



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ไตรคลอโรเอทิลีน โดยใช้หญ้าแฝก

Phytoremediation : Vetiver Grass in Remediation of Soil Contaminated with Trichloroethylene

نامผู้วิจัย นางสาวจิราจันทร์ จันทรงาม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์พัฒนา อนุรักษ์พันธุ์, D.Tech.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศุภวิทย์ สถาปนารู, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มทาวินยาสัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ไตรคลอโรเอทิลีนโดยใช้หญ้าแฝก

Phytoremediation : Vetiver Grass in Remediation of Soil Contaminated with Trichloroethylene

โดย

นางสาวจิราจันทร์ จันทรัมย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จิราจันทร์ จันทรังม 2554: การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ไตรคลอโรเอทิลีน โดยใช้หญ้าแฝก ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์พัฒนา อนุรักษ์พงศธร, D.Tech.Sc. 84 หน้า

งานวิจัยนี้เลือกใช้หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) เพื่อบำบัดไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) ที่ปนเปื้อนในดิน โดยทดลองปลูกหญ้าแฝก 4 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์สงขลา 3 ศรีลังกา กำแพงเพชร 2 และ สุราษฎร์ธานี ในดินที่มีความเข้มข้นของ TCE เกินกว่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด หลังการปลูก 1 เดือน พบว่า ทั้ง 4 สายพันธุ์สามารถเติบโตได้ มีอัตราการอยู่รอด 100% ผลการเจริญเติบโตพบว่า สายพันธุ์สุราษฎร์ธานีมีจำนวนใบมากที่สุด (6.67 ± 0.58 ใบต่อต้น) ศรีลังกามีความยาวลำต้นมากที่สุด รองลงมาคือ สงขลา 3 (6.67 ± 0.76 และ 5.33 ± 0.29 cm ตามลำดับ), สงขลา 3 และ ศรีลังกาให้ความยาวใบมากที่สุด (40.57 ± 1.39 และ 39.30 ± 5.88 cm) แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านจำนวนหน่อตอกอ และ ความกว้างใบของทั้ง 4 สายพันธุ์ การปลูกหญ้าแฝกในวัสดุปลูกที่ประกอบด้วย กาบมะพร้าวสับ : ดินที่ปนเปื้อน TCE : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 พบว่า หญ้าแฝกสามารถเคลื่อนย้ายสาร TCE เข้าไปอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืชได้ และ สะสมในส่วนของใบมากที่สุด รองลงมาคือ ลำต้น และราก ตามลำดับ การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนย้าย สะสม และ ย่อยสลายของสาร TCE ในระบบพบว่า ในชุดควบคุมมีสาร TCE หลงเหลือในวัสดุปลูก 2.49% และสูญหายจากระบบ 91.51% ส่วนในชุดทดลองที่มีการปลูกหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 มีสาร TCE หลงเหลือในวัสดุปลูก 2.02% สะสมในพืช 5.74% และสูญหายจากระบบ 92.24% ส่วนหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกามีประสิทธิภาพการสะสมใกล้เคียงกับสายพันธุ์สงขลา 3 โดยพบว่าสาร TCE หลงเหลือในวัสดุปลูก 2.25% สะสมในพืช 5.61% และสูญหายจากระบบ 92.14% เนื่องจากในงานวิจัยนี้ตรวจวัดเฉพาะสาร TCE เท่านั้น ซึ่งสาร TCE บางส่วนอาจสูญหายจากระบบผ่านกระบวนการระเหย หรือ เปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบชนิดอื่น ผ่านกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์และพืช ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาใช้หญ้าแฝกเป็นพืชทางเลือกในการบำบัดสาร TCE ที่ปนเปื้อนในพื้นที่ได้

Jeerajan Janngam 2011: Phytoremediation : Vetiver Grass in Remediation of Soil Contaminated with Trichloroethylene. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Patana Anurakpongsatorn, D.Tech.Sc. 84 pages

Trichloroethylene (TCE) is chlorinated hydrocarbon which used in degreasing oil and grease from process products. It was found that this chemical was contaminated in environmental, soil and water around industrial area. Soil was collected from Pratum Thani province which had TCE higher than the standard set by Ministry of Industry. Four ecotypes of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) were used for phytoremediation including Songkla 3, Sri Lanka, Kamphaeng Phet2 and Surat Thani. All ecotypes grew up and the survival rate was 100% after planting for 1 month. Surat Thani had the most number of leaves (6.67 ± 0.58 leaves per plant). Songkhlar3 had the longest shoots followed by Sri Lanka (6.67 ± 0.29 and 5.33 ± 0.76 cm). Songkla 3 and Sri Lanka had the longest leaves (40.57 ± 1.39 and 39.30 ± 5.88 cm). However, there were no statistical differences ($p > 0.05$) in sprouts quantity and leaves width among the 4 ecotypes. Songkhlar 3 and Sri Lanka were selected for further experiment. Selected vetiver grass was planted in contaminated soil mixed with materials including coconut husk chips : soil : manure in ratio 3:2:1 by weight. TCE was higher accumulated in leaves than shoots and roots (41.66, 36.99 and 21.35%). In control group, 2.49% of TCE remained in mixed materials and 97.51% was disappeared from the system. Comparing with the test group, planting with Songkhlar 3 had 2.02% of TCE remained in mixed materials, 5.74% TCE left in plant parts and 92.24% disappeared from the system. Sri Lanka test group had the same trend as Songkhlar 3, about 2.25% of TCE still remained in mixed materials, 5.61% was in the plant parts and 92.14% disappeared from the system. Since, this experiment was considered only TCE, loss of TCE in the system might be occurred through volatilization, transformed into others compounds by microbial or plant activities. The results of this research can be benefit in alternatively applied to the existing areas contaminated with TCE.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พัฒนา อนุรักษ์พงษ์ธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร. ตุลวิทย์ สถาปนจารุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาทุนเลขที่ MRG-OSMEP505S048 ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา (พ.ศ.2550) ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าระดับนานาชาติ และขอขอบพระคุณ อาจารย์ สมเกียรติ ท้วมแสง จากสำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ที่ได้ให้คำแนะนำเรื่องเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณสำนักพัฒนาที่ดินเขต 1 จังหวัดปทุมธานี สำหรับดินที่ใช้ในการทดลอง และขอบคุณสำนักพัฒนาที่ดินอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่เอื้อเฟื้อกล้าหาญนำผลทั้งหมดในการทดลอง

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และสถานที่ในการทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอบคุณเพื่อนนิสิตปริญญาโท และน้อง ๆ ในภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม รวมทั้งเพื่อน ๆ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านกำลังใจ กำลังใจ คำแนะนำต่างๆ และบรรยากาศในการทำงานที่ดีตลอดการทำวิจัย และขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงน้อง ๆ ที่คอยเป็นกำลังใจให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ จนกระทั่งทุกวันนี้

จิราจันทร์ จันทรงาม

กรกฎาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	30
อุปกรณ์	30
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	38
สรุปและข้อเสนอแนะ	53
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	55
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของดิน	63
ภาคผนวก ข การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสาร TCE ที่มีอยู่ในวัสดุปลูกที่ผสม วัสดุปรับปรุงดินและในพืช	69
ภาคผนวก ค ตารางประกอบสำหรับอ้างอิงในงานวิจัย	74
ภาคผนวก ง ภาพประกอบสำหรับอ้างอิงในงานวิจัย	77
ภาคผนวก จ อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในปี 2553	79
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	84

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความสามารถของหญ้าแฝกที่ทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ	5
2	คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของไทรคโลโรเอทธิลีน	14
3	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของดินในระดับต่าง ๆ กับเนื้อดิน	23
4	ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินในประเทศไทย	25
5	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน	38
6	ผลการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์	41
7	ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และ อินทรีย์วัตถุ ในดิน กาบมะพร้าวสับ ปุ๋ยคอก และ วัสดุปลูก	45
8	ค่า translocation factor (TF) ของหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา และ สายพันธุ์สงขลา 3 ที่ปลูกในวัสดุปลูก	51
 ตารางผนวกที่		
ก1	ประเมินค่าการวิเคราะห์ของดิน	65
ข1	ปริมาณสาร TCE ในส่วนราก ลำต้น และใบ และค่า translocation factor (TF) ของหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg	69
ข2	ปริมาณสาร TCE ในส่วนราก ลำต้น และใบ และค่า translocation factor (TF) ของหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg	69
ข3	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสาร TCE ที่พบในส่วนราก ลำต้น และใบของหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 และสายพันธุ์ศรีลังกา ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข4 ปริมาณสาร TCE ที่เหลือในวัสดุปลูก และค่า %TCE removal ของชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกหญ้าแฝก คือ ดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg	71
ข5 ปริมาณสาร TCE ที่เหลือในวัสดุปลูก และค่า %TCE removal ของหญ้าแฝก สายพันธุ์สงขลา 3 ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg	72
ข6 ปริมาณสาร TCE ที่เหลือในวัสดุปลูก และค่า %TCE removal ของหญ้าแฝก สายพันธุ์ศรีลังกา ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg	72
ค1 เปรียบเทียบการสะสมของสาร TCE ในส่วนต่าง ๆ เทียบระหว่างดิน 3 ชนิด	75
ค2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสาร TCE โดยใช้วัสดุอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ	75
ค3 mechanism ของสาร TCE ผ่านกระบวนการพืชบำบัดโดยใช้ต้น poplar	76
จ1 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในปี 2553	78

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะลำต้นของหญ้าแฝก	5
2	ลักษณะรากของหญ้าแฝก	8
3	สูตรโครงสร้างของสารไตรคลอโรเอทิลีน	12
4	ปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารไตรคลอโรเอทิลีนในสภาพไร้อากาศ	15
5	กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของสารไตรคลอโรเอทิลีนในพืช	16
6	กระบวนการ phytoextraction หรือ phytoaccumulation	18
7	กระบวนการ rhizofiltration	19
8	กระบวนการ phytostabilization	20
9	กระบวนการ phytodegradation หรือ phytotransformation	21
10	ส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุในดิน	25
11	ลักษณะของดินที่นำมาจากพื้นที่จังหวัดปทุมธานี	26
12	การปลูกหญ้าแฝกเพื่อคัดเลือกลายพันธุ์	33
13	จำนวนใบต่อต้นของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์	39
14	ความยาวลำต้นของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์	40
15	ความยาวใบของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์	40
16	ไคอะแกรมการเคลื่อนที่ของสาร TCE	43
17	ความเข้มข้นของสาร TCE ในวัสดุปลูกหลังจากปลูกหญ้าแฝก 1 เดือน	46
18	ปริมาณสาร TCE ในระบบของชุดควบคุม	47
19	ความเข้มข้นของสาร TCE ที่พบในส่วนต่าง ๆ ของพืชหลังจากปลูกในวัสดุปลูก 1 เดือน	48
20	ปริมาณสาร TCE ในระบบของชุดทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3	49
21	ปริมาณสาร TCE ในระบบของชุดทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อดิน 3 กลุ่ม 12 ชนิด	65
ข1 กราฟสารมาตรฐานของสารไตรคลอโรเอทิลีนที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm โดยใช้เครื่อง GC-ECD	73
ข2 retention time ของสารไตรคลอโรเอทิลีน (2.939 นาที) โดยเครื่อง GC-ECD	73
ง1 ปริมาณ ^{14}C ที่ตรวจพบในต้นกกธูปฤๅษีในระบบ wetland	78
ง2 การสะสมของสาร TCE ในมะเขือเทศ	78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

atm	= ความดันบรรยากาศ
CEC	= ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
cm	= เซนติเมตร
CO ₂	= แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
°C	= องศาเซลเซียส
ds	= เดซิซีเมน
g	= กรัม
kcl	= กิโลแคลอรี
kg	= กิโลกรัม
K 2	= หยู้าแฝกสายพันธุ์กำแพงเพชร 2
L	= ลิตร
m	= เมตร
mg	= มิลลิกรัม
ml	= มิลลิลิตร
OM	= ปริมาณอินทรีย์วัตถุ
pH	= ค่าความเป็นกรดด่าง
ppm	= หนึ่งในล้านส่วน (part per million)
Si	= หยู้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา
So 3	= หยู้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3
Su	= หยู้าแฝกสายพันธุ์สุราษฎร์ธานี
TCE	= ไตรคลอโรเอทิลีน
μl	= ไมโครลิตร
%	= เปอร์เซ็นต์

การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ไตรคลอโรเอทิลีน โดยใช้หญ้าแฝก

Phytoremediation : Vetiver Grass in Remediation of Soil Contaminated with Trichloroethylene

คำนำ

สารไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) มักใช้เป็นสารทำละลายในงานล้างไขมัน และ กรีส ออกจากผิวโลหะ อุตสาหกรรมที่นิยมใช้สารชนิดนี้ ได้แก่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมผลิตแผ่นเซรามิก ผลิตสายนาฬิกาโลหะ รวมไปถึงการผลิตเสื้อผ้า สารดังกล่าวพบว่ามี การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งในดิน แหล่งน้ำผิวดิน และ น้ำใต้ดิน

การบำบัดสารไตรคลอโรเอทิลีนที่ปนเปื้อนในดิน และ น้ำใต้ดิน สามารถใช้วิธีทาง กายภาพ เคมี และ ชีวภาพ ซึ่งการใช้กระบวนการทางชีวภาพเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย และ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก็น้อย อีกทั้งยังเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การใช้พืชบำบัด (phytoremediation) เป็นกระบวนการทางชีวภาพ ที่อาศัยกระบวนการเติบโตของพืช ร่วมกับ กิจกรรมของจุลินทรีย์ และ ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนออกจากระบบ

หญ้าแฝก (vetiver grass) เป็นพืชที่มีระบบรากยาว และ มีปริมาณของรากมาก ทำให้เพิ่ม โอกาสที่รากพืชจะสัมผัสกับสารปนเปื้อนในดินได้มาก นอกจากนี้บริเวณรากยังเป็นที่อยู่อาศัยของ จุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยสลายสารปนเปื้อน หญ้าแฝกสามารถปลูกได้ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย เจริญเติบโตได้ในดินหลายประเภท เช่น ดินพรุน ดินเค็ม ดินเหนียว และ ดินทราย เป็นต้น รวมไปถึง สามารถปลูกในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ เช่น พื้นที่ที่ปนเปื้อน โลหะหนัก พบว่า หญ้าแฝกสามารถทนต่อความเป็นพิษจากโลหะหนัก และ สามารถดูดซับโลหะ หนักไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ ดังนั้น หญ้าแฝกจึงเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจเป็นพืชทางเลือกใน การใช้ดูดซับสารมลพิษออกจากดิน งานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของหญ้าแฝกในการ ดูดซับสารไตรคลอโรเอทิลีนออกจากดิน โดยใช้กระบวนการพืชบำบัด ซึ่งนอกจากจะเป็นการ ฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนแล้ว ยังเป็นการสนองแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ใน การใช้หญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดิน และ น้ำอีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความสามารถในการเจริญเติบโตของหญ้าแฝก 4 สายพันธุ์ ได้แก่ สงขลา 3 ศรีลังกา กำแพงเพชร 2 และ สุราษฎร์ธานี เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน และทำการคัดเลือกหญ้าแฝก 2 สายพันธุ์ที่ให้ค่าการเจริญเติบโตดีที่สุด
2. ตรวจวัดค่าความสามารถในการเคลื่อนย้ายและสะสมของสารไตรคลอโรเอทธิลีนในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าแฝก และ ในวัสดุปลูก จากชุดการทดลองที่ปลูกในวัสดุปลูก (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก)

ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ใช้ทดลอง และ ทดลองปลูกหญ้าแฝก 4 สายพันธุ์ ได้แก่ สงขลา 3 ศรีลังกา กำแพงเพชร 2 และ สุราษฎร์ธานีในดินเพื่อทดสอบความสามารถในการเจริญเติบโต จากนั้นคัดเลือกหญ้าแฝก 2 สายพันธุ์ที่ให้ค่าการเจริญเติบโตดีที่สุดเพื่อนำไปปลูกในดินที่ผสมด้วยวัสดุปรับปรุงดิน ทดสอบการสะสมของสารไตรคลอโรเอทธิลีนในพืช และ ในวัสดุปลูก

การตรวจเอกสาร

1. หญ้าแฝก

หญ้าแฝก (vetiver grass) เป็นพืชตระกูลหญ้าชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย และ ตะไคร้ ซึ่งพบกระจายอยู่ทั่วไปหลายพื้นที่ มีการใช้ประโยชน์และรู้จักกันดีทั่วไปโดยเฉพาะหญ้าแฝกหอม หรือ เรียกกันว่า แฝกลุ่ม แฝกส้ม หรือ แฝกทองขาว เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุอยู่ได้หลายปี มีการนำไปปลูก และใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย การกระจายพันธุ์สันนิษฐานว่าเดิมอยู่บริเวณตอนกลางและตอนใต้ของประเทศอินเดีย และได้แพร่กระจายไปยังภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ต่อมาได้มีการนำไปปลูกในหลายเขตของโลก ซึ่งปัจจุบันพบแพร่หลายอยู่ทั่วไป โดยเฉพาะประเทศในแถบบริเวณเส้นศูนย์สูตรของทวีปเอเชีย หมู่เกาะในมหาสมุทรอินเดีย และ แปซิฟิก ทวีปอเมริกา ออสเตรเลีย อเมริกากลาง อเมริกาใต้ และ ตอนใต้ของทวีปอเมริกาเหนือ

ในประเทศอินเดีย ได้มีการบันทึกถึงการนำหญ้าแฝกมาแต่โบราณ โดยเฉพาะประโยชน์ที่เกี่ยวกับการนำไปใช้ในพิธีกรรมต่าง ๆ และการนำรากไปใช้เป็นเครื่องหอม หญ้าแฝกแต่เดิมเป็นพืชพื้นบ้านในประเทศอินเดีย ซึ่งต่อมาได้มีการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร เพราะประโยชน์ด้านนี้เป็นไปอย่างช้า ๆ (กลุ่มวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์หญ้าแฝกในการจัดการดิน สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [ส.ว.จ.], 2546) สำหรับประเทศไทย คนไทยสมัยก่อนใช้หญ้าแฝกมุงหลังคา ทำยาไทย ปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากหญ้าแฝกมากขึ้น เช่น นำมาใช้ในงานศิลปหัตถกรรม ทำเครื่องจักสาน วัสดุเพาะเห็ด และนำมาสกัดน้ำหอม วัตถุประสงค์หลักของการปลูกหญ้าแฝก คือ ใช้ในการอนุรักษ์ดิน และ น้ำ โดยเฉพาะในบริเวณพื้นที่ลาดชันตามแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ (เพชร, 2545)

จากการศึกษาหญ้าในสกุล *Vetiveria* ในระบบอนุกรมวิธาน พบว่าหญ้าแฝกมีอยู่ประมาณ 12 ชนิด โดยในประเทศไทยพบหญ้าแฝกอยู่เพียง 2 ชนิดด้วยกัน คือ หญ้าแฝกหอม (*Vetiveria zizanioides* Nash) และ หญ้าแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus) ในธรรมชาติพบว่าหญ้าแฝกทั้งสองชนิดมีการกระจายทั่วไป และไม่พบการแพร่ระบาดเป็นวัชพืช ซึ่งจะแตกต่างจากหญ้าคา (มนตรี และคณะ, 2549; ส.ว.จ., 2546)

หญ้าแฝกสามารถปลูกได้ในพื้นที่สูง ทั้งจากความสูงใกล้เคียงระดับน้ำทะเล จนถึงระดับประมาณ 800 m (สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ [กปร.], 2549) เพชร (2545) รายงานว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในระดับความสูง 600 – 1,200 m จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ในประเทศไทยหญ้าแฝกมักไม่พบในพื้นที่ทำการเกษตรแต่จะพบในบริเวณพื้นที่ป่าธรรมชาติ โดยจะพบมากในพื้นที่กลางแจ้ง บริเวณใกล้แอ่งน้ำหนองน้ำ และ แหล่งน้ำที่มีความชุ่มชื้นสูง รวมทั้งในป่าเต็งรัง เช่น ที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ กำแพงเพชร นครสวรรค์ เลย ร้อยเอ็ด ราชบุรี ประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี สงขลา เป็นต้น

1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

หญ้าแฝกมักเจริญอยู่ตามธรรมชาติ พบกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่เขตร้อน ในประเทศไทยสามารถพบหญ้าแฝกตั้งแต่บริเวณพื้นที่ลุ่มจนถึงที่ดอน โดยหญ้าแฝกสามารถขึ้นได้ดีในดินเกือบทุกชนิด (กปร., 2549) นอกจากนี้หญ้าชนิดนี้ยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เป็นพืชทนแล้ง และเป็นพืชชอบน้ำ จึงสามารถเจริญได้ทั้งในสภาพที่แห้งแล้งจัดไปจนถึงบริเวณที่มีน้ำขัง เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยได้มีการทดลองปลูกหญ้าแฝกในดินชนิดต่าง ๆ เช่น ดินเค็ม ดินพรุ ดินทราย เพื่อทดสอบความทนต่อสภาพแวดล้อมของหญ้าแฝก (ตารางที่ 1) พบว่าหญ้าแฝกเป็นพืชที่มีความทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม และสามารถทนความเป็นพิษของโลหะหนักในดินได้

จากการศึกษาของ Dudai *et al.* (2006) ที่ได้ทำการทดลองปลูกหญ้าแฝกในวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ เช่น ทราย ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว crushed limestone ดินร่วนปนทราย และ truff/peat mixture พบว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในวัสดุทุกชนิด และการปลูกในดินเหนียว จะให้ความสูงและจำนวนหน่อมากกว่าวัสดุปลูกชนิดอื่น และจากการศึกษาของสันติภาพ และคณะ (2542) พบว่าหญ้าแฝกสายพันธุ์ที่ทนต่อสภาพดินเค็มได้สูงสุดคือ สายพันธุ์ประจวบฯ รองลงมาได้แก่ สายพันธุ์ศรีลังกา และสายพันธุ์สงขลา 3 นอกจากนี้ยังได้มีการนำหญ้าแฝกไปทดลองปลูกในดินพรุ พบว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้และจะมีการเจริญเติบโตดีขึ้นเมื่อใส่ปุ๋ยสูตรร่วมด้วย (ปัญญา และสมโสทธิ, 2542)

ตารางที่ 1 ความสามารถของหญ้าแฝกที่ทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

สภาพต่าง ๆ	ระดับที่แฝกเจริญได้	ระดับที่ถือว่าปนเปื้อนในดิน
pH ของดิน	3.3	-
อลูมิเนียม	68 (ที่ pH 3.8)	-
แมงกานีส (ppm)	578 (ที่ pH 9.5)	-
ปริมาณเกลือ (%)	33 (ที่ pH 9.5)	-
ความเค็ม (ds/m)	17.5	-
อาร์เซนิก (ppm)	100 – 250	50
แคดเมียม (ppm)	10 – 20	3
โครเมียม (ppm)	200 – 600	50
ทองแดง (ppm)	50 – 100	60
นิกเกิล (ppm)	50 – 100	60

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547)



ภาพที่ 1 ลักษณะลำต้นของหญ้าแฝก

ที่มา: Dudai *et al.* (2006)

1.1.1 ลำต้น (culm)

หญ้าแฝกเป็นหญ้าที่ขึ้นเป็นกอแน่น มีลักษณะเป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรง ขึ้นสูง มีความสูงประมาณ 100 – 150 cm กอแฝกมีขนาดค่อนข้างใหญ่ (วิระชัย และคณะ, 2536) โคนกอเบียดกันแน่น เป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้หญ้าแฝกแตกต่างจากหญ้าชนิดอื่นอย่างชัดเจน ส่วนโคนของลำต้นมีลักษณะแบนเกิดจากส่วนของโคนใบที่จัดเรียงพับซ้อนกัน ลำต้นแท้จะมีขนาดเล็กซ่อนอยู่ในกาบใบบริเวณคอคิน การเจริญเติบโตและการแตกกอของหญ้าแฝก จะเป็นการแตกหน่อใหม่ทดแทนต้นเก่าอยู่เสมอ โดยจะแตกหน่อออกทางด้านข้างบริเวณรอบคอคิน ทำให้กอมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนข้อ และ ปล้องนั้นจะเห็นได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากหญ้าแฝกมีลำต้นสั้น (ภาพที่ 1)

1.1.2 ใบ (leaf)

ใบจะแตกออกจากโคนกอ มีลักษณะแคบยาว ขอบใบขนานปลายสอบแหลม แผ่นใบกว้างคาย โดยเฉพาะใบแก่ขอบใบและเส้นกลางใบมีหนามละเอียด (spinulose) หนามบนใบที่ส่วนโคนและกลางแผ่นใบจะมีน้อย แต่จะมีมากที่บริเวณปลายใบ กระจิ่งหรือเยื่อกันน้ำบนที่โคนใบ (ligule) จะลดรูปมีลักษณะเป็นเพียงขอบโค้งของขนสั้นละเอียด บางครั้งสังเกตได้ไม่ชัดเจน (กปร., 2549) เมื่อตัดแผ่นใบตามขวางและศึกษาดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จะเห็นลักษณะการเรียงตัวของเนื้อเยื่อในใบเป็นลักษณะเฉพาะ ด้านหลังใบจะพบส่วนของมัดท่อน้ำและอาหาร (vascular bundle) เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ อยู่ใต้ชั้นผิวใบ (epidermis) มัดท่อน้ำและอาหารนี้จะถูกห่อหุ้มด้วยกลุ่มเซลล์ผนังบาง (parenchyma sheath) ที่มีสารประกอบสีเขียว (chlorenchyma) และชนิดที่ไม่มีสี (parenchyma) เซลล์เหล่านี้ทำหน้าที่เก็บสะสมอาหาร และเป็นแหล่งเก็บพลังงานที่พืชได้จากการสังเคราะห์แสง ตอนบนของท่อน้ำและอาหารจะมีเซลล์ที่มีผนังหนาตามมุม (sclerenchyma) เรียงตัวอยู่เป็นกลุ่ม ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรง ส่วนด้านท้องใบ ผิวจะปกคลุมด้วยเซลล์ผนังบางชั้นเดียว ใต้ผิวใบลงไปจะประกอบด้วยเซลล์ผนังบางจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มในลักษณะสะพานเชื่อมระหว่างมัดท่อน้ำเลี้ยงกับผิวใบ บริเวณตอนกลางของแผ่นใบ จะมีช่องว่างขนาดใหญ่ (intercellular space) ปรากฏชัดเจนอยู่ทั่วไป ทำหน้าที่เก็บออกซิเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) และหายใจ (respiration) บนด้านหลังใบจะมีเซลล์ปากใบ (guard cell) มากกว่าด้านท้องใบ ส่วนตรงกลางของด้านท้องใบจะมีกลุ่มเซลล์ผนังบางขนาดใหญ่ เรียงตัวอยู่ที่บริเวณรอยพับของใบ (bulliform cells) มีหน้าที่ควบคุมการห่อตัวและการพับตัวของใบ

1.1.3 ราก (roots)

เป็นส่วนสำคัญและเป็นลักษณะพิเศษเฉพาะของหญ้าแฝกที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นหลัก โดยปกติแล้วหญ้าส่วนใหญ่จะมีรากที่เป็นระบบรากฝอย (fibrous roots) แตกจากส่วนลำต้นใต้ดิน แต่ระบบรากของหญ้าแฝกจะแตกต่างจากรากหญ้าส่วนใหญ่ คือ มีระบบรากเป็นรากฝอยจำนวนมาก ลักษณะสานกันแน่น เจริญยังลึกลงดินในแนวดิ่ง และไม่แผ่ขนาน (มนตรี และคณะ, 2549) (ภาพที่ 2) หญ้าแฝกที่มีอายุประมาณ 18 เดือน จะมีระบบรากเจริญเต็มที่ โดยรากแกนที่ส่วนโคนกอจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 – 3 mm ผนังด้านนอกจะแข็งตัวมีลักษณะอวบคล้ายนม เมื่อรากแก่มากก็จะตายไปและถูกแทนที่ด้วยเซลล์ผิวที่อยู่ในชั้นถัดไป จากการศึกษาส่วนของรากภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จะเห็นลักษณะการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ รากด้านนอกประกอบด้วยเซลล์ผิว (outer epidermis) ได้เซลล์ชั้นผิวเป็นเซลล์ที่มีผนังหนาสะสมตามมุม (sclerenchyme) เรียงตัวอยู่เป็นหลายชั้น เซลล์ชั้นถัดไปประกอบด้วยกลุ่มเซลล์ผนังบางที่เชื่อมต่อกันหลวม ๆ เป็นสายคล้ายสะพาน ทำหน้าที่เก็บกักน้ำ ในชั้นนี้จะมีช่องว่างขนาดใหญ่มากมาย เพื่อช่วยกักเก็บน้ำเมื่อมีความชื้นสูง และ เก็บอากาศชั้นเมื่อมีความแห้งแล้ง นอกจากนี้เนื้อเยื่อด้านในส่วนแกนกลางจะประกอบด้วยเซลล์ที่เรียงตัวอัดกันแน่น โดยเซลล์ชั้นนอกสุดจะมีผนังหนา (endodermis) ซึ่งรองรับด้วยเซลล์ที่มีผนังบางเรียงตัวอยู่ชั้นเดียว (pericycle) ถัดไปจะเป็นเซลล์ผนังหนา (sclerenchyma) ที่เรียงตัวกันหลายชั้นซึ่งจะแทรกด้วยกลุ่มของท่อลำเลียง และส่วนใจกลางของราก (pith) จะเป็นกลุ่มของเซลล์ผนังบาง (parenchyma) ที่เรียงตัวอัดแน่นทำหน้าที่ช่วยในการลำเลียงน้ำของรากไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช

1.1.4 ช่อดอก (inflorescence)

หญ้าแฝกมีช่อดอกตั้ง ลักษณะเป็นรวง ก้านช่อดอกยาวกลม ความยาวของก้านช่อดอกและรวงประมาณ 100 – 150 cm ช่อดอกของหญ้าแฝกหอมส่วนใหญ่จะเป็นสีม่วง ซึ่งสีของช่อดอกเป็นลักษณะประจำของแต่ละชนิดพันธุ์ (กปร., 2549)

1.1.5 ดอก (spikelets)

ดอกมักพบเรียงตัวอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มประกอบด้วยดอกชนิดที่ไม่มีก้าน และดอกชนิดมีก้าน ยกเว้นที่ส่วนปลายของก้านช่อดอก มักจะเรียงเป็น 3 ดอกอยู่ด้วยกัน โดยดอกที่ไม่มีก้านจะอยู่ตรงกลาง ส่วนดอกที่มีก้านจะชูอยู่ด้านบน



ภาพที่ 2 ลักษณะรากของหญ้าแฝก

ที่มา: Dudai *et al.* (2006)

1.1.6 เมล็ดและต้นกล้า (seed and deeding)

เมล็ดมีสีน้ำตาลอ่อน เป็นรูปกระสวย ผิวเรียบ หัวท้ายมน มีความกว้าง 1 – 1.5 mm ยาว 2.5 – 3 mm มีเนื้อในลักษณะคล้ายแป้งเหนียว เมล็ดสูญเสียความงอกได้ง่ายและมีความสามารถในการงอก (vitality) อยู่ในช่วงระยะเวลาจำกัดในช่วงระยะเวลานั้น ๆ บางสายพันธุ์ โดยเฉพาะสายพันธุ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศจะไม่มีเมล็ด จึงทำให้หญ้าแฝกไม่สามารถจะแพร่กระจายกลายเป็นวัชพืชร้ายแรงได้ (กปร., 2549)

1.2 ความแตกต่างของหญ้าแฝกหอมและหญ้าแฝกดอน

ข้อแตกต่างที่ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างหญ้าแฝกหอม และ หญ้าแฝกดอน คือ หญ้าแฝกหอม เป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้าหาสภาพแวดล้อมได้ดี โดยหญ้าแฝกหอมที่พบอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ นั้น จะมีการกระจายพันธุ์ และ ปรับตัวเพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญในพื้นที่หญ้าแฝกหอมมีใบยาวประมาณ 45 – 90 cm ความกว้างของใบประมาณ 0.6 – 0.9 cm หลังใบโค้งปลายใบแบน มีสีเขียวเข้ม เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบ (wax) มากทำให้ดูมัน ท้องใบมีสีเขียวซีดมากกว่าด้านหลังใบ และเมื่อนำไปส่องดูกับแดดจะเห็นรอยกั้นขวางในเนื้อใบ (septum) ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะพื้นใบบริเวณส่วนโคนและกลางใบ เส้นกลางใบ (midrib) ที่ฝังอยู่ในตัวแผ่นใบจะไม่ชัดเจน พบว่าหญ้าแฝกหอมที่มีอายุประมาณ 1 ปี จะมีรากที่ยังลึกได้มากกว่า 1 m ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของดินและความอุดมสมบูรณ์ของพืช ในสภาพธรรมชาติดินร่วนปนทรายที่มีการระบายน้ำดี พบว่าหญ้าแฝกจะให้ความยาวรากมากที่สุด

สายพันธุ์หญ้าแฝกหอมที่พบในประเทศไทย ตามทะเบียนของกรมพัฒนาที่ดิน ได้แก่ สายพันธุ์กำแพงเพชร 2 สายพันธุ์เชียงราย สายพันธุ์สงขลา 1 สายพันธุ์สงขลา 2 สายพันธุ์สงขลา 3 สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี สายพันธุ์ตรัง 1 สายพันธุ์ตรัง 2 สายพันธุ์ศรีลังกา สายพันธุ์เชียงใหม่ และ สายพันธุ์แม่ฮ่องสอน เป็นต้น (กปร., 2549)

ส่วนหญ้าแฝกดอน จะมีการกระจายพันธุ์อยู่ในวงแคบ ๆ ตามธรรมชาติเฉพาะในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศไทย ลาว เขมร และ เวียดนาม มักพบในพื้นที่ค่อนข้างแล้ง หรือที่ดินมีการระบายน้ำได้ดี (กปร., 2549) มีลักษณะของยอดกอแผ่โค้งลงคล้ายกอดะไกร ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม โคนกอมีลักษณะแน่นมาก หญ้าแฝกดอนมีใบยาว 35 – 60 cm ความกว้างใบประมาณ 0.4 – 0.6 mm ใบมีสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันสามเหลี่ยม เนื้อใบจะหยาบและสากคายมากกว่าหญ้าแฝกหอม มีไขเคลือบน้อยทำให้ดูร่วนไม่เคลือบมัน ท้องใบมีสีเขียวซีดกับด้านหลังใบ แต่จะซีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ เส้นกลางใบสังเกตได้ชัดเจน มีลักษณะแข็งเป็นแกนหนุนทางด้านหลัง เมื่อเปรียบเทียบรากของหญ้าแฝกหอม และ หญ้าแฝกดอนที่มีอายุเท่ากัน จะพบว่ารากของหญ้าแฝกดอนมีลักษณะสั้นกว่า หญ้าแฝกดอนอายุ 1 ปีจะมีรากลึกประมาณ 80 – 100 cm (วีระชัย และคณะ, 2536)

สายพันธุ์หญ้าแฝกดอนที่พบในประเทศไทย ตามทะเบียนของกรมพัฒนาที่ดิน ได้แก่ สายพันธุ์อุดรธานี 1 สายพันธุ์อุดรธานี 2 สายพันธุ์นครพนม 1 สายพันธุ์นครพนม 2 สายพันธุ์ ร้อยเอ็ด สายพันธุ์ชัยภูมิ สายพันธุ์เลย สายพันธุ์สระบุรี 1 สายพันธุ์สระบุรี 2 สายพันธุ์กาญจนบุรี สายพันธุ์ห้วยขาแข้ง สายพันธุ์นครสวรรค์ สายพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ สายพันธุ์ราชบุรี สายพันธุ์จันทบุรี สายพันธุ์พิษณุโลก และสายพันธุ์กำแพงเพชร 1 เป็นต้น (กปร., 2549)

1.3 ลักษณะของหญ้าแฝกหอมที่ทำการศึกษา

จากการศึกษา และ ค้นคว้าของกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547) ในด้านการใช้หญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ ได้มีการคัดเลือกสายพันธุ์หญ้าแฝก และส่งเสริมการปลูกแฝก 10 สายพันธุ์ ซึ่งสายพันธุ์หญ้าแฝกหอมที่ได้รับการส่งเสริมมีทั้งหมด 4 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ศรีลังกา สายพันธุ์สงขลา 3 สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี และสายพันธุ์กำแพงเพชร 2 เป็นต้น ซึ่งลักษณะของแต่ละสายพันธุ์ เป็นดังนี้

1.3.1 สายพันธุ์ศรีลังกา

สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพพื้นที่ดินเป็นลูกรัง อากาศหนาวเย็น มีร่มเงา แดกกอประมาณ 10 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 11 cm สูง 101 cm แดกกอค่อนข้างกลม หน่อกลม ยืดปล้องเร็ว โคนกอเล็ก ใบแก่ค่อนข้างเล็ก ท้องใบสีเขียวคล้ายกับหญ้าแฝกดอน ดอกมีสีม่วง เริ่มออกดอกเมื่ออายุประมาณ 1 เดือนหลังจากปลูก ขยายพันธุ์ได้ง่ายในสภาพที่มีความชื้นสูง และมีแสงน้อยแต่ไม่ต้านทานต่อโรคโคนเน่า

1.3.2 สายพันธุ์สงขลา 3

สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพพื้นที่เป็นดินร่วนเหนียวปนทรายถึงลูกรัง แดกกอประมาณ 24 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 13 cm สูง 112 cm แดกกอกลม หน่อกลมอวบ ยืดปล้องเร็ว ใบสีเขียวอ่อน ท้องใบสีขาว ดอกสีม่วงแดง ออกดอกเมื่ออายุประมาณ 1.5 เดือนหลังจากปลูก

1.3.3 สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี

สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพพื้นที่ดินร่วนเหนียว และ ดินลูกรัง แดกกอประมาณ 22 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 13 cm สูง 108 cm แดกกอหลวม หน่อกลมอวบ ยึดปล้องเร็ว ทรงพุ่มกว้างมาก ใบสีเขียวอ่อน ท้องใบสีขาว ดอกสีม่วงแดง ออกดอกเมื่ออายุประมาณ 1 เดือนหลังจากปลูก

1.3.4 สายพันธุ์กำแพงเพชร 2

สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพพื้นที่เป็นดินทรายถึงดินลูกรัง แดกกอประมาณ 18 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 18 cm สูง 94 cm แดกกอค่อนข้างหลวม หน่อกลมค่อนข้างเล็ก ยึดปล้องเร็ว ทรงพุ่มกาง ใบสีเขียวเข้ม ท้องใบสีขาว ดอกสีม่วงแดง ดอกดอกเมื่ออายุประมาณ 0.5 เดือน หลังจากปลูก ต้นโต ปล้องไม่โต ทำให้น้ำหนักสดสูง ให้คุณค่าทางอาหารสัตว์ดีกว่าแหล่งพันธุ์อื่น ๆ

1.4 การใช้ประโยชน์จากหญ้าแฝกในทางสิ่งแวดล้อม

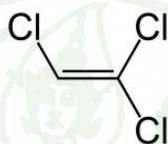
ประโยชน์ของหญ้าแฝกทางสิ่งแวดล้อมมีหลายประการ ทั้งช่วยในการฟื้นฟูทรัพยากรดิน และ รักษาสภาพแวดล้อม เนื่องจาก หญ้าแฝกมีระบบรากที่มีความยาวมาก และมีลักษณะสานกันแน่น ซึ่งเปรียบเสมือนกำแพงใต้ดินที่ช่วยอุ้มน้ำ ทำหน้าที่เกาะยึดดิน สงวนน้ำในดิน กรองและดูดซับธาตุอาหารพืช รวมทั้งสารเคมีมลพิษในดิน กรองพัฒนาที่ดิน กระบุงกษेत्रและสहरณ์ (2547) ได้รายงานว่ารากของหญ้าแฝกสามารถดูดซึมสารเคมี และ แร่ธาตุอาหารพืช ที่ถูกชะล้างลงไปในดิน เช่น ปุ๋ยเคมี และ สารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืช จึงเป็นการป้องกันไม่ให้สารเคมีเหล่านั้นไหลลงไปยังแหล่งน้ำ ส่งผลให้ลดมลภาวะของแหล่งน้ำ ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากหญ้าแฝกในทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การใช้ประโยชน์จากหญ้าแฝกในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างการใช้หญ้าแฝกในการบำบัดสาร 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) ในระบบการปลูกแบบพืชไม่ใช้ดิน (hydroponics) (Makris *et al.*, 2007)

นอกจากนี้หญ้าแฝกสามารถใช้ฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ จากการศึกษาของ Wilde *et al.* (2005) ได้ทดลองใช้หญ้าแฝกฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี ทองแดง และ เหล็ก จากดินที่มีอายุการปนเปื้อนนานประมาณ 50 ปี ในบริเวณ Savannah River Site (SRS)

ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปนเปื้อน พบว่าหญ้าแฝกจะสะสมโลหะหนักที่บริเวณรากมากกว่าลำต้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen *et al.* (2004) ที่ปลูกหญ้าแฝกในดินปนเปื้อนตะกั่ว ในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าตะกั่วจะสะสมในหญ้าแฝกที่บริเวณรากมากที่สุด

2. สารไตรคลอโรเอทิลีน

สารไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : TCE) หรือ ethylemetrichloride หรือ 1,1,2-trichloroethylene สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ C_2HCl_3 (ภาพที่ 3) มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร TCE ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างของสารไตรคลอโรเอทิลีน

ที่มา: The Science Education Resource Center at Carleton College (2009)

TCE เป็นสารประกอบอินทรีย์ไฮโดรคาร์บอน จัดเป็นสารละลายประเภทฮาโลเจนเต็ด (halogenated solvent) สารดังกล่าวสามารถติดไฟได้น้อย หรือ ไม่สามารถติดไฟได้ มีความสามารถในการทำละลายสูง และมีคุณสมบัติที่มีพิษรุนแรงพอสมควร โดยทั่วไปมักใช้สาร TCE ในงานล้างแห้ง ล้างไขมัน น้ำมัน กรีส ออกจากผิวโลหะ ในกระบวนการ degreasing รวมไปถึงใช้ล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล และ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ใช้ในโรงงานยาง ใช้ผลิตยารักษาโรค มักใช้เป็นของเหลวเพื่อนำยาแอร์ และ น้ำยาแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นแก๊สที่ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายคลอโรฟอร์ม (chloroform) สารดังกล่าวสามารถย่อยสลายได้น้อย สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ได้อย่างช้า ๆ โดยทั่วไปแล้วสารประกอบคลอรีนเมื่อผ่านการย่อยสลายแล้ว จะได้สารประกอบชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งผลที่ได้อาจเป็นสารที่มีความเป็นพิษรุนแรงมากขึ้น หรือ เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง หรือ ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

2.1 การปนเปื้อนของไตรคลอโรเอทิลีนสู่สิ่งแวดล้อม

เนื่องจากสารชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในโรงงานผลิตแผ่นเซรามิกสำหรับฝังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมักใช้เป็นวัตถุดิบผสมกับผงดิน เพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่น รวมทั้งโรงงานผลิตสายนาฬิกาโลหะที่มักจะใช้ล้างผลิตภัณฑ์ก่อนบรรจุหีบห่อ และโรงงานผลิตเครื่องประดับสตรี เช่น แหวน สร้อยคอ สร้อยข้อมือ นิยมใช้สาร TCE ล้างทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ก่อนบรรจุหีบห่อ เป็นต้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม สารชนิดนี้ได้มีการสำรวจโดยกลุ่มงานวิจัย และ พัฒนาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมด้านน้ำ ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม เมื่อปี พ.ศ. 2542 พบว่า มีการปนเปื้อนทั้งในดินและน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะในบริเวณนิคมอุตสาหกรรม จังหวัดลำพูน ซึ่งจากการสำรวจพบว่าระดับน้ำใต้ดินของลำพูนมีการปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทิลีนสูงมาก (ผู้จัดการออนไลน์, 2005) นอกจากนี้แล้วสารดังกล่าวยังสามารถปนเปื้อนลงสู่ดิน ทำให้ดินมีคุณภาพต่ำ และ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในดิน อันจะนำมาซึ่งอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์หากมีการปนเปื้อนสู่ห่วงโซ่อาหารได้

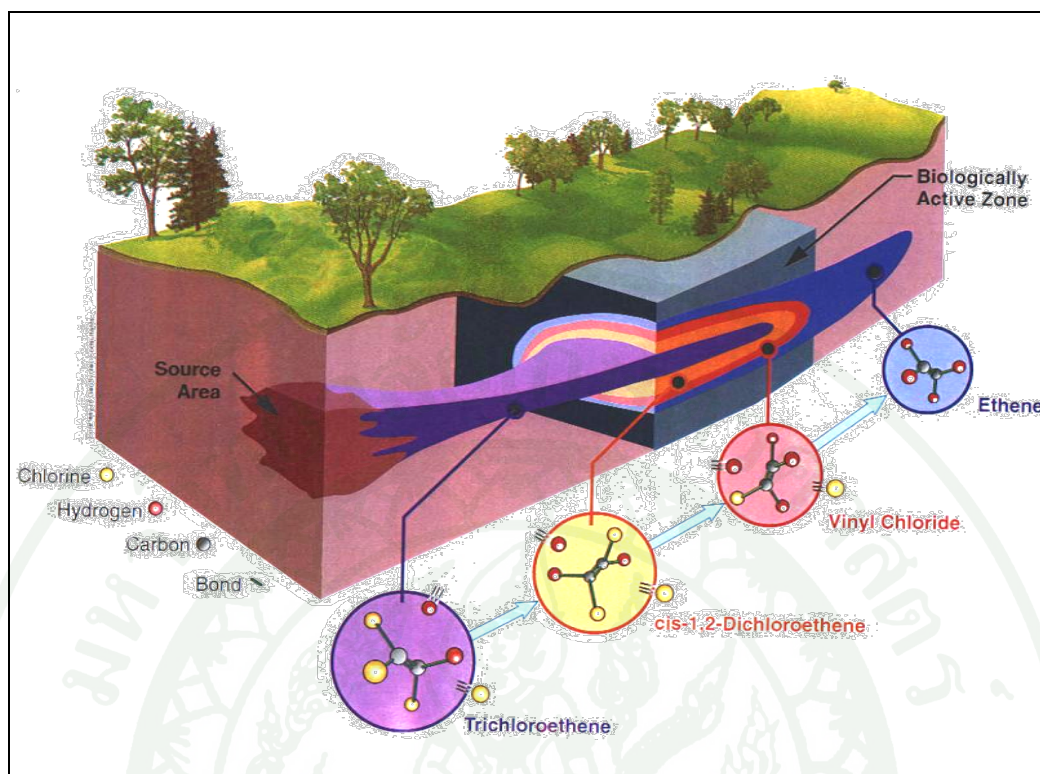
Argonne National Laboratory (2005) ได้รายงานถึงการปนเปื้อนของสาร TCE ไว้ดังนี้ โดยปกติจะพบสาร TCE ในบรรยากาศ และ น้ำบริเวณที่มีกิจกรรมการล้างไขมัน และ กริสจากผิวโลหะในโรงงานอุตสาหกรรม การใช้สาร TCE ในขั้นตอนล้างไขมัน เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สารชนิดนี้ระเหยอยู่ในบรรยากาศ สาร TCE ระเหยอยู่ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับ hydroxyl radicals กลายเป็น phosgene, dichloroacetyl chloride และ formyl chloride โดยครึ่งชีวิตของปฏิกิริยานี้ในบรรยากาศมีค่าประมาณ 7 วัน ที่ 25°C จากการสำรวจในประเทศสหรัฐอเมริกาพบสาร TCE ในบรรยากาศมีค่าสูงโดยเฉพาะในเขตชุมชน และ เขตอุตสาหกรรม

สาร TCE ถึงแม้จะสามารถระเหยจากผิวน้ำได้ง่าย แต่ยังมีบางส่วนที่สามารถตกค้างอยู่ในบริเวณ subsurface และ น้ำใต้ดิน ซึ่งจะคงอยู่เป็นเวลานาน ในสภาพไร้อากาศ เช่น ในดินที่มีน้ำท่วมขัง หรือ บริเวณชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (aquifer site) แบบที่เรียกสามารถย่อยสลายสาร TCE ได้ โดยผ่านกระบวนการ dechlorination ทำให้เกิดสาร vinylidene chloride และ vinyl chloride ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ (ภาพที่ 4) นอกจากนี้ในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของสาร TCE ยังพบการสะสมของสาร TCE ในเนื้อเยื่อสัตว์น้ำ ซึ่งพบอยู่ในระดับตั้งแต่ไม่รุนแรงจนถึงระดับปานกลาง

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของไตรคลอโรเอทิลีน

Parameters	Values	
Freezing point (°C)	-84.8	(freeze)
Boiling point (°C)	86.7	(760 mm Hg)
	43.8	(1 mm Hg)
Specific gravity	1.46	(25/25 °C)
	1.4904	(4/4 °C)
Vapor pressure (mm Hg)	69	(25 °C)
Refraction index (n_D)	1.4782	(20 °C)
Critical temperature (°C)	271.0	
Heat of combustion (kcal/g)	1.751	
Flammability flash point (°C)	Non-flammable under normal working condition; may ignite if in contact with high temperature heat sources	
Ignition temp. (°C)	410	
Danger of explosion:		
Limits (% v/v in air)	8.0 - 10.5	(25.5 °C)
	8.0 - 52.0	(100 °C)
Oxidizing properties	None	
Solubility		
In water (g/l)	1.07	(20 °C)
In organic solvents	Completely miscible with several organic solvents	
In oil	Miscible	
<i>n</i> -octanol/water partition coefficient (log)	$\text{Log}K^0/w$ 2.42	
Organic carbon partition coefficient, K_{oc}	$K^0/w \times 0.6$	
Bioconcentration factor, K_B	$K^0/w \times 0.048$	
Henry's Law Constant	$9.85 \times 10^{-3} \text{ atm-m}^3/\text{mol}$ (25 °C)	

ที่มา: World Health Organization (1985)

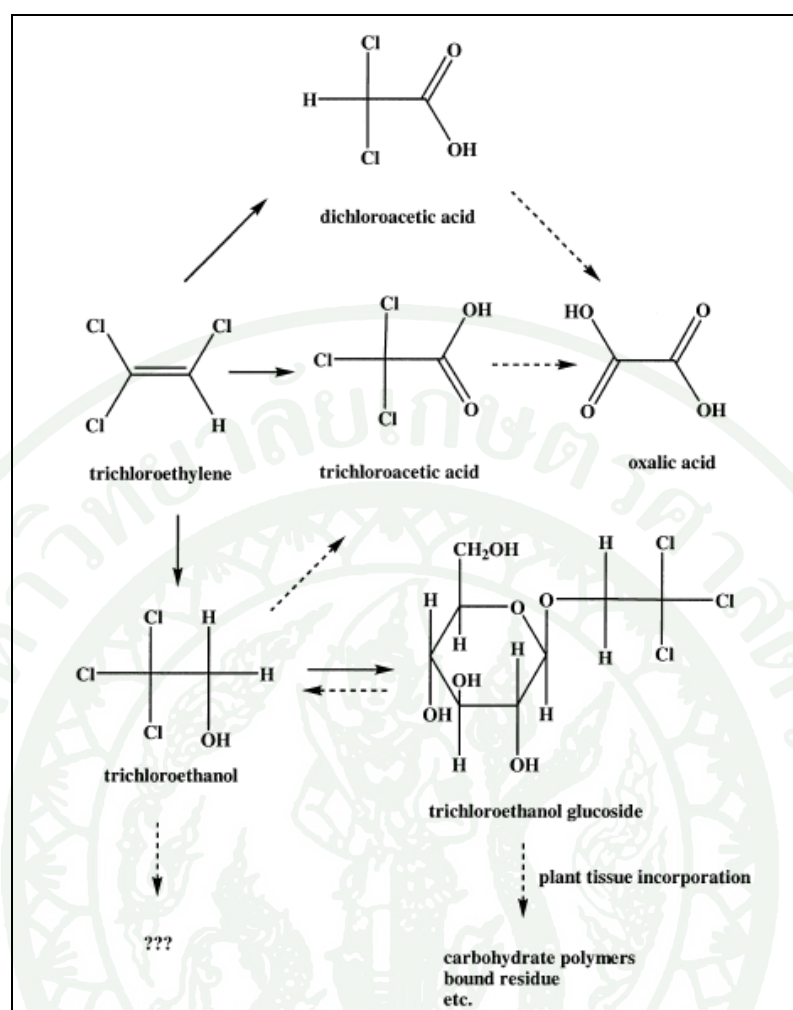


ภาพที่ 4 ปฏิกริยาการย่อยสลายของสารไตรคลอโรเอเททิลีนในสภาพไร้อากาศ

ที่มา: Interstate Technology and Regulatory Cooperation (1999)

2.2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของสารไตรคลอโรเอเททิลีนในพืช

Shang *et al.* (2001) ได้ศึกษาถึงกระบวนการ metabolism ของสาร TCE ในพืชพบว่า สาร TCE สามารถเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี เกิดเป็นสารประกอบอื่น ๆ ได้แก่ dichloroacetic acid, trichloroacetic acid และ trichloroethanol ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกิดกระบวนการ dechlorination และเปลี่ยนรูปเป็น oxalic acid จากการศึกษาโดยการติดฉลากอะตอมของคาร์บอนของสาร TCE ด้วย ^{14}C ในดินยาสูบพบว่าสาร TCE สามารถสะสมที่ส่วนใบได้มากที่สุด รองลงมาคือส่วนลำต้นและส่วนรากตามลำดับ ส่วนสาร trichloroethanol ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายในพืช พบว่าจะสะสมที่ส่วนรากมากที่สุด รองลงมาคือส่วนใบและส่วนลำต้นตามลำดับ (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของสารไตรคลอโรเอทิลีนในพืช

หมายเหตุ ลูกศรแสดง pathway (สีดำ = เกิดขึ้นจริง และเส้นประ = มีความเป็นไปได้)

ที่มา: Shang *et al.* (2001)

2.3 อันตรายจากไตรคลอโรเอทิลีน

การหายใจเอาไอระเหยของสาร TCE เข้าสู่ร่างกาย การรับประทาน และ ดื่มน้ำ ที่มีการปนเปื้อนของสาร TCE รวมทั้งการสัมผัสทางผิวหนัง เป็นการนำสารชนิดนี้เข้าสู่ร่างกาย ประมาณ 75% ของสาร TCE ที่เข้าสู่ร่างกาย จะสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมัน (fatty tissue) และ ในเลือด ซึ่งจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอย่างรวดเร็วที่บริเวณตับและเนื้อเยื่อ โดยอาศัยเอนไซม์ cytochrome P - 450 ซึ่งพบได้ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม โดยเป็นโปรตีนที่แทรกตัวอยู่ในชั้นเมมเบรนมี

หน้าที่ย่อยสลายสารต่าง ๆ ที่ร่างกายสร้างได้และสร้างไม่ได้ ผลจากการย่อยสลายโดย cytochrome P – 450 คือ เกิดสารประกอบต่าง ๆ ในร่างกาย ได้แก่ dichloroacetic acid, trichloroacetic acid, trichloroethanol และ สารเคมีชนิดอื่น ๆ เช่น oxalic acid และ 2-hydroxyacetyethanolamine ซึ่งในที่สุดสารประกอบเหล่านี้จะถูกขับออกจากร่างกายผ่านทางปัสสาวะ และน้ำดี (Argonne National Laboratory, 2005) สารประกอบที่ได้จากการย่อยสลายโดยเอนไซม์ในร่างกาย ได้แก่ dichloroacetic acid, trichloroacetic acid และ trichloroethanol พบว่า เป็นสารประกอบชนิดเดียวกับสารที่เกิดจากการย่อยสลายของสาร TCE ในพืช

การกลืนเอาสาร TCE เข้าสู่ร่างกายมีผลทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน รวมถึงอาการซึมเศร้า การสัมผัสถูกดวงตาก่อให้เกิดอาการระคายเคือง รวมทั้งการสัมผัสทางผิวหนังสามารถก่อให้เกิดการระคายเคือง ทำลายน้ำมันที่ผิวหนัง ก่อให้เกิดผื่น และ เป็นสาเหตุของโรคผิวหนัง การหายใจนำสาร TCE เข้าสู่ร่างกายส่งผลให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ และ การสูดดมไอระเหยของสารชนิดนี้ปริมาณมากสามารถทำให้รู้สึกป่วย และ อาจถึงตายได้ (Clark Products Ltd, 2007) นอกจากนี้สาร TCE ยังจัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ ตามนิยาม และการยอมรับของ International Agency for Research on Cancer (IARC) และ World Health Organization (WHO) จัดเป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และสันนิษฐานว่าสารนี้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

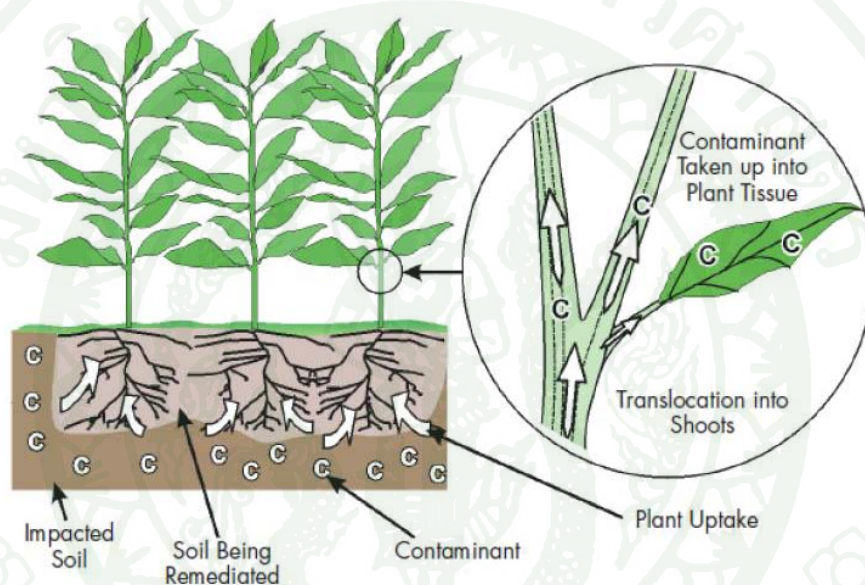
3. กระบวนการใช้พืชบำบัด

กระบวนการใช้พืชบำบัด (phytoremediation) มาจากรากศัพท์คำว่า “phto-” ในภาษากรีก ที่หมายถึง “พืช” และ คำว่า “remedium-” ในภาษาละติน ที่หมายถึง “การบำบัด หรือ การรักษา” ดังนั้น ความหมาย ของ phytoremediation คือ กระบวนการที่ใช้พืชในการบำบัดดิน โคลน กาก ตะกอน หรือ น้ำ โดยอาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำ และ แร่ธาตุอาหาร ผ่านทางรากของพืช รวมทั้งกระบวนการคายน้ำออกทางปากใบของพืช เพื่อเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษ หรือ มีความเป็นพิษน้อยลง (พันธุวิธ, 2009) กระบวนการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลาง ดิน น้ำ หรือ อากาศ เช่น TNT, TCE, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, โลหะหนัก, นิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides) เป็นต้น (จันทน์, 2553)

3.1 ประเภทของกระบวนการใช้พืชบำบัด

3.1.1 phytoextraction หรือ phytoaccumulation

เป็นการใช้พืชที่มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักจากดินเพื่อเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยโลหะหนักจะเคลื่อนย้ายผ่านทางระบบรากและไปสะสมในส่วนเหนือดินของพืช พืชที่มีคุณสมบัติสะสมโลหะหนักมากกว่าพืชชนิดอื่นจะเรียกว่า phytoaccumulator การเก็บเกี่ยวส่วนของพืชออกจากพื้นที่เป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักออกจากดินได้ (ภาพที่ 6)



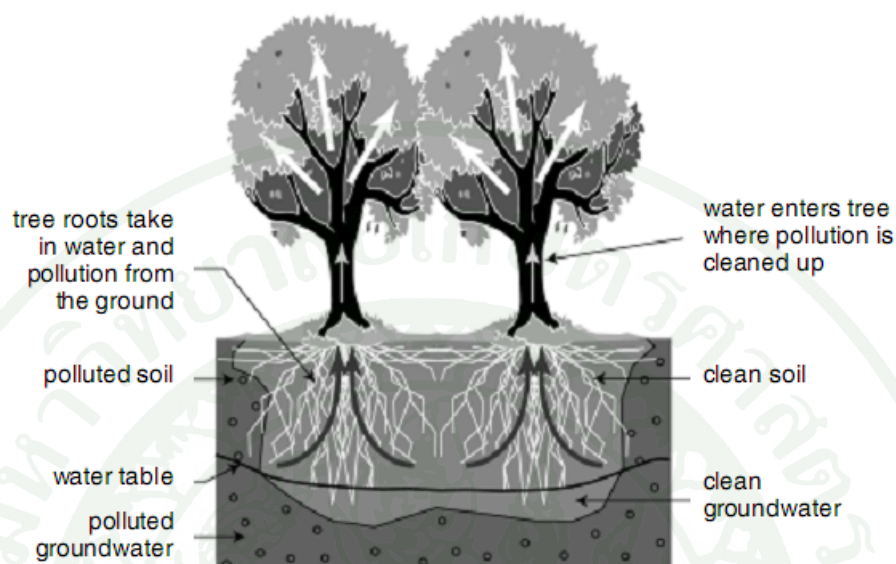
ภาพที่ 6 กระบวนการ phytoextraction หรือ phytoaccumulation

ที่มา: Muhammad *et al.* (2008)

3.1.2 rhizofiltration

เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการดูดซับ หรือ กรอง สารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปสารละลายรอบ ๆ บริเวณรากพืช เข้าไปในรากพืช (ภาพที่ 7) ส่วนมากมักใช้กับการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น น้ำใต้ดิน (Muhammad *et al.*, 2008) และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ วิธีนี้การสามารถช่วยลดปริมาณกากมลพิษได้มาก เนื่องจากเฉพาะส่วนของรากพืชเท่านั้นที่มีการสะสมมลพิษ ซึ่งส่วนนี้จำเป็นต้องอาศัยขั้นตอนอื่นมาบำบัดต่อไป ส่วนของใบ และ ลำต้นที่ไม่มีการปนเปื้อน หลังจากการเก็บเกี่ยว ก็จะทิ้งไปหรือนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้ ขึ้นกับชนิดของพืชที่

นำมาใช้ในการบำบัด เช่น พืชบางชนิดมีดอกที่สวยงาม จึงสามารถเก็บดอกไปขายในช่วงเวลา
ระหว่างการบำบัดได้อีกด้วย (จันทน์, 2553)

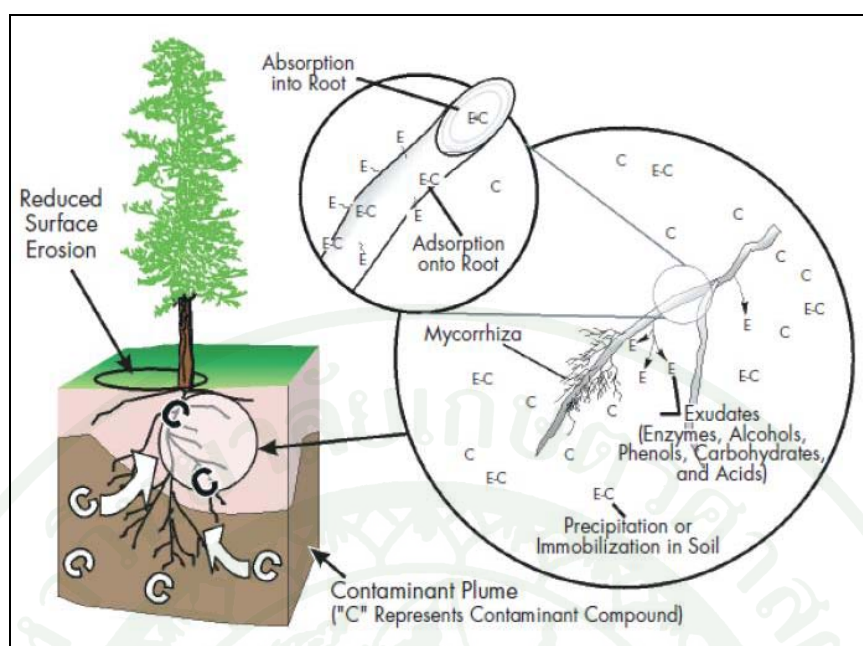


ภาพที่ 7 กระบวนการ rhizofiltration

ที่มา: United States Environment Protection Agency (2001)

3.1.3 phytostabilization

เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการจำกัดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดิน หรือ ในน้ำใต้ดิน โดยผ่านกระบวนการดูดซับ (sorption) การตกตะกอน (precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (complexation) และการรีดิวซ์เวเลนซ์โลหะ (metal valence reduction) (จันทน์, 2553) สารมลพิษจะถูกเก็บสะสมอยู่ที่บริเวณเนื้อเยื่อพืชและสะสมที่บริเวณดินรอบ ๆ รากทำให้ไม่สามารถละลายน้ำ หรือ เคลื่อนที่ได้ ช่วยลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน ไม่ให้ไปสู่น้ำใต้ดิน และระเหยสู่บรรยากาศ ช่วยลดโอกาสที่สารปนเปื้อนจะเข้าไปปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร (ภาพที่ 8)

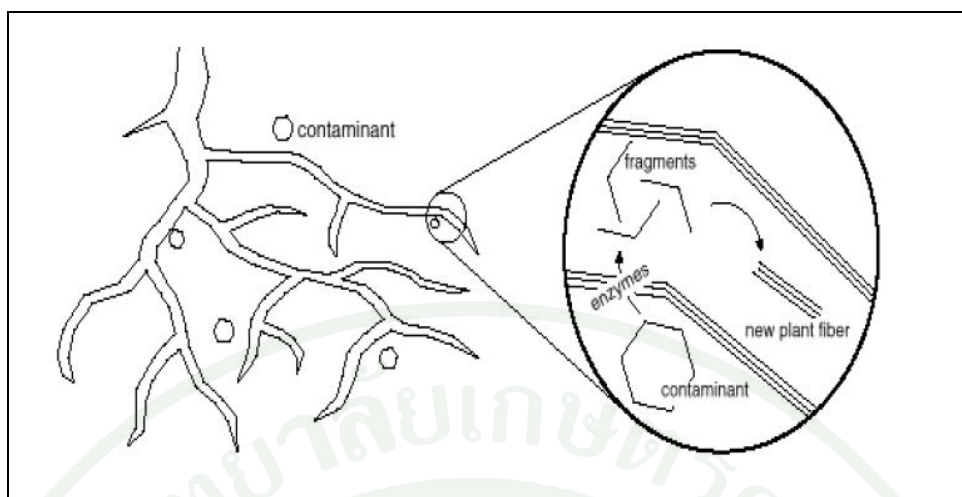


ภาพที่ 8 กระบวนการ phytostabilization

ที่มา: Muhammad *et al.* (2008)

3.1.4 phytodegradation หรือ phytotransformation

กระบวนการนี้เป็นการสลายพันธะของสารมลพิษโดยอาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของพืช หรือ อาศัยสารประกอบที่ปล่อยออกมาจากรากพืช เช่น เอนไซม์ เพื่อย่อยสลายพันธะของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดิน (ภาพที่ 9) โดยสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนจะถูกย่อยสลายให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง และ สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะถูก รวมเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชเพื่อใช้เสริมสร้างเซลล์พืช และ ใช้ในการเจริญเติบโต พืชมีเอนไซม์ที่ช่วย เร่งปฏิกิริยาเคมีได้ โดยเอนไซม์แต่ละชนิดสามารถสลายพันธะของสารประกอบได้อย่างหลากหลาย ได้แก่ สารละลายสารประกอบที่มีองค์ประกอบของคลอรีน เช่น TCE และ สารกำจัดศัตรูพืช รวมทั้ง ของเสียจากวัตถุระเบิด เป็นต้น



ภาพที่ 9 กระบวนการ phytodegradation หรือ phytotransformation

ที่มา: Muhammad *et al.* (2008)

3.1.5 phytovolatilization

กระบวนการนี้เป็นการใช้พืชเคลื่อนย้ายสารมลพิษที่สามารถละลายน้ำได้ และเคลื่อนย้ายสารเหล่านั้นออกสู่บรรยากาศ เป็นการกำจัดสารที่ปนเปื้อนออกจากน้ำ โดยพืชจะดูดซับสารมลพิษ แล้วด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชเองได้ทำการเปลี่ยนรูปสารมลพิษ (transformation) ให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้น สารมลพิษที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้จะถูกกำจัดออกโดยผ่านทางใบพืช (จันทน์, 2553) โดยพืชแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการก่อให้เกิดการระเหยของสารมลพิษแตกต่างกัน เช่น ต้น poplar tree มีประสิทธิภาพในการบำบัดสาร TCE ที่ปนเปื้อนในน้ำผ่านกระบวนการระเหยได้สูงถึง 90% ของปริมาณ TCE ทั้งหมดที่สะสมในพืช (Muhammad *et al.*, 2008)

การบำบัดสารมลพิษโดยใช้กระบวนการพืชบำบัด สิ่งที่สำคัญ คือ ขั้นตอนการเลือกใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของสารมลพิษที่จะทำการบำบัดในตัวกลางนั้น ๆ และปัจจัยร่วมอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อช่วยให้การบำบัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่ กระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และ ชีววิทยา ดังนั้น กระบวนการนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้บำบัดสารมลพิษโดยอาศัยหลักเกณฑ์การพึงพาสิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติเพื่อบำบัดสารมลพิษ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการบำบัดสารมลพิษโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีราคาแพง และ เป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ต่างจาก

วิธีทางกายภาพ และ ทางเคมี ที่จำเป็นต้องอาศัยสารเคมี หรือ การก่อสร้างระบบบำบัด ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง และเป็นสาเหตุของการทำลายสิ่งแวดล้อม เช่น วิธีชะล้างดิน (soil washing) และ วิธีการขุดลอกหน้าดิน เป็นต้น (จันทน์, 2553)

ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดโดยกระบวนการพืชบำบัดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดและปริมาณของพืชที่เลือกใช้ ชนิดและปริมาณของสารมลพิษที่ปนเปื้อน ความกว้าง และ ความลึกของพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน และ ชนิดของดิน นอกจากนี้ข้อควรระวังในการใช้พืชบำบัด คือ หากพืชที่ปลูกไว้ได้รับความเสียหายหรือถูกสัตว์ทำลายต้องมีการปลูกพืชซ้ำซึ่งจะทำให้ระยะเวลาให้การบำบัดเพิ่มมากขึ้น โดยปกติแล้วการใช้กระบวนการพืชบำบัดจะใช้เวลานานเป็นปี (Muhammad *et al.*, 2008)

4. ดิน

“ดิน” ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายความว่า วัตถุธรรมชาติซึ่งเกิดขึ้นบนผิวโลก ประกอบด้วยแร่ธาตุ และ อินทรีย์วัตถุต่าง ๆ รวมถึงหิน กรวด และ ทราบ

4.1 ส่วนประกอบของดิน

สมศักดิ์ (2528) ได้กล่าวรายละเอียดส่วนประกอบดิน แบ่งเป็น 5 ส่วนดังนี้

4.1.1 สารอนินทรีย์ (inorganic matter)

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีปริมาณมากที่สุดในดิน คือ 45% ประกอบด้วย หิน (rock) และแร่ธาตุ (mineral) ปะปนกัน ทั้งด้านปริมาณและขนาดขององค์ประกอบ ซึ่งมีผลต่อความหยาบ หรือ ความละเอียดของเนื้อดิน การระบายอากาศการอุ้มน้ำของดิน และ มีความสำคัญต่อปริมาณแร่ธาตุอาหารของพืชในดิน

4.1.2 น้ำในดิน (soil water)

น้ำในดินมีอยู่ประมาณ 25% ของปริมาตรในดิน และไม่อยู่ในรูปของน้ำบริสุทธิ์ แต่จะมีสารต่าง ๆ ละลายอยู่โดยเฉพาะธาตุอาหารต่าง ๆ น้ำในดินสามารถแสดงแทนด้วยปริมาณ

ความชื้นในดิน ซึ่งคือส่วนของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของดิน เกิดจากการซึมของหยดน้ำลงดินและถูกดูดซับโดยอนุภาคของดินไว้ ความชื้นดังกล่าวจะอยู่ในดินจนกระทั่งเกิดการระเหย หรือ ถูกดูดซับโดยรากพืชนำไปใช้ตามปกติ จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน อัตราการระเหยของน้ำ และ ความจุน้ำของดิน (field of capacity of water) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับประเภทของดิน เช่นดินทรายมีความจุน้ำของดินต่ำสุด ส่วนดินเหนียวมีความจุน้ำสูงสุด ทั้งนี้ดินที่มีความหยาบของเนื้อดินมากจะยอมให้น้ำผ่านได้ง่ายกว่าเนื้อดินที่มีความละเอียด (ภาควิชาภูมิทัศน์และอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม, 2547)

ปรีชา (2552) กล่าวถึงความชื้นในดินที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชดังนี้ ความชื้นเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อยู่ในดิน พืชเจริญเติบโตได้ดีถ้าดินมีความชื้นเพียงพอตลอดเวลา และการหาความชื้นดินที่เพียงพอกับพืชนั้น จำเป็นต้องทราบความชื้นของดินที่จุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point) และความชื้นภาคสนาม (field capacity) ของเนื้อดินต่าง ๆ ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อทราบค่าของดินที่สถานะทั้งสองแล้วจึงสามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อทราบค่าความชื้นที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (available soil moisture) ซึ่งอยู่ระหว่างค่าทั้งสอง ถ้าหาความชื้นดินลดลงจนใกล้เคียงกับจุดเหี่ยวถาวรพืชก็จะเกิดความเครียด และ ชะงักการเจริญเติบโต (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของดินในระดับต่าง ๆ กับเนื้อดิน

กลุ่มของเนื้อดิน	ระดับความชื้นของดิน (%)		
	ความจุความชื้นในสนาม	จุดเหี่ยวถาวร	น้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืช
หยาบ	5.5	2.0	3.5
ค่อนข้างหยาบ	22.2	12.0	10.2
ปานกลาง	34.6	20.3	14.3
ค่อนข้างละเอียด	33.8	21.3	12.5
ละเอียด	33.5	20.2	13.3

ที่มา: ดัดแปลงจากเกษมศรี (2541)

เกษมศรี (2541) กล่าวว่าช่วงของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะแคบหรือกว้าง ขึ้นอยู่กับลักษณะเนื้อดิน โดยเนื้อดินหยาบ หรือ ดินทรายจะมีปริมาณของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชน้อยที่สุด ส่วนเนื้อดินปานกลาง หรือ ดินร่วนจะมีในระดับปานกลาง และ เนื้อดินละเอียดหรือดินเหนียวจะมีปริมาณของน้ำที่เป็นประโยชน์มากที่สุด ดังนั้นในการให้น้ำของพืชต้องคำนึงถึงเนื้อดินเป็นสำคัญ คือ ถ้าจะปลูกพืชในดินเนื้อทรายหยาบควรให้น้ำบ่อยกว่าปลูกในเนื้อดินปานกลาง และ ดินเหนียวตามลำดับ

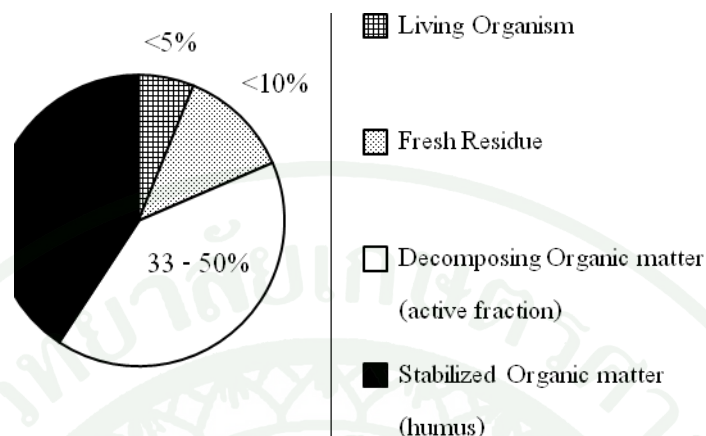
4.1.3 อากาศในดิน (soil air)

มีค่าประมาณ 25% ของปริมาตรดิน ปริมาณอากาศในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดิน เพราะต่างก็แทรกอยู่ตามช่องว่างในดิน (soil pores) กล่าวคือ ถ้าในดินมีอากาศมาก ก็จะมีน้ำน้อย แต่ถ้าในดินมีน้ำมาก น้ำก็จะเข้าแทนที่อากาศในช่องว่างของดินทำให้อากาศถูกไล่ออกไป อากาศในดินประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด และแก๊สที่มีความสำคัญต่อพืช ได้แก่ ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

4.1.4 สารอินทรีย์ (organic matter : OM)

สารอินทรีย์มีมากมายหลายชนิด มีตั้งแต่ขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น ฮิวมัส ลิกนิน และ เซลล์ลูโลส จนถึงมีขนาดโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น น้ำตาลบางชนิด กรดอะมิโนและกรดอินทรีย์ ปริมาณสารอินทรีย์ในดินมีค่าแปรผันในช่วง 1% ถึงมากกว่า 30% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นสภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ และ การกระทำของมนุษย์และสัตว์ต่อดิน นิวัตติ (2554) กล่าวว่า OM หรือ ฮิวมัส (humus) มีความหมายครอบคลุมตั้งแต่ ส่วนของซากพืชหรือสัตว์ที่สลายตัว เซลล์จุลินทรีย์ทั้งที่ยังมีชีวิตอยู่ และ ส่วนที่ตายแล้ว ตลอดจนสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายหรือส่วนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ (ภาพที่ 10) อีกทั้งยังเป็นสารประกอบที่มีประสิทธิภาพสูงในการยึดเกาะหรือ รวมตัวกับอนุภาคต่างๆ โดยเฉพาะอนุภาคดินเหนียวหรือเซลล์จุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี การจับตัวกันเกิดเนื่องจาก ความแตกต่างกันของประจุระหว่างอินทรีย์วัตถุกับดินเหนียว หรือการยึดเกาะกันของประจุลบของอนุภาคทั้งสองโดยมี multivalent cation เป็นตัวเชื่อมโยง OM มีความสามารถในการดูดซับแคตไอออนได้สูงมาก สูงกว่าคอลลอยด์อื่นๆ ตั้งแต่ 2-30 เท่า ในดินทั่วไปปริมาณของแคตไอออนที่ดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุจะอยู่ในช่วงประมาณ 30-90% ของปริมาณที่ดินดูดซับได้ทั้งหมด ความสามารถในการดูดซับมาจากประจุลบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากของอินทรีย์วัตถุ และ จาก

การศึกษาของ เกษมศรี (2541) พบว่าอินทรีย์วัตถุของดินเฉลี่ยทั่วประเทศมีปริมาณค่อนข้างต่ำ (ตารางที่ 4)



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุในดิน

ที่มา: นิวัติ (2554)

ตารางที่ 4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินในประเทศไทย

พื้นที่	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)	
	ดินนา	ดินไร่
ภาคกลาง	0.98 – 5.0	0.6 – 4.8
ภาคเหนือ	0.79 – 3.72	1.5 – 2.7
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	0.1 – 9.0	0.41 – 1.40
ภาคใต้	1.0 – 3.0	0.4 – 2.2

ที่มา: เกษมศรี (2541)

4.1.5 สิ่งมีชีวิตในดิน (soil organism)

มีตั้งแต่ขนาดใหญ่ เช่น สัตว์เลื้อยคลาน หนอน แมลง ไปจนถึงขนาดเล็ก คือ พากจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ดำรงชีวิตในลักษณะที่เกี่ยวข้อง

สัมพันธ์กับสิ่งมีชีวิตอื่น (symbiosis) และ มีบทบาทสำคัญในการแปรสภาพก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีขึ้นภายในดิน ทำให้เกิดสารอินทรีย์และสร้างความอุดมสมบูรณ์แก่ดิน

4.2 ทรัพยากรดินจังหวัดปทุมธานี

พื้นที่จังหวัดปทุมธานีมีสภาพภูมิประเทศเป็นแบบที่ราบน้ำทะเลเคยท่วมถึง เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดิน 2 ประเภท คือวัตถุต้นกำเนิดที่เกิดจากตะกอนน้ำกร่อยทับถมอยู่บนตะกอนน้ำทะเล พบอยู่บริเวณสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา ดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวตลอดชั้นดิน ส่วนบนมีสีเทาเข้ม ก่อนข้างเป็นกรดจนถึงเป็นด่างเพิ่มขึ้นตามความลึก อาจพบสารจาโรไซต์ (jarosite) เล็กน้อย หูดินสำคัญที่พบ ได้แก่ หูดินจะเข้เกรา ส่วนวัตถุต้นกำเนิดดินที่เกิดจากตะกอนน้ำกร่อยลักษณะที่พบเป็นดินเหนียวตลอดชั้นดินส่วนบนมีสีดำทึบ เป็นดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูง ดินเป็นดินเปรี้ยว คือ มีปฏิกิริยาเป็นกรดจัด และพบจุดประสีเหลืองของจาโรไซต์ (ภาพที่ 11) ซึ่งสารนี้เกิดจากกระบวนการเพิ่มออกซิเจนของสารประกอบกำมะถันในรูปของแร่ไพไรต์ (pyrite) ทำให้เกิดกำมะถันและดินมีความเปรี้ยวลดลง หูดินที่สำคัญ ได้แก่ หูดินธัญบุรี หูดินเสนา และหูดินอยุธยา (สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5, 2546)



ภาพที่ 11 ลักษณะของดินที่นำมาจากพื้นที่จังหวัดปทุมธานี

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

William *et al.* (1997) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของสาร TCE ผ่านกระบวนการพืชบำบัด โดยใช้พืชผักที่สามารถบริโภคได้ ได้แก่ แครอท ผักขม และมะเขือเทศ ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาที่บรรจุด้วยดิน และมีอากาศไหลผ่านอย่างต่อเนื่องในสภาพปิด โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ใช้ TCE ที่มี

การติดตามด้วย ^{14}C ความเข้มข้นสูง (560 $\mu\text{g/l}$) และความเข้มข้นต่ำ (140 $\mu\text{g/l}$) ระยะเวลาที่ทำการทดลองในพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดย แครอทใช้เวลา 61 วัน ผักขมใช้เวลา 31 วัน และมะเขือเทศใช้เวลา 106 วัน จากการตรวจวัดปริมาณ ^{14}C พบว่าทั้งชุดการทดลองที่ใช้ TCE ความเข้มข้นสูงและต่ำ ^{14}C จากสาร TCE จะถูกเก็บสะสมในพืช 1 – 2% ดูดซับอยู่กับดิน 5 – 25% และระเหยสู่บรรยากาศ 74 – 95% นอกจากนี้การพบ ^{14}C ในพืชสันนิษฐานว่า TCE ได้ถูกเปลี่ยนรูปและสร้างพันธะกับเนื้อเยื่อพืชทำให้มีความเป็นพิษลดลง

กระบวนการพืชบำบัด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของพืชที่ใช้โดยการนำความรู้ทางด้านพันธุวิศวกรรมเข้ามาช่วย ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Doty *et al.* (2007) ซึ่งใช้ต้น poplar tree ที่มีการตัดต่อพันธุกรรมด้วย cytochrome P450 2E1 (CYP 2E1) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบได้ทั้งในพืชและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในพืช เนื่องจากเอนไซม์ชนิดนี้สามารถย่อยสลายสารประกอบประเภท halogenated ได้หลายชนิด ทำให้ต้น poplar tree ที่ได้ตัดต่อ CYP 2E1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร TCE ออกจากสารละลายได้ 51 – 91% ภายในเวลา 1 สัปดาห์ ภายในระบบปลูกแบบไม่ใช้ดิน แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชซึ่งกำจัดได้น้อยกว่า 3% นอกจากนี้การบำบัดแก๊ส vinyl chloride ซึ่งเป็น metabolize ที่เกิดจากการย่อยสลายของสาร TCE ในดิน พบว่าในระยะเวลา 5 วัน ต้น poplar tree ที่ตัดต่อ CYP 2E1 สามารถลดปริมาณแก๊ส vinyl chloride ได้ 49% การทดลองบำบัดสาร TCE ในอากาศให้ผลดีเช่นเดียวกัน คือ สามารถกำจัดได้ 79% นอกจากนี้แล้วยังมีตัวอย่างการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโดยตัดต่อยีนอื่น ๆ เข้าไป ยกตัวอย่างจากงานวิจัยของ Milton *et al.* (1998) ที่ได้ทดลองตัดต่อยีน H11-11 จาก *Agrobacterium tumefaciens* A281 ในต้น poplar tree เป็นต้น ต้น poplar tree ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้บำบัดสาร TCE อย่างกว้างขวาง การทดลองปลูกต้น poplar tree ในอุปกรณ์ที่มีความลึก 1.5 m บรรจุด้วยน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนด้วยสาร TCE ประมาณ 50 mg/l พบว่าต้น poplar tree สามารถกำจัดสาร TCE ออกจากน้ำได้ประมาณ 95% เมื่อพิจารณาค่าสมดุลมวล (mass balance) ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า TCE ระเหยไปประมาณ 70 – 90% และดูดซับไว้ในส่วนของพืชน้อยกว่า 5% ของปริมาณ TCE ทั้งหมด การที่พบสาร TCE ในพืชน้อยมีความเป็นไปได้ว่าสาร TCE อาจเปลี่ยนรูปและสร้างพันธะกับเนื้อเยื่อพืช หรือ เป็นไปได้ว่ามีการระเหยออกทางใบของพืช ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้พืชชนิดนี้บำบัดสาร TCE ที่ปนเปื้อนในพื้นที่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

สำหรับหญ้าแผ่นนั้น ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้บำบัดสารปนเปื้อนในดิน และ น้ำ เช่นกัน ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้รายงานไว้ว่า หญ้าแผ่นสามารถใช้บำบัดได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ยกตัวอย่างงานวิจัย Singh *et al.* (2008) ที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแผ่นบำบัดสารฟีนอล

ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มักปนเปื้อนในแหล่งน้ำ โดยทำการทดลองปลูกหญ้าแฝกในสภาวะปลอดเชื้อ (aseptic conditions) พบว่าภายในระยะเวลา 4 วันหญ้าแฝกสามารถกำจัดสารฟีนอลความเข้มข้น 50 และ 100 mg/l ออกจากสารละลายได้หมด ส่วนสารฟีนอลความเข้มข้น 200 500 และ 1,000 mg/l สามารถกำจัดได้ 89.76 และ 70% ตามลำดับ ดังนั้นหญ้าแฝกจึงเป็นพืชที่มีแนวโน้มที่จะใช้ในการบำบัดสารฟีนอล และ สารมลพิษอินทรีย์อื่น ๆ ที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ Makris *et al.* (2007) ได้ทดลองใช้หญ้าแฝกบำบัดสาร 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) โดยทดลองในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน (hydroponic media) และ ได้ศึกษาผลของยูเรียที่มีต่อการดูดซับ TNT โดยหญ้าแฝก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหญ้าแฝกสามารถดูดซับ TNT ได้ในปริมาณสูง (1,026 mg/g) แต่การดูดซับนั้นจะเกิดได้ช้า และการเพิ่มยูเรียจะมีผลช่วยให้การดูดซับเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) และเนื่องจากการตรวจพบสารที่เกิดจากการย่อยสลายของ TNT ในพืชได้แก่ 1,3,5-trinitrobenzene 4-amino 2,6-di-nitrotoluene และ 2-amino 4,6-dinitrotoluene ในส่วนของพืช จึงสรุปได้ว่า หญ้าแฝกสามารถดูดซับสาร TNT เข้าไปในส่วนของพืช และสามารถย่อยสลาย หรือ เปลี่ยนรูปสาร TNT ไปเป็นสารประกอบชนิดอื่นได้ ซึ่งสารเหล่านี้พบมากที่สุดในส่วนของราก แต่ไม่พบในส่วนของลำต้น เช่นเดียวกับสาร TCE จากงานวิจัยของ Milton *et al.* (1998) ที่ทำการติดตามการเคลื่อนที่ของคาร์บอนด้วย ^{14}C พบว่าสาร TCE สามารถเปลี่ยนรูปผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวเคมีภายในพืช และเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบต่าง ๆ ได้แก่ trichloroethanol, dichloroacetic acid และ trichloroacetic acid (ภาพที่ 5) นอกจากนี้แล้ว ^{14}C จากสาร TCE ยังสามารถพบได้หลายรูป เช่น อยู่ในรูปสารที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble) สารที่ไม่สามารถสกัดได้ (nonextractable) และบางส่วนจะอยู่ในรูปของ CO_2 ซึ่งพบเป็นส่วนน้อย

Cho *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาถึงกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายของสาร TCE, tetrachloroethylene (PCE) และ 1,1,1-trichloroethane (TCA) พบว่าสารดังกล่าวหายไปจากระบบมากที่สุดโดยกลไกการระเหย ผลจากการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการ และ โรงเรือนให้ผลคล้ายกัน การทดสอบความเป็นพิษของพืชที่ระดับความเข้มข้นของสาร TCE, PCE และ TCA ต่างกัน พบว่าพืชตระกูลหญ้าที่เลือกใช้ คือ eastern gamagrass (*Tripsacum dactyloides*) และ annual ryegrass (*Lolium rigidum*) พบว่าหญ้าทั้งสองชนิดสามารถทนต่อสารดังกล่าวที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 400 ppm โดยไม่พบอาการเป็นพิษใด ๆ ที่เกิดกับพืช นอกจากนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์ยาว 1.5 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 m บรรจุด้วยดินเพื่อทดสอบไอระเหยของสารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดผลหลังจากทดลอง 100 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไอระเหยจากดินลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาที่ผ่านไป และโดยเฉพาะบริเวณดินชั้นบนจะมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายของสารปนเปื้อน ปัญญา และคณะ (2010) ได้ศึกษาการย่อยสลายของสาร TCE โดยใช้แบคทีเรียที่พบในประเทศไทย เนื่องจากสาร TCE สามารถเปลี่ยนรูปได้โดยเชื้อแบคทีเรียผ่านกระบวนการ cometabolism หรือ cooxidation ในสภาพที่มีอากาศ การใช้สารตั้งต้นกระตุ้นให้เชื้อผลิตเอนไซม์ที่ไม่จำเพาะกับสารตั้งต้นและใช้เอนไซม์นี้เปลี่ยนรูปสาร TCE ผ่านกระบวนการ oxidation จึงเป็นที่นิยม วิธีการคือทำการคัดเลือกแบคทีเรียจากแหล่งน้ำธรรมชาติในประเทศไทยที่สามารถใช้สารฟีนอลเป็นแหล่งคาร์บอน ในการเจริญเติบโต และสามารถผลิตเอนไซม์ที่ไม่จำเพาะ (non specific enzyme) เพื่อย่อยสลายสาร TCE จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของการนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสาร TCE ได้สูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของ TCE 10 mg/l จะให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีที่สุด คือ 59.9% ภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการปลูกหญ้าแฝก
 - 1.1 กระถางดินเผา ขนาด 5 x 9 นิ้ว
 - 1.2 กะละมังสำหรับผสม
 - 1.3 จานรองกระถาง
 - 1.4 ช้อนปลูก
 - 1.5 บัวรดน้ำ
 - 1.6 วัสดุเพาะชำ (กาบมะพร้าว, ดิน และปุ๋ยคอก)
2. อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างดิน และ พืช
 - 2.1 ขวดยาจิดขนาด 4 ml
 - 2.2 ขวดยาจิดสีชา ขนาด 25 ml
 - 2.3 จุกยาง และ ฝาอะลูมิเนียม
 - 2.4 ถ้วยกระเบื้อง
 - 2.5 ถุงพลาสติกใส
 - 2.6 ท่ออะลูมิเนียม ขนาด 1 x 15 cm สำหรับเก็บตัวอย่างดิน
 - 2.7 ไม้เสียบลูกชิ้น
 - 2.8 ไม้บรรทัด
 - 2.9 อุปกรณ์สำหรับจดบันทึก
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์
 - 3.1 โกร่งบดยา
 - 3.2 เครื่องปั่นน้ำผลไม้
 - 3.3 ช้อนตักสาร
 - 3.4 ตะแกรงสำหรับร่อนดิน
 - 3.5 สำลี
 - 3.6 Aluminium foil

- 3.7 Beaker 50, 100 ml
- 3.8 Microsyringe 1 ml
- 3.9 Micropipet 1000, 50, 10 μ l
- 3.10 Volumetric flask 25, 100 m

4. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน และ พืช

- 4.1 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 4.2 Gas chromatograph Electron Capture Detector (GC-ECD) HP 6890
- 4.3 Headspace sampler HP 7694
- 4.4 Hot air oven
- 4.5 Hot plate
- 4.6 Incubator shaker

5. สารเคมีที่ใช้

- 5.1 Deionized water
- 5.2 Methanol
- 5.3 Conc. Sulfuric acid
- 5.4 Trichloroethylene

วิธีการ

1. การศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

รวบรวมค้นคว้าและตรวจสอบผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในงานวิจัย และ จัดหาเอกสารที่สามารถใช้ในการอ้างอิงในงานวิจัย

2. การเตรียมดินสำหรับทดลอง และ การวิเคราะห์

นำดินที่เก็บตัวอย่างจากสถานีพัฒนาที่ดินเขต 1 จังหวัดปทุมธานีซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง มาตากด้วยวิธีผึ่งลม (air dried) จากนั้นนำดินที่แห้งแล้วมาทุบและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 – 1.5 cm ใส่กระสอบเตรียมไว้เพื่อใช้สำหรับงานทดลอง โดยในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การ

คัดเลือกสายพันธุ์เหู้าแฝก และ การทดลองใช้เหู้าแฝกบำบัดสาร TCE ที่ปนเปื้อนในดินที่ผสมด้วย วัสดุปรับปรุงดิน

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ได้แก่ ชนิดของเนื้อดิน (soil texture) ความชื้นดิน (soil moisture) ความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter : OM) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน (organic carbon : OC) ค่าความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (carbon exchange capacity : CEC) และ ปริมาณสาร TCE ในดิน

3. การคัดเลือกสายพันธุ์เหู้าแฝก

3.1 การเตรียมดิน

นำดินไปตากด้วยวิธีผึ่งลมจนแห้ง และ นำไปทุบ ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 – 1.5 cm จากนั้นนำดินที่ร่อนแล้วมาใส่กระถางดินเผาขนาด 5 x 9 นิ้ว เตรียมไว้กระถางละ 5 kg โดยรองก้น กระถางด้วยหินรองกระถาง

3.2 การเตรียมเหู้าแฝก

ในการทดลองได้เลือกใช้กล้าเหู้าแฝก 4 สายพันธุ์ เป็นสายพันธุ์ในกลุ่มเหู้าแฝกหอม ทั้งหมด ได้แก่ สายพันธุ์สงขลา 3 สายพันธุ์ศรีลังกา สายพันธุ์กำแพงเพชร 2 และ สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี อายุของเหู้าแฝกเฉลี่ย 1 – 1.5 เดือน ได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักพัฒนาที่ดินอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

วิธีการเตรียมกล้าเหู้าแฝก ในเบื้องต้นจะนำกล้าเหู้าแฝกทั้ง 4 สายพันธุ์ที่มีอายุเฉลี่ย 1 – 1.5 เดือน มาเพาะชำในถุงชำ เพื่อเป็นการเร่งให้เกิดการพัฒนาของระบบรากประมาณ 3 สัปดาห์ จากนั้นจะทำการตัดใบให้มีความยาวเริ่มต้นเท่ากัน 15 cm ความยาวของรากเริ่มต้นมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 5 cm เพื่อให้ตัวอย่างพืชที่ใช้มีความสม่ำเสมอก่อนนำเหู้าแฝกทั้ง 4 สายพันธุ์ไปปลูกลงในกระถางดินที่ได้เตรียมไว้

3.3 การปลูกหญ้าแฝก

การปลูก จะปลูกหญ้าแฝกทั้ง 4 สายพันธุ์ในดินที่ได้เตรียมใส่กระถางไว้แล้ว ทำการปลูกในสภาพกลางแจ้ง และ ดูแลรดน้ำวันละ 1 ครั้ง หรือ เมื่อเห็นว่าดินแห้ง ไม่มีการไสปุ๋ยเพิ่มเติม หลังจากปลูก วางแผนการทดลองแบบ CRD จำนวน 3 ซ้ำ ทำการปลูกเป็นระยะเวลา 1 เดือน (ภาพที่ 12) สถานที่ทำการทดลอง คือ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 การปลูกหญ้าแฝกเพื่อคัดเลือกสายพันธุ์

3.4 การวัดผลการเจริญเติบโตของหญ้าแฝก

ในการคัดเลือกสายพันธุ์หญ้าแฝก จะทำการวัดผลการเจริญเติบโตเบื้องต้นในด้าน จำนวนใบต่อต้น ความยาวลำต้น ความยาวใบ ความกว้างใบ และจำนวนหน่อต่อกอ โดยจะคัดเลือก ให้เหลือ 2 สายพันธุ์ที่มีค่าการเจริญเติบโตดีที่สุด เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

4. การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสาร TCE ที่มีอยู่ในวัสดุปลูกและในพืช

วัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาคุณสมบัติในการ ดูดซับ เคลื่อนย้าย และ สะสมของสาร TCE โดยนำหญ้าแฝก 2 สายพันธุ์ที่คัดเลือกได้จากขั้นตอน

ข้างต้นมาปลูกในดินที่ผสมกับวัสดุปรับปรุงดิน ซึ่งการผสมดินปนเปื้อนด้วยวัสดุปรับปรุงดินทำให้ความเข้มข้นของสาร TCE ลดลง มีความเข้มข้นประมาณ 183 mg/kg จากการคำนวณ โดยวัสดุปลูกที่ใช้มีอัตราส่วน ดังนี้ กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก ปลูกเพื่อศึกษาเป็นระยะเวลา 1 เดือน และทำการตรวจวัดสาร TCE ที่เหลือในวัสดุปลูก และในส่วนราก ลำต้น และ ใบของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์

4.1 การเตรียมตัวอย่างพืชสำหรับวิเคราะห์

ใช้วิธีที่ปรับปรุงจาก Kaewta (2005) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

4.1.1 เก็บตัวอย่างหญ้าแฝกแต่ละกระถางใส่ถุงพลาสติก และมัดปากถุงไว้ในกระติกน้ำแข็ง นำหญ้าแฝกมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา จากนั้นใช้ผ้าซับน้ำให้แห้ง ทำการชั่งน้ำหนักต้นพืชด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

4.1.2 ทำการตัดแยกส่วนต่าง ๆ ของหญ้าแฝก ได้แก่ ตัวอย่างส่วนใบ ลำต้น และราก นำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 0.2 – 0.5 cm บดตัวอย่างด้วยโกร่งบดยา จากนั้นนำไปชั่งโดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

4.4.3 ชั่งตัวอย่าง 5 g ใส่ขวดขวดยาชนิดสีขาวขนาด 25 ml จากนั้นเติม 5 ml conc.sulfuric และ 15 ml deionized water ปิดทันทีด้วยจุกยางและฝาอะลูมิเนียม และเขย่าให้ตัวอย่างผสมกับสารละลายได้ดียิ่งขึ้น

4.1.4 ให้ความร้อนโดยใช้ hot plate ที่ 90°C เป็นเวลา 30 นาที และ นำไปเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเขย่าด้วย incubator shaker ที่ 25°C, 60 rpm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จ. ใช้ microsyringe ดูดตัวอย่างจากขวดขวดยา 1 ml ใส่ในขวดขวดยาขนาด 4 ml ซึ่งใช้สำหรับเครื่อง headspace sampler ทำการปิดทันทีด้วยจุกยางและฝาอะลูมิเนียม จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-ECD โดยวิเคราะห์จากส่วน headspace

4.2 การเตรียมตัวอย่างวัสดุปลูกสำหรับวิเคราะห์

ใช้วิธีที่ปรับปรุงจาก Kaewta (2005) ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.2.1 ใช้ท่ออะลูมิเนียมกดลงไปในกระถางเพื่อเก็บตัวอย่างวัสดุปลูก 4 จุด ต่อ
กระถาง

4.2.2 นำตัวอย่างวัสดุปลูก 5 g ใส่ขวดชาลิดีซิชาขนาด 25 ml จากนั้นเติม 5 ml methanol และ 15 ml deionized water ปิดทันทีด้วยจุกยางและฝาอะลูมิเนียม และเขย่าให้ตัวอย่างผสมกับสารละลายได้ดียิ่งขึ้นเป็นเวลา 1 นาที

4.2.3 นำตัวอย่างไปเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเขย่าด้วย incubator shaker ที่ 25°C, 60 rpm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.2.4 ใช้ microsyringe ดูดตัวอย่างจากขวดชาลิดี 1 ml ใส่ในขวดชาลิดีขนาด 4 ml ซึ่งใช้สำหรับเครื่อง headspace sampler ทำการปิดทันทีด้วยจุกยางและฝาอะลูมิเนียม จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-ECD โดยวิเคราะห์จากส่วน headspace

5. การวิเคราะห์ปริมาณสารไตรคลอโรเอทิลีนจากตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์ปริมาณสาร TCE จะใช้เครื่อง GC-ECD HP 6890 ซึ่งสภาวะที่ใช้ปรับปรุงมาจาก Kaewta (2005) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Detector	:	Electron Capture Detector
Column	:	Capillary (HP-5) 30 cm x ID0.32 mm x film thickness 0.25 μ m
Inlet temperature	:	210°C
Oven temperature	:	90°C
Total retention time	:	10 min
Carrier gas flow	:	1.50 ml/min
Velocity	:	34 cm/sec

6. การคำนวณค่า translocation factor ของสารไทรคลอโรเอทิลีน

ค่า translocation factor (TF) เป็นค่าที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของสารจากดินหรือวัสดุปลูกสู่พืช หรือ ใช้แสดงการเคลื่อนที่ของสารจากส่วนต่าง ๆ ภายในต้นพืช เช่น จากรากสู่ลำต้น เป็นต้น ในกระบวนการพืชบำบัด (phytoremediation) ค่า TF ใช้เพื่อทดสอบความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายสารมลพิษที่เข้ามาสะสมยังส่วนเหนือดิน และ ใช้ในการพิจารณาเพื่อเลือกชนิดของพืชที่เหมาะสมต่อกระบวนการ ในกรณีที่ค่า TF มากกว่า 1 แสดงว่าพืชชนิดนั้นมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารจากรากขึ้นมาสู่ลำต้นได้ดี แต่หากในกรณีที่ TF น้อยกว่า 1 แสดงว่าพืชสามารถเคลื่อนย้ายสารมลพิษเข้าไปสะสมในส่วนเหนือดินได้ในปริมาณน้อยกว่าที่สะสมอยู่บริเวณราก (Bulayan and Thomas, 2009) สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า TF ได้แก่

- 6.1 ค่า TF จากดินสู่ลำต้น (translocation factor from soil to shoot) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$TF = C_{Sh}/C_S$$

- 6.2 ค่า TF จากรากสู่ลำต้น (translocation factor from root to shoot) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$TF = C_{Sh}/C_R$$

- 6.3 ค่า TF จากดินสู่ราก (translocation factor from soil to root) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$TF = C_R/C_S$$

โดย TF = translocation factor

C_S = ความเข้มข้นของสารในดิน (mg/kg)

C_{Sh} = ความเข้มข้นของสารที่บริเวณลำต้น (mg/kg)

C_R = ความเข้มข้นของสารที่บริเวณราก (mg/kg)

7. การคำนวณค่า % removal ของสารไตรคลอโรเอทิลีน

การคำนวณหา % removal ของสาร TCE จะใช้สมการในการคำนวณ คือ

$$\% \text{ removal} = \frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นหลังสิ้นสุดการทดลอง})}{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น})} \times 100$$

8. สถานที่ทำการวิจัย

สถานที่ทำการทดลอง คือ บริเวณบ่อน้ำบาดน้ำเสีย ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ส่วนสถานที่หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง คือ อาคารปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ชั้น 8 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กลุ่มงานวิจัย เคมีดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร และ ห้องปฏิบัติการกลางสำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข

9. ระยะเวลาในการทำวิจัย

ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2551 ถึง เดือนตุลาคม 2553

ผลและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ดินที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นดินที่ได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักพัฒนาที่ดินเขต 1 จังหวัดปทุมธานี คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินแสดงในตารางที่ 5 ดินมีลักษณะเป็นดินเหนียว มี %clay เท่ากับ 55.60% มีความเป็นกรดสูง (pH 3.8) และ ความชื้นหลังจากตากดินด้วยวิธีผึ่งลม (air dried) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.29% ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (OM) 2.11% ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (OC) 1.22% และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) 22.37 mol/kg นอกจากนี้ปริมาณสาร TCE ที่พบในดินมีค่า 549 mg/kg จึงจัดได้ว่าดินชนิดนี้มีการปนเปื้อนสาร TCE ระดับที่สูง เนื่องจากเป็นดินในพื้นที่ที่ใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีรายงานการปนเปื้อนของสาร TCE ในพื้นที่

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน	ค่าที่วัดได้
เนื้อดิน	clay (sand 19.09%, silt 25.67%, clay 55.60%)
ความเป็นกรดค่า	3.8
ความชื้น	5.29%
อินทรีย์วัตถุ	2.11%
อินทรีย์คาร์บอน	1.22%
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	22.37 mol/kg
ปริมาณ TCE	549 mg/kg

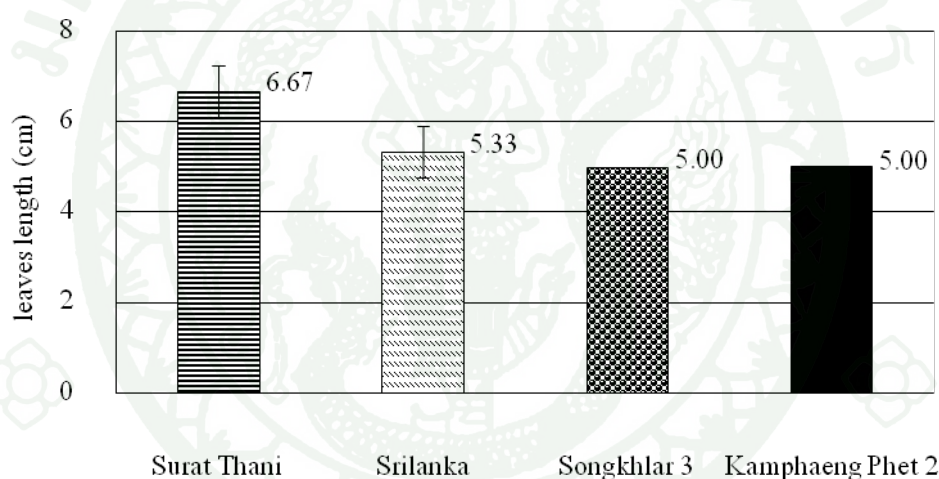
2. การคัดเลือกสายพันธุ์หญ้าแฝก

หญ้าแฝกที่นำมาทดลองนั้นมี 4 สายพันธุ์ซึ่งจัดเป็นกลุ่มหญ้าแฝกหอมทั้งหมด ได้แก่ สายพันธุ์สงขลา 3 สายพันธุ์ศรีลังกา สายพันธุ์กำแพงเพชร 2 และ สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี นำมาปลูกเพื่อทำการศึกษาความสามารถในการเจริญเติบโตในดินที่มีคุณสมบัติดังข้อ 1 และทำการคัดเลือกให้เหลือ 2 สายพันธุ์ที่มีค่าการเจริญเติบโตดีที่สุด โดยการคัดเลือกลักษณะการสุ่มตัวอย่างหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์ และ ทำการเปรียบเทียบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS จากการทดลอง

พบว่าหญ้าแฝกทั้ง 4 สายพันธุ์สามารถเจริญเติบโตได้และมีอัตราการอยู่รอด 100% ภายในระยะเวลา 1 เดือน และไม่พบอาการผิดปกติเนื่องจากสาร TCE ที่เกิดกับพืช ส่วนผลการเจริญเติบโตนั้นแตกต่างกันตามแต่ละชนิดพันธุ์ (ภาพที่ 13 - 15)

2.1 การวัดผลด้านจำนวนใบ

การนับจำนวนใบต่อดันพบว่าสายพันธุ์สุราษฎร์ธานีให้จำนวนใบต่อดันมากที่สุด 6.67 ± 0.58 ใบ แตกต่างจากสายพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนสายพันธุ์สงขลา 3 ศรีลังกา และกำแพงเพชร 2 มีจำนวนใบต่อดันใกล้เคียงกัน (5.00 ± 0.00 , 5.67 ± 0.58 และ 5.00 ± 0.00 ใบ ตามลำดับ) (ภาพที่ 13)



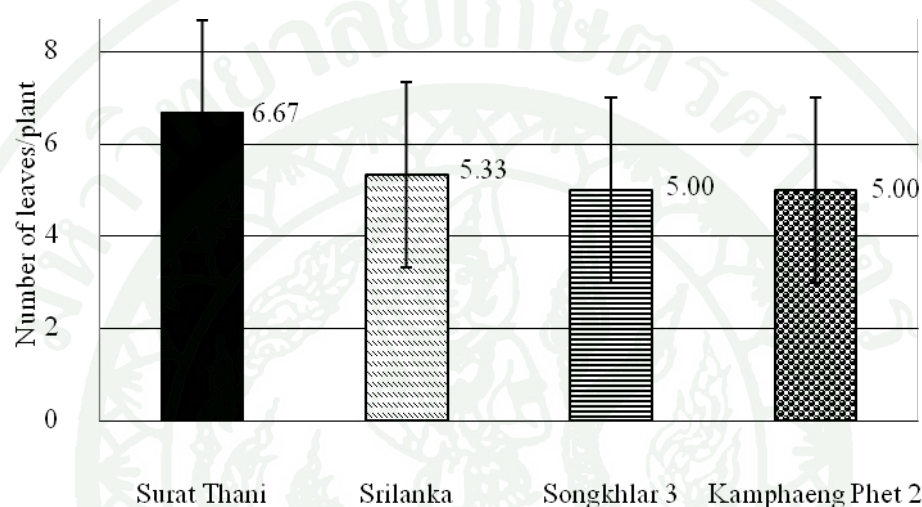
ภาพที่ 13 จำนวนใบต่อดันของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์

2.2 การวัดผลด้านความยาวลำต้น

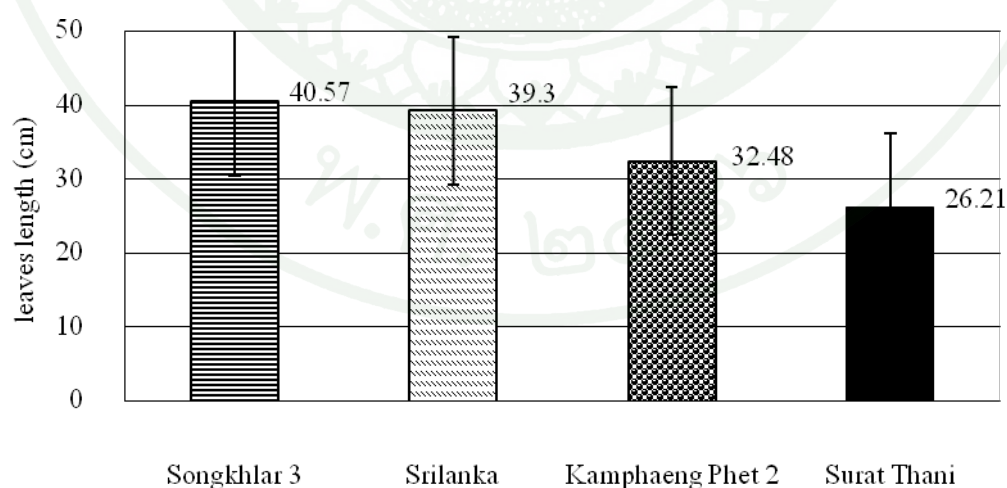
ในด้านความยาวลำต้นเฉลี่ย พบว่า สายพันธุ์ศรีลังกา ให้ความยาวลำต้นมากที่สุด รองลงมา คือ สงขลา 3 (6.67 ± 0.29 และ 5.33 ± 0.76 cm ตามลำดับ) ส่วนสายพันธุ์สุราษฎร์ธานี และกำแพงเพชร 2 ให้ความยาวลำต้นใกล้เคียงกัน (5.07 ± 1.21 และ 4.90 ± 0.96 cm ตามลำดับ) (ภาพที่ 14)

2.3 การวัดผลในด้านความยาวใบ

ผลของความยาวใบเฉลี่ยต่อต้นนั้นคล้ายกับผลของความยาวลำต้น พบว่าสายพันธุ์สงขลา 3 และ สายพันธุ์ศรีลังกาจะให้ความยาวใบมากกว่าสายพันธุ์กำแพงเพชร 2 และ สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี (40.57 ± 1.39 , 39.30 ± 5.88 , 32.48 ± 2.67 และ 26.21 ± 4.64 cm ตามลำดับ) (ภาพที่ 15)



ภาพที่ 14 ความยาวลำต้นของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์



ภาพที่ 15 ความยาวใบของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์

2.4 การวัดผลด้านจำนวนหน่อตอก

ด้านจำนวนหน่อตอกเฉลี่ยพบว่าทั้ง 4 สายพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยสายพันธุ์สงขลา 3 ศรีลังกา กำแพงเพชร 2 และ สุราษฎร์ธานี มีจำนวนหน่อตอก 2.67 ± 1.53 , 2.00 ± 1.00 , 4.00 ± 1.00 และ 2.67 ± 0.58 cm ตามลำดับ (ตารางที่ 6)

2.5 การวัดผลในด้านความกว้างใบ

ด้านความกว้างของใบเฉลี่ยพบว่าทั้ง 4 สายพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยสายพันธุ์สงขลา 3 ศรีลังกา กำแพงเพชร 2 และ สุราษฎร์ธานี มีความกว้างใบ 0.77 ± 0.05 , 0.74 ± 0.09 , 0.76 ± 0.09 และ 0.77 ± 0.02 cm ตามลำดับ (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 ผลการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกแต่ละสายพันธุ์

สายพันธุ์	จำนวนใบ ต่อต้น	ความยาว ลำต้น (cm)	ความยาวใบ (cm)	จำนวนหน่อ ตอก	ความกว้างใบ (cm)
K 2 ^{1/}	5.00 ± 0.00^b	4.90 ± 0.96^b	32.48 ± 2.67^{bc}	4.00 ± 1.00^a	0.76 ± 0.09^a
Si ^{2/}	5.33 ± 0.58^b	6.67 ± 0.29^a	39.30 ± 5.88^{ab}	2.00 ± 1.00^a	0.74 ± 0.09^a
So 3 ^{3/}	5.00 ± 0.00^b	5.33 ± 0.76^{ab}	40.57 ± 1.39^a	2.67 ± 1.53^a	0.77 ± 0.05^a
Su ^{4/}	6.67 ± 0.58^a	5.07 ± 1.21^{ab}	26.21 ± 4.64^c	2.67 ± 0.58^a	0.77 ± 0.02^a

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

^{1/}หญ้าแฝกสายพันธุ์กำแพงเพชร 2

^{2/}หญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา

^{3/}หญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3

^{4/}หญ้าแฝกสายพันธุ์สุราษฎร์ธานี

ผลที่ได้จากการทดลองทำให้สามารถคัดเลือกหญ้าแฝกการคัดเลือกสายพันธุ์หญ้าแฝกโดยเน้นผลการเจริญเติบโตในด้านจำนวนใบ ความยาวลำต้น และความยาวใบเป็นหลัก ดังนั้น จึงได้เลือกหญ้าแฝก สายพันธุ์สงขลา 3 และ สายพันธุ์ศรีลังกา เพื่อใช้ในขั้นตอนการทดลองต่อไป และเนื่องจากดินที่ใช้เป็นดินเหนียว จัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียด (fine-textured soil) ลักษณะของเนื้อดิน

คือ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคดินขนาดเล็กแต่มีปริมาณมาก การแทรกซึมของน้ำจึงมีค่าต่ำ การแทรกซึมน้ำเกิดขึ้นได้ช้าจึงมีปัญหาปัญหาการขาดอากาศของรากพืช เนื่องจากการระบายน้ำที่ไม่ดี (จันทร์จรัส และวิสุทธิ, 2551) ซึ่งดินที่นำมาทดลองมีลักษณะตรงตามที่ได้กล่าวไว้ ผลการปลูก 1 เดือนแสดงให้เห็นว่า หลุมแฝกเจริญเติบโตและหยั่งรากได้ช้า นอกจากนี้ที่บริเวณรากเริ่มมีอาการเน่าเนื่องจากการขาดอากาศ อย่างไรก็ตามหลุมแฝก 2 สายพันธุ์ที่คัดเลือกได้นั้นถือว่ามีความทนต่อสภาพดินที่ไม่เหมาะสมพอสมควร สอดคล้องกับงานวิจัยของสุเมธ และปรีชา (2542) ที่ศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของราก และ ผลผลิตของหลุมแฝกบนกลุ่มดินที่ 35 ชุดดินมาบอน (Mb) ซึ่งเป็นดินพื้นที่ลาดเชิงเนินมีน้ำแช่ขังในช่วงระยะเวลาหนึ่ง พบว่าหลุมแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 สามารถเจริญเติบโต มีการแตกกอและมีการแพร่กระจายได้ดีกว่าสายพันธุ์อื่นในเวลา 6 เดือน การแก้ปัญหาสำหรับดิน

สิ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับการเลือกใช้วิธีพืชบำบัด คือ พืชต้องสามารถทนความเป็นพิษของสารมลพิษที่ปนเปื้อนได้ มีรายงานว่าสาร TCE ปริมาณมากเกินไปจะชักนำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ ในรายงานของ Chappell (1998) พบว่าสาร TCE ที่ปนเปื้อนในน้ำ ความเข้มข้น 500 ppm สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อต้น poplar ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ ในการทดลองที่ 1 ที่ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของสาร TCE เท่ากับ 549 mg/kg และการทดลองที่ 2 มีระดับความเข้มข้นของสาร TCE เฉลี่ยเท่ากับ 183 mg/kg พบว่าหลุมแฝกที่ใช้ทดลองไม่พบอาการผิดปกติเนื่องจากความเป็นพิษของสาร TCE

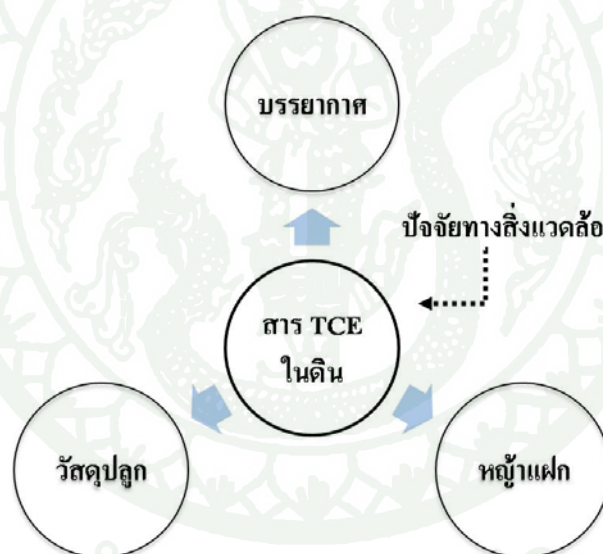
อย่างไรก็ตามการปลูกในกระถางเป็นระยะเวลา 1 เดือนนั้น ยังให้ความแตกต่างในการเจริญเติบโตของพืชไม่ชัดเจนนัก

3. การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสาร TCE ที่มีอยู่ในวัสดุปลูก และ ในพืช

การทดลองที่ 2 ได้นำดินไปผสมด้วยวัสดุปรับปรุงดิน ทำให้ลักษณะทางกายภาพ และ ทางเคมีของวัสดุปลูกเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังส่งผลให้ความเข้มข้นของสาร TCE เริ่มต้นลดลง การปลูกหลุมแฝกในวัสดุปลูกสามารถพิสูจน์ได้ว่าส่วนหนึ่งของสาร TCE สามารถเคลื่อนย้ายเข้าไปสะสมในหลุมแฝก สะสมในวัสดุปลูก และ ระบายสู่บรรยากาศ (Kaewta, 2005) (ภาพที่ 16)

ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสาร TCE เช่น ค่าการละลาย ความสามารถในการละลายได้ในสารอินทรีย์ที่สูง และ ความสามารถในการระเหยที่สูง ทำให้สาร TCE เมื่อปนเปื้อน

สู่สิ่งแวดล้อม จะสามารถละลายน้ำได้น้อย บางส่วนระเหยสู่บรรยากาศ (Cho *et al.*, 2008) และ บางส่วนสามารถยึดติดกับอนุภาคดินเหนียวในดินได้ (Yang-hsin, 2007; Zang *et al.*, 2011) ส่วนใน วัสดุปลูกที่ปรับปรุงด้วยวัสดุอินทรีย์ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และ ปริมาณสารอินทรีย์ คาร์บอนที่มีผลต่อการดูดซับสาร TCE เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบอาจ สามารถย่อยสลายสาร TCE ได้ทำให้ปริมาณสาร TCE ที่หลงเหลือในวัสดุปลูกมีค่าลดลง เนื่องจก ในการทดลองเป็นการปลูกในกระถาง สภาพกลางแจ้ง จึงมีปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ แสง อุณหภูมิ ความชื้น ที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนย้ายของสาร TCE ในระบบได้ สาร TCE สามารถเกิดกระบวนการย่อยสลายโดยแสง (photodegradation) ได้ ส่วนอุณหภูมิมีนั้นีมีผลต่อการ ระเหยของสาร TCE เนื่องจากการทดลองเป็นการปลูกกลางแจ้งและอุณหภูมิเฉลี่ยในระหว่างการ ทดลอง คือ 28°C ซึ่งเมื่อเทียบกับค่า Henry's Law Constant ที่ 25°C พบว่าสารนี้สามารถระเหยได้สูง (อ้างใน Kaewta, 2005) อุณหภูมิยังส่งผลต่อการระเหยของสารผ่านทางปากใบพืชด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 16 โคอะแกรมการเคลื่อนที่ของสาร TCE

คุณสมบัติในการละลายของสาร TCE ในน้ำ สามารถนำมาพิจารณาถึงพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของสาร TCE ในระบบ โดยคุณสมบัติการละลายจะแปรผกผันกับคุณสมบัติในการดูดซับ ความเป็นขั้วของสารมีบทบาทในการเคลื่อนย้ายของสาร สารที่มีความเป็นขั้วมากจะละลายน้ำได้ดี ในตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูง หรือ ละลายน้ำได้มาก แต่ดูดซับกับดินได้น้อย เนื่องจากสาร TCE มี ค่าการละลายน้ำเพียง 1.07 g/l ที่อุณหภูมิ 20°C ทำให้สารนี้ละลายน้ำได้น้อย แต่สามารถละลายได้ดี ในตัวทำละลายอินทรีย์ ค่าการละลายได้ในสารอินทรีย์ (octanol water partition coefficient: K_{ow})

เป็นค่าที่สามารถบอกความชอบหรือไม่ชอบน้ำ ซึ่งหากมลสารไม่ชอบน้ำจะละลายน้ำได้น้อย แต่จะดูดซับกับส่วนของของแข็งหรือดินได้ดี สาร TCE มีค่า $\log K_{ow}$ เท่ากับ 2.42 (World Health Organization, 1985) ดังนั้นจึงสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ และดูดซับกับสารอินทรีย์ในดินได้ดีเช่นกัน (แสงโสม, 2554) ดังนั้นสารชนิดนี้ เมื่อมีการปนเปื้อนในธรรมชาติ บางส่วนอาจเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดิน ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งสามารถยึดเกาะกับอนุภาคดิน โดยเฉพาะดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ของอินทรีย์วัตถุสูง การสร้างพันธะยึดติดกันระหว่างสาร TCE และอินทรีย์วัตถุนั้นทำให้การบำบัดออกจากพื้นที่ยากขึ้น

นอกจากนี้แล้วความสามารถในการละลายของสาร TCE ยังขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายในระบบ เนื่องจากสารบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม เช่น สารจำพวกกรดอินทรีย์ (organic acid) มีแนวโน้มที่จะดูดซับได้ดีในสถานะที่เป็นกรด ส่วนสารประกอบพวกอะมิโน (amino compounds) จะดูดซับได้ดีขึ้นในสถานะที่เป็นด่าง เป็นต้น ในที่นี้มีรายงานว่าสาร TCE สามารถละลายได้ดีในสถานะที่เป็นกรด เมื่อนำมาพิจารณาค่า pH ในดินที่ใช้ทดลอง คือ pH3.8 คาดว่าในสถานะเช่นนี้ สาร TCE จึงสามารถละลายน้ำได้ดี ผลของ pH นอกจากจะส่งผลต่อการละลายของสาร TCE แล้วยังส่งผลต่อพืชอีกด้วย พบว่าดินที่มีค่า pH สูงหรือต่ำเกินไปนั้นอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชบางชนิดได้ แต่ในการทดลองไม่พบอาการผิดปกติ หรือ อาการเป็นพิษ สอดคล้องกับที่กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547) ได้รายงานถึงสภาพความเป็นกรดที่หญ้าแฝกสามารถทนได้ คือ pH3.3

อ้างอิงใน Kaewta (2005) กล่าวว่า สาร TCE สามารถระเหยได้สูงถึง 98% ในระหว่างทำการทดลอง ภายในระยะเวลาเพียง 7 สัปดาห์ เนื่องจากเป็นสารประกอบประเภท semi-volatile organic compound และมีค่า vapor pressure ที่ 25°C เท่ากับ 69 mmHg ดังนั้นจึงสามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ง่าย สอดคล้องกับการทดลองของ Schnabel *et al.* (1996) ที่กล่าวว่า 74 – 94% ของสาร TCE จะระเหยอยู่ในบรรยากาศ ซึ่งทั้งสองการทดลองนั้นใช้ทรายเป็นตัวกลางเพื่อศึกษาการดูดซับสาร TCE แตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ใช้ดินเหนียวผสมกับวัสดุปลูกอินทรีย์ สาร TCE ที่ระเหยสู่บรรยากาศสามารถย่อยสลายต่อได้ผ่านกระบวนการ photolysis โดย photochemically hydroxyl radicals ในบรรยากาศ ซึ่งค่าครึ่งชีวิตของปฏิกิริยานี้ ที่อุณหภูมิ 25°C ใช้เวลาเพียง 7 – 11 วัน สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ ได้แก่ chloroacetaldehyde, formaldehyde และ formyl chloride เป็นต้น

3.1 การสะสมของสาร TCE ในวัสดุปลูก

การนำกาบมะพร้าวสับและปุ๋ยคอกมาผสมคลุกเคล้ากับดินเพื่อลดปัญหาการระบายนํ้าของดิน เนื่องจากวัสดุอินทรีย์ที่ใส่เพิ่มลงไปนั้นทำให้ลักษณะของดินปลูกเปลี่ยนแปลงไป กาบมะพร้าวสับช่วยให้ดินมีความพรุนมากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการระบายนํ้า ส่วนปุ๋ยคอกมีส่วนทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลต่อการดูดซับของสาร TCE ในระบบปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และ อินทรีย์วัตถุ ในดิน กาบมะพร้าวสับ ปุ๋ยคอก และวัสดุปลูก แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และ อินทรีย์วัตถุ ในดิน กาบมะพร้าวสับ ปุ๋ยคอก และวัสดุปลูก

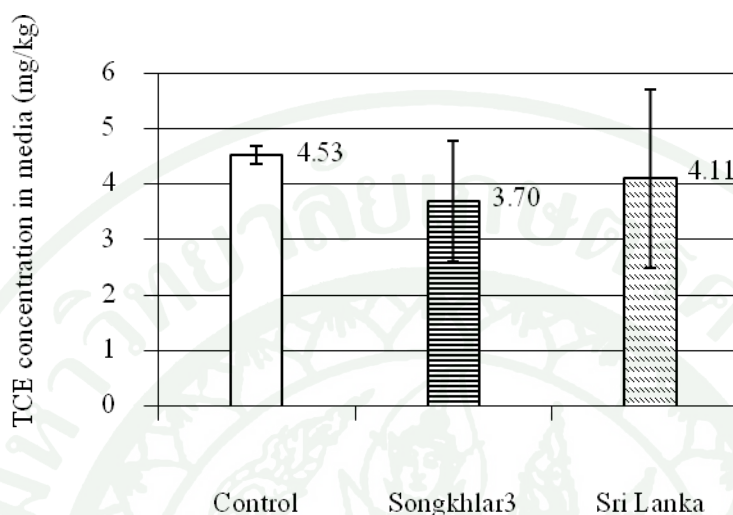
พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้ (%)			
	ดิน	กาบมะพร้าวสับ	ปุ๋ยคอก	วัสดุปลูก ^{1/}
OM	2.11%	80.15%	21.34%	12.00%
OC	1.22%	46.49%	12.38%	6.96%

หมายเหตุ ^{1/}วัสดุปลูก มีส่วนประกอบคือ กาบมะพร้าวสับ ดิน และ ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1

ผลจากการผสมวัสดุปลูกกับดินทำให้ดินมีความเข้มข้นของสาร TCE ลดลงเนื่องจากในวัสดุปลูกมีส่วนผสมอื่น ๆ เข้ามาปนด้วย ความเข้มข้นของ TCE ก่อนปลูกหญ้าแฝกในวัสดุปลูกมีค่าจากการคำนวณ เท่ากับ 183 mg/kg

หลังจากการปลูกหญ้าแฝก 2 สายพันธุ์ ทำให้สาร TCE ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (28 mg/kg) โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกแล้ว พบว่า ในชุดควบคุมมีสาร TCE หลงเหลือในวัสดุปลูก 4.53 ± 0.16 mg/kg คิดเป็น 2.49% ซึ่งมากกว่าในชุดการทดลองที่ปลูกหญ้าแฝก โดยการปลูกหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา และ สงขลา 3 ทำให้มีปริมาณ TCE หลงเหลือในวัสดุปลูก 3.70 ± 1.08 และ 4.11 ± 1.61 mg/kg ตามลำดับ คิดเป็น 2.02 และ 2.25% (ภาพที่ 17) แต่ ทั้งนี้ชุดการทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกและชุดควบคุม มีปริมาณสาร TCE หลงเหลืออยู่ในวัสดุปลูกใกล้เคียงกัน อาจเป็นเพราะว่าสาร TCE สามารถระเหย (Kaewta, 2005) หรือ เกิดกิจกรรมการย่อยสลายโดย

จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในวัสดุปลูก (ปัญญา และคณะ, 2010) รวมทั้งเกิดกระบวนการย่อยสลายเปลี่ยนรูป โดยพืช (Bankston *et al.*, 2002) เป็นต้น



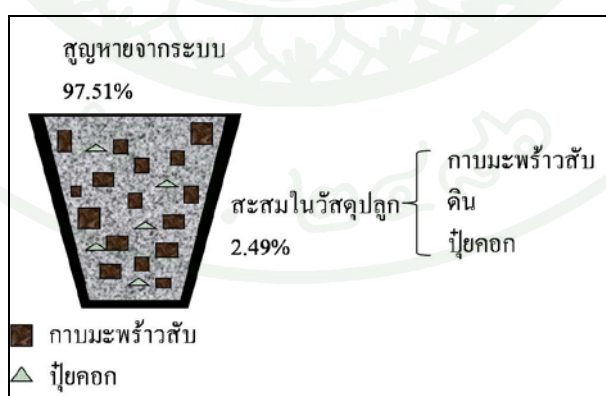
ภาพที่ 17 ความเข้มข้นของสาร TCE ในวัสดุปลูกหลังจากปลูกหญ้าแฝก 1 เดือน

Fan and Scow (1993) รายงานว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับมีหลายปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) จากการทดลองที่ 2 ดินมีค่า OM 12.0% ใกล้เคียงกับดินในการทดลองของ Fan and Scow (1993) ซึ่งดินดังกล่าวสามารถดูดซับสาร TCE ได้ และสะสมสาร TCE ในดิน 71% ระเหยสู่บรรยากาศเพียง 24% แตกต่างจากผลการทดลองที่พบว่าการสะสมในส่วนของดิน น้อยมาก De wild *et al.* (2008) กล่าวว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (OC) มีส่วนสำคัญก่อให้เกิดการดูดซับระหว่างสารอินทรีย์กับวัสดุอินทรีย์ วัสดุปลูกที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ประกอบด้วยกามมะพร้าวสับ 3 ส่วน ดิน 2 ส่วน และ ปุ๋ยคอก 1 ส่วน ดังนั้นวัสดุปลูก 5 kg จึงประกอบด้วย กามมะพร้าวสับ 2.5 kg ดิน 0.83 kg และ ปุ๋ยคอก 1.67 kg ค่า OC ของกามมะพร้าว และ ปุ๋ยคอกแสดงดังตารางที่ 7 ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่า ปริมาณ OC สูง จะส่งผลเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ วัสดุปลูกมีค่า OC 1.22% ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก ทำให้สาร TCE ถูกดูดซับได้น้อย ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะระเหยสู่บรรยากาศได้ค่อนข้างมาก

นอกจากนี้แล้วยังมีปัจจัยเรื่องเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจส่งผลต่อการย่อยสลาย หรือ สูญหายของสาร TCE ในระบบ เนื่องจากในวัสดุปลูกที่ใช้ในชุดควบคุม และ ชุดทดลองที่ปลูกหญ้าแฝก ไม่ได้มีการอบเพื่อทำลายกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงสามารถเกิดกิจกรรมการย่อยสลายของ

เชื้อจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง Anderson and Walton (1995) กล่าวว่า กระบวนการย่อยสลายทางชีวเคมีของสาร TCE ส่วนมากจะเกิดที่บริเวณรากพืชซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมาก ได้แก่ สุน และ พืชตระกูลถั่ว เป็นต้น เชื้อจุลินทรีย์จะย่อยสลายสาร TCE ผ่านกระบวนการ mineralization โดยแบคทีเรียหลายชนิดสามารถย่อยสลายสาร TCE ในดิน ได้ เช่น แบคทีเรียกลุ่มที่ย่อยสลายมีเทน (methanogenic bacteria) (Fan and Scow, 1993; Shukla *et al.*, 2009) อ้างใน Kaewta (2005) กล่าวว่า แบคทีเรียกลุ่มที่ย่อยสลายมีเทนสามารถย่อยสลายสาร TCE ได้ประมาณ 40% ที่อุณหภูมิ 35°C ภายในระยะเวลา 8 สัปดาห์ และกิจกรรมการย่อยสลายสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะที่มีอากาศ และ ไร้อากาศ สาร TCE ที่ถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายแล้วจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบหลายชนิด ได้แก่ dichloroethane, vinyl chloride และ ethene เป็นต้น Shukla *et al.*, 2009) ทำการทดลองพบว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อมีความเข้มข้นของสาร TCE มากกว่า 300 ppm แต่สามารถเจริญเติบโตได้ดี และสามารถย่อยสลายสาร TCE ได้ โดยมีอัตราการย่อยสลาย 0.19 ppm/h เมื่อมีความเข้มข้นของสาร TCE 100 ppm

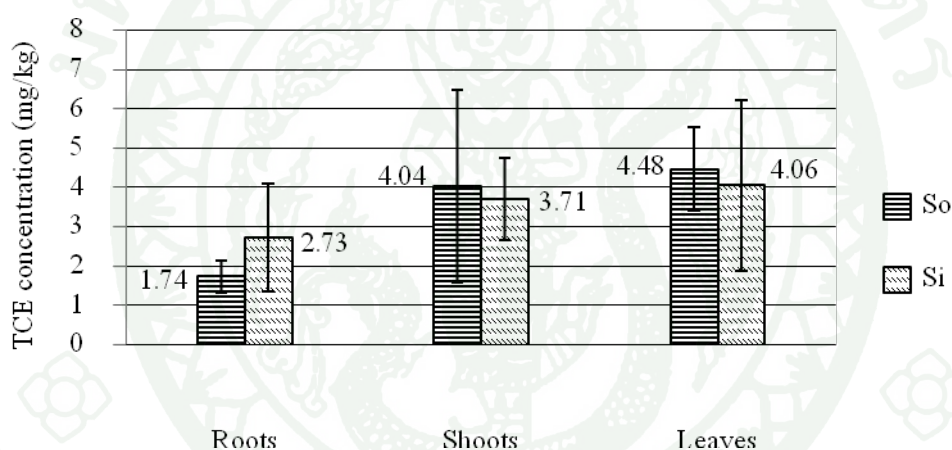
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสาร TCE หลงเหลืออยู่ในวัสดุปลูกน้อยมาก อาจเป็นเพราะส่วนหนึ่งได้ผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ เกิดเป็นสารประกอบชนิดอื่น ซึ่งไม่ได้ทำการตรวจวัดในที่นี้ ทำให้เมื่อวิเคราะห์แล้วพบสาร TCE หลงเหลือในวัสดุปลูกน้อยมาก และ มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่สะสมในส่วนของพืช ในชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกหญ้าแฝก สาร TCE จะสูญหายจากระบบประมาณ 97.51% ซึ่งในส่วนที่สูญหายนี้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในวัสดุปลูก (ภาพที่ 18)



ภาพที่ 18 ปริมาณสาร TCE ในระบบของชุดควบคุม

3.2 การสะสมของการ TCE ในพืช

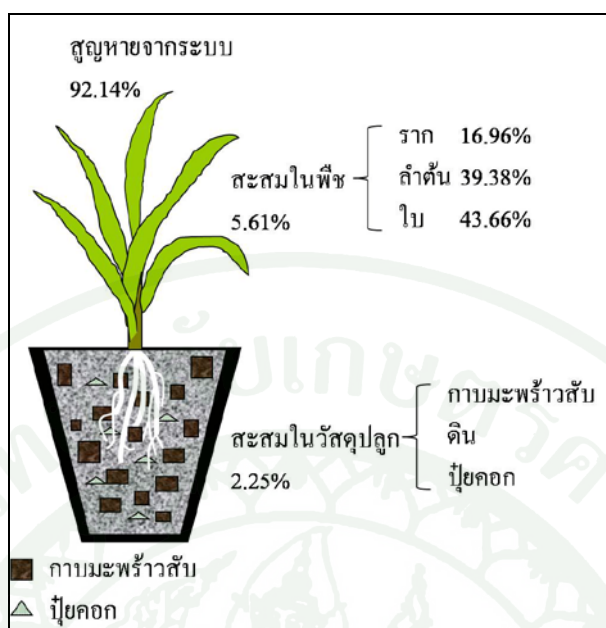
ภายหลังการทดลองปลูกเป็นเวลา 1 เดือน พบว่า กล้าหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 และ ศรีลังกา มีการสะสม TCE ที่ส่วนของใบมากที่สุด รองลงมาคือส่วนลำต้น และ ราก ตามลำดับ (ภาพที่ 19) โดยสายพันธุ์สงขลา 3 และ ศรีลังกา มีการสะสม TCE ในส่วนราก 2.73 ± 1.36 และ 1.74 ± 0.42 mg/kg สะสมในส่วนลำต้น 3.71 ± 1.04 และ 4.04 ± 2.44 mg/kg และสะสมในส่วนใบ 4.06 ± 2.18 และ 4.48 ± 1.07 mg/kg ตามลำดับ แต่ทั้งนี้หญ้าแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์สะสมสาร TCE ในส่วนของพืชมีปริมาณใกล้เคียงกัน สายพันธุ์สงขลา 3 สะสมสาร TCE เฉลี่ยประมาณ 10.26 mg/kg ต่อต้น คิดเป็น 5.61% ของสาร TCE ทั้งหมด (ภาพที่ 20) ส่วนสายพันธุ์ศรีลังกาสะสมสาร TCE เฉลี่ยประมาณ 10.5 mg/kg ต่อต้น คิดเป็น 5.74% ของสาร TCE ทั้งหมด (ภาพที่ 21)



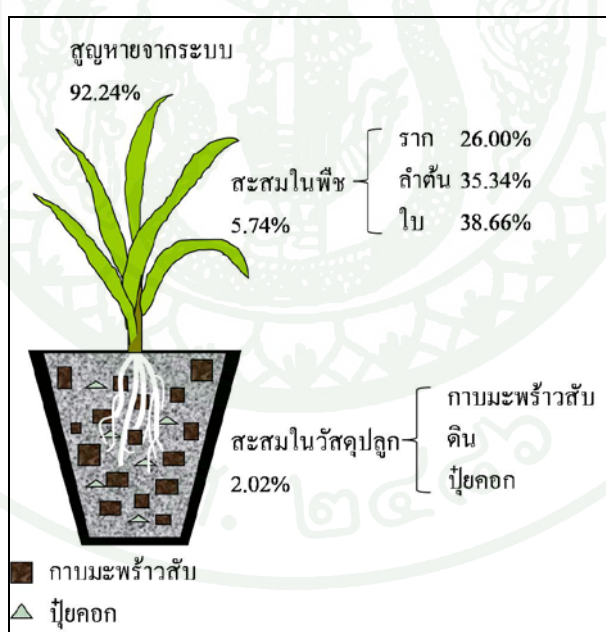
ภาพที่ 19 ความเข้มข้นของสาร TCE ที่พบในส่วนต่าง ๆ ของพืช หลังจากปลูกในวัสดุปลูก 1 เดือน

หมายเหตุ So คือ หญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3

Si คือ หญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา



ภาพที่ 20 ปริมาณสาร TCE ในระบบของชุดทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3



ภาพที่ 21 ปริมาณสาร TCE ในระบบของชุดทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา

สาร TCE ที่ตรวจพบในพืชเป็นส่วนใหญ่ถูกดูดซับ และยังไม่ผ่านการย่อยสลายจากเอนไซม์ในพืช กิจกรรมการย่อยสลายของสาร TCE ที่เกิดขึ้นในพืชนั้นได้ถูกพิสูจน์จากการทดลองของ Bankston *et al.* (2002) ซึ่งได้ทำการติดตามอะตอมของคาร์บอนของสาร TCE ด้วย ^{14}C และ

ใช้ต้นกกธูปฤๅษีซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นเดียวกับหญ้าแฝกในการดูดซับสาร TCE จากระบบ พบว่า พืช และ เอนไซม์ในพืชมีส่วนช่วยในการเคลื่อนย้าย สะสม และย่อยสลายสาร TCE ให้อยู่ในรูป สารประกอบชนิดต่าง ๆ โดยสามารถตรวจพบสารประกอบที่มี ^{14}C เป็นองค์ประกอบได้ในส่วนของ พืช ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ จากการทดลองพบว่าหญ้าแฝกสะสมสาร TCE ปริมาณมากที่สุดที่ใบ รองลงมาคือ ลำต้น และราก ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Bankston *et al.* (2002) เนื่องจากงานวิจัยนี้ตรวจวัดเฉพาะสาร TCE เท่านั้น และ ไม่ได้ศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นหลังจาก การย่อยสลายโดยพืช ทำให้สาร TCE ที่ตรวจวัดได้มีค่าน้อยมาก

การศึกษาระบวนการย่อยสลาย และ เปลี่ยนรูป ของสาร TCE ภายในพืช นิยมใช้ต้น poplar ในการศึกษา Chappell (1998) ได้ทดลองปลูกต้น poplar ในโรงเรือน พบว่า ต้น poplar เป็น ตัวกลางทำให้สาร TCE ระเหยสู่บรรยากาศ โดยผ่านกระบวนการ evapotranspiration นอกจากนี้ สาร TCE บางส่วนสามารถถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และ สร้างพันธะกับเนื้อเยื่อพืช ได้ จากการทดลองของ Shang *et al.* (2001) (ภาพที่ 5) แสดงให้เห็นว่าสาร TCE สามารถเกิดกิจกรรม การย่อยสลายในพืช และ เปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบชนิดต่าง ๆ ได้แก่ dichloroacetic acid, trichloroacetic acid และ trichloroethanol นอกจากนี้การศึกษาของ Bankston *et al.* (2002) ยังแสดงให้เห็นว่าในระบบ wetland สามารถพบสาร TCE และสารประกอบที่เกิดจากการย่อยสลายของ TCE ในพืชรวมกัน ในพืชประมาณ 38% โดยสารประกอบที่เกิดขึ้นนี้ พืชจะนำไปใช้ประโยชน์เป็น องค์ประกอบของเซลล์ เสริมสร้างเนื้อเยื่อพืช และ ใช้ในการเจริญเติบโต สารประกอบเหล่านี้ตรวจ พบมากที่สุดบริเวณ ใบด้านบนมากที่สุด รองลงมาคือใบด้านล่าง หัว และ รากของต้นกกธูปฤๅษี ตามลำดับ(ภาพผนวกที่ ง1) ซึ่งต่างจากการทดลองของ Schnabel *et al.* (1996) ที่ทดลองโดยใช้ต้น มะเขือเทศ ซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ แตกต่างจากหญ้าแฝก พบว่าสาร TCE และสารประกอบที่เกิดจาก การย่อยสลายของสาร TCE จะสะสมที่บริเวณรากมากที่สุด รองลงมาคือ ใบ และ ลำต้น ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการสะสมในพืชประมาณ 1 -2% และ ระเหยออกจากระบบ 74 – 95% (ภาพผนวกที่ ง2) ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองปลูกหญ้าแฝก จึงพบว่า หญ้าแฝกสามารถ สะสมสาร TCE ในส่วนของพืชได้มากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของ Schnabel *et al.* (1996) แต่ ทั้งนี้ลักษณะการสะสมของสารในส่วนของพืชจะแตกต่างกันตามแต่ละชนิดพืช และ คุณสมบัติของ สาร จากการทดลองของ Åslund *et al.* (2006) ที่ศึกษาการสะสมของสารที่มีคลอรีนเป็น องค์ประกอบในพืช โดยเลือกใช้สาร polychlorinated biphenyl (PCB) ซึ่งสารชนิดนี้สามารถย่อย สลายเป็นสาร TCE ได้ โดยการทดลองเลือกใช้พืช 3 ชนิด ได้แก่ ฟักทอง หญ้าแห้วหมู และ หญ้า เลี้ยงสัตว์ ทำการทดลองปลูกพืชทั้ง 3 ชนิดในดินที่ปนเปื้อนสาร PCB พบว่าสารดังกล่าวจะสะสมใน ส่วนของลำต้น และราก มากกว่าที่บริเวณใบ นอกจากนี้พืชทั้ง 3 ชนิด ให้ค่า shoot bioconcentration

factor (BCF_{shoot}) มากกว่า 0.29 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการสะสมของสาร PCB ของผักทองเฉพาะ ส่วนเหนือดิน พบว่าให้การสะสมที่ส่วนลำต้น และ ก้านใบ มากกว่าที่ใบ แตกต่างจากการทดลองที่ใช้หญ้าแฝกที่ให้การสะสมที่บริเวณใบมากกว่าลำต้น

เมื่อพิจารณาค่า translocation factor (TF) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสาร TCE จากรากสู่ลำต้นของหญ้าแฝก พบว่าทั้งสองสายพันธุ์มีค่า TF ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 8) หญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 และ สายพันธุ์ศรีลังกา ให้ค่า $TF_{R/S}$ 0.42 และ 0.74 ตามลำดับ แสดงว่าหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกาสามารถเคลื่อนย้ายสาร TCE จากวัสดุปลูกเข้าสู่รากได้ดีกว่าสายพันธุ์สงขลา 3 นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า $TF_{Sh/S}$ ของหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 และ สายพันธุ์ศรีลังกา มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.98 และ 1.00 ตามลำดับ แสดงว่าหญ้าแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถเคลื่อนย้ายสาร TCE จากวัสดุปลูกสู่ลำต้นได้ดี ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า $TF_{Sh/R}$ แล้ว พบว่าทั้งสองสายพันธุ์มีค่าดังกล่าวมากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถเคลื่อนย้ายสาร TCE ภายในส่วนของพืชจากรากสู่ลำต้นได้ดี หญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 และ สายพันธุ์สงขลา 3 ศรีลังกา ให้ค่า $TF_{Sh/R}$ เท่ากับ 2.23 และ 1.48 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Åslund *et al.* (2006) ที่ทดลองโดยใช้สาร PCE พบว่าการใช้หญ้าแฝกดูดซับสาร TCE ทำให้สาร TCE เคลื่อนที่เข้าสู่พืชได้ดีกว่า PCE เนื่องจากขนาดของโมเลกุลเล็กกว่า และมีความสามารถละลายได้ดีในไขมันมากกว่าจึงเคลื่อนที่ผ่านทางรากพืชเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชได้ดีกว่าสาร PCE และในขณะที่สาร TCE เคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อเยื่อพืชสารดังกล่าวก็สามารถเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวเคมีร่วมไปด้วย ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในรูปสารประกอบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น

ตารางที่ 8 ค่า translocation factor (TF) ของหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา และ สายพันธุ์สงขลา 3 ที่ปลูกในวัสดุปลูก

สายพันธุ์หญ้าแฝก	^{1/} $TF_{R/S}$	^{2/} $TF_{Sh/S}$	^{3/} $TF_{Sh/R}$
สงขลา 3	0.42	0.98	2.23
ศรีลังกา	0.74	1.00	1.48

หมายเหตุ ^{1/} $TF_{R/S}$ คือ ความสามารถในการเคลื่อนย้ายสาร TCE จากวัสดุปลูกสู่ราก

^{2/} $TF_{Sh/S}$ คือ ความสามารถในการเคลื่อนย้ายสาร TCE จากวัสดุปลูกสู่ลำต้น

^{3/} $TF_{Sh/R}$ คือ ความสามารถในการเคลื่อนย้ายสาร TCE จากรากสู่ลำต้น

ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นว่างานวิจัยนี้ตรวจวัดเฉพาะสาร TCE เท่านั้น ดังนั้นส่วนที่สูญหายจากระบบนั้นอาจจะอยู่ในรูป metabolites หรือ CO₂ และสูญหายไปในบรรยากาศ หรือ สะสมในพืช รวมถึงเกิดกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่งไม่ได้ตรวจวัดในงานวิจัยนี้ การที่มีพืชเข้ามาในระบบนั้น ทำให้สาร TCE ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอื่นที่มีอันตรายน้อยลง ดังนั้น จึงทำให้มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และ เนื่องจากการสะสมของสาร TCE มักจะสะสมที่ส่วนเหนือดิน ได้แก่ ใบ และ ลำต้น จึงทำให้ง่ายต่อการจัดการ โดยสามารถกำจัดสาร TCE จากดินที่ปนเปื้อนโดยการตัดส่วนเหนือดินออกไป และ ปล่อยให้หญ้าแฝกเจริญเติบโตในพื้นที่ที่ปนเปื้อนนั่นต่อไปและดูดสาร TCE ขึ้นมาเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดที่ได้เปรียบทางด้านค่าใช้จ่ายเป็นอย่างยิ่ง

อย่างไรก็ตามผลจากการทดลองนี้สามารถนำมาขยายผลเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณหาปริมาณสาร TCE ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ สาร TCE สามารถเคลื่อนย้ายจากดินเข้าสู่หญ้าแฝกไปเก็บสะสมไว้ในส่วนของพืช ทำให้พืชชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะใช้ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนด้วย TCE นอกจากนี้การสะสมของ TCE ในส่วนเหนือดิน เช่น ลำต้น และ ใบนับเป็นข้อดีประการหนึ่ง คือ ทำให้ง่ายต่อการจัดการ โดยสามารถตัดส่วนดังกล่าวของพืชออกไป และ ปล่อยให้พืชเจริญเติบโตในพื้นที่ที่ปนเปื้อนเพื่อบำบัดสารมลพิษต่อไป

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการทดลองเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่จังหวัดปทุมธานีมาวิเคราะห์ พบว่า ดินมีความเป็นกรดสูง (pH 3) มีค่า organic matter 2.11% organic carbon 1.22% CEC 22.37 mol/kg ลักษณะเป็นดินเหนียว มี clay 55.60% และ ความชื้นของดินที่ผ่านการตากให้แห้งด้วยวิธีผึ่งลม มีค่า 5.29% นอกจากนี้ยังมีปริมาณสาร TCE ปนเปื้อนในดินสูง 549 mg/kg

การนำหญ้าแฝก 4 สายพันธุ์ ไปทดลองปลูกในกระถางที่มีดินปนเปื้อนสาร TCE 549 µg/kg พบว่า ทั้ง 4 สายพันธุ์สามารถเจริญเติบโตได้ มีอัตราการรอด 100% และ จากการวัดผลด้านการเจริญเติบโต พบว่า สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีจำนวนใบมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยที่ 6.67 ± 0.58 ใบต่อดิน สายพันธุ์ที่มีความความยาวลำต้นมากที่สุด คือ ศรีลังกา รองลงมา คือ สงขลา 3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่ 6.67 ± 0.76 และ 5.33 ± 0.29 cm ตามลำดับ ซึ่งในด้านความยาวลำต้นจะคล้ายกับความยาวใบ คือ สงขลา 3 และ ศรีลังกาจะให้ความยาวใบมากที่สุด 40.57 ± 1.39 และ 39.30 ± 5.88 cm ส่วนในด้านจำนวนหน่อตอกอ และ ความกว้างใบ พบว่าทั้ง 4 สายพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การปลูกในวัสดุปลูกที่ประกอบด้วย กาบมะพร้าวสับ : ดินที่ปนเปื้อน TCE : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 พบว่า หญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 และ สายพันธุ์ศรีลังกาสามารถเคลื่อนย้ายสาร TCE เข้าไปอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ และ สะสมในส่วนของใบมากที่สุด รองลงมาคือ ลำต้น และ รากตามลำดับ

การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนย้าย สะสม และ ย่อยสลายของสาร TCE ในระบบ พบว่า ในชุดควบคุมสาร TCE จะหลงเหลือในวัสดุปลูก 2.49% และสูญหายจากระบบ 91.51% ส่วนในชุดทดลองที่มีการปลูกหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 มีสาร TCE หลงเหลือในวัสดุปลูก 2.02% สะสมในพืช 5.74% และสูญหายจากระบบ 92.14% ส่วนหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกามีประสิทธิภาพการสะสมสาร TCE ใกล้เคียงกับสายพันธุ์สงขลา 3 โดยพบว่าสาร TCE หลงเหลือในวัสดุปลูก 2.25% สะสมในพืช 5.61% และสูญหายจากระบบ 92.14%

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ตรวจวัดเฉพาะสาร TCE เท่านั้น ซึ่งอาจมีสาร TCE บางส่วนสูญหายจากระบบโดยผ่านกระบวนการระเหย หรือ เปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบชนิดอื่น โดยผ่านกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์และพืช

ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาใช้หญ้าแฝกเป็นพืช
ทางเลือกเพื่อบำบัดสาร TCE ที่ปนเปื้อนในพื้นที่ รวมถึงอาศัยประโยชน์ของหญ้าแฝกในการอนุรักษ์
และฟื้นฟูดินตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ร่วมด้วย



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2547. **สรุปผลการดำเนินงานการปลูกหญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำฟื้นฟูทรัพยากรดินและสภาพแวดล้อม**. ม.ป.ท.

กลุ่มงานวิจัยเคมีดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร. 2544. **คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช**. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, กรุงเทพฯ.

กลุ่มวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์หญ้าแฝกในการจัดการดิน สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2546. **คู่มือเจ้าหน้าที่รัฐ เรื่อง การใช้หญ้าแฝกเพื่อการพัฒนาที่ดิน**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

เกษมศรี ชับช้อน. 2541. **ปฐพีวิทยา**. ศูนย์ฝึกอบรมวิศวกรรมเกษตร บางขุน กองวิทยาลัยเกษตรกรรม กรมอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ, กรุงเทพฯ.

จันทร์จรัส วีรสาร และ วิสุทธิ วีรสาร. 2551. **สมบัติทางกายภาพของดินที่มีผลต่อการเกษตร**. แหล่งที่มา: <http://clgc.rdi.ku.ac.th/article/soils/physical/physical.htm>, 27 ธันวาคม 2551.

จันทน์ แจ่มแสงทอง. 2553. **การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี phytoremediation**. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104v.html>, 5 มกราคม 2553.

ปัญญา ไยถาวร, สุดา อิทธิสุภรณ์รัตน์ และ สุนันทา บุญประกอบ. 2010. **การย่อยสลายของสารไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) โดยแบคทีเรียที่พบในประเทศไทย**. แหล่งที่มา: http://www.ertc.deqp.go.th/ertc/index.php?option=com_content&task=view&id=1090&Itemid=74, 17 มีนาคม 2553.

ปัญญา เอี่ยมอ่อน และ สมโสภิต ดำเนินงาม. 2542. **การทดสอบสายพันธุ์และการจัดการดินเพื่อปลูกหญ้าแฝกในพื้นที่ดินพรุ**, น. 59 – 60. ใน รายงานผลการสัมมนา เรื่อง การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครั้งที่ 3. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

ปรีชา บุญสมบุญ. 2552. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินที่ระดับที่จุดเหี่ยวเฉาถาวร และความชื้นภาคสนามกับค่าเปอร์เซ็นต์ดินเหนียว และดัชนีเนื้อดิน. แหล่งที่มา: http://e-library.udd.go.th/library/Abstract/soiln_09_3.htm, 27 ธันวาคม 2552.

ผู้จัดการออนไลน์. 2005. อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์การลงทุนที่มาพร้อม "ปัญหาสิ่งแวดล้อม". แหล่งที่มา: <http://www.ftawatch.org/news/view.php?id=3921>, 10 ตุลาคม 2552.

พันธุ์ส สัมพันธ์พานิช. 2009. **Phytoremediation**. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (อัดสำเนา)

เพชร พลอยเจริญ. 2545. การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลต่าง ๆ บริเวณลุ่มน้ำวัง อำเภอกพาน จังหวัดเชียงราย. วารสารวิชาการป่าไม้ 1(4): 12-20.

ภาควิชาภูมิทัศน์และอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่. 2547. ความชื้นในดินและน้ำในดิน. แหล่งที่มา: http://coursewares.mju.ac.th/section2/la166/chapter/ch_8/index_ch_8.htm, 11 มกราคม 2552.

มนตรี เดชาสกุลสม, ปัญญา ชูพานิช, อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช และ พลเทพ เลิศวรรณิช. 2549. การศึกษาทดลองประสิทธิภาพในการป้องกันการชะล้างและการพังทลายของหญ้าแฝกจากโมเดลจำลอง, น. 13 – 19. ใน รายงานฉบับที่ วพ. 226 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

วีระชัย ณ นคร, มโนชัย จงรักวิทย์ และ กมลพรรณ นามวงศ์พรหม. 2536. สันฐานวิทยาและกายวิภาควิทยาเปรียบเทียบของหญ้าแฝก, น. 239 – 246. ใน รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 31 สาขาพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วังใน. 2528. จุลินทรีย์และกิจกรรมในดิน. โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด. กรุงเทพฯ.

สันติภาพ ปัญพวรรค์, วินิจ พัวพันธ์ และ กัลยา ดำรงสัจศิริ. 2542. การใช้หญ้าแฝกเพื่อการปรับปรุงดินเค็มและดินทรายภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, น 55 – 56. ใน รายงานผลการสัมมนา เรื่อง การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครั้งที่ 3. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

แสงโสม ศิริพานิช. 2554. ผลกระทบต่อสุขภาพจากการทำงานสัมผัสสารไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene). สำนักระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค, กรุงเทพฯ.

สุเมธ วัฒนธรรม และ ปรีชา โพธิ์ปาน. 2542. การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตระบบราก และผลผลิตของหญ้าแฝกชนิดต่าง ๆ บนกลุ่มดินที่ 35 (ชุดดินมาบอน), น. 61 – 62. ใน รายงานผลการสัมมนา เรื่อง การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครั้งที่ 3. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ [กปร.]. 2549. สารบัญเรื่องหญ้าแฝก โครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. พิมพ์ครั้งที่ 5. ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5. 2546. ระบบนิเวศเกษตรเขตภาคกลางและภาคตะวันตก. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

Argonne National Laboratory. 2005. **Trichloroethylene**. Human Health Fact Sheet. (Mimeographed)

Åslund, M.L.W., B.A. Zeeb, A. Rutter and K.J. Reimer. 2006. *In situ* phytoextraction of polychlorinated biphenyl-(PCB) contaminated soil. **Science of the Total Environment** 374: 1–12.

Bankston, J.L., D.L. Sola, A.T. Komor and D.F. Dwyer. 2002. Degradation of trichloroethylene in wetland microcosms containing broad-leaved cattail and eastern cottonwood. **Water Research** 1536: – 1546.

Boonsaner, M., T. Kaewumpot and A. Boonsaner. Bioaccumulation of Organophosphate Pesticides in Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* Nash.). **Thammasat Int. J. Sc. Tech** 7: 30 – 39.

Bu-Olayan, A.H. and B.V. Thomas. 2009. Translocation and bioaccumulation of trace metals in desert plants of Kuwait governorates. **Res. J. Environ. Sci** 3: 581 – 587.

Chappell, J. 1998. **Phytoremediation of TCE in Groundwater using Populus**. United States Environmental Protection Agency Technology Innovation Office, Washington, DC.

Chen, B., M. Yuan and H. Liu. 2001. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous solution using plant residue materials as a biosorbent. **Journal of Hazardous Materials** 188: 436 – 442.

Chen, Y., Z. Shen and X. Li. 2004. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. **Applied Geochemistry** 19: 1553 – 1565.

Climatetemp.info. 2011. **Thailand Weather Average**. Available Source: <http://www.climatetemp.info/thailand/>, June 15, 2011.

Cho, C., M.Y. Corapcioglu, S. Park and K. Sung. 2008. Effects of Grass on the fate of VOCs in contaminated Soil and Air. **Water Air Soil Pollut** 187: 243 – 250.

Clark Products Ltd. 2007. **Trichloroethylene**. Clark Products Ltd., (Safety Data Sheet).

De wild, T., J. Mertens, P. Spanoghe, J. Ryckebor, P. Jaeken and D. Springael. 2008. Sorption kinetics and its effects on retention and leaching. **Chemosphere** 72: 509–516.

- Diamadopoulos, E., D. Sakellariadis and E. Koukouraki. 1998. The effect of humic acid on the transport of volatile chlorinated hydrocarbons in soil. **Water Research** 32: 3325 – 3330.
- Doty, S.L., C.A. James, A.L. Moore, A. Vajzovic, G.L. Singleton, C. Ma, Z. Khan, G. Xin, J.W. Kang, J.Y. Park, R. Meilan, S.H. Strauss, J. Wilkerson, F. Farin and S.E. Strand. 2007. Enhanced phytoremediation of volatile environmental pollutants with transgenic tree. **PNAS** 104: 16816 – 16821.
- Dudai, N., E. Putievsky, D. Chaimovitch and M. Ben-Hur. 2006. Growth management of vetiver (*Vetiveria zizanioides*) under Mediterranean conditions. **Environmental Management** 81: 63 – 71.
- Fan, S. and K.M. Scow. 1993. Biodegradation of Trichloroethylene and Toluene by Indigenous Microbial Populations in Soil. **Applied and Environmental Microbiology** 6: 1911 – 1918.
- Interstate Technology and Regulatory Cooperation, Work Group In situ Bioremediation Work Team and Industrial Members of the Remediation Technologies Development Forum (RTDF). 1999. **Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Groundwater: Principles and Practices**. Interstate Technology and Regulatory Cooperation.
- Kaewta Pungcha-um. 2005. **Trichloroethylene and Vinylchloride Contaminated Groundwater around Plastic Manufactures of Greater Metropolitan Bangkok Region and Clean Up Trichloroethylene by Using Mesocosm Technique**. M.E. Thesis, Asian Institute of Technology, Chulabhorn Research Institute and Mahidol University School of Environment.
- Makris, K.C., M.S. Kabindra, D. Datta, D. Sarkar and D. Pachanoor. 2007. Chemically catalyzed uptake of 2,4,6-trinitrotoluene by *Vetiveria zizanioides*. **Environmental Pollution** 148: 101 – 106.

Milton, G., N. Choe, J. Duffty, G. Ekuan, P. Heilman, I. Muiznieks, M. Ruszaj. B.B. Shurtleff, S. Strand, J. Wilmoth and L.A. Newman. 1998. Phytoremediation of Trichloroethylene with Hybrid Poplars. **Environmental Health Perspectives** 106: 1001 – 1004.

Muhammad, N.B.Y., N.B.M. Intan, B.B. Nuradliza, J.S. Yeow and B.M.A. Hanafi. 2008.

Phytoremediation. Available Source: <http://www.biology-online.org/articles/phytoremediation-a-lecture/phytoextraction.html>, January 5, 2010.

Schnable, W.E., A.C. Dietz, J.G. Burken, J.L. Schnoor and P.J. Alvarez. 1996. Uptake and transformation of trichloroethylene by edible garden plants. **Water Research** 31: 816 – 824.

Shang, T.Q., S.L. Doty, A.M. Wilson, W.N. Howald and M.P. Gordon. 2001. Trichloroethylene oxidative metabolism in plants: the trichloroethanol pathway. **Phytochemistry** 58: 1055–1065.

Shing, T.Q., S.L. Doty, A.M. Wilson, W.N. Howald and M.P. Gordon. 2001. Trichloroethylene oxidative metabolism in plant: the trichloroethanol pathway. **Phytochemistry** 58: 1055 – 1065.

Shukla, A.K., P. Vishwakarma, S.N. Upadhyay, A.K. Tripathi, H.C. Prasana and S.K. Dubey. 2009. Biodegradation of trichloroethylene (TCE) by methanotrophic community. **Bioresource Technology** 100: 2469–2474.

Singh, S., J.S. Melo, S. Eapen and S.F. D'Soiza. 2008. Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) for phytoremediation of phenol. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 71: 671 – 676.

The Science Education Resource Center at Carleton College. 2009. **TCE and PCE Toxicity, Uses, and Properties.** Available Source: http://serc.carleton.edu/woburn/issues/tce_toxicity.html, November 14, 2009.

United States Environment Protection Agency. 2001. **A Citizen's Guide to Phytoremediation.**

Available Source: <http://clu-in.org/download/citizens/citphyto.pdf>, April 28, 2010.

Waliaga, I., J.J.V.D. Lee, V.J.G. Houba, W.V. Vark and I. Novozamsky. 1995. **Plant analysis manual** . Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Wei, Z. and Y., Seo. 2010. Trichloroethylene (TCE) adsorption using sustainable organic mulch. **Journal of Hazardous Materials** 181: 147 – 153.

Wilde, E.W., R.L. Brigmon, D.L. Dunn, M.A. Heitkamp and D.C. Dagnan. 2005. Phytoremediation of lead from firing range soil by Vetiver grass. **Chemosphere** 61: 1451 – 1457.

William, E.S., C.D. Annette, G.B. Joel, L.S. Jerlad and J.A. Pedro. 1997. Uptake and Transformation of Trichloroethylene by edible garden plants. **Water Research** 31: 816 – 824.

World Health Organization. 1985. **Trichloroethylene**. Available Source: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc50.htm>, October 28, 2008.

Yamamoto, K., M. Fukushima, N. Kakutani and K. Kuroda. 1997. Volatile organic compounds in urban rivers and their estuaries in Osaka, Japan. **Environmental Pollution** 95: 135 – 143.

Yang-hsin, S., 2007. Sorption kinetics and thermodynamics of trichloroethylene in humic acid. **Colloids and Surfaces A** 317: 159 – 163.

Zhang, M., F. He, D. Zhao and X. Hao. 2011. Degradation of soil-sorbed trichloroethylene by stabilized zero valent iron nanoparticles: Effects of sorption, surfactants, and natural organic matter. **Water research** 45: 2401 – 2414.





ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของดิน

1. การวิเคราะห์ชนิดของเนื้อดิน (Texture)

ใช้วิธีตรวจสอบด้วย hydrometer ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ texture ของดิน

1.1 ชั่งตัวอย่างดิน 50 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกมาใส่ desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น

1.2 นำดินใส่ลงใน dispersion cap เดิมสารละลาย calgon 5% ลงไป 15 ml และเติมน้ำกลั่นครึ่งถ้วย นำดินไปปั่นเป็นเวลา 10 นาที

1.3 เทตัวอย่างดินลงใน cylinder ล้างเครื่องปั่นด้วยน้ำกลั่น เติมน้ำลงไปให้ถึงระดับที่กำหนด ปิดฝาและเขย่ากลับไปมาประมาณ 50 ครั้ง และค่อย ๆ หย่อน hydrometer จับเวลา 40 นาที อ่านค่า hydrometer จากนั้นหย่อน thermometer และอ่านค่าอุณหภูมิ บันทึกค่าที่ได้

1.4 ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บันทึกค่าที่ได้จาก hydrometer และ ค่าอุณหภูมิอีกครั้ง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา %sand, %silt และ %clay จากสูตร จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเทียบกับสามเหลี่ยมจำแนกเนื้อดิน 3 กลุ่ม 12 ชนิด

C	ได้จากการเปิดตาราง T
Corr 40 sec	ได้จากการคำนวณด้วยสูตร $100 - [(Hydro. + C) \times 2] = \%sand$
Corr 1 hour	ได้จากการคำนวณด้วยสูตร $[(Hydro. + C) \times 2] = \%clay$
%silt	ได้จากการคำนวณด้วยสูตร $100 - (\%sand + \%clay)$

2. การหาความชื้นในดิน

2.1 นำ moisture can มาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำ moisture can ที่อบแล้วมาใส่ใน desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น

2.2 ชั่งน้ำหนัก moisture can ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนัก ชั่งดินประมาณ 5 g ใส่ลงใน moisture can จดบันทึกน้ำหนักที่ได้

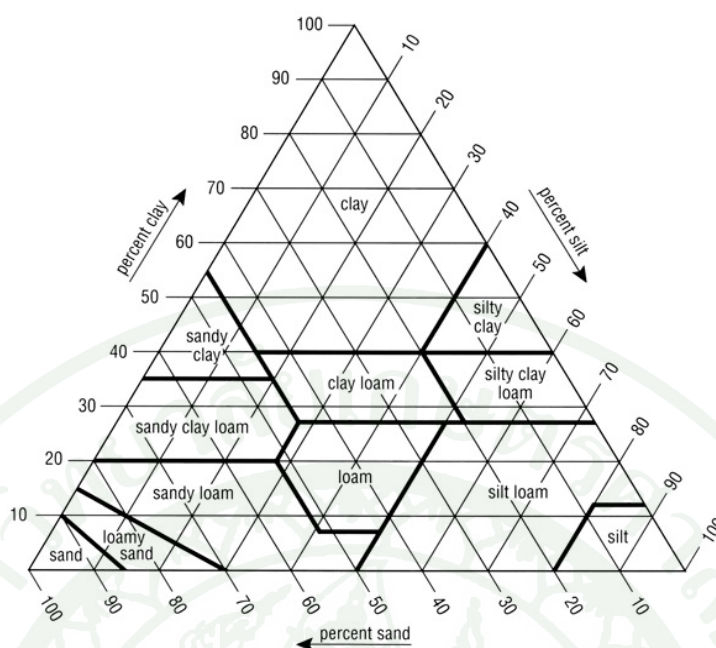


Chart showing the percentages of clay, silt, and sand in the basic textural classes.

ภาพผนวกที่ ก1 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อดิน 3 กลุ่ม 12 ชนิด

2.3 นำ moisture can ที่มีดินปนุญอยู่ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนักดินหลังอบอีกครั้ง

2.4 คำนวณหาความชื้นของดิน ดังนี้

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างดินหลังอบ}) \times 100}{(\text{น้ำหนักตัวอย่างดินก่อนอบ})}$$

3. วิเคราะห์ ค่าความเป็นกรดต่างของดิน (pH)

ค่า pH ของดินเป็นค่าที่บ่งชี้ความเป็นกรดต่างของดินซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการทางเคมีและชีวภาพในดิน มีผลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช ทำการวัดค่า pH โดย pH meter โดยใช้อัตราส่วนดิน : น้ำ คือ 1 : 1 (g : ml)

3.1 นำดินมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm ชั่งดิน 10 g ใส่ลงใน Beaker ขนาด 50 ml เติมน้ำกลั่น 10 ml ใช้แท่งแก้วคนให้ดินและน้ำเข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ในขณะที่วางทิ้งไว้ให้คนเป็นครั้งคราวก่อนวัด pH

3.2 ทำ standardize pH meter ด้วย buffer solution pH 7.0 และ 4.0 ก่อนการวัด pH ของดิน แล้วนำค่า pH ที่บันทึกไว้แล้วนำมาประเมินค่าการวิเคราะห์ของดิน โดยเทียบระดับกับตารางมาตรฐาน ค่า pH ของดิน ในตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 ประเมินค่าการวิเคราะห์ของดิน

ระดับ (rating)	pH
เป็นกรดจัดมาก (extremely acid)	< 4.5
เป็นกรดจัด (very strongly acid)	4.5-5.0
เป็นกรดแก่ (strongly acid)	5.1-5.5
เป็นกรดปานกลาง (moderately acid)	5.6-6.0
เป็นกรดเล็กน้อย (slightly acid)	6.1-6.5
เป็นกลาง (neutral)	6.6-7.3
เป็นด่างอย่างอ่อน (slightly alkaline)	7.4-7.8
เป็นด่างปานกลาง (moderately alkaline)	7.9-8.4
เป็นด่างแก่ (strongly alkaline)	8.5-9.0
เป็นด่างจัด (extremely alkaline)	>9.0

หมายเหตุ ปฏิกริยาของดิน (Soil reaction), pH (ดิน : น้ำ = 1:1)

4. วิเคราะห์อินทรีย์วัตถุ (organic matter: OM)

ใช้วิธีของ Walkley and Black ทำโดยการออกซิไดซ์คาร์บอนให้กลายเป็น CO_2 ด้วย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ และ H_2SO_4 แล้ววัดปริมาณ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ที่เหลือโดยการไตเตรตด้วย reducing agent ซึ่งวิธีวิเคราะห์จะปรับจากกลุ่มงานวิจัยเคมีดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร (2544)

4.1 ซั่งตัวอย่างดิน 1 g ซั่งร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 mm ใส่ลงใน erlenmeyer flask 250 ml เติม 1 N $K_2Cr_2O_7$ ลงไป 10 ml ใช้ pipet แก้ว flask เบา ๆ ให้ดินและสารละลายผสมกัน เติม H_2SO_4 (conc.) 15 ml เขย่าเบาๆ 1-2 นาทีแล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

4.2 เติมน้ำกลั่น 50 ml แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และ หยด O - phenanthroline ซั่งเป็น indicator ลงไป 5 หยด สีของ suspension จะเปลี่ยนเป็นสีเขียว ไตเตรตด้วยสารละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 0.5 N จนถึง end point สีของสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง จด ปริมาตร $K_2Cr_2O_7$ และ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ที่ใช้

4.3 ทำ blank เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ดิน จากนั้นคำนวณหาปริมาณ organic matter สูตรคำนวณค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter: OM)

$$\% OC = (B-T)N/B \times (100/77) \times (3/10^3) \times (100/X)$$

เมื่อ B = จำนวนมิลลิลิตรของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ที่ไตเตรตกับ blank
 T = จำนวนมิลลิลิตรของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ที่ไตเตรตกับตัวอย่างเดิม
 N = ความเข้มข้นของ $K_2Cr_2O_7$
 X = น้ำหนักของดิน (กรัม)
 $\% OM = \% \text{ organic carbon} \times 1.724$

5. การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)

ใช้วิธีทำให้ดินอิ่มตัวด้วย 1 N NH_4OAc ซั่งเป็นวิธีที่ในกลุ่มงานวิจัยเคมีดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร (2544)

5.1 ซั่งดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm น้ก 5 g ใส่ใน leaching tube ซั่งรองก้นด้วยสำลี และเทสารละลาย asbestos 5 ml

5.2 ซะดินด้วยน้ำยา 1 N NH_4OAc , pH7 ปริมาตร 100 ml ค่อย ๆ ปล่อยให้หยดทีละน้อย

5.3 ล้างดินใน leaching tube ด้วย ethyl alcohol 95% ปริมาตร 100 ml เพื่อล้างเอา NH_4OAc ที่ขังและติดอยู่ตามมุมของอนุภาคออกให้หมด

5.4 ชะดินด้วย 10% acidified NaCl ปริมาตร 100 ml เพื่อที่ Na^+ จะได้ไปไล่ NH_4^+ ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดิน การชะดินต้องทำอย่างช้า ๆ หลังจากนั้นนำ leachate ที่ได้มาปรับปริมาตรเป็น 200 ml ด้วยน้ำกลั่น

5.5 นำ leachate ไปกลั่นด้วยชุดกลั่นหาปริมาณ NH_4^+ โดย pipet สารละลายจากข้อ 4.4 มา 20 ml ใส่ลงใน Kjeldahl flask แล้วเติม MgO 0.2 g จับ NH_3 ที่เกิดขึ้นด้วย 2% boric acid-indicator 5 ml นำไปกลั่น สารละลายที่ได้จะมีสีเขียว หลังจากนั้นนำมาไตเตรทด้วย H_2SO_4 0.02 N จนถึง end point จะได้สารละลายสีม่วงอมชมพู บันทึกปริมาตรของ H_2SO_4 ที่ใช้ไตเตรทเพื่อนำไปคำนวณต่อไปตามสูตรการคำนวณค่า CEC

$$\text{CEC} = N \times (T - B) \times A \times 100$$

เมื่อ N = Normality ของ standard H_2SO_4 (ใช้ 0.02 N)

T = ปริมาตรของ standard H_2SO_4 ที่ใช้ titrate sample

B = ปริมาตรของ standard H_2SO_4 ที่ใช้ titrate sample

A = ปริมาตรทั้งหมดของ aliquot



ภาคผนวก ข

การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสาร TCE ที่มีอยู่ในวัสดุปลูกที่ผสมวัสดุปรับปรุงดินและในพืช

1. ผลการตรวจวัดปริมาณสาร TCE ในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าแฝก

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณสาร TCE ในส่วนราก ลำต้น และใบ และ ค่า translocation factor from root to shoot ($TF_{Sh/R}$) ของหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg

ต้นที่	ปริมาณสาร TCE (mg/kg)			
	ราก	ลำต้น	ใบ	ค่า TF
1	1.77	2.21	3.58	1.25
2	1.82	3.97	1.82	2.18
3	2.65	4.03	7.04	1.52
4	4.68	4.62	3.80	0.99
ค่าเฉลี่ย	2.73	3.71	4.06	1.48
SD	1.36	1.04	2.18	0.51

ตารางผนวกที่ ข2 ปริมาณสาร TCE ในส่วนราก ลำต้น และใบ และ ค่า translocation factor from root to shoot ($TF_{Sh/R}$) ของหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg

ต้นที่	ปริมาณสาร TCE (mg/kg)			
	ราก	ลำต้น	ใบ	ค่า TF
1	1.51	4.80	3.59	3.18
2	1.46	2.00	6.03	1.37
3	1.63	2.20	4.06	1.35
4	2.36	7.16	4.24	3.03
ค่าเฉลี่ย	1.74	4.04	4.48	2.23
SD	0.42	2.44	1.07	1.01

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสาร TCE ที่พบในส่วนราก ลำต้น และใบของหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 และสายพันธุ์ศรีลังกา ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS

ส่วนของพืช	ความเข้มข้นของสาร TCE (mg/kg)	
	สายพันธุ์สงขลา 3	สายพันธุ์ศรีลังกา
ราก	1.74±0.42 b	2.73±1.36 a
ลำต้น	4.04±2.44 ab	3.71±1.04 a
ใบ	4.48±1.07 a	4.06±2.18 a

2. ผลการตรวจวัดปริมาณสาร TCE ในดินที่ผสมวัสดุปรับปรุงดิน

ตารางผนวกที่ ข4 ปริมาณสาร TCE ที่เหลือในวัสดุปลูก และค่า %TCE removal ของชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกหญ้าแฝก คือ ดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg

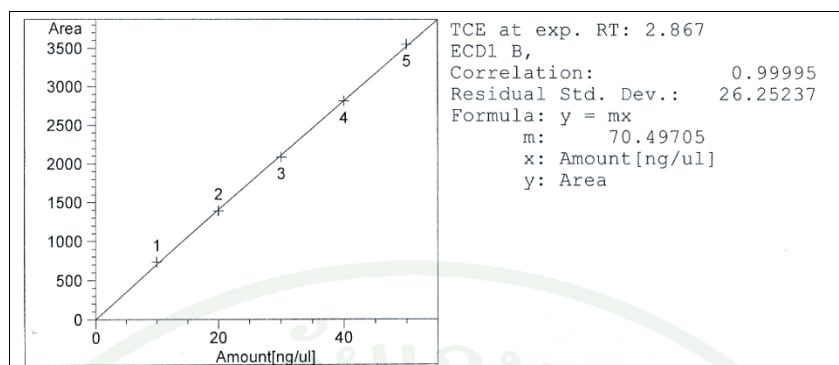
ดินตัวอย่างที่	ปริมาณสาร TCE ในวัสดุปลูก (mg/kg)	%TCE removal
1	4.44	97.57
2	4.72	97.42
3	4.44	97.57
4	4.44	97.57
5	4.72	97.42
ค่าเฉลี่ย	4.55	97.51
SD	0.15	0.08

ตารางผนวกที่ ข5 ปริมาณสาร TCE ที่เหลือในวัสดุปลูก และค่า %TCE removal ของหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg

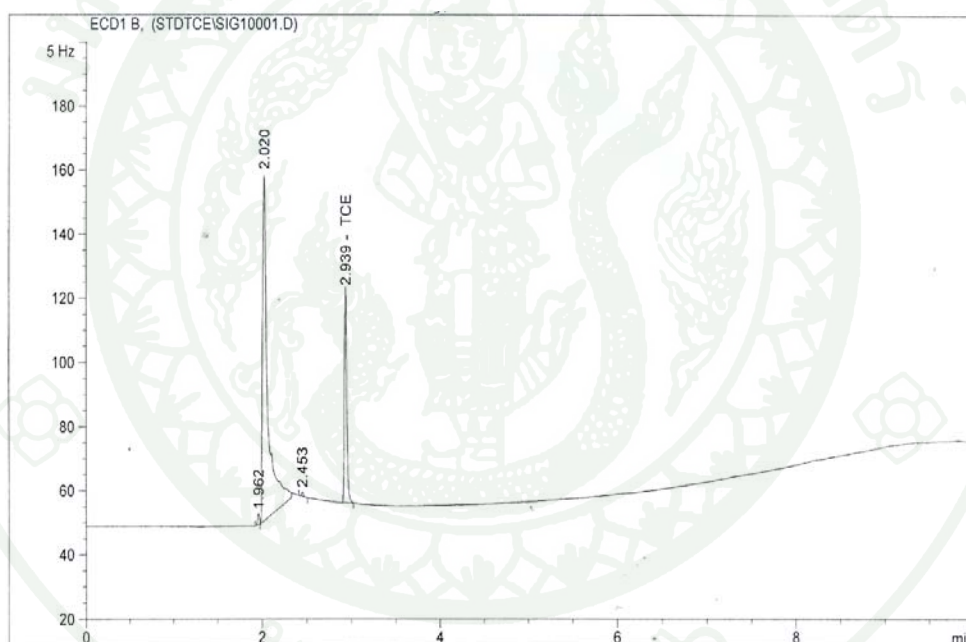
ดินตัวอย่างที่	ปริมาณสาร TCE ในวัสดุปลูก	%TCE removal
	(mg/kg)	
1	4.20	97.70
2	3.88	97.88
3	1.76	99.04
4	1.64	99.10
5	3.28	98.21
ค่าเฉลี่ย	2.95	98.39
SD	1.19	0.65

ตารางผนวกที่ ข6 ปริมาณสาร TCE ที่เหลือในวัสดุปลูก และค่า %TCE removal ของหญ้าแฝกสายพันธุ์ศรีลังกา ที่ปลูกในดินผสมวัสดุปรับปรุงดิน (กาบมะพร้าวสับ : ดิน : ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยน้ำหนัก) ปริมาณ TCE เริ่มต้นมีค่าประมาณ 183 mg/kg

ดินตัวอย่างที่	ปริมาณสาร TCE ในวัสดุปลูก	%TCE removal
	(mg/kg)	
1	3.80	97.92
2	3.84	97.90
3	1.76	99.04
4	1.76	99.04
5	3.88	97.88
ค่าเฉลี่ย	3.01	98.36
SD	1.14	0.62



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟสารมาตรฐานของสารไตรคลอโรเอทิลีนที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm โดยใช้เครื่อง GC-ECD



ภาพผนวกที่ ข2 retention time ของสารไตรคลอโรเอทิลีน (2.939 นาที) โดยเครื่อง GC-ECD



ตารางผนวกที่ ค1 เปอร์เซ็นต์การสะสมของสาร TCE ในส่วนต่าง ๆ เทียบระหว่างดิน 3 ชนิด

Soil	Properties of soils			% TCE		
	OM (%)	Moisture (%)	Bulk density (g cm ⁻³)	Gas	Liquid	Absorbed
Rindge	11.2	35.4	2.0	24	5	71
Yolo	2.2	11.7	2.4	52	3	45
Reiff	1.4	13.9	2.5	57	4	39

ที่มา: Fan and Scow (1993)

ตารางผนวกที่ ค2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสาร TCE โดยใช้วัสดุอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

Organic materials	%OC	surface area	TCE sorption
Pine	51.62	0.62 m ² /g	1,076.0 µg/g
Cypress	19.05	1.37 m ² /g	942.7 µg/g
hardwood	43.23	1.1 m ² /g	540.9 µg/g

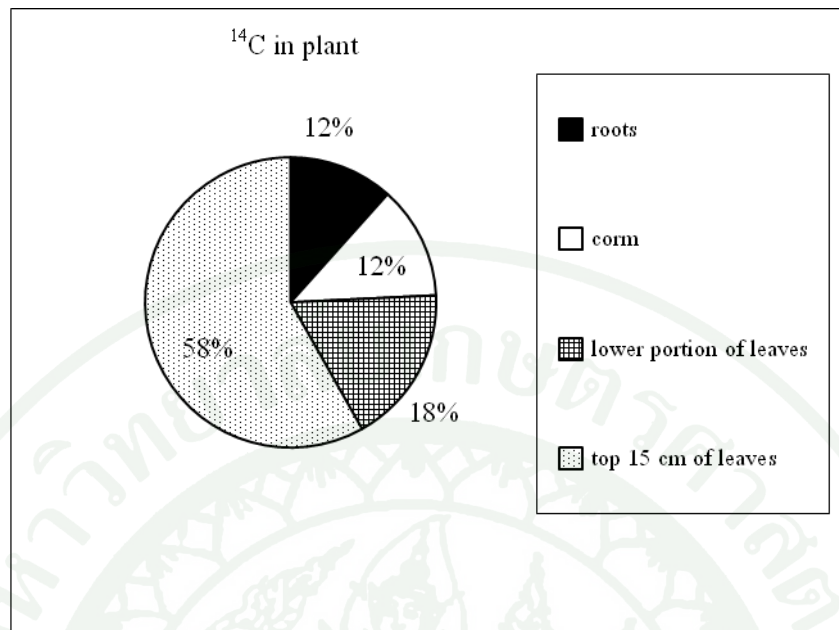
ที่มา: Wei and Seo (2010)

ตารางผนวกที่ ๓ mechanism ของสาร TCE ผ่านกระบวนการพืชบำบัดโดยใช้ต้น poplar

Process	Product
methabolism	chloral hydrate, trichloroethanol, di- and trichloroacetic acid
incorporation	insoluble residue
mineralization	CO ₂
transpiration	TCE vapor
rhizosperic degradation via microorganisms	CO ₂ , dehalogenation metabolites such as cis-1,2-dichloroethylene, vinyl chloride, and others

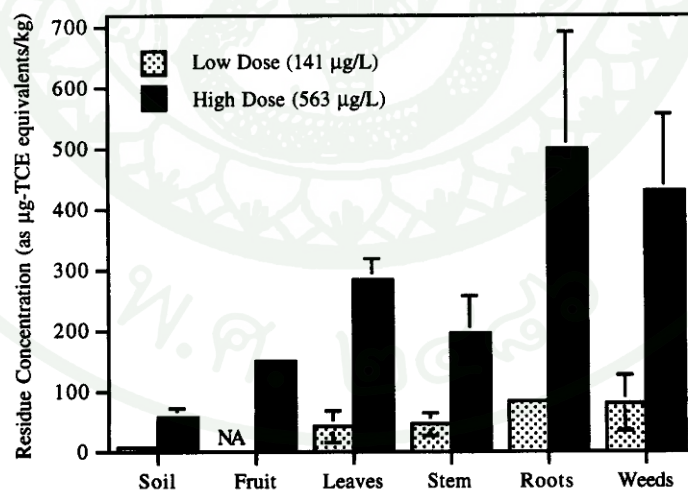
ที่มา: Chappell (1998)





ภาพผนวกที่ ๑1 ปริมาณ ¹⁴C ที่ตรวจพบในต้นกกธูปฤๅษีในระบบ wetland

ที่มา: Bankston *et al.* (2002)



ภาพผนวกที่ ๑2 การสะสมของสาร TCE ในมะเขือเทศ

ที่มา: Schnabel *et al.* (1996)



ตารางผนวกที่ ๑1 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในปี 2553

	Average Minimum Temperatures in Thailand (°C)	Average Maximum Temperature in Thailand (°C)	Thailand Average Temperature (°C)	Average Sea Temp (°C)	Average Precipitation/ Rainfall (mm)	Wet Days (>0.1 mm)	Average Sunlight Hours/ Day	Relative Humidity (%)	Average Wind Speed in Thailand (Beaufort)	Average Number of Days with Frost	
Weather in Thailand in January	20	31	25.5	-	9	1	-	74	-	0	Average Temperature in Thailand in January
Weather in Thailand in February	22	32	27	-	29	1	-	77	-	0	Average Temperature in Thailand in February
Weather in Thailand in March	24	33	29	-	34	3	-	77.0	-	0	Average Temperature in Thailand in March
Weather in Thailand in April	25	35	30	-	89	3	-	77	-	0	Average Temperature in Thailand in April

ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

	Average Minimum Temperatures in Thailand (°C)	Average Maximum Temperature in Thailand (°C)	Thailand Average Temperature (°C)	Average Sea Temp (°C)	Average Precipitation/ Rainfall (mm)	Wet Days (>0.1 mm)	Average Sunlight Hours/ Day	Relative Humidity (%)	Average Wind Speed in Thailand (Beaufort)	Average Number of Days with Frost	
Weather in Thailand in May	25	33	29	-	166	9	-	80	-	0	Average Temperature in Thailand in May
Weather in Thailand in June	24	32	28	-	171	10	-	81	-	0	Average Temperature in Thailand in June
Weather in Thailand in July	24	32	28	-	178	13	-	82	-	0	Average Temperature in Thailand in July
Weather in Thailand in August	24	32	28	-	191	13	-	83	-	0	Average Temperature in Thailand in August

ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

	Average Minimum Temperatures in Thailand (°C)	Average Maximum Temperature in Thailand (°C)	Thailand Average Temperature (°C)	Average Sea Temp (°C)	Average Precipitation/ Rainfall (mm)	Wet Days (>0.1 mm)	Average Sunlight Hours/ Day	Relative Humidity (%)	Average Wind Speed in Thailand (Beaufort)	Average Number of Days with Frost	
Weather in Thailand in September	24	31	28	-	306	15	-	85	-	0	Average Temperature in Thailand in September
Weather in Thailand in October	24	31	28	-	255	14	-	85	-	0	Average Temperature in Thailand in October
Weather in Thailand in November	22	30	26	-	57	5	-	82	-	0	Average Temperature in Thailand in November

ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

	Average Minimum Temperatures in Thailand (°C)	Average Maximum Temperature in Thailand (°C)	Thailand Average Temperature (°C)	Average Sea Temp (°C)	Average Precipitation/ Rainfall (mm)	Wet Days (>0.1 mm)	Average Sunlight Hours/ Day	Relative Humidity (%)	Average Wind Speed in Thailand (Beaufort)	Average Number of Days with Frost	
Weather in Thailand in December	25	30	27.5	-	7	1	-	76	-	0	Average Temperature in Thailand in December

ที่มา: Climatetemp.info (2011)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวจิราจันทร์ จันทรังม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	12 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(พืชสวน) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	- นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาในงานประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ครั้งที่ 15 ในวันที่ 15 ตุลาคม 2552 เรื่อง สมรรถนะการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกในดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน - นำเสนอผลงานในงานประชุมระดับนานาชาติ Pure and Applied Chemistry Conference 2010 (PACCON 2010) ในวันที่ 22 มกราคม 2553 เรื่อง Phytoremediation: Vetiver grass in remediation of soil contaminated with trichloroethylene - นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาในงานประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 ในวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2553 เรื่อง สมรรถนะการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกในดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	- ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2550 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย - ได้รับทุนสนับสนุนการไปนำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ (ทุนเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่า) ประจำปี 2552 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์