานตะวันที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์คู่อิโอไดน-137 และสตรอนเชียม-90 เมื่อทำภาพถ่ายรังสีในตัวแสดงการกระจายของสารกัมมันตรังสี พบว่า ซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 สามารถกระจายไปได้ทุกส่วนของต้นทานตะวันเช่นกันการทำภาพถ่ายรังสีในตัว เพื่อศึกษาการดูดสารกัมมันตรังสีชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า พืชแต่ละชนิดสามารถดูดสารกัมมันตรังสีได้ แต่ความสามารถในการดูดสารกัมมันตรังสีก็อาจแตกต่างกัน หรือพืชชนิดเดียวกันแต่ต่างแหล่งพันธุ์ก็อาจดูดสารกัมมันตรังสีได้แตกต่างกันด้วย

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ย PSL  $\text{mm}^{-2}$  ในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นแหล่งพันธุสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ระยะเวลาปลูก/วัน	PSL $\text{mm}^{-2}$				
	ราก	ต้น	ใบ /1	ใบ /2	ใบ /3
3	28.58	70.18	7.87	5.54	3.48
6	31.04	87.43	16.28	14.15	11.76
9	52.12	141.89	17.98	14.36	8.48
12	68.00	350.22	33.02	17.88	8.88
15	52.50	236.05	22.77	18.55	8.53
18	168.04	300.49	47.50	31.49	17.55

## 2.2 กัมมันตภาพซีเซียม-134 ในสารละลายที่ระยะเวลาต่าง ๆ

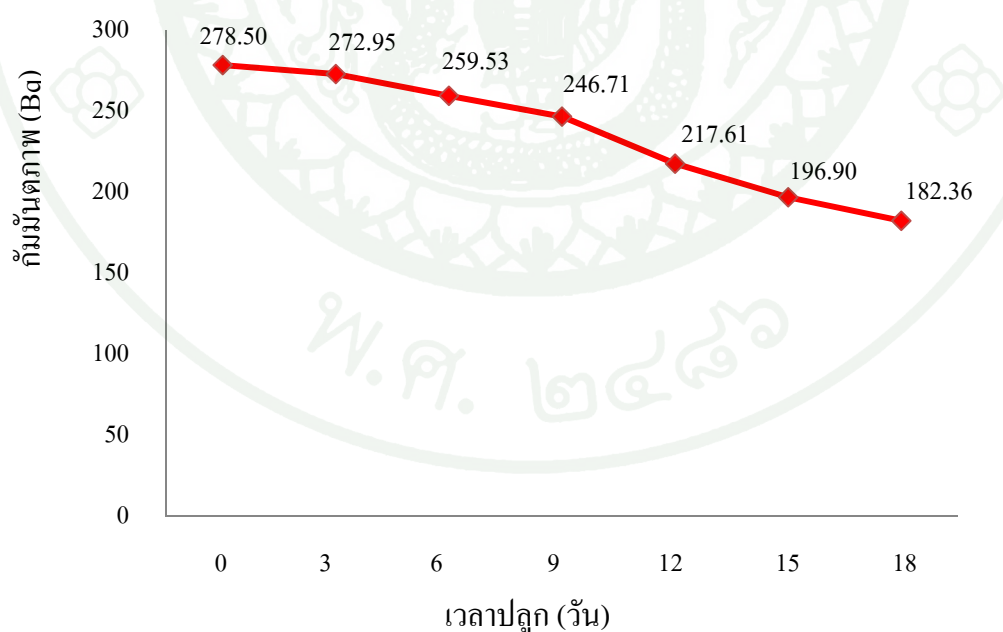
หลังปลูกแผ่น ได้ปรับปริมาตรของสารละลายทุกตัวอย่างทดลองให้เท่ากัน (20 ml) ก่อนดูดสารละลายซีเซียม-134 ปริมาตร 0.01 ml หยดบนกระดาษกรองที่อยู่ในจานนับรังสี ทำให้แห้ง แล้ววัดอัตรานับด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง คำนวณเป็นค่ากัมมันตภาพของสารละลายจากสมการที่ (3) และกัมมันตภาพที่ลดลงของสารละลายซีเซียม-134 หลังปลูกแผ่นาน 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน (ตารางที่ 15)

เตรียมสารละลายซีเซียม-134 ที่เหลืออยู่จากการทดลองที่ 1 โดยนำสารละลายซีเซียม-134 ทุกความเข้มข้นมารวมกัน มีกัมมันตภาพ 278.50 Bq หลังจากปลูกแผ่นแหล่งพันธุสุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 นาน 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน กัมมันตภาพในสารละลายลดลงเหลือ 272.95, 259.53, 246.71, 217.61, 196.90 และ 182.36 ตามลำดับ ซึ่งกัมมันตภาพที่ลดลงอยู่ระหว่าง 6-29 Bq (ตารางที่ 15) คิดเป็นร้อยละกัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในสารละลายที่ลดลง คือ 1.99, 6.81, 11.41, 21.86, 29.30 และ 34.52 ตามลำดับ (ภาพที่ 40) จากการทดลองนี้ กัมมันตภาพที่ลดลงสอดคล้องกับการวัดค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ของแผ่นด้วย คือ เมื่อปลูกแผ่นานขึ้น ค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  เพิ่มขึ้นเกือบทุกตำแหน่งของแผ่นที่ปลูกในระยะเวลาต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้นแผ่นสามารถบำบัดซีเซียม-134 ได้มากขึ้นด้วย และ จากการวัดค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ของแผ่นที่ปลูกนาน 12 วัน มีค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  เฉลี่ย สูงกว่าแผ่นที่ปลูกนาน 15 วันนั้น ก็สัมพันธ์กับการวัด

กัมมันตภาพของสารละลายที่ลดลงมากเช่นกัน คือ สามารถวัดค่ากัมมันตภาพในสารละลายที่ลดลงมากกว่าช่วงระยะเวลาอื่น แสดงให้เห็นความสามารถของแผ่นในการดูดหรือบำบัดซีเซียม-134 ซึ่งสัมพันธ์กับภาพถ่ายทางรังสีด้วย

ตารางที่ 15 กัมมันตภาพของสารละลายซีเซียม-134 หลังการปลูกแผ่นแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลาปลูก (วัน)	ค่านับสุทธิ (count)	อัตรานับ/วินาที (cps)	กัมมันตภาพ (Bq)
0	9,932.00 ± 330.51	16.55	278.50
3	9734.33 ± 105.05	16.22	272.95
6	9255.78 ± 168.82	15.43	259.53
9	8798.33 ± 191.27	14.66	246.71
12	7760.56 ± 805.61	12.93	217.61
15	7022.00 ± 272.28	11.7	196.90
18	6503.67 ± 433.07	10.84	182.36



ภาพที่ 40 กัมมันตภาพในสารละลายซีเซียม-134 หลังการปลูกแผ่นแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

จากข้อมูลดังกล่าว สรุปได้ว่า เมื่อปลูกแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีในสารละลายซีเซียม-134 นาน 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน สามารถบำบัดซีเซียม-134 ได้ร้อยละ 1.99, 6.81, 11.41, 21.86, 29.30 และ 34.52 ลำดับ กล่าวได้ว่า แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีบำบัดซีเซียม-134 ได้ และระยะเวลาในการปลูกแฝกมีผลต่อความสามารถในการดูดซีเซียม-134 คือ เมื่อปลูกแฝกนานขึ้น แฝกสามารถดูดหรือบำบัดซีเซียมได้มากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่า PSL  $\text{mm}^{-2}$  ด้วย

จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดสารกัมมันตรังสี ดังงานทดลองที่มีความสอดคล้องกัน เช่น ทานตะวัน ต้นป๊อบล่า และต้นกก สามารถดูดสารกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการปลูกนานขึ้น (Soudek *et al.*, 2004; 2006) ด้าน Hornik *et al.* (2008) ทดลองและค้นพบว่า การปลูกพืชในน้ำปราศจากไอออนและน้ำที่มีธาตุอาหารพืช เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นพืชสามารถดูดได้แตกต่างกัน สำหรับ Eapen (2006) ใช้ต้นรักดูดสารกัมมันตรังสีซีเซียม-137 และสตรอนเชียม-90 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นต้นรักสามารถลดกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีลงได้ เช่นเดียวกับ Jayakumar and Cheruth (2009) ศึกษาการดูดโคบอลต์-60 โดยใช้ต้นกล้วยเหลือง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นพืชสามารถดูดได้เพิ่มขึ้น และลดกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีลงด้วย

### 2.3 กัมมันตภาพของซีเซียม-134 ในต้นและรากแฝกที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ต้นกล้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีที่อบแห้งผ่านการถ่ายภาพรังสีในตัว และอ่านสัญญาณ PSL แล้ว ตัดแยกส่วนต้นและราก ชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนของแฝก มีน้ำหนักต้นและรากระหว่าง 0.0488-0.0873 กรัม และ 0.0080-0.0214 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 15)

วัดรังสีของต้นและราก ด้วยเครื่องวัดรังสีแกมมาหัววัดเจอร์มานเนียมความบริสุทธิ์สูง โดยใช้เวลานับวัด 600 วินาที คำนวณกัมมันตภาพได้จากสมการที่ (3) พบว่า กัมมันตภาพของต้นและรากที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปลูกนานขึ้นจาก 3, 6, 9, 12, 15 และ 18 วัน ตามลำดับ และแนวโน้มของแฝก มีกัมมันตภาพในต้นมากกว่าราก (ตารางที่ 16)

เมื่อนำน้ำหนักของต้นและรากแฝก มาคำนวณกัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างแฝก จากสมการที่ (4) เห็นได้ว่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยในรากจะมากกว่าในต้นทุกระยะเวลาที่ปลูก และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปลูกแฝกในสารละลายซีเซียม-134 นานขึ้น ดูได้จากค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยทั้งในต้นและรากแฝก (ตารางที่ 17) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกัมมันตภาพจำเพาะในรากแฝกที่ปลูกนาน 18 วัน มีกัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยสูงถึง  $411.62 \text{ kBq g}^{-1}$  ขณะที่เมื่อปลูกแฝกนาน 3 วัน

มีกัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยในรากเพียง  $54.97 \text{ kBq g}^{-1}$  เมื่อเปรียบเทียบกับกัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยในต้นที่ปลูกนาน 18 วัน มีกัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย  $144.98 \text{ kBq g}^{-1}$  และแฝกที่ปลูกนาน 3 วัน มีกัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยในต้นเพียง  $30.84 \text{ kBq g}^{-1}$

เมื่อเปรียบเทียบกับกัมมันตภาพจำเพาะของแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในระยะเวลาต่าง ๆ สรุปได้ว่า แฝกที่ปลูกนานขึ้นจะมีกัมมันตภาพจำเพาะของต้นและรากเพิ่มขึ้น และมีกัมมันตภาพจำเพาะในรากมากกว่าต้นซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (ตารางที่ 17) จึงกล่าวได้ว่า แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีเซียม-134 โดยที่รากจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าลำต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh *et al.* (2006) รายงานว่าแฝกสามารถบำบัดซีเซียม-137 โดยสะสมไว้ที่รากมากกว่าต้น สำหรับพืชอื่นก็มีแนวโน้มสะสมสารกัมมันตรังสีเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาผ่านไป ดังรายงานของ K. Jayakumar and Cheruth Abdul Jaleel. (2009) รายงานว่าถั่วเหลืองสะสมโคบอล ที่ราก ต้น และใบได้มากขึ้นเมื่อเวลาปลูกนานขึ้น เช่นเดียวกับ Grazyna bystrzejewska-piotrowska and Pawel (2003) ค้นพบการสะสมซีเซียมในใบ ต้น และรากของต้นเทียนแดงที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ และสามารถสะสมซีเซียมได้เพิ่มขึ้น เมื่อเวลานานขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 16 น้ำหนักต้นและรากแฝกแห้ง หลังจากปลูกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

แหล่งพันธุ์	เวลาปลูก (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ต้นแฝก (g)	นน. รากแฝก (g)	นน. ต้นและรากแฝก (g)
สุราษฎร์ธานี	3	1	0.0671	0.0169	0.0840
		2	0.0700	0.0091	0.0791
		3	0.0451	0.0078	0.0529
	6	1	0.0603	0.0188	0.0791
		2	0.0448	0.0080	0.0528
		3	0.0702	0.0174	0.0876
	9	1	0.0709	0.0187	0.0896
		2	0.0488	0.0214	0.0720
		3	0.0475	0.0148	0.0623

ตารางที่ 16 (ต่อ)

แหล่งพันธุ์	เวลาปลูก (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ต้นแฝก (g)	นน. รากแฝก (g)	นน. ต้นและรากแฝก (g)
	12	1	0.0491	0.0144	0.0635
		2	0.0611	0.0175	0.0786
		3	0.0582	0.0200	0.0782
	15	1	0.0873	0.0204	0.1077
		2	0.0661	0.0203	0.0864
		3	0.0768	0.0164	0.0932
	18	1	0.0676	0.0160	0.0836
		2	0.0739	0.0134	0.0873
		3	0.0676	0.0109	0.0785

ตารางที่ 17 กัมมันตภาพและกัมมันตภาพจำเพาะในต้นและรากแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี  
ที่ปลูกในสารละลายกัมมันตรังสีซีซีเอ็ม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลาปลูก (วัน)	ตัวอย่าง	กัมมันตภาพ (Bq)		กัมมันตภาพจำเพาะ (Bq g <sup>-1</sup> )	
		ต้น	ราก	ต้น	ราก
3	1	2,017.21	1,183.35	30,062.81	70,020.95
	2	2,060.42	527.77	29,434.64	57,997.06
	3	1,489.24	287.86	33,020.95	36,905.26
6	1	2,106.61	1,093.40	34,935.43	58,159.62
	2	5,006.25	1,903.62	111,746.59	237,952.93
	3	3,708.63	1,312.65	52,829.48	75,439.51
9	1	6,161.84	2,892.04	86,908.91	154,654.64
	2	2,436.25	1,580.74	49,923.11	73,866.36
	3	5,432.18	3,012.73	114,361.65	203,562.63

ตารางที่ 17 (ต่อ)

เวลาปลูก (วัน)	ตัวอย่าง	กัมมันตภาพ (Bq)		กัมมันตภาพจำเพาะ (Bq g <sup>-1</sup> )	
		ต้น	ราก	ต้น	ราก
12	1	9,493.95	5,539.35	193,359.40	384,676.97
	2	7,063.25	5,666.57	115,601.49	323,803.82
	3	5,666.40	2,471.52	97,360.80	123,576.12
15	1	11,729.87	4,977.03	134,362.83	243,972.03
	2	8,317.07	3,908.22	125,825.57	192,523.14
	3	11,616.14	6,529.98	151,251.87	398,169.62
18	1	12,280.14	9,219.29	181,658.82	576,205.79
	2	9,993.06	5,913.29	135,224.13	441,290.51
	3	7,979.69	2,369.23	118,042.75	217,360.69

ตารางที่ 18 กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยในต้นและรากแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในสารละลายกัมมันตรังสีซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

แหล่งพันธุ์	เวลาปลูก (วัน)	กัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย (kBq g <sup>-1</sup> )	
		ต้นแฝก	รากแฝก
สุราษฎร์ธานี	3	30.84 ± 1.92	54.97 ± 16.76
	6	66.50 ± 40.19	123.85 ± 99.19
	9	83.73 ± 32.34	144.03 ± 65.50
	12	135.44 ± 50.98	277.35 ± 136.61
	15	137.15 ± 12.94	278.22 ± 67.02
	18	144.98 ± 32.91	411.62 ± 181.25

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การปนเปื้อนมลพิษในสิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องมีวิธีที่จะบำบัดอย่างเหมาะสม การบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยการใช้เทคโนโลยีชีว หรือพฤษบำบัด เป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ประหยัด สามารถใช้ได้ในพื้นที่กว้าง และบำบัดมลพิษได้หลากหลาย พืชที่ใช้ในงานพฤษบำบัด ต้องมีความทนทานและเจริญเติบโตดีในแหล่งมลพิษ หญ้าแฝก จึงเป็นพืชที่เลือกนำมาใช้ในการทดลองนี้

สำหรับการทดลองนี้ เป็นการศึกษาการดูดซึมและกระจายซีเซียม-134 ในแฝก 2 แหล่งพันธุ์ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นสารกัมมันตรังสี ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก 2 แหล่งพันธุ์ และศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการปลูก ต่อการดูดซึมซีเซียม-134 ของแฝก โดยอาศัยภาพถ่ายทางรังสีประกอบงานวิจัยด้วย งานวิจัยนี้สามารถเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับศึกษาการดูดซึมสารกัมมันตรังสีของแฝก เพื่อมุ่งเน้นการบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อม โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. จากภาพถ่ายรังสีในตัวของแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีและราชบุรี ที่ปลูกในสารละลายซีเซียม-134 และการวัดกัมมันตภาพในแฝก ให้ผลที่สอดคล้องกันว่า แฝกทั้ง 2 แหล่งพันธุ์ สามารถดูดซีเซียม-134 ได้ และสะสมไว้ในส่วนของรากมากกว่าต้น
2. เมื่อปลูกแฝกในสารละลาย ที่มีความเข้มข้นของซีเซียม-134 เพิ่มขึ้น แฝกก็สามารถดูดซีเซียม-134 ได้เพิ่มขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อสารละลายซีเซียม-134 ที่ปลูกแฝกมีความเข้มข้นมากขึ้น ภาพถ่ายรังสีในตัวก็มีความเข้มมากขึ้น ค่า PSL  $\text{mm}^2$  ค่ากัมมันตภาพในแฝกก็เพิ่มขึ้น และค่ากัมมันตภาพในสารละลายหลังปลูกลดลง โดยความสามารถดูดซีเซียม-134 ที่เพิ่มมากขึ้นนี้ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเข้มข้นซีเซียม-134 ที่เพิ่มขึ้นด้วย
3. แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี สามารถดูดซีเซียม-134 ได้มากกว่าแฝกแหล่งพันธุ์ราชบุรี ในทุกความเข้มข้นของสารละลายซีเซียม-134 ที่ปลูกแฝก โดยมีมากกว่าประมาณร้อยละ 7-9

4. เมื่อปลูกแฝกในสารละลายซีเซียม-134 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ระยะเวลาในการปลูกแฝกมีผลต่อความสามารถในการดูดซีเซียม-134 คือ เมื่อปลูกแฝกนานขึ้น แฝกสามารถดูดหรือบำบัดซีเซียมได้มากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่า PSL  $\text{mm}^2$  ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นด้วยค่ากัมมันตภาพ และกัมมันตภาพจำเพาะในแฝกก็เพิ่มขึ้น และค่ากัมมันตภาพในสารละลายหลังปลูกลดลง

### ข้อเสนอแนะ

#### ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

1. ควรทำการศึกษาการดูดซึมและกระจายซีเซียม-134 ในแฝกแหล่งพันธุ์อื่นเพิ่มเติม ทั้งแฝกกลุ่มและแฝกตอน เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้แฝกบำบัดสารมลพิษ ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
2. ควรทำการศึกษาการดูดซึมและกระจายสารกัมมันตรังสี ในพืชชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจ และใช้ประโยชน์จากพืชเพื่อลดหรือกำจัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมให้คุ้มค่ามากที่สุด
3. เลือกสารกัมมันตรังสีชนิดอื่นศึกษาการดูดซึมและกระจาย ในพืช โดยพิจารณาความเหมาะสม เช่น ครึ่งชีวิต การขจัดและการเปื้อนสารกัมมันตรังสี
4. เปรียบเทียบและศึกษาระยะเวลาต่าง ๆ ที่เหมาะสมและให้ผลดีที่สุดในการบำบัดสารมลพิษเพิ่มเติม
5. ศึกษาการเก็บเกี่ยวพืชหลังการบำบัดเพื่อนำมาเก็บเป็นกากกัมมันตรังสี หรือสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้หรือไม่

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กปร. 2541. **สารนำรู้เรื่องแฝก**. โครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2545. **สารนำรู้เรื่องแฝก**. โครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2549. **คู่มือดำเนินงานโครงการปลูกหญ้าแฝกเฉลิมพระเกียรติ**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

คารินทร์ แซ่ตั้ง, สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์, ฉลองชัย แบบประเสริฐ และ อมรา ทองปาน. 2551. **การใช้หญ้าแฝกในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. ปรินญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชงชัย, Y. T. Cheng และ J. M. R. Hutchison. n.d. การวัดสารรังสีแบบสองมิติด้วยอิมเมจเพลท. ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38.

ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ. 2548. **การสอบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาแบบเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูงชนิดเพลนนา**. วิทยานิพนธ์ปรินญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ. 2536. **เทคนิคการวัดรังสี**. ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

\_\_\_\_\_. 2552. **การใช้หญ้าแฝกเพื่อการบำบัดโลหะหนัก**. เครือข่ายหญ้าแฝกแห่งประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ. 2553. นิวเคลียร์เทคโนโลยี: พื้นฐานและการประยุกต์ใช้ด้านดินและพืช. ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิทักษ์ อินทะพันธ์, สวัสดิ์ บุญชี, นิพนธ์ อุดปวง และ ศศิประภา พ่วงพลับ. 2542. การทดสอบ การปลูกหญ้าแฝกหอมเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำบนพื้นที่ลาดชัน 1) การทดสอบการปลูก หญ้าแฝกที่มีระยะห่างระหว่างแนวตั้งต่าง ๆ กัน 2) การทดสอบการปลูกหญ้าแฝกที่มี จำนวนแถว และระยะปลูกที่ต่างกัน. น. 74-75. ใน รายงานผลการสัมมนา เรื่อง การพัฒนา และรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครั้งที่ 3. สำนักงาน คณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงาน โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

มนต์ชัย จันทร์ศิริ. 2548. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วยเทคนิคแทนลอน้ำในการบำบัด น้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิรุฬห์ มังคละวิรัช และ สุวิทย์ ปุณช์ชัยยะ. 2536. รายงานอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง. กรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

สุภา รันดาเว, กิตติพร ศรีสวัสดิ์, วันเลิศ วรรณปิยะรัตน์, วัชรินทร์ ปางค์ชัยภูมิ, วิโรจน์ จันทรโชติ, วิศิษฐ์ จุ้ยดอนกลอย, บัญญัติ แหวนแก้ว, ปรีชา เพชรประไพ และ H. H. Reinhardt. 2547. การพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันการชะล้างพังทลายของดินในพื้นที่ ปลูกมันสำปะหลังแบบเกษตรกรรมมีส่วนร่วมเพื่อเกษตรยั่งยืนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของประเทศไทย, น. 263-273. ใน การประชุมสัมมนาวิชาการระบบเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 4.

ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 2555. คู่มือเทคนิควิธีการปลูก หญ้าแฝกในการปรับปรุงและพัฒนาดินที่แข็งเป็นดานเพื่อการปลูกพืช. แหล่งที่มา: <http://www.huaysaicenter.org/images/research/vetiver%20grass.pdf>, 20 สิงหาคม 2556.

อังศุมาลิน อินแดง, วันวิสา สุดประเสริฐ และ ชงชัย สุดประเสริฐ. 2552. การวัดและประเมินค่าการกระเจิงของระดับรังสีแกมมาอ้างอิงในห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ (SSDL) ด้วยระบบวัดแบบอิมเมจจิงเพลต. ใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิเวศวิทยุ ครั้งที่ 11.

Ahmet, C. 2008. An approximation for response function to g-rays of NaI(Tl) detectors up to 1.5 MeV. **Appl. Radiat. Isot.** 66: 1371-1376.

Baeza, B., F. J. Guillen, A. Salas and J. L. Manjon. 2005. Distribution of radionuclides in different parts of a mushroom: Influence of the degree of maturity. **Journal of Science of the Total Environment** 359: 255-266.

Bañuelos, G. S., H. A. Ajwa, N. Terry and A. Zayed. 1997. Phytoremediation of selenium laden soils: A new technology. **Journal of Soil and Water Conservation** 52 (6): 426-430.

Carchon, R., M. Moeslinger, C. Bass and M. Zendel. 2007. **Gamma radiation detectors for safeguards applications.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 579: 380-383.

Cerne, M., B. Smodis and M. Strok. 2010. Uptake of radionuclides by a common reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud.) grown in the vicinity of the former uranium mine at Zirovski vrh. **Nuclear Engineering and Design** 241: 1282-1286.

Clark, M. J. and F. B. Smith. 1988. Wet and dry depositions of Chernobyl release. **Nature** 332: 245-249.

Das, P., R. Datta, K. C. Makris and D. Sarkar. 2009. Vetiver grass is capable of removing TNT from soil in the presence of urea. **Journal of Environmental Pollution** 158: 1980-1983.

- Debertin, K. and R. G. Helmer. 1998. **Gamma And X-Ray Spectrometry With Semiconductor Detectors**. North-Holland, New York.
- Eapen, S., S. Singh, V. Thorat, C. P. Kaushik, K. Raj and S. F. D'Souza. 2006. Phytoremediation of radiostrontium ( $^{90}\text{Sr}$ ) and radiocesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) using giant milky weed (*Calotropis gigantea* R.Br.) plants. **Journal of Chemosphere** 65: 2071-2073.
- Fuhrmann M., M. L. Mitch, D. E. Stephen, V. K. Leon and C. Jay. 2002. Uptake of Cesium-137 and Strontium-90 from Contaminated Soil by Three Plant Species; Application to Phytoremediation. **Journal of Environ. Qual.** 31: 904-909.
- Furutani, S., S. Takuya, I. Hitoshi, O. Masataka, O. Kyousuke, K. Yoshiomi, T. Yoshihiro and N. Hiromu. 2006. Assurance of I-125 seeds for prostate brachytherapy using an imaging plate. **Journal of Radiation Oncology Biology Physic** 66: 603-609.
- Gauthier-Lafaye, F. 2002. 2 billion year old natural analogs for nuclear waste disposal: the natural nuclear fission reactors in Gabon (Africa). **Comptes Rendus Physique** 3 (7-8): 839-849.
- Gilmore, G. and J. D. Hemingway. 2004. **Practical Gamma-Ray Spectrometry**. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England.
- Grazyna bystrzejewska-piotrowska and L. U. Pawel. 2003. Accumulation of Cesium in leaves of *lepidium sativum* and its influence on photosynthesis and transpiration. **Acta biologica cracoviensia Series Botanica** 45 (2): 131-137.
- Hornik, M., M. Pipiska and J. Augustin. 2008. Bioaccumulation of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  in freshwater plants. **Journal of Nova Biotechnologica** 8-1: 55-63.
- IAEA and ANSTO. 2006. **Distance Learning Materials: Radiation Protection**. (CD Rom). Office of Atoms for Peace, Bangkok.

IAEA. 2011. **Radioactive contamination and animal production and health.** International Atomic Energy Agency, Vienna.

Jayakumar K. and A. J. Cheruth. 2009. Uptake and Accumulation of Cobalt in Plants: a Study Based on Exogenous Cobalt in Soybean. **Botany Research International** 2 (4): 310-314.

Knoll, F. G. 2000. **Radiation Detection and Measurement.** John Wiley & Sons, New York.

Konshin, D. V. 1992. Transfer of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to grass-analysis of possible source of uncertainty. **Health Physics** 63: 307-315.

Konstantinos, C. M., M. S. Kabindra, D. Rupali, S. Dibyendu and P. Devanand. 2006. High uptake of 2, 4, 6-trinitrotoluene by vetiver grass e Potential for phytoremediation? **Environmental Pollution** 146 (2007): 1-4.

Kong, X., L. Weiwen, W. Biqing and L. Fuhe. 2003. Study on vetiver's purification for waste water from pig farm, pp. 181-185. *In Proceedings of the third International conference on vetiver and Exhibition.* China. 6-9 October 2003.

Korea Atomic Energy Research Institute. 2000. **Table of Nuclide.** Available source: <http://atom.kaeri.re.kr/>, August 23, 2011.

Lewellen, T. 2008. **Radiation detection and measurement.** Rad. Detect & Measure, New York.

Lozano, R. L., M. A. H. Ceballos, J. A. Adame, M. C. Ruiz, M. Sorribas, E. G. S. Miguel and J. P. Bolivar. 2011. Radioactive impact of Fukushima accident on the Iberian Peninsula: Evolution and plum previous pathway. **Journal of Environment International** 37: 1259-1264.

- Hatano, Y., H. Masanori, O. Y. Hiroko, N. Hirofumi and Y. Toshihiko. 2012. Measurement of tritium concentration in water by imaging plate. **Journal of Fusion Engineering and design.** 87: 965-968.
- Hirota, M., S. Takuya, O. Yoshimune and N. Kunihide. 2001. Feasibility of in vivo thyroid <sup>131</sup>I monitoring with an imaging plate. **Journal of Applied Radiation and Isotopes** 55: 513-516.
- Ito, S., S. Takuya, A. Eiji, D. Shizuhiko, H. Masahiro and N. Kunihide. 2009. <sup>99m</sup>Tc thyroid imaging system using multiple imaging plates. **Journal of Physica Medica.** 25: 73-81.
- Mahara, Y. 1993. Storage and migration of fallout of strontium-90 and cesium-137 for over 40 years in the surface soil of Nagasaki. **Journal of Environmental Quality** 22: 722-730.
- Makris, K. C., K. M. Shakya, R. Datta, D. Sarkar and D. Pachanoor. 2006. High uptake of 2, 4, 6-trinitrotoluene by vetiver grass-potential for phytoremediation?. **Journal of Environmental Pollution** 146: 1-4.
- Manolopoulou, M., E. Vagena, S. Stoulos, A. Ioannidou and C. Papastefanou. 2011. Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident. **Journal of Environmental Radioactivity** 102: 796-797.
- Meagher, R. B., C. L. Rugh, M. K. Kandasamy, G. Gragson and N. J. Wang. 2000. Engineered phytoremediation of mercury pollution in soil and water using bacterial genes. pp. 201-221. *In* **Phytoremediation of contaminated soil and water (Eds: N. Terry and G. Banuelos)**. Boca Raton, Lewis.
- Miroslav, H., P. Martin and A. Jozef. 2008. Biocumulation of 137-Cs and 60-Co in freshwater plants. **Nova Biotechnologica** 8-1: 55-63.

Murashige and Skoog Basal Medium. 1962. Available source: [http://www.mpbio.com/product\\_info.php?open=products&cPath=1\\_7\\_46\\_389\\_854&selecttab=&family\\_key=0926231](http://www.mpbio.com/product_info.php?open=products&cPath=1_7_46_389_854&selecttab=&family_key=0926231), August 28 2011.

Persson, B. R. R. and E. Holm. 2011. Polonium-210 and lead-210 in the terrestrial environment: a historical review. **Journal of Environmental Radioactivity** 102: 420-429.

Pittauerova, D., B. Hettwig and H. W. Fischer. 2011. Fukushima fallout in Northwest German environmental media. **Journal of Environmental Radioactivity** 102: 877-880.

Rodriguez, P. B., F. V. Tome, J. C. Lozano and M. A. P. Fernandez. 2010. Transfer of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , and  $^{210}\text{Pb}$  from soils to tree and shrub species in a Mediterranean area. **Journal of Applied Radiation and Isotopes** 68: 1154-1159.

Roongtanakiat, N. and P. Chairoj. 2001a. Uptake potential of some heavy metals by vetiver grass. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 35: 46-50.

\_\_\_\_\_. 2001b. Vetiver grass for the remediation of soil contaminated with heavy metals. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 35: 433-440.

Roongtanakiat, N., T. Nirunrach, S. Chanyotha and D. Hengchaovanich. 2003. Uptake of heavy metals in landfill leachate by vetiver grass. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 37: 168-175.

Roongtanakiat, N., Y. Osotsapar and C. Yindiram. 2008. Effect of soil amendent on grow and heavy metal content in vetiver in iron ore tailings. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 397-406.

Roongtanakiat, N., Y. Osotsapar and C. Yindiram. 2009. Influence of heavy metals and soils amendments on vetiver (*Vetiveria zizanioides*) grown in zinc mine soil. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 43: 37-49.

- Roongtanakiat, N., S. Tangruangkiat and R. Meesat. 2007. Utilization of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) for removal of heavy metal from industrial waste water. **ScienceAsia** 33: 397-403.
- Singh, S., E. Eapena, V. Thoratb, C. P. Kaushikb, K. Raj and S. F. D'Souza. 2006. Phytoremediation of <sup>137</sup>Cesium and <sup>90</sup>Strontium from solutions and low-level nuclear waste by *Vetiveria zizanioides*. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 69: 306-311.
- Soudek, P., R. Tykva, R. Vankova and T. Vanek. 2005. Accumulation of radioiodine from aqueous solution by hydroponically cultivated sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Jornal of Environmental and Experimental Botany** 57: 220-225.
- Soudek, P., T. Richard, and Tom\_a\_s Van\_ek. 2004. Laboratory analyses of <sup>137</sup>Cs uptake by sunflower, reed and poplar. **Journal of Chemosphere** 55: 1081-1087.
- Soudek, P., S. Valenova, Z. Vavrikova and T. Vanek. 2006. <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions. **Journal of Environmental Radioactivity** 88: 236-250.
- Sugiyama, K., T. Tanabe, T. Saze and K. Nishizawa. 2006. Application of imaging plate technique for separate detection of <sup>3</sup>H and <sup>14</sup>C. **Journal of Fusion Engineering and design**. 81: 1111-1116.
- Takeda, R., S. Yukiko, Y. Rumi, K. Sadao and S. Akiyoshi. 2010. Accumulation of Heavy Metals By Cucumber And Brassica Juncea Under Different Cultivation Conditions. **Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy** 11 (19).

- Truong, P. 1999. **Vetiver grass technology for mine rehabilitation**. PRVN Technical Bulletin No. 1999/2. Office of the Royal Development Project Board, Bangkok, Thailand.
- \_\_\_\_\_. 2000. Application of the vetiver system for phytoremediation of mercury pollution in the lake and Yolo counties, Northern California. pp. 550-561. **In Invited paper presented at the Pollution Solutions Seminar**. 10 May 2000. Yolo Counties, Northern California.
- \_\_\_\_\_ and D. Baker. 1998. **Vetiver Grass System for Environmental Protection**. Technical Bulletin No. 1998/1. Pacific Rim Vetiver Network. Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Thailand.
- U.S. Department of Energy. 2007. **Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas**. Available source: [http://www.evs.anl.gov/pub/dsp\\_detail.cfm?PubID=1472](http://www.evs.anl.gov/pub/dsp_detail.cfm?PubID=1472), August 22, 2011.
- Whicker, F. W., J. E. Pinder III, J. W. Bowling, J. J. Alberts and Jr. I. L. Brisbin. 1990. Distribution of long-lived radionuclides in an abandoned reactor cooling reservoir. **Journal of Ecology Monographs** 60: 471-496.
- Wikipedia. 2011. **Caesium-137**. Available source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Caesium>, August 15, 2011.
- Wong, C. C. 2003. The Rirole of Mycorrhizae associated with *Vetiveria zizanioides* and *Cyperus polystachyos* in the remediation of metals (lead and zinc) contaminated soils. M. Phil Thesis. Hong Kong Baptist University, Hong Kong.
- Xia, H. P and W. S. Shu. 2001. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings. **Journal of Acta Ecologica Sinica**, 21: 1121-1129.

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางธัญรัศม์ อัครวุฒิชยานนท์
วันเดือนปีเกิด	31 มกราคม 2514
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ตำแหน่งปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์จัดการกากกัมมันตรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนา ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี