



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และการศึกษาปริมาณตะกั่ว
จากองค์ประกอบของพืชด้วยวิธี Steam Explosion และ Wayman's Method

Potential of Siam Weed (*Chromolaena odorata*) to Remediate Lead Contaminated Soil
and Determination of Lead in Plant Components by Steam Explosion
and Wayman's Method

نامผู้วิจัย นายกนกศักดิ์ อุดมสิน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพร สุขผล, ปร.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทรแก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และการศึกษาปริมาณตะกั่ว
จากองค์ประกอบของพืชด้วยวิธี Steam Explosion และ Wayman's Method

Potential of Siam Weed (*Chromolaena odorata*) to Remediate Lead Contaminated Soil
and Determination of Lead in Plant Components by Steam Explosion
and Wayman's Method

โดย

นายกนกศักดิ์ อุดมสิน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

กนกศักดิ์ อุดมสิน 2554: ศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว
และการศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบของพืชด้วยวิธี Steam Explosion และ
Wayman's Method ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศพร สุภผล, ประ.ด. 170 หน้า

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมเป็นปริมาณมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจาก
อุตสาหกรรมเหมืองแร่ตะกั่ว ซึ่งเป็นอีกกิจกรรมหนึ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของตะกั่วสู่ดิน ก่อให้เกิด
ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ ปัจจุบันการจัดการดินที่เกิดการปนเปื้อนตะกั่วสามารถทำได้หลายวิธี
โดยเฉพาะเทคนิคทางกายภาพและเคมี แต่เทคนิคต่างๆ ดังกล่าวเป็นเทคนิคที่มีราคาสูงและส่งผลกระทบต่อ
สิ่งแวดล้อมเมื่อใช้ในการจัดการ ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคการบำบัดด้วยพืช (phytoremediation) มาใช้ในการ
บำบัดดินที่ปนเปื้อน ซึ่งมีข้อดีที่มีค่าใช้จ่าย และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค
อื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการจัดการกับซากของพืชภายหลังจากการบำบัดยังเป็นปัญหาที่สำคัญเมื่อใช้พืชในการ
บำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก อีกทั้งยังมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพืชที่คุณสมบัติในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว
และแนวทางการจัดการซากพืชหลังจากการใช้พืชในการบำบัดที่เกี่ยวข้องอยู่เพียงเล็กน้อย

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาความสามารถในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยสาบเสือ
(*Chromolaena odorata*) และปริมาณการสะสมของตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือดด้วยวิธี steam
explosion, Waymans's method และ atomic absorption spectrophotometer (AAS) โดยทำการบำบัดดินที่
ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง โดยวางแผนการทดลองแบบ
2x6 completely randomized design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ซึ่งจากผลการศึกษาพบระยะเวลาในการบำบัดเหมาะสม
ที่ 45 วัน โดยสามารถบำบัดดินที่มีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดโดยเฉลี่ยก่อนการบำบัดเท่ากับ
75,529.38 มก.กก.⁻¹ ให้ลดลง จนมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในดินโดยเฉลี่ยภายหลังการบำบัดเท่ากับ
68,446.46 มก.กก.⁻¹ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 9.38 ต่อหนึ่งรอบของการบำบัด และพบว่าที่
สภาวะความดันที่ 19 กก.ซม.⁻² ณ เวลา 5 นาที เป็นสภาวะที่เลือกใช้ในการศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบ
ทางเคมีของสาบเสือดด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method พบปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน
cellulose > Klason lignin > water-soluble material > methanol-soluble lignin ตามลำดับ ทั้งในส่วนเหนือดินและ
ส่วนใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 75.5, 17.2, 5.0 และ 2.3
ตามลำดับในส่วนเหนือดิน และร้อยละ 84.1, 11.0, 3.3 และ 1.6 ตามลำดับในส่วนเหนือดิน

Kanoksak Udomsin 2011: Potential of Siam Weed (*Chromolaena odorata*) to Remediate Lead Contaminated Soil and Determination of Lead in Plant Components by Steam Explosion and Wayman's Method. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Assistant Professor Savaporn Supaphol, Ph.D. 170 pages.

Lead (Pb) is the most common heavy metal soil contaminant in the environment, especially from the Pb mine industry is the point source to Pb contaminated soils. At the present, current technologies attempt to remediate by physical or chemical separation of soils contaminants. However, these techniques are labor intensive and costly. Thus, using of plants to remediate Pb or heavy metals in soil contaminants especially known as phytoremediation. Phytoremediation, the use of green plants to clean up metal contaminated environments has attracted attention as an environmentally friendly and useful metal-extraction technique for treating toxic contaminated soil. However, the management of hyperaccumulated plants after phytoremediation is very important issue. For more, very few studies to lead hyperaccumulator and utilize a hyperaccumulating plants after phytoremediation.

In this thesis studies to the potential of Siam weed (*Chromolaena odorata*) to remediate Pb contaminated soil in remediation times at 15, 30, 45, 60, 75 and 90 days from green house experiments and determination of Pb in plant components was established using steam explosion, Wayman's extraction method, and an atomic absorption spectrophotometer (AAS). The experiment design was on 2x6 in completely randomized design (CRD) with three replicates. In the result, the appropriate to harvesting time at 45 days and the concentration of total Pb in soils after remediation had decreased from 75,529.38 mg kg⁻¹ to 68,446.46 mg kg⁻¹. This illustrates the potential of Siam weed to remediate soil as around 9.38% of total Pb was decreased in the first crop. The determination of Pb in plant components from steam-exploded Siam weed was selected to steaming pressure and steaming time in steam explosion and the Wayman's method at 19 kg cm⁻² in 5 min, and the Pb was accumulated in cellulose fraction > Klason lignin fraction > water-soluble material fraction > methanol-soluble lignin fraction, significantly (p≤0.05) at 75.5, 17.2, 5.0 and 2.3% in aboveground parts and 84.1, 11.0, 3.3 and 1.6% in underground parts, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งของ ศศ.ดร.ศวพร ศุภผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รศ.ดร.นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ในการตรวจสอบและแก้ไข ตลอดจนให้คำปรึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย ประกอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณ รศ.กณิดา ดังคนานุรักษ์ ประธานในการสอบ และ ดร.สมชาย เอื้อพิพัฒนากุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมในการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ดร.ประพันธ์ศักดิ์ ศิริชะทามิ ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ต่อคำแนะนำในส่วนเอกสารที่เกี่ยวข้องในการทำวิทยานิพนธ์ ดร.พิลาณี ไวยถนอมสัตย์ สถาบันคั้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ รศ.ดร.วิทยา ปั่นสุวรรณ ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์ทั้งคำแนะนำ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัยประกอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณชัยภัทร คงแก้ว นายภาณุ สัมเกลียง นส.รียากร นกแก้ว นส.นันทิยา ชุ่มชื่น นายเคียวเพชร ลบรัมย์ นางสาวบุรณัฏ์ ปลื้มปัญญา และนายภัทร คมกมล สำหรับความช่วยเหลือทางเทคนิคที่สำคัญต่อความรู้และความเข้าใจที่เพิ่มมากขึ้นแก่ผู้วิจัย อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ มินกร 55 สวส. 32-33 และเคมีเกษตร ที่คอยเป็นแรงผลักดันที่สำคัญต่อความสำเร็จที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย ประกอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ โดยเฉพาะ อาร์ม ติ๊ะ นุก นวย อู๋ย แซนด์ ฟน เบน ปูน ปู ปอ ป้าแนน บุ่ม แบงค์ เบียร์ อ้อ จุน เอ๋ พิวรรณ เอ๋ ฝ่าย นื่องพร พี่อ๊อบ พี่เอ็ม พี่มด มะแตง เกด ไก่ จ๊ับ และ ศุ ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นแหล่งกำลังใจที่สำคัญให้ฝ่าฟันอุปสรรคที่เกิดขึ้นให้ผ่านมาได้จนถึงวันนี้

ขอขอบพระคุณ คุณชายเอื้อน เกลี้ยงประดิษฐ์ นางสาวนีย์ อุดมสิน มารดา และนายธนิตร อุดมสิน น้องชาย ที่เป็นผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จทั้งหมดที่เกิดขึ้น และสุดท้ายขอขอบคุณความดีที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้แก่ พ.ท.พิรัช อุดมสิน บิดาผู้ล่วงลับ ขอให้ท่านจงมีความสุขตลอดไปในทุกอนาตชาติ

กนกศักดิ์ อดมสิน

พฤษภาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	120
สรุป	120
ข้อเสนอแนะ	121
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	122
ภาคผนวก	134
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	135
ภาคผนวก ข เกณฑ์มาตรฐานในการพิจารณาคุณสมบัติของดิน ตะกอนดิน และน้ำ และผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี บางประการของดินที่ใช้ในการทดลองศักยภาพของسابเสื้อ ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	151
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติของดิน และปริมาณตะกั่วในดิน ตะกอนดิน น้ำ และسابเสื้อที่ใช้ในการทดลอง	155
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	170

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 พิกัดกริด และระดับความสูงของพื้นที่ ณ บริเวณต่างๆ ที่ตั้งในเขตพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภothองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	53
2 สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในดินจากพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภothองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	57
3 สมบัติทางเคมีบางประการของตะกอนดิน และปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในตะกอนดินจากพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภothองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	59
4 สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำจากพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภothองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	62
5 ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วทั้งหมดของตัวอย่างพืชบางชนิดที่พบในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภothองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	63
6 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด (total Pb) ในส่วนเหนือดิน ค่า translocation factor (TF) และ bioaccumulation factor (BAF) ต่อการพิจารณาพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง (lead hyperaccumulator) ของตัวอย่างพืชบางชนิดที่พบในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภothองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	65
7 การพิจารณาสมบัติของสาบเสือต่อความสามารถในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง (lead hyperaccumulator) จากการศึกษาศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง ที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน	81
8 สัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในพืชชนิดต่างๆ ภายหลังจากกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1	น้ำหนักแห้งของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง 136
ก2	การดูใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง 137
ก3	ความเข้มข้นของตะกั่วในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง 138
ก4	อิทธิพลของระดับความดันต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method 139
ก5	อิทธิพลของระยะเวลาต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method 140
ก6	ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วัน 141
ก7	ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วัน 142
ก8	ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วัน 143
ก9	ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วัน 144

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก10 ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว สาบเสือ 75 วัน	145
ก11 ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว สาบเสือ 90 วัน	146
ก12 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน water-soluble material ของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว สาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	147
ก13 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน methanol-soluble lignin ของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว สาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	148
ก14 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน Klason lignin ของสาบเสือภายหลังจาก การบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	149
ก15 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose ของสาบเสือภายหลังจาก การบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	150
ข1 เกณฑ์มาตรฐานของปฏิกิริยาดิน ตะกอนดิน และน้ำ	152

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข2	เกณฑ์มาตรฐานของค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการของดิน และตะกอนดินที่ใช้ในการทดลอง	153
ข3	สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณความเข้มข้น ตะกั่วในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	154

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการ phytoaccumulation	12
2 กระบวนการ phytodegradation	13
3 กระบวนการ phytostabilization	14
4 กระบวนการ phytovolatilization	15
5 กระบวนการ rhizodegradation	16
6 กระบวนการ rhizofiltration	17
7 ความแตกต่างของพืชที่มีคุณสมบัติเป็น non-hyperaccumulator (ข้าว) และพืชที่มีคุณสมบัติเป็น hyperaccumulator (ขมิ้น)	21
8 กลไกทั้ง 6 ประเภทในการทนต่อโลหะหนักของพืช	23
9 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>); (ก) ลักษณะโดยทั่วไปของลำต้น (ข) ใบและยอด (ค) ดอก (ง) เมล็ด	25
10 ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่อง steam explosion; (ก) ลักษณะของเครื่องทางด้านหน้า (ข) ลักษณะของเครื่องทางด้านข้าง (ค) ส่วนประกอบของเครื่อง	30
11 แนวทางการใช้ประโยชน์ในองค์ประกอบทางเคมีชนิดต่างๆ ของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยวิธี steam explosion	32
12 กระบวนการ Wayman's method โดยสรุป	34
13 ที่ตั้งและอาณาเขตของพื้นที่ศึกษา ตำบลชะแล อำเภอดงพิกุล จังหวัดกาญจนบุรี	51
14 ลักษณะที่ตั้งและอาณาเขตของอุทยานแห่งชาติลำคลองงู ในเขตอำเภอดงพิกุล จังหวัดกาญจนบุรี	52
15 ลักษณะทางกายภาพของที่ตั้ง และการแพร่กระจายของพืชบางชนิดในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว; (ก) อาณาเขตที่ตั้งของพื้นที่ (ข) โรงแต่งแร่ (ค) ลานแร่ (ง) ลานตะกอนหางแร่ (จ) บ่อคัดตะกอนที่ 1 (ช) บ่อคัดตะกอนที่ 2 (ซ) สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>) (ฅ) กระถิน (<i>Leucaena leucophala</i>) และ (ญ) อ้อ (<i>Arundo donax</i>)	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
16 การแพร่กระจายของพืชน้ำในบ่อคักตะกอนที่ 1 (ก) และบ่อคักตะกอนที่ 2 (ข) ที่พบการแพร่กระจายของพืชน้ำในบ่อคักตะกอนที่ 2 มากกว่าบ่อคักตะกอนที่ 1 (ลูกศรชี้)	60
17 การเจริญเติบโตของสาบเสือในดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (control) และดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว (treatment) ที่ระยะเวลาการปลูก 30 วัน (ก) 45 วัน (ข) 60 วัน (ค) 75 วัน (ง) 90 วัน (จ) และลักษณะการแสดงออกของความเป็นพิษของสาบเสือภายหลังการปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว (ฉ) (ลูกศรชี้)	69
18 ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาบเสือที่ได้ภายหลังการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง; (ก) ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ข) ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว	70
19 ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง; (ก) ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ข) ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว	73
20 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง; (ก) ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ข) ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว	76
21 อิทธิพลของระดับความดันต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method; (ก) = water-soluble material (ข) = methanol-soluble lignin (ค) = Klason lignin (ง) = cellulose	87
22 อิทธิพลของระยะเวลาต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method; (ก) = water-soluble material (ข) = methanol-soluble lignin (ค) = Klason lignin (ง) = cellulose	91
23 สัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ของสาบเสือ ภายหลังจากระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
24	ลักษณะทางกายภาพของสาบเสือในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ก่อนและหลัง steam explosion ลักษณะ water-soluble material (ค) methanol-soluble lignin (ง) Klason lignin (จ) และ cellulose (ฉ) ที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี Wayman's method 94
25	ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วัน 98
26	ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วัน 100
27	ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วัน 102
28	ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วัน 104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	เนื้อหา	หน้า
29	ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วัน	106
30	ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วัน	108
31	ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน water-soluble material ของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	110
32	ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน methanol-soluble lignin ของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	112
33	ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน Klason lignin ของสาบเสือหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
34	ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose ของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน	116
ภาพผนวกที่		
ค1	Soil texture diagram	158

ศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และการศึกษาปริมาณตะกั่ว จากองค์ประกอบของพืชด้วยวิธี Steam Explosion และ Wayman's Method

Potential of Siam Weed (*Chromolaena odorata*) to Remediate Lead Contaminated Soil and Determination of Lead in Plant Components by Steam Explosion and Wayman's Method

คำนำ

เมื่อกล่าวถึงดินซึ่งจัดเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติที่สำคัญต่อการเกษตร ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์และปราศจากการปนเปื้อนของมลพิษย่อมส่งผลดีต่อผลิตทางการเกษตร แต่ปัจจุบันจากกิจกรรมทางภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากประชากรที่เพิ่มมากขึ้น และเทคโนโลยีที่ทันสมัยได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมาก จึงเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินนั้น ถือเป็นปัญหาสำคัญที่พบได้บ่อยและมีแนวโน้มที่พบได้มากขึ้นในปัจจุบัน โดยมีสาเหตุส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นหลัก ทั้งจากกิจกรรมจากภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรม

ตะกั่วเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีการปนเปื้อนในดิน อันเนื่องมาจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยมีแหล่งสำคัญของการปนเปื้อนตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อมมาจากกิจกรรมในอุตสาหกรรมการผลิตอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตอาวุธปืนและเครื่องกระสุน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งอุตสาหกรรมการผลิตเหมืองแร่ ซึ่งเป็นอีกกิจกรรมหนึ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของตะกั่วสู่ดินในพื้นที่โดยรอบ ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของตะกั่วจนเกิดผลกระทบต่อทางสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ โดยปริมาณการปนเปื้อนของสารตะกั่วในปัจจุบันที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ในหลายๆ ประเทศมีมาตรการลดการปนเปื้อนของสารตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม โดยการควบคุมกิจกรรมต่างๆ เพื่อควบคุมปริมาณการปนเปื้อนของสารตะกั่ว และการพัฒนาเทคโนโลยีในการกำจัดสารตะกั่วที่มีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยปัจจุบันในการจัดการโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินนั้นสามารถทำได้หลายวิธีโดยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ วิธีการทางกายภาพ อาทิ soil flushing, solidification และ stabilization และวิธีการทางเคมี อาทิ soil washing, chemical

reduction และ oxidation (USEPA, 1993; พันธวิศ, 2550) ซึ่งเทคนิคต่างๆ เหล่านี้เป็นเทคนิคที่มีราคาสูง ขาดต่อการปฏิบัติ และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลังจากการบำบัด

เทคนิคการบำบัดโดยใช้พืช หรือที่เรียกว่า phytoremediation เป็นการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งอาศัยประโยชน์จากระบวนการดูดน้ำและการลำเลียงแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช รวมทั้งกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารมลพิษรวมทั้งโลหะหนักในดินให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง ซึ่งกลไกเหล่านี้จะทำให้หน้าที่เปลี่ยนรูปของสารประกอบอินทรีย์ และเกิดการดูดซับและสะสมโลหะหนักไว้ในลำต้นใบ และยอดโดยสารปนเปื้อนเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป (บัญชาการ, 2548) ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีข้อดีเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายน้อย ง่ายต่อการปฏิบัติ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการบำบัดทางกายภาพและเคมี

สาบเสือ (*Chromolaena odorata*) เป็นพืชที่พบได้ทั่วไป มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว พบการแพร่กระจายได้ง่าย และสามารถเจริญเติบโตได้ในหลายพื้นที่ อีกทั้งมีรายงานวิจัยสนับสนุนว่าเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว โดยพบว่าสาบเสือเป็นพืชที่สามารถดูดซับและสะสมตะกั่วได้ในระดับสูง (Rotkittikhun *et al.* 2006; Tanhan *et al.*, 2007) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยต้นสาบเสือ

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสียด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method เป็นเทคนิคในการแยกองค์ประกอบทางเคมี เพื่อให้ได้องค์ประกอบหลักของพืชสี่ชนิด ได้แก่ ส่วนที่ละลายน้ำได้ (water-soluble material fraction) ลิกนินที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (methanol-soluble lignin fraction) ลิกนินที่มีมวลโมเลกุลสูง (Klason lignin fraction) และเซลลูโลส (cellulose fraction) ในชิ้นส่วนของพืช หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารมูลค่าเพิ่มต่างๆ อาทิ การผลิตเซลลูโลสบริสุทธิ์เพื่อใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์ การผลิตกาบไม้ การผลิตเชื้อกระดาษ และเรซิน นอกจากนี้เทคนิคดังกล่าวยังเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่จากระบวนการ phytoremediation ในพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อน (พิชญา, 2549; Kobayashi *et al.*, 2005a)

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสัณฐานภาพของสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว
2. ศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method



การตรวจเอกสาร

1. ตะกั่ว (Lead)

1.1 ลักษณะและสมบัติของตะกั่ว

ตะกั่ว (lead) มีสัญลักษณ์ Pb โดยที่มาจากชื่อละติน plumbum ที่แปลว่า liquid silver (จิรพร, 2550) โดยตะกั่วมีลักษณะเป็นโลหะสีเทาอมน้ำเงิน ผิวหน้ามีลักษณะเป็นเงา เป็นโลหะที่รู้จักมาตั้งแต่สมัยโบราณ มีลักษณะอ่อนสามารถ ทบ รีด และตัดให้ขาดได้ง่าย เมื่อหลอมหรือถูกตัดขาดใหม่ๆ และสามารถผสมเข้ากับโลหะต่างๆ ได้ดี รวมทั้งการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเกลือของตะกั่วรูปต่างๆ ในตารางธาตุ ตะกั่วอยู่ในกลุ่ม IVA มีเลขเชิงอะตอม (atomic number) เท่ากับ 82 และน้ำหนักเชิงอะตอม (atomic weight) เท่ากับ 207.19 ความถ่วงจำเพาะ 11.34 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลวที่ 327.4 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่ 1,740 องศาเซลเซียส มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าคือ +1, +2 และ +4 โดยมักพบในรูป +2 เนื่องจากเป็นรูปที่มีเสถียรที่สุด มีไอโซโทปได้หลายไอโซโทป พบในธรรมชาติมากในรูปของ ^{194}Pb , ^{206}Pb , ^{208}Pb โดยพบร้อยละ 1.4, 25.2 และ 51.7 ตามลำดับ และไอโซโทปที่เกิดจากการสลายกัมมันตรังสี คือ ไอโซโทปที่มีน้ำหนักเชิงอะตอมเท่ากับ 195-203, 205 และ 209-214 (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ตะกั่วมีการกระจายทั่วไปในธรรมชาติโดยที่เปลือกโลกมีตะกั่วโดยเฉลี่ยประมาณ 10-15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งตามธรรมชาติตะกั่วปรากฏอยู่ในรูปธาตุอิสระในธรรมชาติมีน้อยมาก แต่จะพบในเปลือกโลกทั้งหมดจะอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ที่สำคัญ ได้แก่ แร่กาไลนา (PbS) แร่เซอรไรต์ (PbCO_3) และแร่แองกลีไซต์ (PbSO_4) ซึ่งมีธาตุตะกั่วสะสมอยู่ร้อยละ 86.6, 83.4 และ 73.6 ตามลำดับ ส่วนแร่อื่นๆ ที่พบตะกั่วได้แก่ แร่ลูไรท์ แร่กัมไมท์ และแร่จอร์แดนไนท์ เป็นต้น (เบญจลักษณ์, 2546) โดยจะสามารถพบได้ในบริเวณเดียวกับแหล่งแร่ทองแดง เงิน สังกะสี พลวง และบิสมัท (ศิรณรรณ, 2549) ซึ่งตะกั่วมีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อน ทนต่อการดัดฟลูริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดไนตริก (HNO_3) และละลายได้บ้างในสารประกอบอะซิเตท (CH_3COO^-) (ถนอมขวัญ, 2548)

1.2 การใช้ประโยชน์จากตะกั่ว

1.2.1 สารประกอบอนินทรีย์ตะกั่ว ได้แก่

(1) โลหะตะกั่ว ใช้ผสมในแท่งโลหะผสมหรือผงเชื่อมบัดกรีโลหะนำมาทำเป็นแผ่นหรือท่อโลหะใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน แผ่นกรองในอุตสาหกรรมรถยนต์ การผลิตอาวุธปืนและเครื่องกระสุน และฉนวนกันสารกัมมันตรังสี (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2552) ใช้เป็นวัสดุหุ้มสายไฟฟ้าและสายโทรคมนาคมที่มีการฝังใต้ดิน เนื่องจากคุณสมบัติของตะกั่วที่มีความยืดหยุ่น และไม่ผุกร่อน (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

(2) ออกไซด์ของตะกั่ว ได้แก่ ตะกั่วมอนอกไซด์ (lead monoxide) โดยใช้ในอุตสาหกรรมสีโดยใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน ตะกั่วไดออกไซด์ (lead dioxide) ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์ และเครื่องจักร ตะกั่วแดง หรือตะกั่วออกไซด์ (lead red oxide) ใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ สีทาโลหะเพื่อกันสนิม เครื่องแก้ว ยาง และเครื่องเคลือบ (ปราโมทย์ และ รินทวัฒน์, 2552)

(3) สารประกอบของเกลือตะกั่ว ได้แก่ ตะกั่วเหลือง (lead chromate) ตะกั่วขาว (lead carbonate) โดยใช้เป็นแม่สีหรือสีผสมในอุตสาหกรรมสี ตะกั่วซัลเฟต (lead sulfate) โดยใช้ในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ ตะกั่วแอซิเตต (lead acetate) โดยใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง สีย้อม และครีมไฝผสม ผลิตภัณฑ์สีย้อมผ้าฝ้าย สารเคลือบผิวโลหะ รวมทั้งเป็นสารทำแห้งในผลิตภัณฑ์สี น้ำมันขัดเงาและหมึก ตะกั่วซิลิเกต (lead silicate) โดยใช้ในอุตสาหกรรมกระเบื้อง และเครื่องเคลือบเซรามิกเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีผิวเรียบและเงางาม ตะกั่วไนเตรต (lead nitrate) โดยใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกและยาง รวมทั้งใช้ผลิตวัตถุระเบิด และตะกั่วอาร์ซีเนต (lead arsenate) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืช (กรมควบคุมมลพิษ, 2547; สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2552)

1.2.2 สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว ได้แก่

เตตราเอทิลเลด (tetraethyl lead) และเตตราเมทิลเลด (tetramethyl lead) โดยใช้เป็นสารกันน็อก หรือสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์เวลาทำงาน โดยผสมในน้ำมันเบนซิน เพื่อให้เชื้อเพลิงมีค่าออกเทนสูงขึ้น แต่จากผลของตะกั่วที่ออกมาจากท่อไอเสียรถยนต์จะอยู่ในรูปของตะกั่วออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดพิษต่อมนุษย์ ทำให้ในปัจจุบันได้ยกเลิกการใช้สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วดังกล่าวในการผลิตน้ำมันเบนซิน (ปราโมทย์ และ รินทวัฒน์, 2552)

1.3 ตะกั่วในดิน

เมื่อโลหะหนักมีการปนเปื้อนลงสู่ดินจะอยู่ในรูปใดรูปหนึ่งหรือหลายรูป ได้แก่ (1) รูปที่ละลายในสารละลายดิน (soluble) (2) รูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (adsorbed) (3) รูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน (fixed occluded) (4) รูปที่ตกตะกอนหรือตกตะกอนกับสารอื่น (precipitated) และ (5) รูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (organic) ซึ่งโลหะหนักรูปที่หนึ่งและสองถือเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ (mobile) ในดินพืชจึงสามารถดูดและสะสมในส่วนต่างๆ ได้ แต่เนื่องจากกระบวนการต่างๆ ในดินมีลักษณะเป็นพลวัตจึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปต่างๆ ได้ตลอดเวลา (สุกมาศ, 2540) โดยส่วนใหญ่ตะกั่วที่อยู่ในดินจะพบอยู่ในรูป Pb^{2+} มากกว่า Pb^{4+} และมีพฤติกรรมคล้ายกลุ่มโลหะแอลคาไลน์ (alkali metals) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth metals) ดังนั้นจึงเข้าแทนที่โพแทสเซียม (K) แบเรียม (Ba) สตรอนเชียม (Sr) และ แคลเซียม (Ca) ในแร่และในตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ที่ถูกดูดซับ (สุกมาศ, 2540; ถนอมขวัญ, 2548) โดยตะกั่วเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้น้อยที่สุด แต่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวภาพคล้ายกับปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) ซึ่งสภาพการละลายได้ของตะกั่วในดินจะลดลงอย่างมากโดยการใส่ปูน โดยในดินที่มีพีเอชสูงจะพบการตกตะกอนของตะกั่วในรูปไฮดรอกไซด์ (OH^-) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และมีความเสถียรค่อนข้างมาก (สุกมาศ, 2540)

โดยตะกั่วในดินที่มีอากาศจะอยู่ในรูป Pb^{2+} ส่วนตะกั่วในดินที่ไม่มีอากาศจะเปลี่ยนรูปเป็น Pb^0 , $(C_6H_5)_2Pb$, $C_6H_5Pb^+$, PbS , $(CH_3)_2Pb$, $(CH_3)Pb^+$, CH_3PbOH และ CH_3PbCl (Davies, 1980) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับและการแพร่กระจายของตะกั่วในดินคือ ค่าพีเอช (pH) ปริมาณความอุดมสมบูรณ์ในดิน (organic matter) การแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange) ของสาร

ประกอบจำพวกแมงกานีสออกไซด์ เหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และพันธะระหว่างตะกั่วกับสารอินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานจากผลการศึกษาของ Farrah and Pickering (1977) ที่พบการดูดซับของตะกั่วในดินเหนียวและสารอินทรีย์ได้ดีเมื่อดินนั้นมี pH ต่ำ และถ้าในดินมีสารประกอบจำพวกแมงกานีสออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำให้เกิด $PbOH^+$ และ $PbOH_2^+$ จึงสามารถคงอยู่ในดินได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าดินมี pH สูงจะทำให้ตะกั่วเกิดการตกตะกอนในรูปสารประกอบของ $PbOH_2$, $Pb_3(PO_4)_2$, $PbCO_3$ หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และมีความเสถียรค่อนข้างมาก รวมทั้งการมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินน้อยย่อมเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ตะกั่วเกิดละลายและแพร่กระจายในดินได้มาก โดยจากการศึกษาของ Kitagishi and Yamane (1981) พบว่าตะกั่วจะมีค่าครึ่งชีวิตของการสลายตัว (half life) ประมาณ 740-5,900 ปี และจากการศึกษาของ สุขุมาศ (2540) รายงานว่าปริมาณตะกั่วในดินฮิสโตซอลล์มีค่าเฉลี่ย 44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในดินชนิดต่างๆมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 22-29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในธรรมชาติตะกั่วในดินนั้นมีปริมาณตั้งแต่ 1.5-189 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยควรมีค่าเฉลี่ยไม่ควรเกิน 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตะกั่วในดินนี้จะมีสภาพละลายได้ต่ำมากและคงทนต่อการสลายตัวด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินจึงคงอยู่ในดินได้นาน

1.4 ตะกั่วในพืช

ตะกั่วจัดเป็นโลหะหนักที่ไม่มีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตพืช โดยตะกั่วเมื่อเข้าสู่พืชจะสะสมอยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) และคลอโรพลาสต์ (chloroplast) ตะกั่วที่เข้าทางรากส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่รากฝอยมากกว่ารากแก้ว ซึ่งพืชของตะกั่วในพืชเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของพลาสติด (plastid) โดยไปยับยั้งกระบวนการทางชีวเคมีในกระบวนการหายใจที่ไมโทคอนเดรีย ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง ยับยั้งการเจริญของรากและใบและยืดเวลาการงอกจากเมล็ด โดยระดับปกติของปริมาณตะกั่วโดยเฉลี่ยในพืชคือ 0.5-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนระดับเป็นพิษในพืชนั้นขึ้นกับพืชแต่ละชนิดที่ทนต่อสารตะกั่วไม่เท่ากัน โดยพืชสามารถรับตะกั่วจากสิ่งแวดล้อมได้ 2 ทาง คือ ทางราก จากดิน ในรูปของสารละลายตะกั่วที่อยู่ในดินและทางใบ จากอนุภาคของตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศ (สุขุมาศ, 2540; คณะกรรมาธิการวิทยาศาสตร์, 2541; ออริงค์, 2551)

1.5 การแพร่กระจายของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม

ตะกั่วสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้จากการพังทลายของเปลือกโลก และละลายลงสู่แหล่งน้ำ การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีผลทำให้ตะกั่วมีโอกาสดูดซับและเจือปนในสิ่งแวดล้อมได้เป็นจำนวนมาก รวมทั้งสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ด้วย และยังมีการนำตะกั่วมาผสมในน้ำมันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1925 จึงทำให้ตะกั่วมีการเจือปนในสิ่งแวดล้อมรวดเร็วขึ้นไม่ว่าจะเป็นการแพร่กระจายไปตามบรรยากาศ แหล่งน้ำ พื้นดินหรือในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (บวร, 2530) โดยการปนเปื้อนตะกั่วในสภาพแวดล้อมเกิดได้จากทั้งที่เป็นการปนเปื้อนจากสาเหตุการฉกฉกรรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด และที่สำคัญจากการกิจกรรมของมนุษย์ เช่น จากการถลุงแร่ และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากไอเสียรถยนต์ โดยควันพิษเป็นแหล่งแพร่กระจายตะกั่วที่สำคัญ ซึ่งตะกั่วที่เป็นสารมลพิษจากควันโรงงานส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปตะกั่ว เช่น PbS , PbO , $PbSO_4$ และ $PbO \cdot PbSO_4$ รวมทั้งการใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งกากตะกอนน้ำโสโครก (sewage sludge) และอินทรีย์วัสดุเหลือใช้ (organic waste) ต่างๆ เช่น มูลสัตว์ สารประกอบทางเคมี เช่น สารกำจัดศัตรูพืช และวัสดุเหลือใช้จากครัวเรือน (domestic waste) ที่มีการใช้สารตะกั่วเป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์โดยบริเวณที่พบปริมาณการสะสมตะกั่วมากในดิน ก็จะพบการสะสมตะกั่วมากในแหล่งน้ำและในดินตะกอนในบริเวณเดียวกันมากตามไปด้วย (ศุภมาส, 2540; เบญจลักษณ์, 2546)

1.6 ผลกระทบของตะกั่วต่อมนุษย์

พิษของตะกั่วสามารถก่อให้เกิดต่อมนุษย์นั้นสามารถจำแนกได้ตามลักษณะความรุนแรงของอาการที่พบได้ 2 รูปแบบ ได้แก่

1.6.1 พิษเฉียบพลัน

โดยมีอาการสำคัญที่พบ คือ อาการของโรคเนื่อสมองเสื่อมเฉียบพลันมักเกิดเมื่อระดับตะกั่วในเลือดสูงเกิน 120 ไมโครกรัมต่อเลือด 100 มิลลิลิตร และมักพบในเด็กอายุต่ำกว่า 3 ปี โดยอาการอาจเริ่มด้วยชักและหมดสติหรือมีอาการอื่นร่วม เช่น เมื่ออาหาร ชีด กระวนกระวาย ชีม กระสับกระส่าย อาเจียน มีอาการทักตะเลื้อยโดยเฉพาะการพูด ซึ่งอาการจะมากขึ้นเรื่อยๆ ใน 3-6 สัปดาห์ จากนั้นจึงมีอาการของโรคสมองเสื่อมตามมาใน 2-5 วัน เริ่มด้วยอาการเดินเซ อาเจียน ชีม หมดสติและชัก แต่จะไม่พบอาการปลายประสาทเสื่อม (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2552)

1.6.2 พืชเรื้อรัง โดยแสดงอาการต่อระบบต่างๆ ได้แก่

(1) ผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ระบบประสาทสมอง และกล้ามเนื้อ

มีอาการสำคัญที่พบ คือ สมองเสื่อมจากพิษตะกั่ว มีอาการหงุดหงิดง่าย กระวนกระวาย ซึม เวียนศีรษะ เดินเซหกล้มง่าย นอนไม่หลับ ความจำเสื่อม และบุคลิกภาพเปลี่ยนแปลงซึ่งในรายที่พบรุนแรงอาจมีอาการสั้นเวลาเคลื่อนไหว ชัก หมดสติ และเสียชีวิตได้ โดยผู้ป่วยที่มีอาการทางระบบประสาทส่วนกลางจะมีอัตราการตายประมาณ 1 ใน 4 ของผู้ป่วยทั้งหมด (Gosselin *et al.*, 1984; Hardman *et al.*, 1996) รวมทั้งพบอาการปวดตามกล้ามเนื้อและข้อต่างๆ ในกล้ามเนื้อที่ใช้บ่อยมักมีอาการอ่อนแรงหรือเป็นอัมพาต (IPCS, 1995)

(2) ผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหารและระบบขับถ่าย

มีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้อาเจียน โดยเริ่มแรกมักมีอาการท้องผูก แต่บางรายอาจมีอาการท้องเดิน น้ำหนักลด รู้สึกคลื่นไส้ของโลหะ ซึ่งเมื่อภาวะเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น กล้ามเนื้อหน้าท้องบีบเกร็ง และกดเจ็บ ทำให้มีอาการปวดท้องอย่างรุนแรงที่เรียกว่า โรคโคลิค (colic disease) นอกจากนี้อาจตรวจพบเส้นสีน้ำเงินปนดำที่เหงือก ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ของแบคทีเรียในช่องปากกับตะกั่ว โดยอาจพบอาการได้ถึง 8 ใน 10 ของผู้ป่วยทั้งหมดที่ได้รับตะกั่วสะสมมาก รวมทั้งอาจเกิดภาวะไตวายเรื้อรังเนื่องจากตะกั่วมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและหน้าที่ของไต โดยทำให้เซลล์ที่บุส่วนต้นของท่อภายในไตเกิดสารประกอบของตะกั่วกับโปรตีนซึ่งมีผลต่อกระบวนการสร้างพลังงานของไต รวมทั้งยังทำให้อุจจาระมีสีดำ (ไมตรี, 2531; สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2552)

(3) ผลกระทบต่อระบบโลหิต

โดยตะกั่วมีผลต่อระบบโลหิตหลายประการที่สำคัญคือ ทำให้เกิดภาวะโลหิตจางเนื่องจากตะกั่ว (lead-induced anemia) ซึ่งมีสาเหตุจากอายุของเม็ดเลือดแดงลดลง อันเกิดจากลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดแดงมีความเปราะบางมากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะซีดจากการขาดธาตุเหล็กเนื่องจากตะกั่วจะเข้าไปยับยั้งเหล็กในกระบวนการสังเคราะห์ฮีโมโกลบินในไขกระดูก โดยเข้าไปยับยั้งเหล็กในรูปเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และเอนไซม์ในกระบวนการสังเคราะห์ฮีโมโกลบินในไขกระดูก (กรมควบคุมมลพิษ, 2547; สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2552)

(4) ผลกระทบต่อระบบโครงสร้าง ระบบสืบพันธุ์ และพฤติกรรม

โดยปกติตะกั่วจะไปสะสมที่กระดูก ซึ่งถ้าร่างกายขาดแคลเซียมจะทำให้ร่างกายดึงแคลเซียมจากกระดูกมาใช้เป็นผลให้ตะกั่วกลับเข้าสู่กระแสเลือดด้วย (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2552) โดยผู้ที่ได้รับตะกั่วติดต่อกันเป็นเวลานาน อาจพบอาการเป็นหมันได้ทั้งชายและหญิงโดยเพศชายจะมีจำนวนเชื้ออสุจิน้อยอ่อนแอ และมีลักษณะผิดปกติ (Chowdhury *et al.*, 1986) ส่วนเพศหญิงจะมีความผิดปกติของประจำเดือน รังไข่ทำงานผิดปกติ และการเกิดอาการแท้ง รวมทั้งมีความเสี่ยงต่อการคลอดก่อนกำหนด (IPCS, 1995) รวมทั้งจากรายงานของ กรมควบคุมมลพิษ (2547) ที่อ้างผลการศึกษาของ Zenz *et al.* (1994) จากผลการศึกษาในคนงานที่สัมผัสกับตะกั่วในสถานที่ทำงาน และมีความเข้มข้นของตะกั่วในเลือดต่ำกว่า 80 ไมโครกรัมต่อเลือด 100 มิลลิลิตร พบว่าการสัมผัสกับตะกั่วเป็นเวลานาน ทำให้คนงานมีพฤติกรรมหลากหลาย เช่น หงุดหงิด เหนื่อยง่าย นอนหลับได้ด้อย่างง่ายดายขณะดูโทรทัศน์ และไม่สนใจกิจกรรมบันเทิงยามว่างซึ่งเป็นผลมาจากระบบประสาทส่วนกลางที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรม

2. เทคนิคการบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation)

2.1 คำจำกัดความของการบำบัดโดยใช้พืช

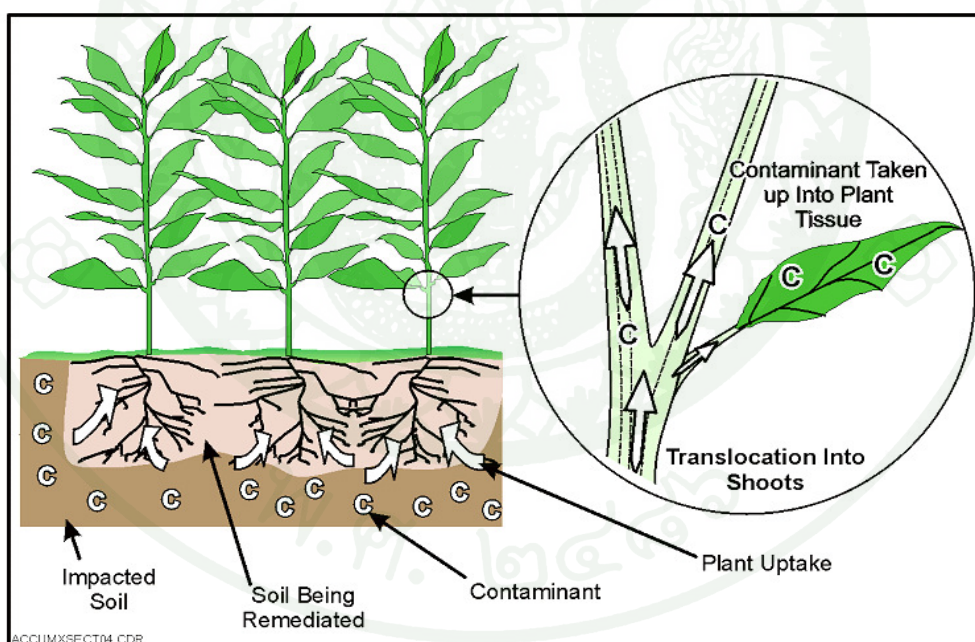
การบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation) มาจากรากศัพท์คำว่า phyto ในภาษากรีก ที่หมายถึงพืช รวมกับคำว่า remediation ในภาษาละตินที่หมายถึงการแก้ไขหรือการปิดเป่าสิ่งชั่วร้าย (Cunningham *et al.*, 1996) โดยเมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกันนั้นจะหมายถึง การนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์

ซึ่งการบำบัดโดยใช้พืชนี้เริ่มเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1990 จากการทดลองที่พบคุณสมบัติของพืชบางชนิดในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันดิบ (USEPA, 2000) ซึ่งการบำบัดโดยใช้พืชจัดเป็นวิธีการทางชีวภาพอีกวิธีหนึ่งที่อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำ และการลำเลียงแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช รวมทั้งกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชต่อการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง โดยกลไกเหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปของสารประกอบอินทรีย์ อาทิ น้ำมัน และสารกำจัดศัตรูพืช หรือ ดูดใช้และสะสมธาตุ หรือสารอนินทรีย์ที่ก่อให้เกิดพิษ ได้แก่ โลหะหนักต่างๆ เช่น ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีไว้ในลำต้น ใบ และยอด ซึ่งสารประกอบหรือโลหะหนักเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป โดยวิธีการนี้มีข้อดีคือมีค่าใช้จ่ายน้อย สามารถปฏิบัติได้ง่าย ไม่เกิดการทำลายทรัพยากรหน้าดิน และช่วยป้องกันการกระจายของโลหะหนักหรือสารมลพิษต่างๆ ที่อยู่ในดิน (บัญชาการ, 2548; พันธวิศ, 2552) รวมทั้งสามารถนำพืชภายหลังการบำบัดไปใช้ในการจัดการหรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ (Kobayashi *et al.*, 2005a, 2005b) โดยในบางครั้งอาจเรียกเทคโนโลยีในการบำบัดดังกล่าวได้ในหลายๆ ชื่อ อาทิเช่น botano-remediation, green remediation, phytotechnology หรือ phytoremediation technologies (McCutcheon and Schnoor, 2003)

2.2 วิธีการของกระบวนการบำบัดโดยใช้พืช

โดยในปัจจุบันองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (USEPA) ได้กำหนดความหมายและชนิดของกระบวนการบำบัดโดยใช้พืช 6 วิธีการ (USEPA, 1993) ได้แก่

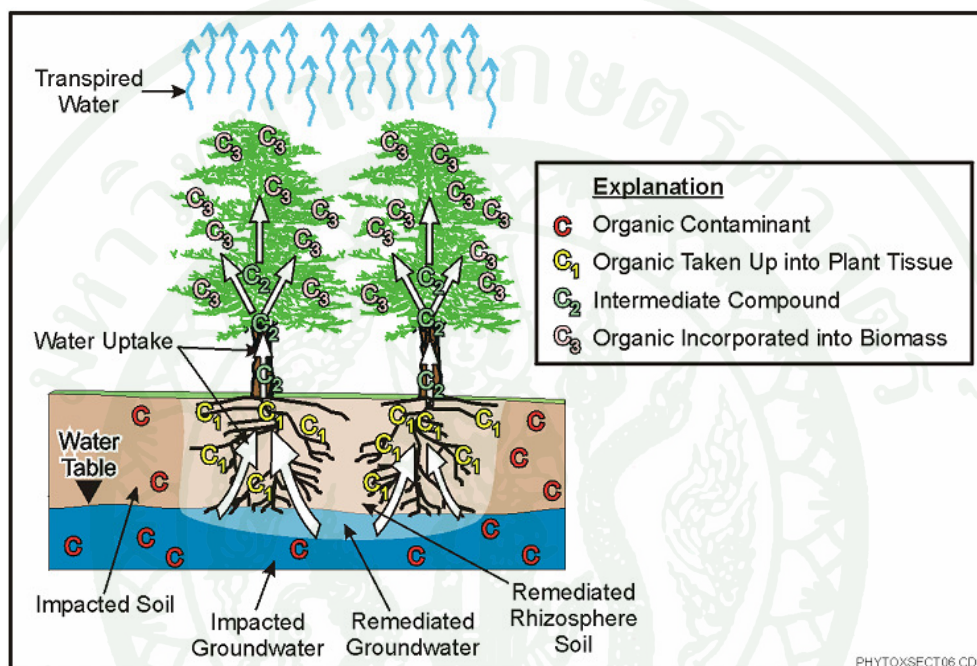
2.2.1 Phytoaccumulation (phytoextraction) เป็นกระบวนการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชที่มีความสามารถในการสะสมสารมลพิษต่างๆ ในรูปของโลหะหนัก ซึ่งพืชสามารถดูดใช้และเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดินโดยรากของพืช รวมทั้งสามารถเคลื่อนย้ายและสะสมยังไปส่วนยอดของพืชได้ โดยพืชชนิดนั้นจะต้องมีความสามารถในการทนต่อการสะสมโลหะหนักในระดับความเข้มข้นสูง อีกทั้งภายหลังจากที่พืชดูดใช้และสะสมสารพิษได้ในปริมาณที่เหมาะสมก็สามารถทำการเก็บเกี่ยวพืชชนิดดังกล่าวเพื่อนำไปจัดการต่อไปอย่างเหมาะสมต่อไปได้ (USEPA, 1993; Ensley, 2000; Pokaew, 2008) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการ phytoaccumulation

ที่มา: ITRC (2001)

2.2.2 Phytodegradation (phytotransformation) เป็นกระบวนการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชที่มีความสามารถในการดูดสารมลพิษต่างๆ ในรูปของสารอินทรีย์ แล้วทำการเปลี่ยนรูปสารมลพิษเหล่านี้ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม หรือเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง (USEPA, 1993; Cunningham *et al.*, 1996; Macek *et al.*, 2000) ดังภาพที่ 2

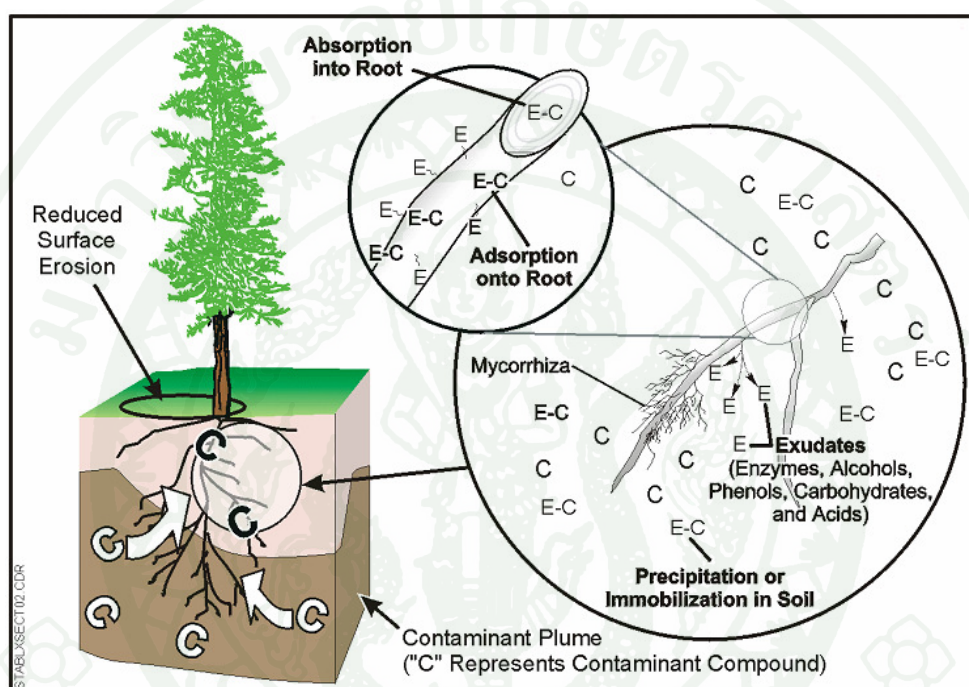


ภาพที่ 2 กระบวนการ phytodegradation

ที่มา: ITRC (2001)

2.2.3 Phytostabilization เป็นกระบวนการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุมหรือลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน ทั้งในรูปของสารอินทรีย์ และโลหะหนักด้วยการตรึงและยึดไว้ที่ราก โดยรากของพืชจะยึดและตรึงสารมลพิษไว้ที่ผิวรากพืช ทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอน โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะสามารถลดการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่างๆ ภายในดิน และขัดขวางการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนลงไปสู่ น้ำใต้ดินหรือในอากาศให้มีการเคลื่อนย้ายลดลง โดยจะต้องมีการควบคุมการชะล้างจากน้ำและไม่มีการพังทลายของดินซึ่งในกระบวนการ phytostabilization อาจแบ่งย่อยออกเป็น (1) humification เป็นกระบวนการที่สาร

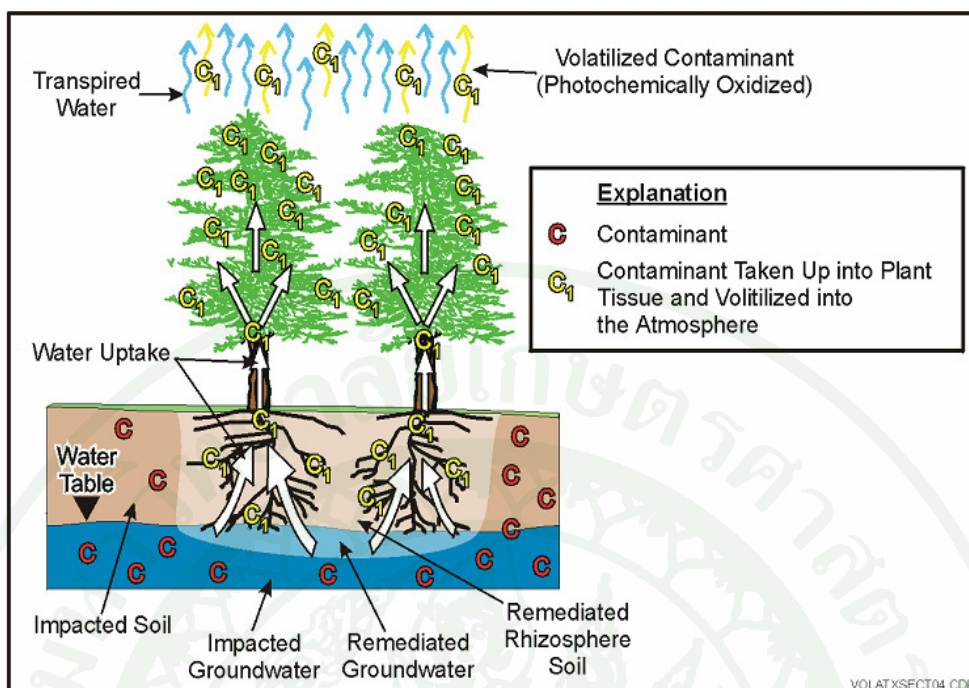
ปนเปื้อนเกิดการรวมตัวกันกับฮิวมัสภายในดิน ทำให้สารปนเปื้อนมีความสามารถในการเคลื่อนย้าย (bioavailability) ที่ลดลง (2) lignification เป็นกระบวนการที่สารปนเปื้อนถูกจับไว้กับส่วนประกอบของผนังเซลล์พืชในสภาพที่ไม่สามารถหลุดออกไปได้ และ (3) irreversible binding เป็นกระบวนการที่สารมลพิษที่อยู่ในสภาพที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงเพราะเกิดจากการรวมตัวเข้ากับดิน (พันธิวัศ, 2552; USEPA, 1993; Cunningham *et al.*, 1996; Schnoor, 2000) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการ phytostabilization

ที่มา: ITRC (2001)

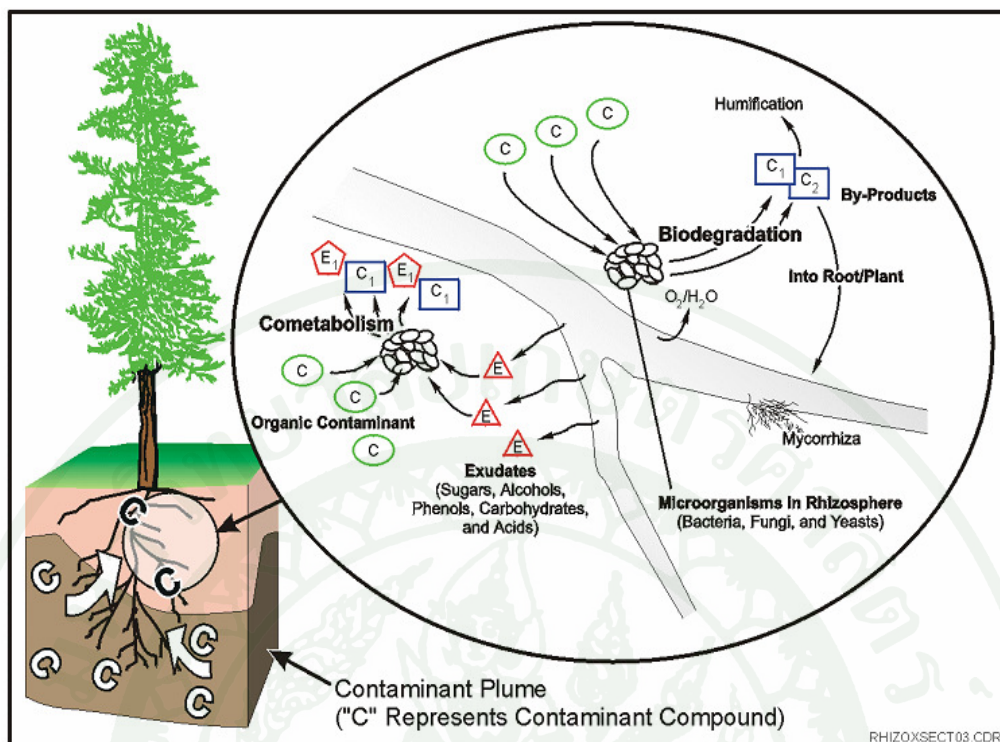
2.2.4 Phytovolatilization เป็นกระบวนการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อช่วยในการเคลื่อนย้ายสารมลพิษที่มีอยู่ในดินหรือน้ำไปสู่อากาศ โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นตามกระบวนการเจริญเติบโตของพืชยืนต้นและพืชชนิดอื่นๆ ที่มีการดูดใช้และสะสมน้ำที่มีสารอินทรีย์ และโลหะหนักเมื่อเข้าสู่ต้นพืช ซึ่งการระเหยของสารปนเปื้อนภายหลังจากการดูดใช้และสะสมอาจเกิดบริเวณส่วนยอดของพืช ส่วนราก และบริเวณพื้นผิวดิน โดยการทำงานร่วมกันกับจุลินทรีย์ภายในดินเพื่อเสริมอัตราการระเหยของสารมลพิษ (USEPA, 1993; Cunningham *et al.*, 1996; McCutcheon and Schnoor, 2003) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการ phytovolatilization

ที่มา: ITRC (2001)

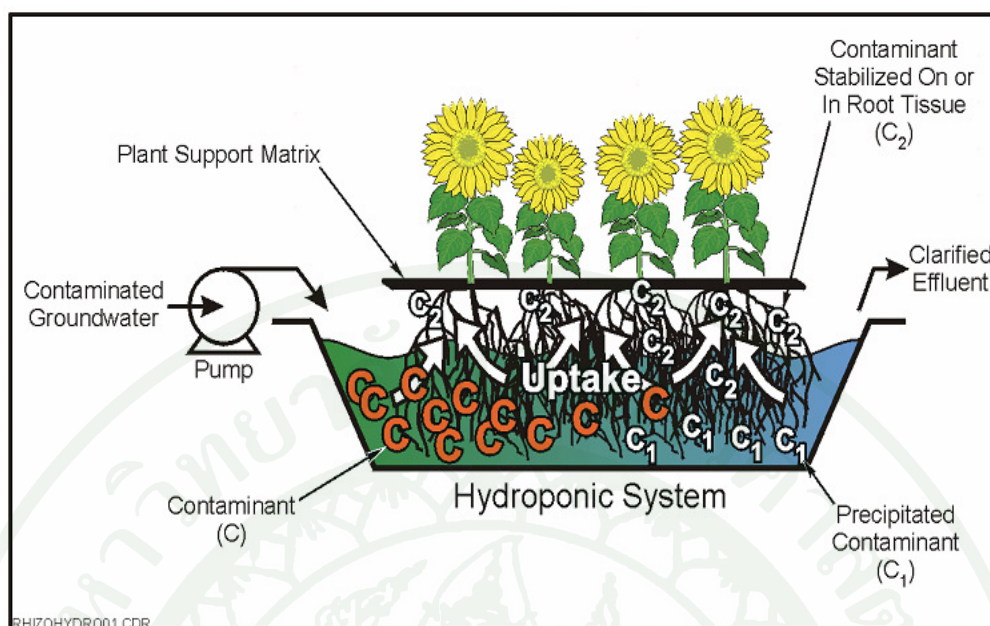
2.2.5 Rhizodegradation (phytostimulation; rhizosphere biodegradation; enhanced rhizosphere biodegradation) เป็นกระบวนการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยใช้กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่โดยรอบรากของพืช ซึ่งสามารถใช้หรือย่อยสลายสารมลพิษในรูปของสารอินทรีย์เป็นอาหาร รวมทั้งปลดปล่อยสารบางชนิดภายในตัวของจุลินทรีย์เพื่อทำลายสารมลพิษที่เกิดการปนเปื้อนรอบๆ บริเวณรากของพืชที่จุลินทรีย์อาศัยอยู่ (USEPA, 1993; Cunningham *et al.*, 1996; Pokaeo, 2008) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กระบวนการ rhizodegradation

ที่มา: ITRC (2001)

2.2.6 Rhizofiltration เป็นกระบวนการบำบัดสารมลพิษที่เกิดการปนเปื้อนในดินหรือน้ำ โดยใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารมลพิษต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์และโลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะต้องมีความเหมาะสมในการนำไปใช้กำจัดสารมลพิษต่างๆ ในแหล่งน้ำหรือในดินที่มีความชุ่มชื้นของน้ำหรือในระบบการผลิตพืชไร้ดิน (hydroponics) (พันธวิศ, 2552; USEPA, 1993) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กระบวนการ rhizofiltration

ที่มา: ITRC (2001)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดใช้และสะสมโลหะหนักโดยพืช

โดยจากการศึกษาของ บัญชาการ (2548) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดใช้และสะสมโลหะหนักโดยพืชจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับ 6 ปัจจัยหลัก ดังนี้

2.3.1 ชนิดของโลหะหนัก โดยชนิดของโลหะหนักมีส่วนสำคัญมาก ซึ่งในการที่พืชจะดูดใช้และสะสมโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดินเนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือพืชจะดูดใช้และสะสมโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว

2.3.2 รูปแบบเคมีของโลหะหนัก โดยการดูดใช้และสะสมโลหะหนักโดยพืชนั้น ส่วนใหญ่โลหะหนักที่อยู่ในรูปเกลืออนินทรีย์ (inorganic salt) ที่ละลายน้ำแล้วนั้นพืชจะสามารถดูดใช้และสะสมเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ (organic compound)

2.3.3 ชนิดของพืช โดยพืชแต่ละชนิดที่มีลักษณะทางสรีรวิทยาที่ต่างกันย่อมส่งผลให้ความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักของพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน

2.3.4 สมบัติและองค์ประกอบบางอย่างของดิน อาทิ

(1) เนื้อดิน โดยเนื้อดินที่แตกต่างกันมีผลต่อความสามารถในการเข้าถึงของรากพืช ส่งผลให้เกิดการดูดใช้และสะสมโลหะหนักได้ต่างกัน

(2) ความสามารถในการอุ้มน้ำ การที่ดินสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากจะสามารถทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปที่ง่ายต่อการดูดใช้ และพืชก็สามารถดูดใช้และสะสมได้มากขึ้นเช่นกัน

(3) ความสามารถในการดูดจับโลหะหนัก โดยดินดูดจับกับโลหะหนักไว้อย่างแน่นหนาโอกาสที่พืชจะดูดใช้และสะสมไปได้ย่อมลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงมักพบว่าพืชจะสามารถดูดใช้และสะสมโลหะหนักในดินทรายได้ดีกว่าในดินเหนียวอยู่เสมอ

2.3.5 สิ่งต่างๆ ที่เติมลงไปในดิน โดยสิ่งที่เติมเข้าไปในดินนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในพืชมาก เนื่องจากสิ่งที่เติมเข้าไบนี้อาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของโลหะหนัก และสารอาหารของพืชในดิน ทำให้พืชมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักที่ปนเปื้อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม อาทิ สารประกอบจำพวก EDTA (ethylene-diamine-tetracetic acid), HEDTA (hydroxyl-ethylene-diamine tetracetic acid), DTPA (diethylene-triaminepentaacetic acid) และปุ๋ยหมัก เป็นต้น

2.3.6 สภาพแวดล้อมอื่นๆ อาทิ

(1) อุณหภูมิ โดยอุณหภูมิมีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพืชจะดูดใช้และสะสมแคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) จากดินสู่พืชมากขึ้น

(2) ช่วงวัน โดยช่วงวันมีผลต่อการดูดใช้และสะสมโลหะหนักของพืชเช่นกัน โดยที่ช่วงวันที่ยาวกว่าพืชจะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ส่งผลให้โอกาสที่พืชจะดูดใช้และสะสมโลหะหนักออกจากดินมีสูงขึ้น

(3) ปริมาณของแสง โดยปริมาณของแสงมีส่วนในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักของพืชเช่นกัน เนื่องจากแสงที่มีความเข้มที่เหมาะสมกับพืชจะส่งเสริมความสามารถในการสังเคราะห์แสง ทำให้การดูดใช้และสะสมโลหะหนักที่อยู่ในดินเพิ่มขึ้น

(4) ความชื้นของดิน โดยความชื้นในดินมีส่วนที่พืชจะดูดใช้และสะสมโลหะหนักไปจากดิน โดยจะพิจารณาจากการออสโมซิส (osmosis) ซึ่งต้องมีความเหมาะสมของความชื้นในดินและพืชสามารถดูดซับสารต่างๆ ออกจากดิน

(5) ความชื้นในอากาศ โดยความชื้นในอากาศจะส่งผลต่อการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในดินเช่นกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศมีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากจะต่ำทำให้พืชดูดดึงสารต่างๆ ในดินได้น้อยลง

2.4 พืชที่มีลักษณะเหมาะสมในการบำบัดโลหะหนัก

ความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในพืชขึ้นกับชนิดของพืช ซึ่งพืชแต่ละชนิดที่มีลักษณะสรีรวิทยาที่ต่างกันย่อมส่งผลให้ความสามารถของพืชในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักของพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน (พันธวัศ, 2552) โดยการพิจารณาถึงชนิดพืชเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดโลหะหนักแต่ละชนิดนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้พืชที่มีลักษณะเหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ (1) มีอัตราการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว (2) มีมวลทางชีวภาพที่สูง (3) มีการแพร่กระจายของรากเป็นบริเวณกว้าง (4) ง่ายต่อการเก็บเกี่ยวภายหลังจากการบำบัด และ (5) มีความทนทานต่อความเป็นพิษของโลหะหนักและมีปริมาณการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในส่วนเหนือดินในปริมาณสูง (Clemens *et al.*, 2002) รวมทั้งจะต้องมีคุณสมบัติในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักได้ในระดับสูง (hyperaccumulator) โดยหมายถึงพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณที่มากจนผิดปกติ (พันธวัศ, 2552) ซึ่งจากผลการศึกษาของ Cunningham *et al.* (1996); Wei *et al.* (2009) พบว่าพืชที่มีคุณสมบัติเป็น hyperaccumulator นั้นจะต้องมีลักษณะทั่วไปที่ต้องเข้าเกณฑ์เกินครึ่งหนึ่ง (2 ใน 3 หรือ 3 ใน 4 ข้อ) เป็นอย่างต่ำ ตามลำดับดังนี้

(1) พืชชนิดนั้นจะต้องมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมาก โดยต้องพบปริมาณการสะสมในเนื้อเยื่อของส่วนเหนือดินที่ต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 0.0001 โดยน้ำหนักแห้ง (w/w) (1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในน้ำหนักแห้ง) ของทองคำ (Au) หรือมากกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักแห้ง (w/w) (100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในน้ำหนักแห้ง) ของแคดเมียม (Cd) หรือมากกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักแห้ง (w/w) (1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในน้ำหนักแห้ง) ของโคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) นิกเกิล (Ni) และสารหนู (As) หรือมากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแห้ง (w/w) (10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในน้ำหนักแห้ง) ของแมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) (Baker and Brooks, 1989; Baker *et al.*, 1994, 2000; Srivastava *et al.*, 2006)

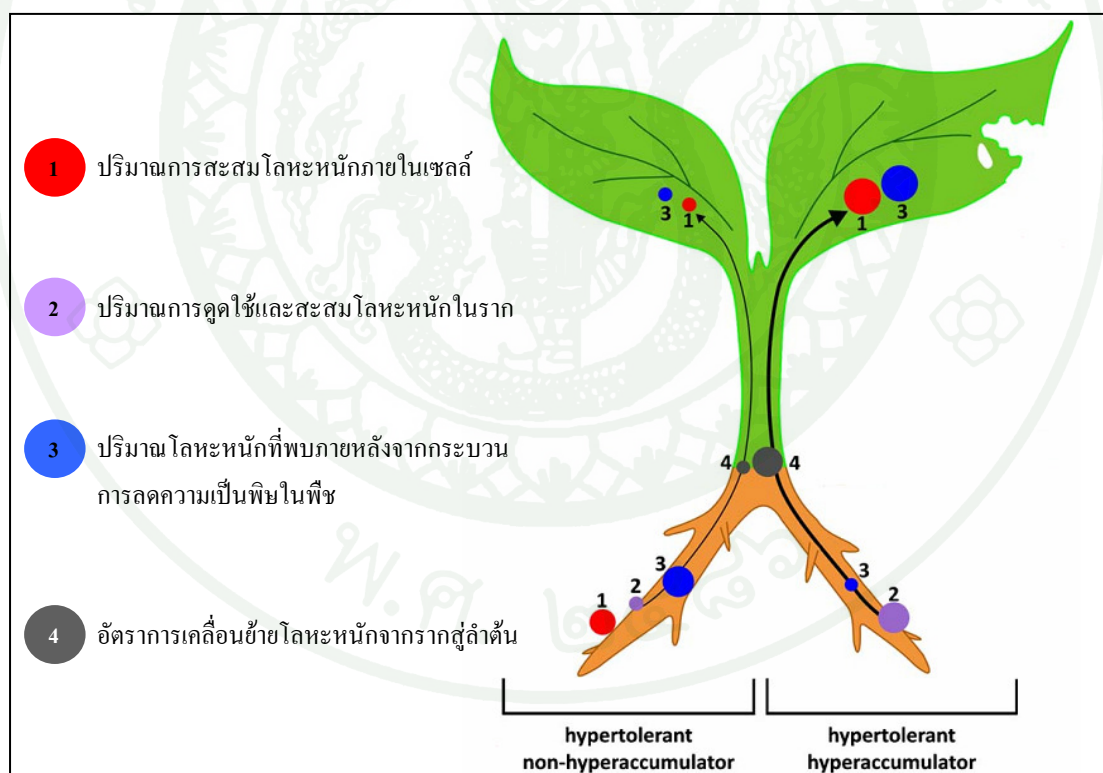
(2) พืชชนิดนั้นจะต้องมีอัตราส่วนของปริมาณโลหะหนักในส่วนเหนือดินเทียบกับปริมาณโลหะหนักในส่วนใต้ดินภายหลังการบำบัดมากกว่า 1 (translocation factor; $TF > 1$) (Mattina *et al.*, 2003)

(3) พืชชนิดนั้นจะต้องมีอัตราส่วนของปริมาณโลหะหนักในส่วนเหนือดินภายหลังการบำบัดเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่สกัดได้ในดินภายหลังการบำบัดมีค่ามากกว่า 1 (bioaccumulation factor; BAF หรือ enrichment coefficient; $R > 1$) (Deram *et al.*, 2006; Khan *et al.*, 2006; Branquinho *et al.*, 2007)

(4) พืชชนิดนั้นจะต้องมีอัตราส่วนของความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนเหนือดินภายหลังการบำบัดเทียบกับความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนเหนือดินของพืชเดียวกันที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อน (C/NC ratio) ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 10-500 เท่า (Shen and Liu, 1998)

2.5 กลไกการทนต่อโลหะหนักของพืช

พืชที่มีคุณสมบัติในการบำบัดดินที่ปนเปื้อน โดยเฉพาะพืชที่มีความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินนอกจากจะต้องมีคุณสมบัติในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อพืชได้ในปริมาณที่สูง และมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากสู่ลำต้นในอัตราที่สูงดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 ยังต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญอื่นๆ อันได้แก่ ความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่เกิดการปนเปื้อนในดินได้ในปริมาณสูง และความสามารถในการลดความเป็นพิษภายหลังจากการดูดใช้และสะสมที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถเจริญเติบโตในพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิดได้ (ภาพที่ 7) ซึ่งพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการทนต่อโลหะหนักที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกลไกทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดความเป็นพิษ หรือทำลายพิษในพืชแต่ละชนิด



ภาพที่ 7 ความแตกต่างของพืชที่มีคุณสมบัติเป็น non-hyperaccumulator (ข้าว) และพืชที่มีคุณสมบัติเป็น hyperaccumulator (ขวา)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Rascio and Navari-Izzo (2011)

โดย ยงยุทธ (2543); Tomsett and Thurmann (1988) ได้อธิบายว่าพืชในแต่ละจีโนไทป์ (geotype) จะมีความแตกต่างด้านความทนทานต่อพิษของโลหะ ซึ่งพืชที่มีความทนทานสูงย่อมสามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่างๆ ได้มากกว่าปกติซึ่งกลไกที่มีส่วนช่วยให้พืชสามารถทน (tolerance) ต่อพิษของโลหะหนักของพืชมีอยู่ด้วยกัน 6 ประเภท โดยพืชในแต่ละชนิดอาจมีกลไกในการทนต่อพิษของโลหะหนักมากกว่าหนึ่งแบบ (ภาพที่ 8) ได้แก่

(1) การเกิดกลไกการควบคุมโลหะหนักให้อยู่ในผนังเซลล์ โดยกลไกนี้มีส่วนช่วยในการลดความเป็นพิษของโลหะหนักต่อพืชได้บ้าง แต่เนื่องจากประจุที่ใช้ยึดเหนี่ยวกับโลหะหนักโดยส่วนใหญ่มีอยู่จำกัดจึงสามารถดักจับโลหะหนักไว้ที่ผนังเซลล์ได้ระดับหนึ่งเท่านั้น (หมายเลข 1)

(2) การเกิดกลไกการดูดหรือขับโลหะหนักออกไป ซึ่งกลไกนี้มีบทบาทไม่มากนักในพืชชั้นสูง (หมายเลข 2)

(3) การเกิดกลไกการขับออก โดยใช้กระบวนการขับออกแบบแอคทีฟ (active efflux) (หมายเลข 3)

(4) การเกิดกลไกการรวมตัวของโลหะหนักกับอินทรีย์สารที่ไม่ละลาย หรืออินทรีย์สารที่ละลายน้ำได้แล้วกักเก็บให้อยู่เฉพาะบางบริเวณของเซลล์ ได้แก่ แวกิวโอล (vacuole) ซึ่งกลไกในส่วนนี้มีความสำคัญมากในการลดความเป็นพิษของโลหะหนัก โดยอาศัยโปรตีนที่มีบทบาทโดยตรงในกลไกนี้คือ phytochelatins หรือ metallothioneins (หมายเลข 4)

(5) การเกิดกลไกในปฏิกิริยา chelation ระหว่างโลหะหนักกับอินทรีย์สารในบริเวณระหว่างผนังเซลล์ (cell wall) กับเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) (หมายเลข 5)

(6) การเกิดกลไกในปฏิกิริยา chelation ระหว่างโลหะหนัก กับอินทรีย์สารในไซโตพลาสซึม (cytoplasm) (หมายเลข 6)

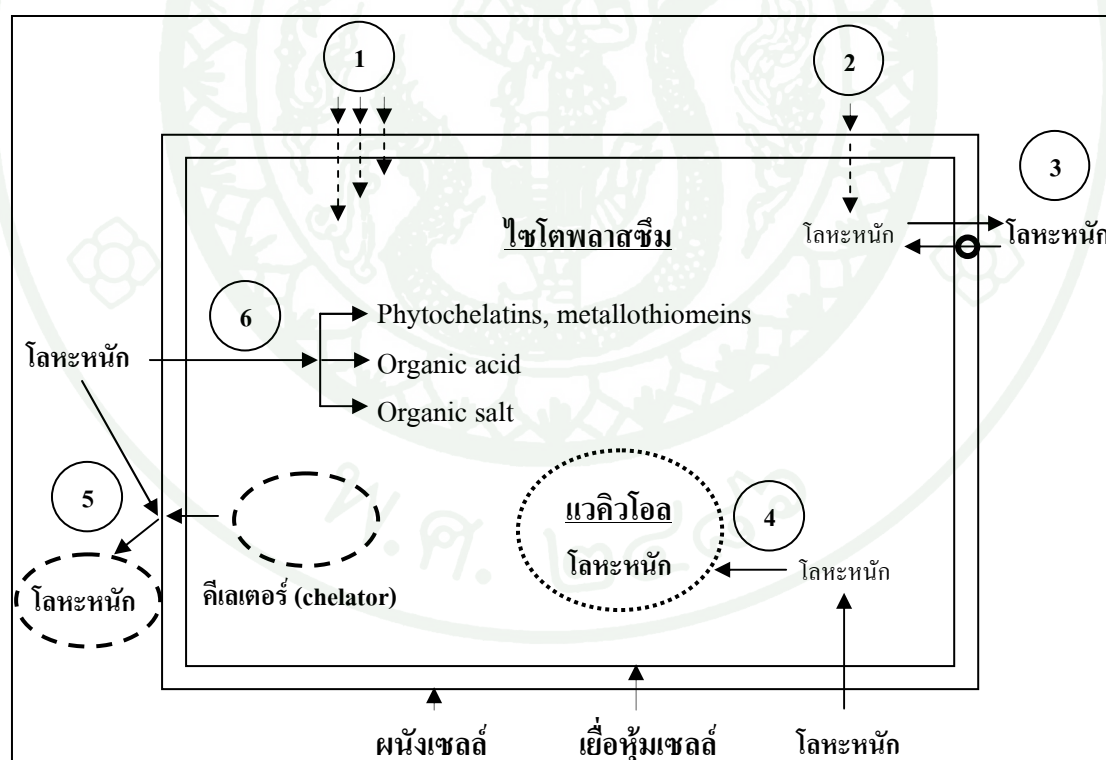
นอกจากนั้น บัญชากร (2548); Medina *et al.* (2003) ได้แบ่งลักษณะการแสดงออกของพืชเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนักในพืชไว้ 4 ประเภท ได้แก่

(1) Exclusion เป็นวิธีการที่พืชจะจดจำโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งพืชจะทำการป้องกันและลดการดูดใช้และสะสมโลหะในชนิดนั้นๆ ให้น้อยลง

(2) Amelioration เป็นวิธีการที่พืชจะลดผลของความเป็นพิษจากการดูดใช้และสะสมโลหะหนักเข้าไปโดยวิธีการต่างๆ อาทิ การสร้างคีเลต (chelate) การแพร่ไปสู่เนื้อเยื่อบริเวณอื่น การย่อยสลาย การระเหย และเคลื่อนย้ายโลหะหนักเหล่านั้นออกสู่ภายนอก เป็นต้น

(3) Avoidance เป็นวิธีการที่พืชสร้างสารเคมีที่มีผลทางกายภาพบางอย่างออกมาเพื่อป้องกันไม่ให้พืชได้รับผลกระทบจากสภาวะของความเป็นพิษของโลหะหนัก

(4) Evasion เป็นวิธีการที่พืชทำการเคลื่อนย้ายโลหะหนักไปสะสมยังบริเวณที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อต้นพืชในระดับต่ำ



ภาพที่ 8 กลไกทั้ง 6 ประเภทในการทนต่อโลหะหนักของพืช

ที่มา: คัดแปลงจาก ขงยุทธ (2543)

3. สาบเสือ

3.1 ลักษณะทางอนุกรมวิธาน

จากการศึกษาของ Boonlert (2008) พบว่าสาบเสือนี้อาจมีลักษณะทางอนุกรมวิธาน ดังนี้

Kingdom - Plantae

Subkingdom - Tracheobionta

Superdivision - Spermatophyta

Division - Magnoliophyta

Class - Magnoliopsida

Subclass - Asteridae

Order - Asterales

Family - Asteraceae

Genus - *Chromolaena*

Species - *Chromolaena odorata* L. King and H.E. Robins.

3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

สาบเสือนี้ชื่อวิทยาศาสตร์ *Chromolaena odorata* L. King and H.E. Robins มีชื่อสามัญ Siam weed, Bitter bush, Baby tea, Cariaquillo, Santa María หรือ Fleurit-Noël จัดเป็นไม้ล้มลุก แตกกิ่งก้านสาขา มีลักษณะเป็นทรงพุ่ม มีลำต้นสูง 1-2 เมตร ใบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 2 เซนติเมตร ใบเดี่ยวออกจากลำต้นที่มีข้อแบบตรงกันข้าม ขอบใบหยัก ปลายใบแหลม ฐานใบกว้าง เส้นใบเห็นชัดเจน 3 เส้น เมื่อขยี้ใบจะมีกลิ่นของน้ำมัน โดยในสมัยโบราณมีความเชื่อว่ามีกลิ่นคล้ายกับกลิ่นสาบของเสื่อ ดอกเป็นช่อสีขาว ชมพูหรือฟ้าอมม่วง ประกอบด้วยดอกย่อย 15-25 ดอก โดยสามารถมีดอกได้เมื่อมีอายุผ่านไป 5 เดือน เมล็ดมีขนาดเล็กสีน้ำตาลหรือดำ ขนาด 4-6 มิลลิเมตร (ภาพที่ 9) (Boonlert, 2008) สามารถเจริญเติบโตได้ในหลายพื้นที่ เช่น ในป่าที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,500 มิลลิเมตรต่อปี ทุ่งหญ้าและพื้นที่แห้งแล้งที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยน้อยกว่า 500 มิลลิเมตรต่อปี ในประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อินเดีย ออสเตรเลีย และบางส่วนของประเทศในทวีปแอฟริกาและอเมริกา (Wilson, 2006)



ภาพที่ 9 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสาบเสือ (*Chromolaena odorata*); (ก) ลักษณะโดยทั่วไปของลำต้น (ข) ใบและยอด (ค) ดอก (ง) เมล็ด

ที่มา: ดัดแปลงจาก สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (2554); USDA (2011)

3.3 คุณประโยชน์

จากการศึกษาของ Triratana *et al.* (1991) พบว่าใบของสารเลื้อยที่มีมีรสฝาดหอมร้อน มีสรรพคุณใช้พอกบาดแผลเพื่อห้ามเลือดที่เกิดจากอุบัติเหตุ อาทิ แผลจากทากกัด และแผลจากแมลงกัดต่อย และจากการศึกษาของ Liogier (1990) พบว่าสารสกัดจากใบใช้เป็นน้ำยาฆ่าเชื้อ รักษารักษาอาการเจ็บคอและอาการไข้ รวมทั้งจากการรายงานของ กรมส่งเสริมการเกษตร (2552) พบว่า ใบและต้นของสาบเลื้อยสามารถใช้ในการควบคุมศัตรูพืช ได้แก่ หนอนกระทู้ผัก หนอนใยผัก ค้างคาวเขียว และมอดข้าวสารได้

3.4 คุณสมบัติของสาบเลื้อยในการดูดใช้และสะสมโลหะหนัก

โดยจากการตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้องพบศักยภาพของสาบเลื้อยในการบำบัดโลหะหนัก นั้นพบว่าสาบเลื้อยมีศักยภาพในการบำบัดโลหะหนักได้ในหลายชนิด อาทิ แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) (Boonlert, 2008) รวมถึงโลหะหนักชนิดอื่นๆ ได้แก่ ซีเซียม (Cs) (Singh *et al.*, 2009) และตะกั่ว (Pb) (Rotkittikhun *et al.*, 2006; Tanhan *et al.*, 2007) จากการสำรวจสาบเลื้อยที่มีการแพร่กระจายในพื้นที่ การทดลองในระบบ hydroponics และการทดลองในสภาพควบคุมในโรงเรือน ทดลองพบว่าสาบเลื้อยมีศักยภาพในการบำบัดโลหะหนักแต่ละชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยเฉพาะคุณสมบัติของสาบเลื้อยในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งจากผลการศึกษาของ Rotkittikhun *et al.* (2006) พบการแพร่กระจายของพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว ซึ่งมีการปนเปื้อนของตะกั่วในดินในระดับสูง ในเขตพื้นที่บ้านบ่องาม อำเภอนาทอง ภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี โดยพบว่าสาบเลื้อยเป็นพืชที่มีความสามารถในการเจริญเติบโตและมีการแพร่กระจายสูงในพื้นที่จากการสำรวจพบว่าสาบเลื้อยมีศักยภาพในการสะสมตะกั่วทั้งในส่วนเหนือดิน และในส่วนใต้ดิน โดยพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยที่ 3,730 และ 9,870 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม ในน้ำหนักแห้งตามลำดับ พบค่า TF และ BAF ที่ 0.37 และ 0.03 ตามลำดับ และพบค่า C/N ratio โดยเฉลี่ยที่ 18.9 เท่า

สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tanhan *et al.* (2007) พบว่าสาบเสือมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งในข้อมูลจากการสำรวจสาบเสือที่เจริญเติบโตในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่วในเขตพื้นที่บ้านบ่องาม อำเภอนาทอง ภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต พบว่าสาบเสือที่เจริญเติบโตในพื้นที่เหมืองแร่ ณ จุดเก็บตัวอย่างในพื้นที่ลานแร่ที่ 2 มีการสะสมตะกั่วสูงถึง 1,100.8 และ 652.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินตามลำดับ โดยพบค่า TF และ BAF ที่ 1.69 และ 0.52 ตามลำดับ และพบค่า C/NC ratio โดยเฉลี่ยที่ 28.9 เท่า อีกทั้งยังพบว่าสาบเสือมีความสามารถในการทนทานต่อระดับความเข้มข้นของตะกั่วในดินที่สูงถึง 100,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมได้ และจากการศึกษาความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในระบบการบำบัดแบบไร้ดินพบว่าสาบเสือสามารถดูดใช้แคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มขึ้น โดยที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรพบการสะสมตะกั่วสูงสุดถึง 1,772.3 และ 60,655.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสาบเสือเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในส่วนของต้นพืชได้ในปริมาณมาก (hyperaccumulator) โดยเฉพาะเข้าเกณฑ์พืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง (lead hyperaccumulator)

4. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของพืชโดยวิธี steam explosion และ Wayman's method

4.1 วิธี steam explosion method

4.1.1 ประวัติความเป็นมาของวิธี steam explosion

จากการศึกษาของ พิษญา (2549); Asada *et al.* (2005) พบว่า steam explosion method หรือ เทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ เกิดขึ้นมาเมื่อประมาณ 60 ปีมาแล้ว ซึ่งมีการนำเทคนิคนี้มาใช้เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของพืช โดยการแยกองค์ประกอบของวัสดุจำพวกไม้และวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งต่อมามีการศึกษาและปรับปรุงเทคนิคดังกล่าวจนสามารถออกแบบเครื่องมือที่ทำงานได้ทั้งในรูปของกระบวนการทำงานเป็นครั้ง (batch) และการทำงานอย่างต่อเนื่อง (continuous) และด้วยระยะเวลาในกระบวนการ steaming time ไม่เกิน 10 นาที ณ ที่ไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูงจะสามารถสกัดแยก hemicellulose ออกจากส่วนประกอบของ cellulose และ lignin โดยอาศัยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำ (hydrolysis) ที่มีอุณหภูมิและเวลาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และต่อมามีการทำแยก cellulose ออกจาก lignin ภายหลังด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์

(NaOH) หรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 72 โดยปริมาตร (v/v) ดังนั้นเทคนิคนี้จึงช่วยในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ของไม้ให้อยู่ในรูป hemicellulose, cellulose และ lignin ก่อนนำไปทำเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับผลิตสารที่มีมูลค่าสูงต่อไป ซึ่งตัวแปรสำคัญของเทคนิคนี้ คือ อุณหภูมิของไอน้ำและระยะเวลาที่ใช้ในการระเบิด โดยเมื่อทำการรวมตัวแปรทั้งสองเข้าด้วยกันจะเรียกว่า ค่าแฟกเตอร์ของความรุนแรง (severity factor; Ro) โดยมีความสัมพันธ์ดังในสมการที่ 1 และ 2

$$Ro = \int_0^t \exp [(T-100)/14.75] dt \quad (1)$$

$$\log Ro = \log \{t \exp [(T-100)/14.75] \} \quad (2)$$

โดยที่ Ro คือ ค่า severity factor

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการ steam explosion (นาท)

T คือ อุณหภูมิของไอน้ำ (องศาเซลเซียส)

ปัจจุบันมักใช้ค่า Ro ที่ได้จากการคำนวณในสมการข้างต้นไปใช้ในการรายงานผลในส่วนของสถานะที่ใช้ในกระบวนการ steam explosion ของตัวอย่างพืชแต่ละชนิด หรืออาจจะระบุสถานะของระดับความดันและระยะเวลาที่ใช้กับตัวอย่างพืชแต่ละชนิดที่จำเพาะเจาะจงได้อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

4.1.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง steam explosion (พิชญา, 2549)

โดยเครื่อง steam explosion (ภาพที่ 10) มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

หมายเลข 1 คือ ถังเก็บน้ำกลั่น (water tank) ทำหน้าที่เก็บน้ำกลั่นเพื่อส่งไปยังถังให้ความร้อน

หมายเลข 2 คือ ถังให้ความร้อน (heater tank) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำในถังที่มาจากถังเก็บน้ำกลั่น

หมายเลข 3 คือ วาล์ว (valve) ทำหน้าที่ควบคุมปรับเปลี่ยนความดันของไอน้ำที่ปล่อยเข้าสู่ถังทำปฏิกิริยา

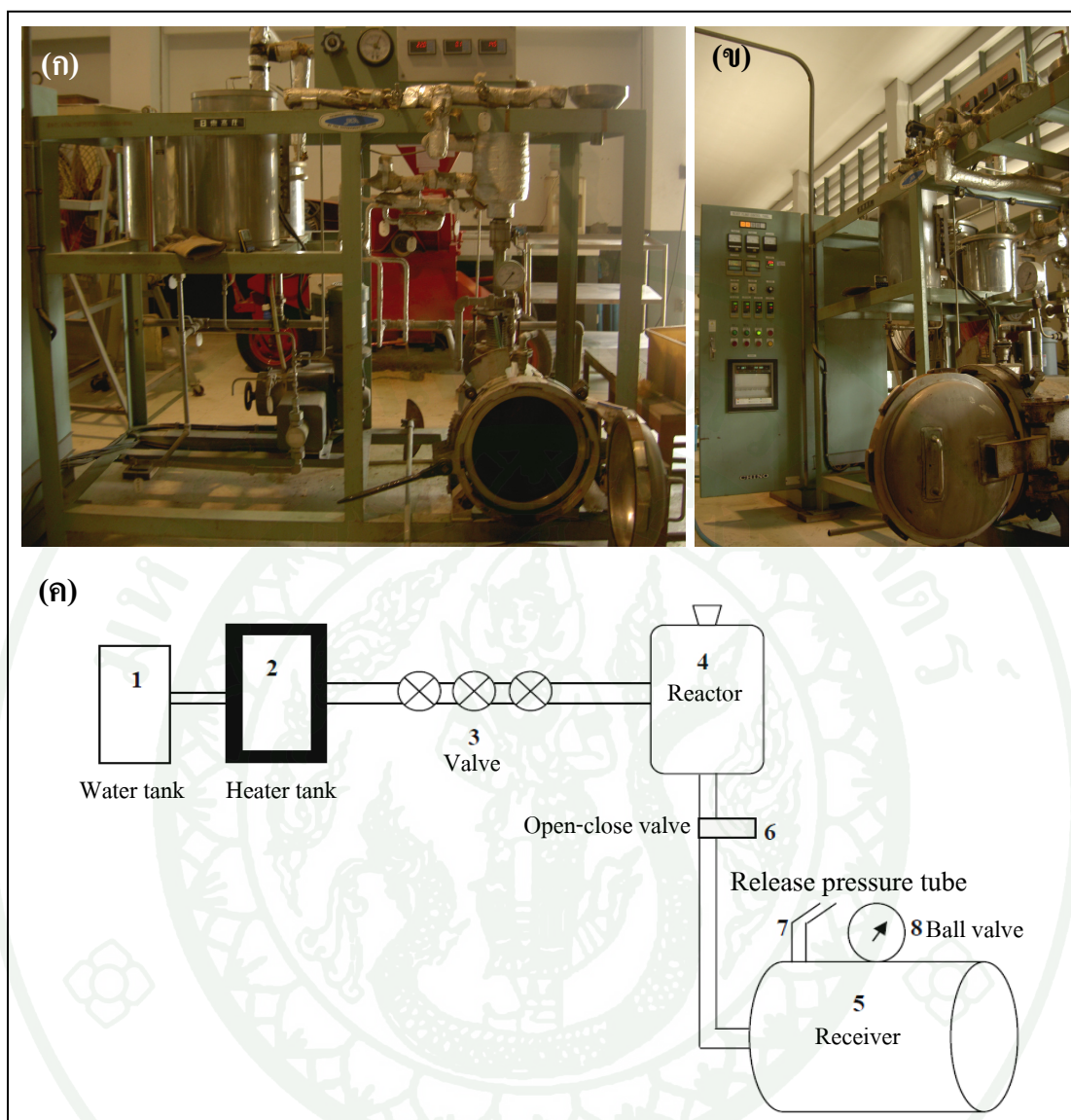
หมายเลข 4 คือ ถังทำปฏิกิริยา (reactor) ทำหน้าที่ให้ไอน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาย่อยตัวอย่างชิ้นไม้สับ หรือตัวอย่างชิ้นส่วนของพืช

หมายเลข 5 คือ ถังรองรับตัวอย่างน้ำ และเชื้อเพลิงระเบิด (receiver) ทำหน้าที่เป็นถังรองรับตัวอย่างน้ำและเชื้อเพลิงระเบิดชิ้นไม้สับ หรือตัวอย่างชิ้นส่วนของพืชด้วยไอน้ำ

หมายเลข 6 คือ วาล์วปิดเปิด (open-close valve) ทำหน้าที่เปิดให้ชิ้นไม้สับ หรือตัวอย่างชิ้นส่วนของพืชที่ระเบิดแล้วตกลงไปยังถังรองรับตัวอย่าง

หมายเลข 7 คือ ท่อปล่อยระบายความดันไอน้ำ (release pressure tube)

หมายเลข 8 คือ เครื่องวัดความดัน (ball valve) ภายในถังรองรับตัวอย่าง



ภาพที่ 10 ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่อง steam explosion; (ก) ลักษณะของเครื่องทางด้านหน้า
(ข) ลักษณะของเครื่องทางด้านข้าง (ค) ส่วนประกอบของเครื่อง

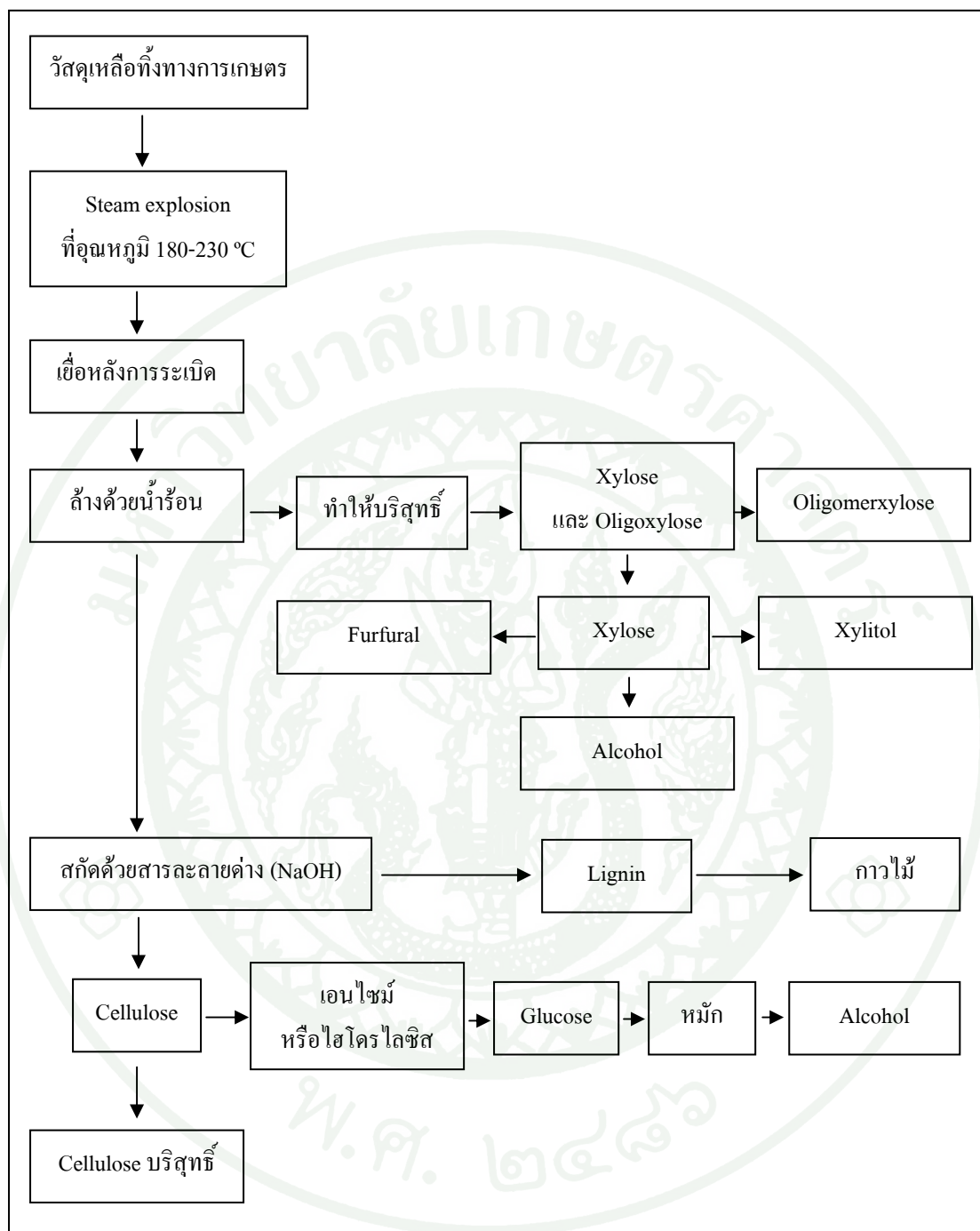
ที่มา: ดัดแปลงจาก พิษณุ (2549)

4.1.3 หลักการทำงานของเครื่อง steam explosion

เครื่อง steam explosion มีหลักการทำงาน โดยเริ่มจากน้ำจากถังหมายเลข 1 จะถูกส่งไปยังถังหมายเลข 2 ซึ่งถึงหมายเลข 2 จะมีการให้ความร้อนเกิดขึ้นเพื่อให้น้ำกลายเป็นไอน้ำตามอุณหภูมิหรือความดันที่ต้องการ โดยไอน้ำถูกส่งต่อไปยังวาล์วหมายเลข 3 ซึ่งเป็นจุดควบคุมความดันที่ปล่อยเข้าสู่ถังทำปฏิกิริยา คือ หมายเลข 4 ที่บรรจุตัวอย่างชิ้นไม้สับ หรือตัวอย่างชิ้นส่วนของพืช เมื่อเปิดวาล์วหมายเลข 3 ไอน้ำเข้าสู่ถังหมายเลข 4 จากนั้นทำการจับเวลา ณ ความดันนั้นและควบคุมความดันไอน้ำให้คงที่ตลอดเวลาโดยการปรับปล่อยวาล์วหมายเลข 3 เมื่อครบเวลาที่กำหนดเปิดวาล์วหมายเลข 6 ที่เชื่อมระหว่างถังหมายเลข 4 และ 5 ความดันจะดันตัวอย่างชิ้นไม้สับ หรือตัวอย่างชิ้นส่วนของพืชซึ่งอยู่ในถังหมายเลข 4 ลงไปยังถังหมายเลข 5 หลังจากนั้นระบายความดันออกจากถังหมายเลข 5 โดยค่าที่เครื่องวัดความดันในหมายเลข 8 จะเป็นตัววัดความดันในเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำรอนจนกระทั่งค่าความดันเป็นศูนย์ จากนั้นจึงทำการเปิดฝาดังหมายเลข 5 ออกเพื่อเอาเยื่อชิ้นไม้ภายหลังการระเบิดออกมา ดังภาพที่ 10 (พิชญา, 2549)

4.1.4 ประโยชน์ของวิธี steam explosion

วิธี steam explosion หรือวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ สามารถนำมาใช้ในการ pretreatment ในชิ้นส่วนไม้ ชิ้นส่วนตัวอย่างของพืช หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อให้ได้วัตถุดิบหรือองค์ประกอบทางเคมีหลักของพืช 3 ชนิดได้แก่ cellulose, hemicellulose และ lignin (พิชญา, 2549) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารมูลค่าเพิ่มต่างๆ ได้ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แนวทางการใช้ประโยชน์ในองค์ประกอบทางเคมีชนิดต่างๆ ของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยวิธี steam explosion

ที่มา: พิษญา (2549)

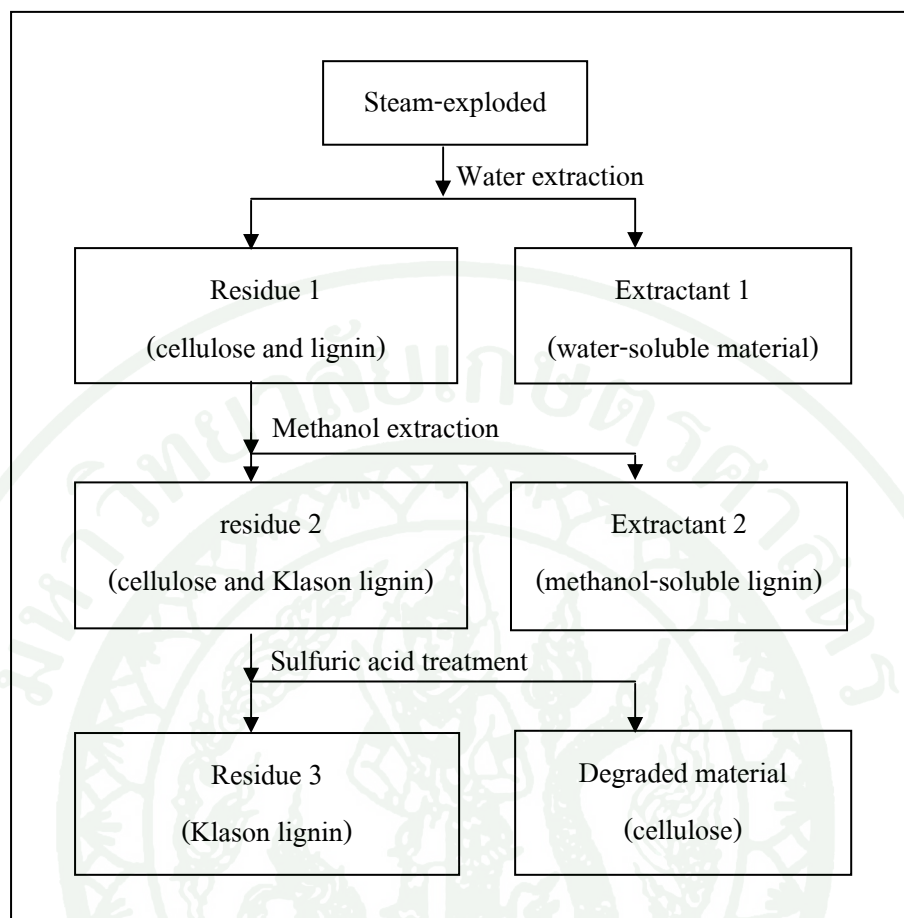
4.1.5 สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของพืชโดยวิธี steam explosion

จากการศึกษาของ Asada *et al.* (2005) พบว่าสภาวะของความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไผ่ญี่ปุ่น (*Phyllostachys pubescens*) คือที่ระดับความดัน 36 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 นาที และจากการศึกษาของ Kobayashi *et al.* (2005b) ที่ทำการศึกษาในเฟิร์นญี่ปุ่น (*Athyrium yokoscense*) พบระดับความดันที่เหมาะสมที่สภาวะความดัน 26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 3 นาที อีกทั้งจากการศึกษาของ Tanahashi *et al.* (1988) ที่ทำการศึกษาใน White Birch (*Betula platyphylla*) พบระดับความดันที่เหมาะสมที่สภาวะความดันที่ 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (อุณหภูมิ 212 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 นาที โดยใช้ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของพืชที่พบได้ภายหลังจากการวิเคราะห์เป็นดัชนีชี้วัดสภาวะที่เหมาะสม ตามวัตถุประสงค์ของการนำเศษซากวัสดุของพืชแต่ละชนิดที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ โดยสภาวะของความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่แตกต่างกันย่อมส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของพืชที่สกัดได้ภายหลังจากระบวนการ steam explosion มีความแตกต่างกัน (Kobayashi *et al.*, 2005b)

4.2 วิธีของ Wayman's

4.2.1 ประวัติความเป็นมาของวิธี Wayman's

Wayman's method เป็นเทคนิคที่เกิดขึ้นมาเมื่อประมาณ 30 ปีมาแล้วโดย M.G.S. Chua และ M. Wayman (Chua and Wayman, 1979) ซึ่งเป็นเทคนิคในการสกัดตัวอย่างชิ้นส่วนของพืชที่ผ่านกระบวนการ steam explosion โดยใช้ตัวทำละลายอย่างง่ายเพื่อแยกองค์ประกอบทางเคมีของพืชให้อยู่ในรูปของสารละลายและกากของแข็งอันได้แก่ ส่วนที่ละลายน้ำได้ (water-soluble material fraction หรือเรียกว่า hemicellulose fraction) ลิกนินที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (methanol-soluble lignin fraction) ลิกนินที่มีมวลโมเลกุลสูง (Klason lignin fraction) และเซลลูโลส (cellulose fraction) โดยใช้คุณสมบัติในการละลายของตัวทำละลายที่แตกต่างกันขององค์ประกอบเคมีแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นเป็นหลัก (Kobayashi *et al.*, 2005a) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กระบวนการ Wayman's method โดยสรุป

ที่มา: ดัดแปลงจาก Asada *et al.* (2005)

4.2.2 ประโยชน์ของวิธี Wayman's

ผลผลิตที่ได้จากการแยกองค์ประกอบทางเคมีของพืชโดยวิธี Wayman's สามารถนำมาใช้เป็นสารมูลค่าเพิ่มได้ อาทิเช่น การผลิตพลังงานเชื้อเพลิง (เอทานอลหรือมีเทน) หรือการผลิตเซลล์ulosbriสุทธิเพื่อใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์จากในส่วน water-soluble material การผลิตกรดแลคติกพร้อมกับกิจกรรมของจุลินทรีย์จากในส่วน cellulose การผลิตเรซินจากในส่วน methanol-soluble lignin หรือแม้แต่การผลิต activated carbon จากในส่วน Klason lignin (พิชญา, 2549; Asada *et al.*, 2005; Kobayashi *et al.*, 2005a) เป็นต้น

นอกจากนั้นเทคนิค steam explosion และ Wayman's method ดังกล่าวยังเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่จากพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติเป็น hyperaccumulator (Kobayashi *et al.*, 2005b) โดยจากการศึกษาของ Nishizono *et al.* (1987) ที่ทำการศึกษาปริมาณการสะสมของโลหะหนักในองค์ประกอบทางเคมีของเฟิร์นญี่ปุ่น (*Athyrium yokoscense*) ซึ่งจากการวิเคราะห์พบปริมาณโลหะหนักโดยส่วนใหญ่จะสะสมและเชื่อมติดกับในส่วนของ cellulose และ lignin ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์ในส่วนใต้ดินของพืช อีกทั้งจากการศึกษาของ Kobayashi *et al.*, (2005b) พบปริมาณการสะสมของโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) เหล็ก (Fe) และสังกะสี (Zn) ในเฟิร์นญี่ปุ่น (*Athyrium yokoscense*) โดยพบการสะสมของโลหะหนักดังกล่าวเป็นปริมาณมากในส่วน Klason lignin และในส่วน cellulose ตามลำดับ และมีการสะสมโลหะหนักเป็นปริมาณต่ำในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาปริมาณการสะสมของโลหะหนักในองค์ประกอบทางเคมีของพืชที่แตกต่างกันดังกล่าว จึงสามารถนำองค์ประกอบทางเคมีของพืชแต่ละชนิดไปใช้ในการสร้างมูลค่าเพิ่ม อาทิ การสร้างผลิตภัณฑ์จากพืชในส่วนที่พบการสะสมของโลหะหนักในปริมาณต่ำและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม หรือการนำโลหะหนักในส่วนที่พบการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูงกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ภายหลังจากกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับการเก็บตัวอย่างดิน
 - 1.1 พลั่วมือ และถุงพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่างดิน
 - 1.2 เชือกผูกถุง และปากกาเขียนชนิดติดถาวร
 - 1.3 เครื่องวัดพิกัดพื้นที่ GPS (GERMIN รุ่น etrex H, USA)
2. อุปกรณ์ภาคสนามสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำ
 - 2.1 ขวดเก็บตัวอย่างน้ำพลาสติกโพลีเอทธิลีน ขนาดความจุ 1,000 มิลลิลิตร
 - 2.2 ถุงพลาสติกชนิดทนความเย็น ขนาด 10 x 15 นิ้ว
 - 2.3 อุปกรณ์วัดคุณภาพน้ำภาคสนาม (WTW รุ่น cond 330i และ oxi 315i, Germany)
 - 2.4 conc. HNO_3 (MERCK, Germany)
 - 2.5 ปิเปต พร้อมลูกยาง
 - 2.6 น้ำแข็ง
3. อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างตะกอนดิน
 - 3.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างตะกอนดิน (grab sampler)
 - 3.2 ถุงพลาสติกชนิดรูดปิดสำหรับใส่ตัวอย่างตะกอนดิน
4. อุปกรณ์การปลูกพืชทดสอบในเรือนทดลอง
 - 4.1 ต้นพันธุ์ของสาบเสือที่ไม่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว ในเขตสายไหม กรุงเทพฯ
 - 4.2 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจากเหมืองตะกั่วแร่ของบริษัท กาญจนบุรีเอ็กโพลเรชั่น แอนด์ ไมนิ่ง (เค็มโก้) จำกัด หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอดงหลวง จังหวัดกาญจนบุรี ในบริเวณลานตะกอนทางแร่
 - 4.3 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่วในพื้นที่ผลิตผัก ในเขตอำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี
 - 4.4 ภาชนะดินเผาขนาดความจุ 15 กิโลกรัมสำหรับปลูกสาบเสือ พร้อมจานรองภาชนะ
 - 4.5 บัวรดน้ำ และช้อนปลูก
 - 4.6 ป้ายแสดงสิ่งทดลอง

5. อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

5.1 pH meter (TOA รุ่น HM-7E, Japan)

5.2 EC meter (SCHOTT รุ่น CG 855, Germany)

5.2 Fume hood (BOSS TECH, Thailand)

5.3 Block digester (VELP รุ่น DK 20 และ DK 42/26, Italy)

5.4 Micro-Kjeldahl distillation apparatus

5.5 Spectrophotometer (MILTON ROY รุ่น spectronic 21, USA)

5.6 Atomic absorption spectrophotometer (VARIAN รุ่น AA240, Australia)

5.7 Steam explosion apparatus ชนิดทำงานเป็นครั้ง (batch) ที่ขนาดความจุ 2.5 ลิตร (Nitto Koatsu Company, Japan)

5.8 Soxhlet extraction apparatus (BUCHI รุ่น B-811 Standard, Switzerland)

5.9 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (PRESICA รุ่น 120A, USA)

5.10 เครื่องเขย่า (INNOVA รุ่น 2100, USA)

5.11 กระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (ADVANTEC, Japan)

5.12 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิสำหรับอบตัวอย่างพืช (MEMMERT รุ่น TV 80b, Western Germany)

5.13 ตู้อบตัวอย่าง incubator (BINDER รุ่น FED 53, Germany)

5.14 ครกสำหรับบดตัวอย่างดิน

5.15 เครื่องบดตัวอย่างพืช (POLYMIX รุ่น PX-MFC, Switzerland)

5.16 ตะแกรงร่อนดินขนาด 2, 0.4 และ 0.25 มิลลิเมตร (10, 40 และ 60 mesh) (ENDOCORIS, England)

5.17 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณตะกั่วจากตัวอย่างดิน ตะกอนดิน น้ำ พืช และองค์ประกอบทางเคมีของพืช (รายละเอียดดังภาคผนวก ก)

5.18 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของพืช

5.18.1 น้ำกลั่น

5.18.2 H_2SO_4 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 72 โดยปริมาตร (v/v) (J.T. BAKER, USA)

5.18.3 CH_3OH บริสุทธิ์ (GC grade) (MERCK, Germany)

5.19 เครื่องแก้วสำหรับการทดลองและการวิเคราะห์ (PYREX, USA)

5.20 อุปกรณ์อื่นๆ สำหรับการทดลองและการวิเคราะห์

วิธีการ

1. การทดลองที่ 1 การสำรวจพื้นที่เหมืองแร่ที่ปนเปื้อนตะกั่ว และวิเคราะห์สมบัติของดิน ตะกอนดิน น้ำ และพืชที่พบในพื้นที่

1.1 การสำรวจพื้นที่

ทำการสำรวจลักษณะที่ตั้งและข้อมูลโดยสังเขปของพื้นที่โดยใช้ข้อมูลรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (EIA) ของบริษัทเทสโก้ ในปี พ.ศ. 2529 ซึ่งเป็นบริษัทที่ได้รับการว่าจ้างในการเขียนรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการประกอบกิจการการทำเหมืองแร่ตะกั่วในพื้นที่ รวมทั้งการสำรวจลักษณะทางกายอื่นๆ ของพื้นที่เหมืองโดยตรง

1.2 การเก็บตัวอย่างดิน ตะกอนดิน น้ำ และพืชในพื้นที่

1.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน สุ่มเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่เหมืองที่ปนเปื้อนตะกั่ว ได้แก่ พื้นที่โรงแต่งแร่ ลานแร่ และลานตะกอนหางแร่ ทำการเก็บดินที่ความลึก 0-30 เซนติเมตร โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มตลอดทั้งพื้นที่ที่กำหนดไว้ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินไม่น้อยกว่า 15 จุดต่อหนึ่งพื้นที่ที่ทำการสำรวจ และทำการฉางหญ้า กวาดเศษซากพืชหรือวัสดุที่อยู่ผิวหน้าดินออกเสียก่อน แล้วจึงใช้จอบ เสียม หรือพลั่วขุดหลุมเป็นรูปตัว V ให้มีความลึกในแนวดิ่งประมาณ 30 เซนติเมตร จากนั้นจึงนำทุกตัวอย่างนำมาผสมกันเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างดินในแต่ละพื้นที่ ทำการเก็บตัวอย่างดินจำนวน 2 กิโลกรัมโดยประมาณ จากนั้นนำมาผึ่งลมให้แห้ง บดและร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 และ 0.25 มิลลิเมตร (10 และ 60 mesh) (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

1.2.2 การเก็บตัวอย่างตะกอนดิน สุ่มเก็บตัวอย่างตะกอนดินจากบ่อคัดตะกอนที่ 1 และ 2 ตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณเหมือง สุ่มเก็บตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือเก็บตะกอนดิน ทำการเก็บบริเวณพื้นที่ท้องน้ำที่ความลึก 15 เซนติเมตรนับจากพื้นท้องน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนดินเป็นจำนวน 5 จุดต่อหนึ่งพื้นที่ที่ทำการสำรวจ ในลักษณะรูปกากบาทเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างตะกอนดินในแต่ละพื้นที่ ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนดินจำนวน 2 กิโลกรัมโดยประมาณ จากนั้นนำมาผึ่งลมให้แห้ง และทำการกำจัดซากพืชและซากสัตว์ออกภายหลังการบดและร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 และ 0.25 มิลลิเมตร (10 และ 60 mesh) (คัดแปลงจาก ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2551)

1.3 การเก็บตัวอย่างน้ำ สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อดักตะกอนที่ 1 และ 2 ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณเหมืองโดยทำการเก็บตัวอย่างตำแหน่งเดียวกันกับบริเวณที่ทำการเก็บตะกอนดิน สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณผิวน้ำที่ความลึก 30 เซนติเมตรนับจากผิวน้ำโดยระวังไม่ให้อากาศเข้าไปในขวดเก็บตัวอย่างน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างในลักษณะเช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างตะกอนดินเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างน้ำในแต่ละพื้นที่ จากนั้นทำการวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (dissolved oxygen; DO) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ (total dissolved solid; TDS) และอุณหภูมิของน้ำ (temperature) โดยทำการตรวจวัดทันทีด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพน้ำภาคสนาม จดบันทึกค่าที่ได้ แล้วจึงทำการใส่ conc. HNO_3 จำนวน 2 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุตัวอย่างให้มีค่าพีเอช (pH) ต่ำกว่า 2 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะหนักของตัวอย่างน้ำ และการดูดซึมโลหะหนักโดยผิวของภาชนะระหว่างรอวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยแช่ขวดตัวอย่างไว้ในน้ำแข็งเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในน้ำตัวอย่าง (ดัดแปลงจาก APHA, AWWA and WEF, 2005)

1.4 การเก็บตัวอย่างพืช สุ่มเก็บตัวอย่างพืชแต่ละชนิดที่พบในพื้นที่โดยกำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่างเช่นเดียวกับวิธีการเก็บตัวอย่างดิน ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างพืชแต่ละชนิดที่มีการแพร่กระจายอยู่ให้ทั่วในพื้นที่ทำการสำรวจ แล้วนำตัวอย่างพืชชนิดเดียวกันมาผสมกันเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างพืชแต่ละชนิดที่พบในแต่ละพื้นที่ โดยในการเก็บตัวอย่างให้แยกส่วนเหนือดิน (aboveground part) ได้แก่ ลำต้น ใบ ดอก และส่วนใต้ดิน (underground part) ได้แก่ ราก อย่างละ 1 กิโลกรัมต่อพืชหนึ่งชนิดที่พบในพื้นที่ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างไว้ในถุงกระดาษ ผึ่งลมให้แห้ง และนำไปอบจนตัวอย่างแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน หรือจนกว่าตัวอย่างมีจะน้ำหนักคงที่ ทำการบดจนละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 0.4 มิลลิเมตร (> 40 mesh) เก็บตัวอย่างพืชที่ผ่านการบดและร่อนไว้ในถุงกระดาษ และควรอบตัวอย่างพืชที่บดแล้วอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในโถสุญญากาศ (desiccators) ก่อนนำมาชั่งเพื่อทำการวิเคราะห์ (ทัศนีย์ และ จงรักย์, 2551)

1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดิน

โดยทำการวิเคราะห์เนื้อดินโดยวิธีปิเปต (Kilmer and Alexander, 1949; Day, 1965) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.6 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการของดิน และตะกอนดิน ได้แก่

1.6.1 ค่าพีเอช (pH) ทำการวัดค่า pH ของสารละลายดินโดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ด้วยเครื่อง pH meter (ทศนิยม และ จงรักย์, 2542) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.6.2 ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC) ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สกัดจากดินซึ่งอิมตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสด้วยเครื่อง electricity conductometer (ทศนิยม และ จงรักย์, 2542) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.6.3 ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity; CEC) ทำการวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน โดยการซึมชะไอออนบวกด้วยสารละลาย 1 N NH_4OAc ที่ pH 7.0 และแทนที่ NH_4^+ ด้วย acidified NaCl ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร (v/v) (ดัดแปลงจาก Chapman, 1965) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.6.4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter; OM) ทำการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุโดยใช้ oxidizing agent (1N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) และ conc. H_2SO_4 และหาจุดยุติของปฏิกิริยาด้วย 0.5N FeSO_4 (ทศนิยม และ จงรักย์, 2542; Walkley and Black, 1934) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.6.5 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen; total N) ทำการย่อยสลายตัวอย่างด้วย digestion mixture (Na_2SO_4 , selenium และ conc. H_2SO_4) และทำการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี micro-Kjeldahl (ดัดแปลงจาก ทศนิยม และ จงรักย์, 2542) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.6.6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus; available P) ทำการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์โดยใช้สารสกัด Bray II และทำการวัดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร (Bray and Kurtz, 1945) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.6.7 ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (available potassium; available K) ทำการวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โดยใช้สารสกัด 1N NH_4OAc ที่ pH 7 แล้ววัดหาปริมาณโพแทสเซียมด้วย atomic absorption spectrophotometer (AAS) (ดัดแปลงจาก ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Pratt, 1965) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.7 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในดิน ตะกอนดิน น้ำ และพืช ได้แก่

1.7.1 ตะกั่วที่สกัดได้ (available lead; available Pb) ทำการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่สกัดได้ในดินและตะกอนดิน โดยใช้สารสกัด 0.005M DTPA ที่ pH 7.3 และทำการวัดปริมาณตะกั่วด้วย AAS (Lindsay and Norvell, 1978) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

1.7.2 ตะกั่วทั้งหมด (total lead; total Pb) ทำการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน ตะกอนดิน น้ำ และพืชด้วย digestion mixture (HNO_3 และ HClO_4 ในอัตราส่วน 5:2) และทำการวัดปริมาณตะกั่วด้วย AAS (ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Michael, 1982) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

2. การทดลองที่ 2 การศึกษาศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

2.1 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว หมายถึง ดินจากบริเวณลานตะกอนหางแร่ในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว ตำบลชะแล อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 75,529.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางผนวกที่ ข3) โดยมีปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ที่กำหนดปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินไม่เกิน 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2554ก)

2.1.2 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว หมายถึง ดินจากพื้นที่ผลิตผัก อำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 37.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางผนวกที่ ข3) โดยมีปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ที่กำหนดปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2554ก)

2.2 การวางแผนการทดลอง

2.2.1 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว

ตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนตะกั่ววางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ทำการทดลองศึกษาสภาพในการบำบัดดินด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัดแตกต่างกัน จำนวน 6 ดำรับการทดลอง ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน
 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 วัน
 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน
 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 60 วัน
 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 75 วัน
 ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 90 วัน

2.2.2 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว

ตัวอย่างดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ววางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลองศึกษาสภาพในการบำบัดดินด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัดแตกต่างกัน จำนวน 6 ดำรับการทดลอง ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน
 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 วัน
 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน
 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 60 วัน
 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 75 วัน
 ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาในการบำบัด 90 วัน

2.2 การดำเนินการทดลอง

2.2.1 การเตรียมดิน นำตัวอย่างดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วที่เก็บได้จากพื้นที่ศึกษา ทำการผึ่งให้แห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 7-10 วัน และคลุกเคล้าดินให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นชั่งใส่กระถางดินเผาในปริมาณ 15 กิโลกรัมต่อกระถาง เป็นจำนวนทั้งสิ้น 36 กระถาง (36 หน่วยการทดลอง)

2.2.2 นำดินสาบเสือที่คัดเลือกจากพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว โดยทำการคัดเลือกต้นพันธุ์สาบเสือที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในพื้นที่แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร ตั้งอยู่ในพิกัดละติจูดที่ 13 องศาเหนือ 90 องศา 23 ลิปดา และลองจิจูดที่ 100 องศาตะวันออก 63 ลิปดา 11 ลิปดา ทำการคัดเลือกต้นพันธุ์สาบเสือที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 3 มิลลิเมตร และทำการตัดแต่งกิ่งให้มีความคล้ายคลึงและมีความสูง 30 เซนติเมตรในทุกๆ ต้น จากนั้นทำการย้ายลงในกระถาง ควรใช้เวลาในการเคลื่อนย้ายต้นพันธุ์จากพื้นที่ที่ไม่ปนเปื้อนและทำการลงปลูกไม่เกิน 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการบอบช้ำ และลดปัญหาการชะงักการเจริญเติบโตของต้นพันธุ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.2.3 ทำการเก็บเกี่ยวต้นสาบเสือหลังจากการบำบัด ณ เวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วันหลังจากเริ่มทำการปลูก ทำการเก็บเกี่ยวในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน จากนั้นล้างด้วยน้ำกรอง 2 ครั้ง ทำการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการเก็บตัวอย่างพืช บันทึกรายละเอียดทั้งหมดที่ได้ และเก็บตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วของต้นสาบเสือภายหลังการเก็บเกี่ยว และปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของต้นสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

2.2.4 ทำการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดจากسابเสื่อภายหลังการเก็บเกี่ยวโดยวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วทั้งหมดของسابเสื่อ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในการทดลองที่ 1.7.2

2.3 การคำนวณ

2.3.1 ค่า translocation factor (TF) สามารถคำนวณได้จาก

$$TF = C_{\text{aboveground}} / C_{\text{underground}}$$

โดย $C_{\text{aboveground}}$ คือ ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วของพืชในส่วนเหนือดิน
 $C_{\text{underground}}$ คือ ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วของพืชในส่วนใต้ดิน (Mattina *et al.*, 2003)

2.3.2 ค่า bioaccumulation factor (BAF) หรือ enrichment coefficient (R) สามารถคำนวณได้จาก

$$BAF \text{ or } R = C_{\text{aboveground}} / C_{\text{soil}}$$

โดย $C_{\text{aboveground}}$ คือ ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วของพืชในส่วนเหนือดิน
 C_{soil} คือ ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินที่สกัดได้ (Deram *et al.*, 2006; Khan *et al.*, 2006; Branquinho *et al.*, 2007)

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (SPSS Inc, Chicago, IL, USA)

3. การทดลองที่ 3 การศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

3.1.1 การศึกษาระดับของความดันที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างต้นสาบเสือจากพื้นที่ไม่ปนเปื้อนจากบริเวณเดียวกันกับที่ทำการคัดเลือกต้นพันธุ์ในการทดลองที่ 2.2.2 โดยคัดเลือกเฉพาะในส่วนเหนือดิน ทำการสับตัวอย่างให้มีความยาว 3.5-4 เซนติเมตร และมีความกว้างไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร นำมาชั่งน้ำหนักแห้งจำนวน 50 กรัม นำตัวอย่างที่เตรียมเข้าเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำมีขนาดความจุ 2.5 ลิตร โดยควบคุมระยะเวลาที่ 3 นาที ภายใต้ระดับความดันต่างๆ ดังนี้

ความดัน 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (198 องศาเซลเซียส)

ความดัน 17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (203 องศาเซลเซียส)

ความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (209 องศาเซลเซียส)

ความดัน 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (214 องศาเซลเซียส)

ความดัน 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (219 องศาเซลเซียส)

จากนั้นนำตัวอย่างสาบเสือที่ได้ภายหลังจากกระบวนการ steam explosion ทำการผึ่งแดดให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำไปอบจนตัวอย่างแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน หรือจนกว่าตัวอย่างมีจะน้ำหนักคงที่ บดจนละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานให้มีขนาด 0.4-0.25 มิลลิเมตร (40-60 mesh) (TAPPI, 1996) ทำการสกัดเพื่อแยกองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี Wayman's method (ดัดแปลงจาก Chua and Wayman, 1979; TAPPI, 1983; Asada *et al.*, 2005) ตามลำดับ ดังนี้

(1) water-soluble material fraction

นำตัวอย่างที่ได้ภายหลังจากกระบวนการ steam explosion ที่ผ่านการบดและคัดขนาดจำนวน 3 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 180 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงทำการกรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาด 40-100 ไมโครเมตร โดยของเหลวที่ได้ คือ water-soluble material fraction นำกากของแข็งและส่วนที่ละลายน้ำได้ยาลงในถ้วยกระเบื้องที่ผ่านการอบ และทราบน้ำหนักที่แน่นอน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 ± 5 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จนตัวอย่างแห้งสนิท ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccators จดบันทึกน้ำหนักที่ได้ จากนั้นทำการคำนวณปริมาณ water-soluble material ที่ได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณ water-soluble material ที่สกัดได้ (ร้อยละ)} = \frac{A}{B} \times 100$$

โดยที่ A = ปริมาณ water-soluble material อบแห้งหลังสกัด (กรัม)

B = น้ำหนักผงตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)

(2) methanol-soluble lignin fraction

นำกากของแข็งที่ไม่ละลายในส่วน water-soluble material ที่ผ่านการอบแห้งจำนวน 2 กรัม ใส่ในกระดาษกรองรูปกรวยสำหรับสกัด (soxhlet thimble) นำถ้วยสกัด (soxhlet extraction cup) ที่ผ่านการอบแห้งและทราบน้ำหนักที่แน่นอน ติดตั้งเครื่องสกัดสารแทรก (soxhlet extraction) ทำการสกัดด้วย CH_3OH บริสุทธิ์ (GC grade) จำนวน 200 มิลลิลิตร ทำการสกัดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (30 รอบ) โดยควบคุมอุณหภูมิและจุดเดือดของตัวทำละลาย รวมทั้งรักษาระดับการชะล้างของสารละลายให้คงที่ โดยสารละลายที่ได้ภายหลังจากการสกัดนี้ คือ methanol-soluble lignin fraction ทิ้งไว้ให้เย็นสักครู่ จากนั้นทำการกรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาด 40-100 ไมโครเมตร นำกากของแข็งล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วทำการต้มเพื่อไล่ CH_3OH ที่ติดอยู่เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำทั้งกากของแข็ง และส่วนที่ละลายใน CH_3OH ยาลงในถ้วยกระเบื้องที่ผ่านการอบและทราบน้ำหนักที่แน่นอน ทำการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จนตัวอย่างแห้งสนิท ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccators จดบันทึกน้ำหนักที่ได้ จากนั้นทำการคำนวณปริมาณ methanol-soluble lignin ที่ได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณ methanol-soluble lignin ที่สกัดได้ (ร้อยละ)} = \frac{A}{B} \times 100$$

โดยที่ A = ปริมาณ methanol-soluble lignin อบแห้งหลังสกัด (กรัม)

B = น้ำหนักผงตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)

(3) Klason lignin และ cellulose fraction

น้ำหนักของแข็งที่ไม่ละลายในส่วน methanol-soluble lignin ซึ่งผ่านการอบแห้งจำนวน 0.5 กรัม ทำการละลายตัวอย่างด้วย สารละลายกรด H_2SO_4 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 72 โดยปริมาตร (v/v) จำนวน 7.5 มิลลิลิตร คนให้กระจายสม่ำเสมอ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 8 องศาเซลเซียส และทำการคนทุกๆ 15 นาที จนครบ 2 ชั่วโมงจนแน่ใจว่าเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ จากนั้นเทสารละลายใน Erlenmeyer flask ขนาด 1 ลิตร แล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 280 มิลลิลิตร ทำการต้มจนเดือดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงโดยทำการหล่อเย็นควบคู่กับการต้มเพื่อไม่ให้เกิดการระเหยของสารละลายตัวอย่าง จากนั้นจึงตั้งทิ้งเพื่อให้สารละลายเกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 1 คืน โดยตะกอนที่ได้นี้คือ Klason lignin fraction และสารละลายที่ได้นี้คือ cellulose fraction แล้วจึงทำการกรองตะกอนด้วยถ้วยกรอง (crucible grass) เบอร์ 4 ที่ผ่านการอบและทราบน้ำหนักที่แน่นอน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จนตัวอย่างแห้งสนิท ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccators จดบันทึกน้ำหนักที่ได้ จากนั้นทำการคำนวณปริมาณ Klason lignin และ cellulose ที่ได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณ Klason lignin ที่ได้ (ร้อยละ)} = \frac{A}{B} \times 100$$

โดยที่ A = ปริมาณ Klason lignin อบแห้ง (กรัม)

B = น้ำหนักผงตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)

$$\text{และปริมาณ cellulose ที่ได้จากการคำนวณ (ร้อยละ)} = 100 - A - B - C$$

โดยที่ A = ร้อยละของปริมาณ water-soluble material ที่สกัดได้

B = ร้อยละของปริมาณ methanol-soluble lignin ที่สกัดได้

C = ร้อยละของปริมาณ Klason lignin ที่สกัดได้

3.1.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

ในการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสกัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method นี้ ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างต้นสาบเสือจากพื้นที่ไม่ปนเปื้อนจากบริเวณเดียวกันกับบริเวณที่ทำการคัดเลือกต้นพันธุ์ในการทดลองที่ 2.2.2 เช่นเดียวกับการในส่วนของการศึกษาระดับของความดันที่เหมาะสม โดยใช้ระดับของความดันที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.1.1 เป็นตัวควบคุมระดับของความดัน แล้วจึงทำการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ ดังนี้

ความดันที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.1.1 ที่เวลา 1 นาที
ความดันที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.1.1 ที่เวลา 3 นาที
ความดันที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.1.1 ที่เวลา 5 นาที
ความดันที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.1.1 ที่เวลา 7 นาที
ความดันที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.1.1 ที่เวลา 9 นาที

จากนั้นนำตัวอย่างสาบเสือที่ได้ภายหลังจากกระบวนการ steam explosion ทำการวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบเคมีของสาบเสือที่ระยะเวลาต่างๆ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.1.1

3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose ของสาบเสือหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลองด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

นำตัวอย่างสาบเสือที่ได้ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน จากการทดลองที่ 2.1.2 ทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน โดยทำการเตรียมตัวอย่างและใช้สภาวะของระดับความดันและเวลาที่ได้จากผลการทดลองที่ 3.1 เข้าเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างสาบเสือภายหลังจากการระเบิดและทำการสกัดเพื่อแยกองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น เว้นแต่ไม่มีการวิเคราะห์หาปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในรูปของน้ำหนักแห้งภายหลังจากการสกัดด้วยวิธี Wayman's method โดยมีการปรับปริมาตรในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin

และ cellulose ภายหลังจากการสกัดให้มีปริมาตรสุดท้ายเป็น 250, 200 และ 500 มิลลิลิตรตามลำดับ ในทุกคำรับการทดลอง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดด้วย AAS (ดัดแปลงจาก Chua and Wayman, 1979; TAPPI, 1983; Asada *et al.*, 2005) (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติในการเปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2

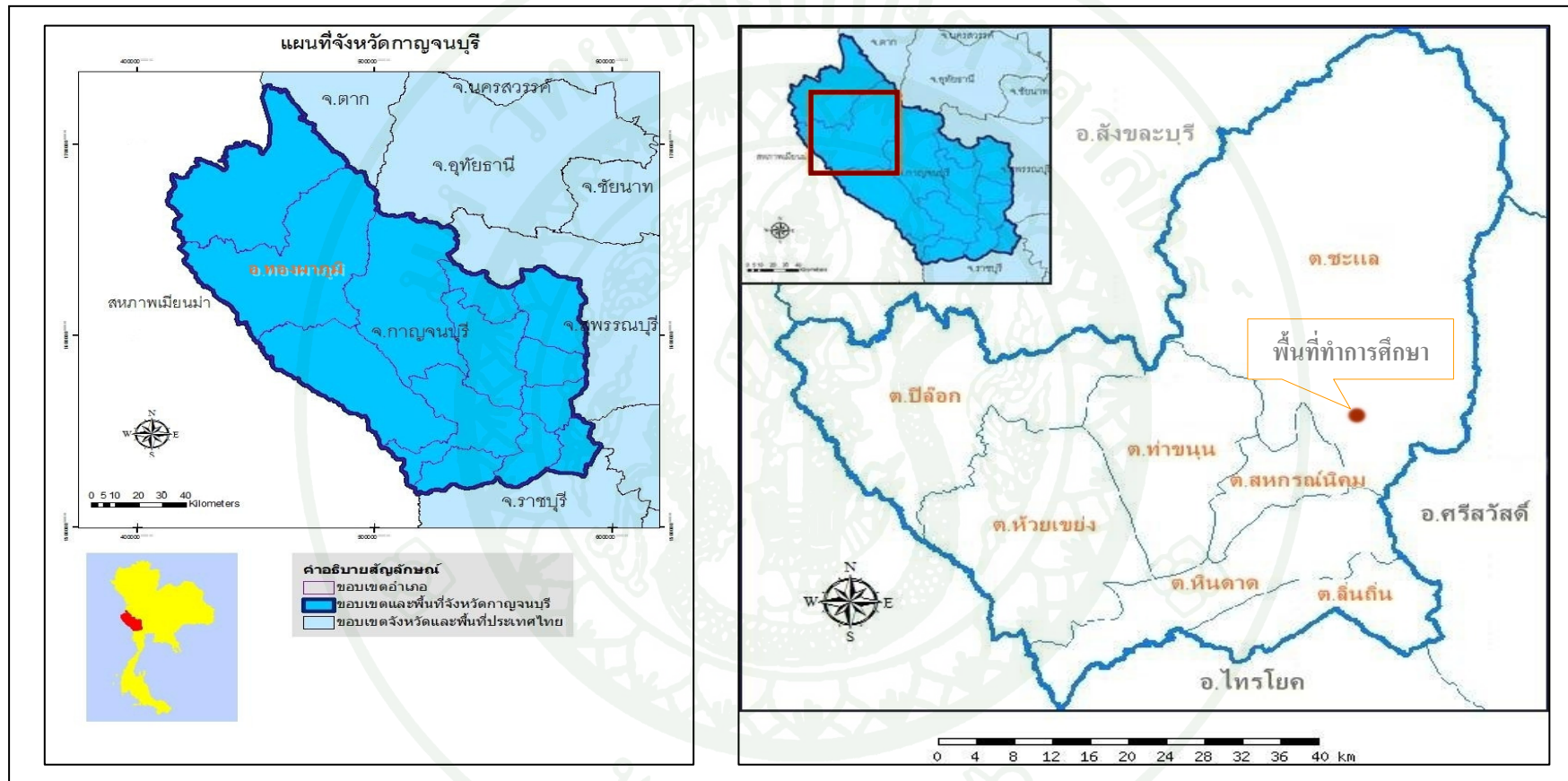
ผลและวิจารณ์

1. การทดลองที่ 1 การสำรวจพื้นที่เหมืองแร่ที่ปนเปื้อนตะกั่ว และการวิเคราะห์สมบัติของดิน ตะกอนดิน น้ำ และพืชที่พบในพื้นที่

1.1 ลักษณะของพื้นที่

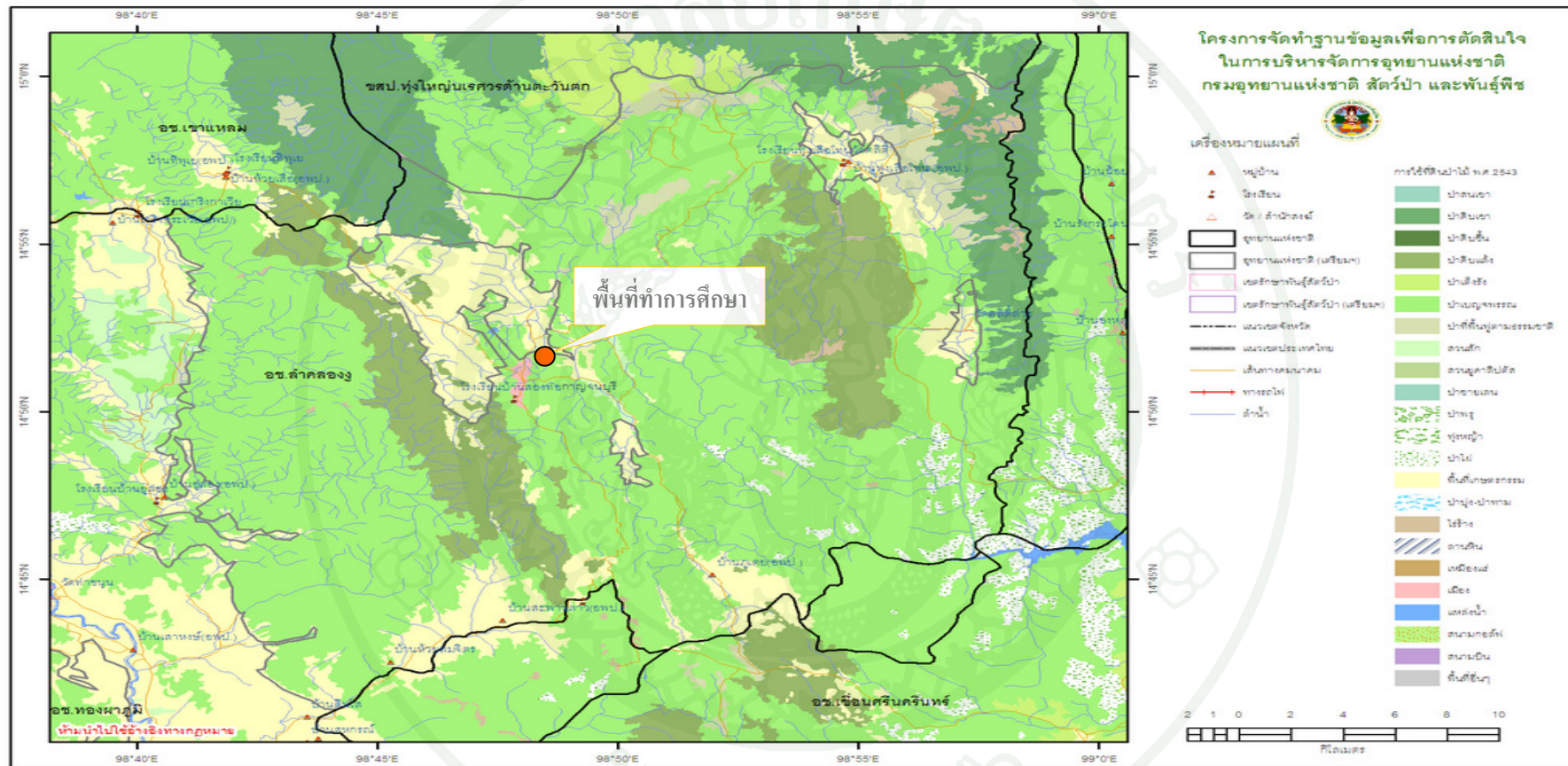
จากการสำรวจพื้นที่เหมืองแร่ที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยใช้แผนที่รายงานการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและสำรวจลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของพื้นที่ พบว่าในบริเวณที่ตั้งของพื้นที่ที่ทำการศึกษานี้เดิมเป็นพื้นที่ของบริษัทยาสูบนิรโรคพิษภัย เอ็นดี ไมนิ่ง (เค็มโก้) จำกัด ซึ่งได้รับสัมปทานในการผลิตตะกั่วจากแร่กาลีน่า (PbS) และแร่เซอร์ไซต์ (PbCO₃) ในประเภทเหมืองอุโมงค์ใต้ดิน โดยบริเวณที่ตั้งอยู่มีระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 670 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยมีสภาพพื้นที่เป็นที่ราบเชิงเขาระหว่างเขาทะเลซึ่งเป็นเทือกเขาในกลุ่มแควน้อย อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี และเทือกเขาในกลุ่มแควใหญ่ อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี ตั้งอยู่ในพิกัดละติจูดที่ 14 องศาเหนือ 51 ลิปดา 18 พิลิปดา และลองจิจูดที่ 98 องศาตะวันออก 47 ลิปดา 50 พิลิปดา ในเขตป่าสงวนแห่งชาติเขาพระฤๅษี-เขาบ่อแร่ ตามกฎกระทรวงที่ 802 (พ.ศ. 2521) ตั้งอยู่ในเขตการปกครองของบ้านสองท่อ หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี โดยสามารถเดินทางได้โดยใช้เส้นทางคมนาคมทางบกโดยห่างจากตัวเมืองกาญจนบุรีประมาณ 158 กิโลเมตรอันเป็นเส้นทางขนส่งที่รถยนต์สามารถเดินทางได้ตลอดปี และอีกเส้นทางหนึ่งเป็นเส้นทางเดินรถที่สามารถเดินทางได้เฉพาะในฤดูแล้ง มีระยะทางห่างจากตัวเมืองกาญจนบุรีประมาณ 161 กิโลเมตร (คัดแปลงจาก บริษัทเทสโก้, 2529) ดังภาพที่ 13

สถานภาพของพื้นที่ดังกล่าวและพื้นที่โดยรอบในปัจจุบันซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลของกรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้ถูกนำเสนอจากคณะกรรมการอุทยานแห่งชาติให้กำหนดพื้นที่ดังกล่าวให้เป็นอุทยานแห่งชาติลำคลองงู โดยมีพระราชกฤษฎีกากำหนดบริเวณที่ดินป่าเขาพระฤๅษี-ป่าเขาบ่อแร่ในพื้นที่ดังกล่าวและโดยรอบในเขตอำเภอทองผาภูมิ และบางส่วนของอำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นอุทยานแห่งชาติ ลำดับที่ 123 ของประเทศไทย โดยประกาศลงในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนที่ 97 ก ลงวันที่ 25 ธันวาคม 2552 โดยมีเนื้อที่ประมาณ 420,374 ไร่ หรือ 672.59 ตารางกิโลเมตร (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช, 2554) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 ที่ตั้งและอาณาเขตของพื้นที่ศึกษา ตำบลชะแล อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาฬสินธุ์

ที่มา: ดัดแปลงจาก สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2554)



ภาพที่ 14 ลักษณะที่ตั้งและอาณาเขตของอุทยานแห่งชาติลำคลองงู ในเขตอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

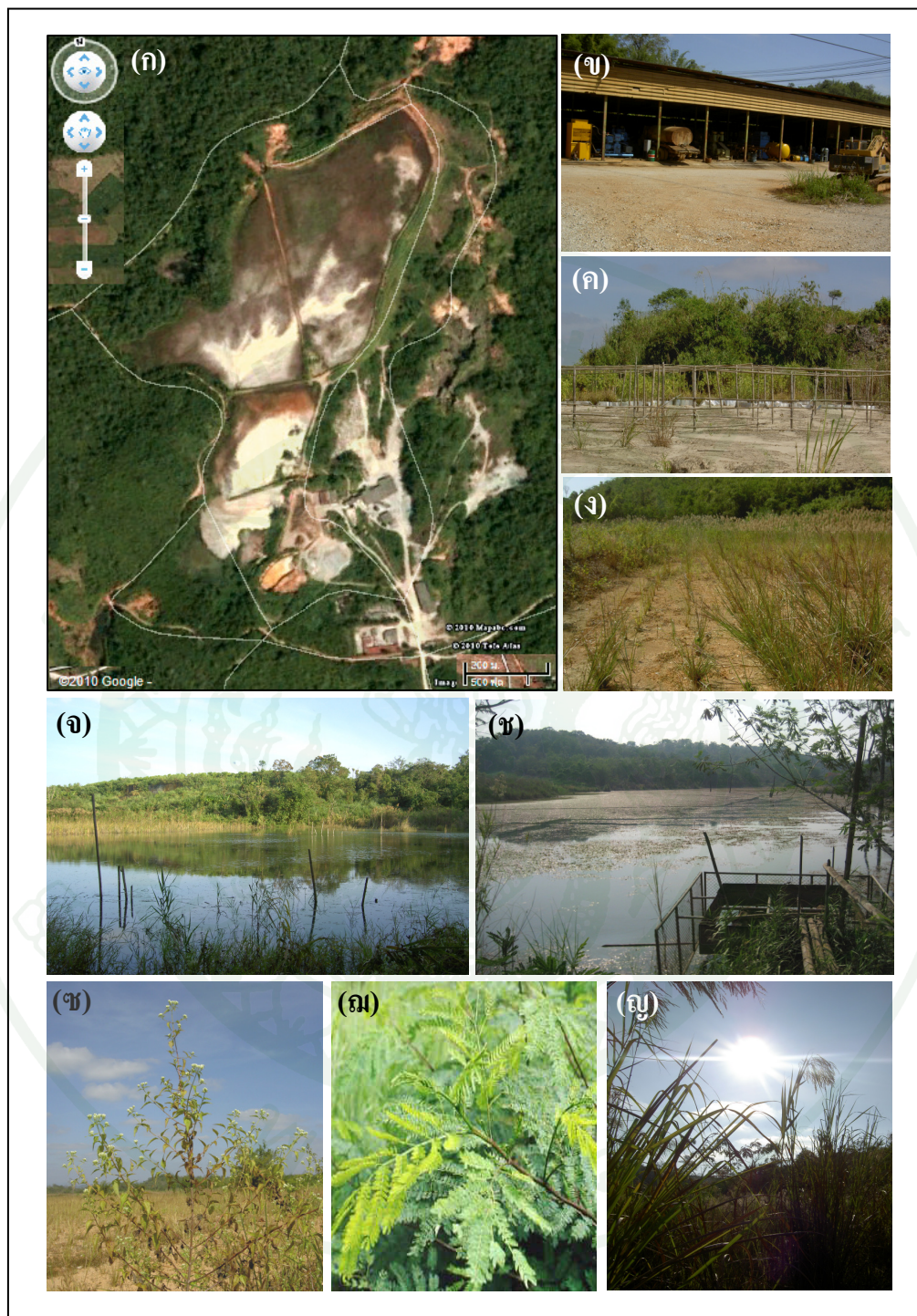
ที่มา: กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช (2554)

จากการสำรวจพื้นที่ในบริเวณเหมืองพบว่าในพื้นที่ที่มีการแบ่งบริเวณในการประกอบกิจกรรมออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ (1) พื้นที่ที่ใช้ในการขุดแร่ซึ่งเป็นเหมืองที่มีการขุดอุโมงค์ลึกลงไปใต้ดินเพื่อหาสายแร่ในลักษณะการทำเหมืองอุโมงค์ (2) พื้นที่ที่ใช้ในการแต่งและเก็บกักแร่ (โรงแต่งแร่) ที่ใช้ในการคัดแยกและทำความสะอาดก้อนแร่เพื่อรอการเคลื่อนย้ายไปสู่การถลุงแร่ยังพื้นที่แหล่งอื่นๆ และ (3) พื้นที่ลานแร่และลานตะกอนหางแร่ที่ใช้ในการรองรับเศษซากของแร่ขนาดเล็กที่เหลือจากการแต่งแร่ ดังภาพที่ 15

พบว่าในบริเวณประกอบกิจกรรมดังกล่าวของพื้นที่โรงแต่งแร่ตั้งอยู่บนที่สูงเช่นเดียวกับในส่วนของพื้นที่ที่ใช้ในการขุดแร่โดยมีระดับความสูงของบริเวณที่ตั้งลดหลั่นลงมาในส่วนของพื้นที่ลานแร่และลานตะกอนหางแร่ตามลำดับ รวมทั้งมีบ่อเก็บกักน้ำน้ำที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการดักตะกอนที่เกิดขึ้นจากการไหลบ่าของเศษแร่ขนาดเล็กที่เกิดขึ้น อันได้แก่ บ่อดักตะกอนที่ 1 และ บ่อดักตะกอนที่ 2 โดยมีระดับความสูงของบริเวณที่ตั้งลดหลั่นลงมาตามลำดับรองจากพื้นที่ในบริเวณลานตะกอนหางแร่เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของแร่ตะกั่วในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พิกัดกริด และระดับความสูงของพื้นที่ ณ บริเวณต่างๆ ที่ตั้งในเขตพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดกาฬสินธุ์

พื้นที่	พิกัดกริด UTM	ระดับความสูงของพื้นที่ (จากระดับน้ำทะเลปานกลาง)
โรงแต่งแร่	47P 0478564	670 m
	UTM 1641800	
ลานแร่	47P 0478268	664 m
	UTM 1641787	
ลานตะกอนหางแร่	47P 0478212	664 m
	UTM 1641779	
บ่อดักตะกอนที่ 1	47P 0478070	664 m
	UTM 1641710	
บ่อดักตะกอนที่ 2	47P 0480792	659 m
	UTM 1643355	



ภาพที่ 15 ลักษณะทางกายภาพของที่ตั้ง และการแพร่กระจายของพืชบางชนิดในพื้นที่เหมืองแร่ ตะกั่ว; (ก) อาณาเขตที่ตั้งของพื้นที่ (ข) โรงแต่งแร่ (ค) ลานแร่ (ง) ลานตะกอนทางแร่ (จ) บ่อดักตะกอนที่ 1 (ฉ) บ่อดักตะกอนที่ 2 (ช) สาบเสือ (*Chromolaena odorata*) (ฌ) กระถิน (*Leucaena leucocphala*) (ญ) อ้อ (*Arundo donax*)

รวมทั้งการสำรวจการแพร่กระจายของพืชในพื้นที่เหมือง โดยเฉพาะในส่วนของพื้นที่โรงแต่ง ลานแร่ และลานตะกอนหางแร่ พบว่าการแพร่กระจายของพืชไม่กี่ชนิด อาทิเช่น กระถิน (*Leucaena leucocphala*) สาบเสือ (*Chromolaena odorata*) และอ้อ (*Arundo donax*) แต่จากการสำรวจด้วยสายตาในพื้นที่โดยสังเขปทั้ง 3 บริเวณจากที่กล่าวมาแล้วในช่วงต้น พบปริมาณการแพร่กระจายของต้นอ้อและสาบเสือเป็นจำนวนมากในทุกๆ พื้นที่ ดังภาพที่ 15

1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพสมบัติทางเคมีบางประการและปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในดิน

โดยจากการสุ่มเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่วจากจุดต่างๆ ได้แก่ โรงแต่งแร่ ลานแร่ และลานตะกอนหางแร่ จากผลการวิเคราะห์สมบัติของดินในห้องปฏิบัติการพบว่าลักษณะทางกายภาพในส่วนของเนื้อดินที่พบโดยส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกันในทุกๆ พื้นที่โดยมีลักษณะของเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินทราย ยกเว้นแต่พื้นที่ในส่วนของโรงแต่งแร่ที่มีลักษณะของเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายแป้ง ลักษณะของเนื้อดินที่เป็นดินทรายของพื้นที่ในสวนลานแร่ และลานตะกอนหางแร่นั้นเกิดจากกิจกรรมของการทำเหมืองแร่ในพื้นที่ทำให้เกิดการชะล้างและทับถมของเศษดินและเศษแร่ขนาดเล็กจนเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมของลักษณะเนื้อดินในพื้นที่ ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการของตัวอย่างดินในพื้นที่พบว่าส่วนใหญ่มีค่าพีเอช (pH) อยู่ในช่วงที่เป็นด่างปานกลาง ยกเว้นแต่ดินในส่วนของโรงแต่งแร่ที่อยู่ในช่วงเป็นกลาง โดยมีค่า pH โดยเฉลี่ยเท่ากับ 6.97 ± 0.06 , 8.17 ± 0.06 และ 8.07 ± 0.06 ในส่วนของโรงแต่งแร่ ลานแร่ และลานตะกอนหางแร่ตามลำดับ และในส่วนของสภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำมากทั้ง 3 บริเวณ โดยมีค่า EC โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 ± 0.01 , 0.07 ± 0.01 และ 0.07 ± 0.01 เดซิซีเมนต่อเมตรตามลำดับ รวมทั้งยังมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity; CEC) ที่มีค่าอยู่ในช่วงปานกลางถึงต่ำตามลำดับ โดยมีค่า CEC โดยเฉลี่ยเท่ากับ 11.9 ± 0.10 , 7.6 ± 0.08 และ 4.25 ± 0.17 เซนติโมลต่อกิโลกรัมตามลำดับ

รวมทั้งในส่วนผลการวิเคราะห์ความอุดมสมบูรณ์ของตัวอย่างดินในพื้นที่พบว่าส่วนใหญ่มีค่าความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ต่ำมากในทุกๆ พารามิเตอร์ โดยพบปริมาณอินทรียวัตถุ (organic matter; OM) โดยเฉลี่ยร้อยละ 3.32 ± 0.07 , 1.89 ± 0.03 และ 0.30 ± 0.08 ตามลำดับ พบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N) โดยเฉลี่ยร้อยละ 0.03 ± 0.01 , 0.01 ± 0 และ 0.02 ± 0 ตามลำดับ พบปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.50 ± 0 , 0.33 ± 0.14 และ $6.83 \pm$

1.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และพบปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (available K) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 9.90 ± 1.88 , 4.54 ± 0.79 และ 12.64 ± 3.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

นอกจากนั้นในส่วนของผลการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในพื้นที่ทั้ง 3 บริเวณ ทั้งในส่วนของปริมาณตะกั่วที่สกัดได้ (available Pb) และตะกั่วทั้งหมด (total Pb) พบมีปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในดินที่สูงเกินมาตรฐานคุณภาพดินจากประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในปี พ.ศ. 2547 จากการพิจารณามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่ต้องมีปริมาณการปนเปื้อนของ total Pb ไม่เกิน 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2554ก) โดยจากการวิเคราะห์พบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb โดยเฉลี่ยเท่ากับ 837.71 ± 24.23 , 375.64 ± 13.89 และ $1,114.61 \pm 53.06$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb โดยเฉลี่ยเท่ากับ $18,543.0 \pm 3,417.99$, $1,620.98 \pm 93.59$ และ $75,529.38 \pm 2,935.98$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ดังตารางที่ 2 และตารางผนวกที่ ข1

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในดิน
จากพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอดงพิกุล จังหวัดกาญจนบุรี

สมบัติของดิน	จุดเก็บตัวอย่างที่ 1	จุดเก็บตัวอย่างที่ 2	จุดเก็บตัวอย่างที่ 3
Texture ^{1/}	Silt loam	Sand	Sand
Sand (%)	24.24	86.97	90.24
Silt (%)	58.96	6.23	2.96
Clay (%)	16.80	6.80	6.80
pH ^{2/}	6.97±0.06	8.17±0.06	8.07±0.06
EC ^{3/} (dS m ⁻¹)	0.32±0.01	0.07±0.01	0.07±0.01
CEC ^{4/} (cmol kg ⁻¹)	11.9±0.10	7.6±0.08	4.25±0.17
OM ^{5/} (%)	3.32±0.07	1.89±0.03	0.30±0.08
Total N ^{6/} (%)	0.03±0.01	0.01±0	0.02±0
Available P ^{7/} (mg kg ⁻¹)	0.50±0	0.33±0.14	6.83±1.04
Available K ^{8/} (mg kg ⁻¹)	9.90±1.88	4.54±0.79	12.64±3.47
Available Pb ^{9/} (mg kg ⁻¹)	837.71±24.23	375.64±13.89	1,114.61±53.06
Total Pb ^{10/} (mg kg ⁻¹)	18,543.0±3,417.99	1,620.98±93.59	75,529.38±2,935.98

หมายเหตุ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1; โรงแต่งแร่

จุดเก็บตัวอย่างที่ 2; ลานแร่

จุดเก็บตัวอย่างที่ 3; ลานตะกอนหางแร่

^{1/} Pipette method (Kilmer and Alexander, 1949; Day, 1965)

^{2/} pH meter (soil: water; 1:1) (ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{3/} Electric conductrometer (ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{4/} Extracted with NH₄OAc pH 7.0 (ดัดแปลงจาก Chapman, 1965)

^{5/} Walkley and Black method (ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Walkley and Black, 1934)

^{6/} Micro-Kjeldahl method (ดัดแปลงจาก ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{7/} Extracted with NH₄OAc pH 7.0 (ดัดแปลงจาก ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Pratt, 1965)

^{8/} Bray II method (Bray and Kurtz, 1945)

^{9/} Extracted with 0.005M DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)

^{10/} Wet-digestion method (ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Michael, 1982)

1.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในตะกอนดิน

โดยจากการสุ่มเก็บตัวอย่างตะกอนดินจากบ่อดักตะกอนในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่วจากบ่อดักตะกอนที่ 1 และบ่อดักตะกอนที่ 2 จากผลการวิเคราะห์สมบัติของตะกอนดินในห้องปฏิบัติการพบว่าในตะกอนดินจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีค่า pH ที่เป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย และมีค่า EC ที่ต่ำมาก โดยพบค่า EC โดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 ± 0.15 และ 0.61 ± 0.37 เดซิซีเมนต่อเมตร ตามลำดับ และพบปริมาณของ available Pb และ total Pb ในปริมาณที่สูง โดยพบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb โดยเฉลี่ยเท่ากับ $1,330.76 \pm 28.07$ และ 692.15 ± 35.29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพบปริมาณความเข้มข้น total Pb โดยเฉลี่ยเท่ากับ $1,686.48 \pm 202.30$ และ $2,706.07 \pm 2,090.91$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ดังตารางที่ 3 และตารางผนวกที่ ข1-ข2

ซึ่งจากผลของปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ที่ตรวจพบจากบ่อดักตะกอนที่ 2 ที่มีปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าบ่อดักตะกอนที่ 1 นั้นมีสาเหตุมาจากลักษณะของที่ตั้งทางกายภาพของบ่อดักตะกอนที่ 2 ที่อยู่ต่ำกว่าดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนของคุณลักษณะของพื้นที่จากการทดลองที่ 1.1 ส่งผลให้เกิดกระบวนการไหลบ่า (run-off) ของตะกอนดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจากการทำกิจกรรมเหมืองแร่ตะกั่วในพื้นที่และเกิดการสะสมอยู่ในส่วนของบ่อดักตะกอนที่ 2 มากกว่าบ่อดักตะกอนที่ 1 แต่จากการวิเคราะห์ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ที่ตรวจพบจากบ่อดักตะกอนที่ 1 ที่มีปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าบ่อดักตะกอนที่ 2 นั้นมีสาเหตุมาจากปริมาณอินทรีย์วัตถุที่สูงในบ่อดักตะกอนที่ 2 เมื่อเทียบกับบ่อดักตะกอนที่ 1 โดยจากการศึกษาของ สุขมาศ (2540) พบว่าเมื่ออินทรีย์วัตถุนั้นเมื่อเกิดการแตกตัวของกลุ่มอนุโมลบางตัวจากสารประกอบอินทรีย์จะทำให้มีประจุเกิดขึ้นซึ่งประจุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นประจุลบทำให้มีความสามารถในการดูดซับประจุบวก หรือโลหะหนักที่มีประจุบวกในรูปอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งหมด ได้แก่ (1) ในรูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ (adsorbed) (2) ในรูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นๆ (fixed, occluded) (3) ในรูปที่ตกตะกอนหรือตะกอนกับสารอื่น (precipitated) หรือ (4) ในรูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (organic) สอดคล้องกับปริมาณของพืชใต้น้ำที่ตรวจพบในพื้นที่ของบ่อดักตะกอนทั้ง 2 จุด โดยพบการเจริญเติบโตของพืชใต้น้ำบางชนิด อาทิ สาหร่ายหางกระรอก (*Hydrilla verticillata*) และสาหร่ายพวงกะโหลก (*Ceratophyllum demersum*) ที่มีการแพร่กระจายในบ่อดักตะกอนที่ 2 มากกว่าในบ่อดักตะกอนที่ 1 ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุจากการทับถมของวัสดุอินทรีย์ของตะกอนดินในบ่อดักตะกอน รวมทั้งจากการ

ดูค่าใช้จ่ายและสะสมตะกั่วในรูป available Pb ที่มีอยู่ในตะกอนดินจากพืชได้น้ำโดยตรง ส่งผลต่อการลดลงของตะกั่วในรูป available Pb ของตะกอนดินในบ่อดักตะกอนที่ 2 ดังภาพที่ 16

ตารางที่ 3 สมบัติทางเคมีบางประการของตะกอนดิน และปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในตะกอนดินจากพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอดงหลวง จังหวัดกาญจนบุรี

สมบัติของตะกอนดิน	จุดเก็บตัวอย่างที่ 1	จุดเก็บตัวอย่างที่ 2
pH ^{1/}	7.28±0.12	7.57±0.09
EC ^{2/} (dS m ⁻¹)	1.01±0.15	0.61±0.37
OM ^{3/} (%)	2.86±0.63	3.06±0.35
Available Pb ^{4/} (mg kg ⁻¹)	1,330.76±28.07	692.15±35.29
Total Pb ^{5/} (mg kg ⁻¹)	1,686.48±202.30	2,706.07±2,090.91

หมายเหตุ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1; บ่อดักตะกอนที่ 1

จุดเก็บตัวอย่างที่ 2; บ่อดักตะกอนที่ 2

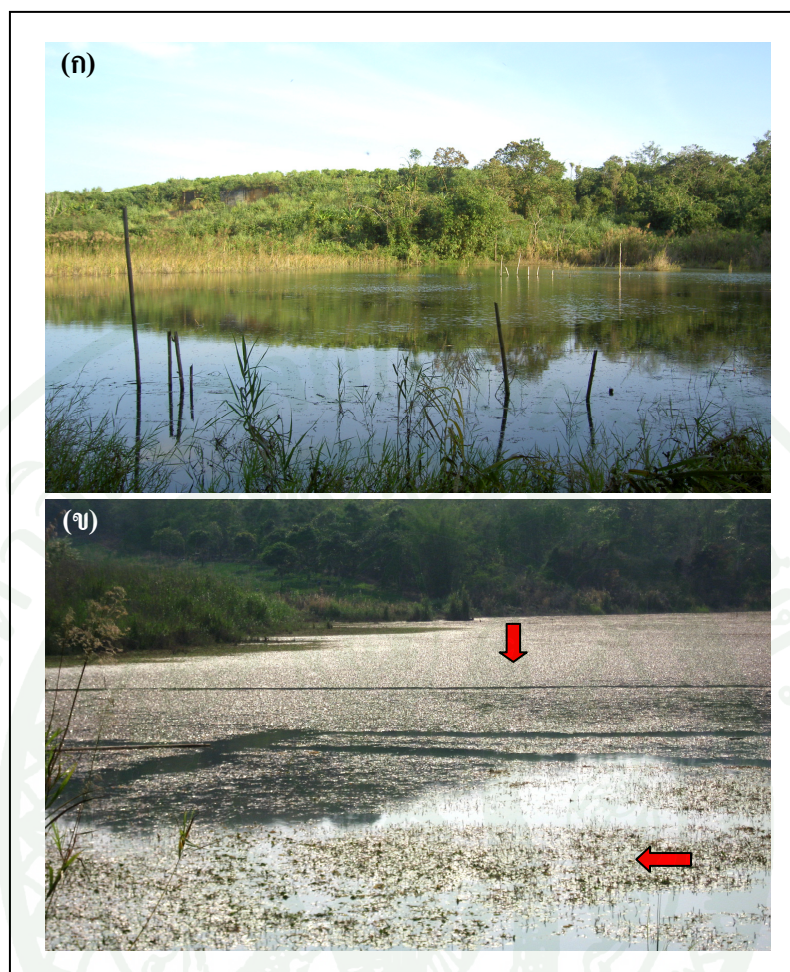
^{1/} pH meter (soil: water; 1:1) (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{2/} Electric conductrometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{3/} Walkley and Black method (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Walkley and Black, 1934)

^{4/} Extracted with 0.005M DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)

^{5/} Wet-digestion method (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Michael, 1982)



ภาพที่ 16 การแพร่กระจายของพืชน้ำในบ่อดักตะกอนที่ 1 (ก) และบ่อดักตะกอนที่ 2 (ข)
ที่พบการแพร่กระจายของพืชน้ำในบ่อดักตะกอนที่ 2 มากกว่าบ่อดักตะกอนที่ 1 (ลูกศรชี้)

1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในน้ำ

โดยจากการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อดักตะกอนที่ 1 และบ่อดักตะกอนที่ 2 ในพื้นที่เหมือนแร่ตะกั่ว ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำในห้องปฏิบัติการพบว่าจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีค่า pH ที่เป็นค่าเล็กน้อยและไม่แตกต่างกันทั้ง 2 จุด โดยมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 7.66 ± 0.05 ทั้ง 2 จุด และมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (dissolved oxygen; DO) ในระดับปานกลางโดยพบปริมาณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.94 ± 0.75 และ 4.43 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณที่พบได้ตามปกติในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2554ข)

รวมทั้งเมื่อทำการวัดปริมาณตะกั่วที่อยู่ในรูปของไอออนอิสระ (available Pb; Pb^{2+}) และ total Pb ในน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 2 จุด โดยผลจากการวิเคราะห์ไม่พบปริมาณตะกั่วที่อยู่ในรูป Pb^{2+} แต่พบปริมาณ total Pb อยู่ในระดับสูง ซึ่งพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในน้ำ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.23 ± 0.15 และ 0.42 ± 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งสาเหตุจากผลจากทดลองที่ไม่พบปริมาณตะกั่วที่อยู่ในรูป Pb^{2+} แต่พบปริมาณตะกั่วในน้ำที่รูปตะกั่วทั้งหมด เนื่องจากปริมาณตะกั่วที่อยู่ในรูป Pb^{2+} ในน้ำที่เกิดการปนเปื้อนจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ตะกั่วในข้างต้น ถูกดูดซับไว้ในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ หรือถูกดูดซับในรูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นๆ เอาไว้ทั้งหมด (ศุภมาส, 2540)

โดยเมื่อพิจารณาปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 2 จุด พบว่าจัดอยู่ในระดับที่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำ จากการพิจารณามาตรฐานคุณภาพน้ำทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมจากประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในปี พ.ศ. 2539 ที่กำหนดให้มีปริมาณของตะกั่วในน้ำทั้งจากกิจกรรมต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2554ค) นอกจากนั้นจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (total dissolved solid; TDS) ที่วัดได้จากเครื่องวัดคุณภาพน้ำภาคสนาม พบปริมาณ TDS โดยเฉลี่ยเท่ากับ 133.0 ± 3.39 และ 231.2 ± 1.30 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของที่ตั้งของบ่อดักตะกอนที่ 2 ที่อยู่ต่ำกว่าบ่อดักตะกอนที่ 1 ส่งผลให้เกิดกระบวนการ run-off ของอนุภาคที่มีประจุในน้ำจากบ่อดักตะกอนที่ 1 สู่บ่อดักตะกอนที่ 2 ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TDS ในน้ำที่ได้จากการตรวจวัดในบ่อดักตะกอนที่ 2 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำจากพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอดงพญาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

สมบัติของน้ำ	จุดเก็บตัวอย่างที่ 1	จุดเก็บตัวอย่างที่ 2
Temperature ^{1/} (°C)	25.78±0.36	23.4±0.16
pH ^{1/}	7.66±0.05	7.66±0.05
TDS ^{1/} (mg l ⁻¹)	133.0±3.39	231.2±1.30
DO ^{1/} (mg l ⁻¹)	4.94±0.75	4.43±0.13
Available Pb ^{2/} (mg l ⁻¹)	0	0
Total Pb ^{3/} (mg l ⁻¹)	0.23±0.15	0.42±0.09

หมายเหตุ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1: บ่อดักตะกอนที่ 1

จุดเก็บตัวอย่างที่ 2: บ่อดักตะกอนที่ 2

^{1/} ทำการวิเคราะห์โดยตรงจากเครื่องวัดคุณภาพน้ำภาคสนาม

^{2/} ทำการกรองแล้ววิเคราะห์โดยตรงจากเครื่อง AAS

^{3/} Wet-digestion method (ทักษิณีย์ และ จงรักษ์, 2542; Michael, 1982)

1.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของพืชในพื้นที่

โดยจากการสุ่มเก็บตัวอย่างพืชในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่วในจุดต่างๆ อันได้แก่ พื้นที่โรงแต่งแร่ ลานแร่ และลานตะกอนหางแร่ ซึ่งจากการสำรวจการแพร่กระจายของพืชที่มีการเจริญเติบโตในพื้นที่ พบการแพร่กระจายของสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) ในทุกๆ พื้นที่ที่ทำการสำรวจ อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการดูดใช้และสะสมของต้นสาบเสือกับพืชชนิดอื่นๆ ที่พบในพื้นที่ในแต่ละบริเวณที่ทำการสำรวจ ได้แก่ กระถิน (*Leucaena leucocphala*) และอ้อ (*Arundo donax*) โดยจากการวิเคราะห์ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของพืชทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินในห้องปฏิบัติการพบว่า ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยในพื้นที่โรงแต่งแร่พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ของต้นสาบเสือทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2,012.0±312.66 และ 4,476.83±1,008.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ของต้นอ้อในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 813.75±28.31 และ 18,717.08±535.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ในส่วน

ของพื้นที่ลานแร่พบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของพืชแต่ละชนิดที่แตกต่างเช่นเดียวกัน โดยพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ของต้นสาบเสือทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 230.18 ± 63.89 และ $2,904.83 \pm 736.01$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ของต้นอ้อทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 117.69 ± 6.37 และ $5,280.21 \pm 95.60$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และในส่วนของพื้นที่ลานตะกอนหางแร่พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ของต้นกระถินทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 498.29 ± 26.96 และ $4,466.67 \pm 124.81$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ของต้นสาบเสือทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่นๆ ในข้างต้น โดยพบปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วโดยเฉลี่ยเท่ากับ 91.08 ± 14.41 และ $1,922.25 \pm 280.48$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วทั้งหมดของตัวอย่างพืชบางชนิดที่พบในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดกาฬสินธุ์

ชนิดของพืช	จุดเก็บตัวอย่าง	Total Pb ^u (mg kg ⁻¹)	
		ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน
สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>)	โรงแต่งแร่	$2,012.0 \pm 312.66$	$4,476.83 \pm 1,008.03$
อ้อ (<i>Arundo donax</i>)	โรงแต่งแร่	813.75 ± 28.31	$18,717.08 \pm 535.84$
สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>)	ลานแร่	230.18 ± 63.89	$2,904.83 \pm 736.01$
อ้อ (<i>Arundo donax</i>)	ลานแร่	117.69 ± 6.37	$5,280.21 \pm 95.60$
กระถิน (<i>Leucaena leucocphala</i>)	ลานตะกอนหางแร่	498.29 ± 26.96	$4,466.67 \pm 124.81$
สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>)	ลานตะกอนหางแร่	91.08 ± 14.41	$1,922.25 \pm 280.48$

หมายเหตุ ^u Wet-digestion method (ทักษิณีย์ และ จงรักภัย, 2542; Michael, 1982)

จากการพิจารณาสัณยภาพดูใช้และสะสมของพืชที่พบในพื้นที่ เพื่อพิจารณาการเลือกใช้เทคนิคการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยใช้พืชภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง ซึ่งจากการพิจารณาโดยใช้ดัชนีชี้วัดในพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง (lead hyperaccumulator) อันได้แก่ (1) พืชชนิดนั้นจะต้องมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมตะกั่วทั้งหมด (total Pb) ในส่วนเหนือดินในปริมาณที่มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Baker and Brooks, 1989; Baker *et al.*, 1994, 2000) (2) พืชชนิดนั้นจะต้องมีอัตราส่วนของความเข้มข้นตะกั่วในส่วนเหนือดินต่อส่วนใต้ดินที่มากกว่า 1 (translocation factor; $TF > 1$) (Mattina *et al.*, 2003) (3) พืชชนิดนั้นจะต้องมีอัตราส่วนของความเข้มข้นตะกั่วในส่วนเหนือดินต่อความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดได้ในดินที่ปนเปื้อนที่มากกว่า 1 (bioaccumulation factor; $BAF > 1$) (Deram *et al.*, 2006; Khan *et al.*, 2006; Branquinho *et al.*, 2007) และ (4) พืชชนิดนั้นจะต้องมีอัตราส่วนของความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนเหนือดินภายหลังการบำบัดต่อความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนเหนือดินที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนในพืชชนิดเดียวกัน (C/NC ratio) ที่ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 10-500 เท่า (Shen and Liu, 1998) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการตรวจสอบเอกสาร

ผลการพิจารณาต่อการเลือกใช้สาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในสภาพโรงเรือนโดยใช้ดัชนีชี้วัด 3 ข้อแรกในช่วงต้นพบว่า ในส่วนของพื้นที่โรงแต่งแร่ต้นสาบเสือมีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วที่เข้าเกณฑ์พืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง โดยเข้าเกณฑ์คุณสมบัติของพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดจาก 2 ใน 3 ดัชนี รวมทั้งมีค่าดัชนีที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับต้นอื่นทั้ง 3 ดัชนีชี้วัด โดยพบว่าต้นสาบเสือมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมตะกั่วในส่วนเหนือดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2,012 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อีกทั้งมีค่า TF และ BAF ที่ 0.45 และ 2.40 ตามลำดับ อีกทั้งจากการวิเคราะห์ตัวอย่างสาบเสือที่เก็บได้ในพื้นที่ของลานแร่ยังพบว่าต้นสาบเสือมีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วที่สูงกว่าต้นอื่นที่พบในพื้นที่เช่นเดียวกับโรงแต่งแร่ โดยพบว่าต้นสาบเสือมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมตะกั่วในส่วนเหนือดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 230.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อีกทั้งมีค่า TF และ BAF 0.08 และ 0.37 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามในพื้นที่ลานตะกอนหางแร่ที่พบศักยภาพในการบำบัดของสาบเสือที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับต้นกระถิน โดยพบว่าสาบเสือมีความสามารถในการดูดใช้และสะสมตะกั่วในส่วนเหนือดินโดยเฉลี่ยเท่ากับ 91.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อีกทั้งมีค่า TF และ BAF ที่ 0.05 และ 0.08 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาถึงปริมาณการแพร่กระจายของต้นกระถินในพื้นที่ลานตะกอนหางแร่ที่พบปริมาณการแพร่กระจายที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสาบเสือ โดยสามารถพบสาบเสือในทุกๆ พื้นที่ที่ทำการสำรวจ อีกทั้งจากการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในสาบเสือที่พบปริมาณ

การดูใช้และสะสมตะกั่วในปริมาณสูง โดยเฉพาะสาบเสือที่พบจากการสำรวจในพื้นที่โรงเต่งแร่ จึงสามารถสันนิษฐานถึงความสามารถในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูงของสาบเสือ และสามารถนำข้อสันนิษฐานที่ได้ไปใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดของดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในสภาพควบคุมในโรงเรือนทดลองได้ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด (total Pb) ในส่วนเหนือดิน ค่า translocation factor (TF) และ bioaccumulation factor (BAF) ต่อการพิจารณาพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง (lead hyperaccumulator) ของตัวอย่างพืชบางชนิดที่พบในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่ว หมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดกาฬสินธุ์

จุดเก็บตัวอย่าง	ชนิดของพืช	Total Pb ในส่วนเหนือดิน (mg kg ⁻¹)	TF	BAF	Lead hyper- accumulator
โรงเต่งแร่	สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>)	2,012	0.45	2.40	เข้าเกณฑ์
	อ้อ (<i>Arundo donax</i>)	813.75	0.04	0.97	ไม่เข้าเกณฑ์
ลานแร่	สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>)	230.18	0.08	0.37	ไม่เข้าเกณฑ์
	อ้อ (<i>Arundo donax</i>)	117.69	0.02	0.19	ไม่เข้าเกณฑ์
ลานตะกอน	กระถิน (<i>Leucaena leucocphala</i>)	498.29	0.11	0.45	ไม่เข้าเกณฑ์
ทางแร่	สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>)	91.08	0.05	0.08	ไม่เข้าเกณฑ์

2. การทดลองที่ 2 การศึกษาศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

2.1 การเจริญเติบโตของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยการนำดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจากบริเวณลานตะกอนหางแร่ในพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่วมาทำการบำบัดด้วยสาบเสือ ณ ระยะเวลาบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยนำต้นสาบเสือที่เจริญเติบโตในบริเวณที่ไม่ปนเปื้อนมาใช้ในการบำบัดภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง จากการศึกษาพบว่าน้ำหนักแห้งของต้นสาบเสือที่ได้ภายหลังการบำบัดของสาบเสือที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนและดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว พบน้ำหนักแห้งโดยเฉลี่ยที่เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินโดยพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของสาบเสือที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนและดินที่ปนเปื้อน พบว่าสาบเสือที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนมีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับสาบเสือที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในทุกๆ ระยะเวลาของการบำบัดอันเนื่องมาจากมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตที่มากกว่า (ตารางผนวกที่ ข3) รวมทั้งจากการสังเกตถึงลักษณะการแสดงออกถึงความของเป็นพิษในสาบเสือภายหลังการบำบัดโดยเฉพาะในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยพบลักษณะการเกิดรอยจุดไหม้ (necrosis) ที่ใบของสาบเสือซึ่งพบลักษณะการแสดงออกของความเป็นพิษมากในบริเวณโคนต้น ดังภาพที่ 17

2.1.1 การเจริญเติบโตของสาบเสือในดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

ผลการปลูกสาบเสือในดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าสาบเสือจะมีน้ำหนักที่เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการบำบัดทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน โดยมีปริมาณน้ำหนักแห้งตามระยะเวลาในการบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 12.51 ± 1.41 , 16.79 ± 3.25 , 22.07 ± 6.91 , 34.10 ± 2.31 , 34.35 ± 0.74 และ 52.13 ± 9.34 กรัมตามลำดับในส่วนเหนือดิน และเท่ากับ 14.30 ± 3.30 , 15.23 ± 1.19 , 14.27 ± 3.11 , 37.30 ± 1.49 , 35.32 ± 4.74 และ 39.73 ± 15.52 กรัมตามลำดับในส่วนใต้ดิน

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติของการเจริญเติบโตของสาบเสือ โดยพิจารณาจากน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน พบว่าที่ระยะเวลาการบำบัด 90 วันให้ค่าการเจริญเติบโตสูงสุดและมีค่าการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 75, 60, 45, 30 และ 15 วันตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการบำบัด 75 วันให้ค่าการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 60 วัน แต่พบการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 45, 30 และ 15 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วันให้ค่าการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาในการบำบัด 30 วัน แต่พบการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน อีกทั้งยังพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 วันให้ค่าการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ดังภาพที่ 18ก และตารางผนวกที่ ก1

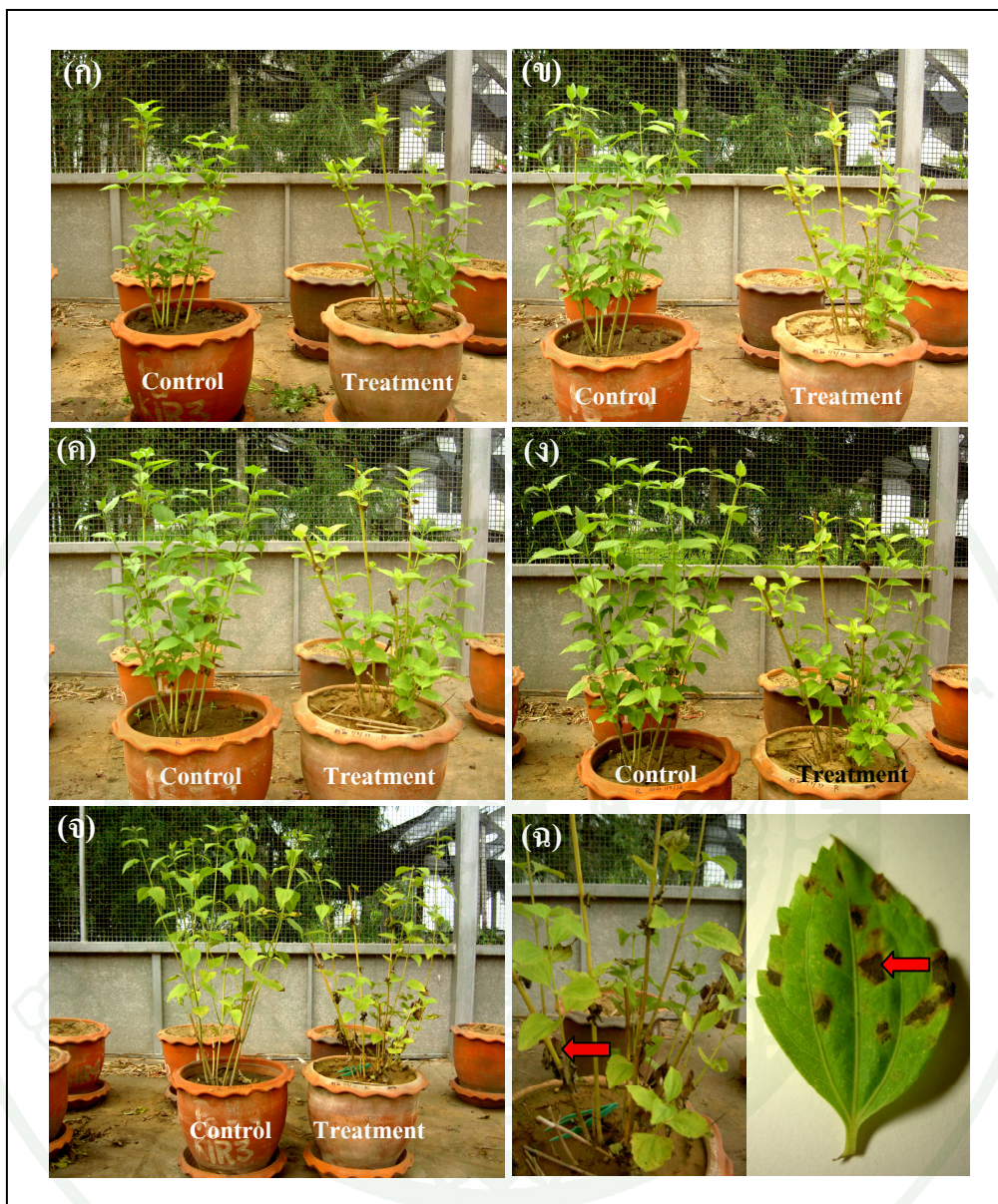
รวมทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติในการเจริญเติบโตของสาบเสือของน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดิน พบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 90 วันให้ค่าการเจริญเติบโตสูงสุดและไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 75 และ 60 วันตามลำดับ แต่พบการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 45, 30 และ 15 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วันให้ค่าการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 30 และ 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 18ก และตารางผนวกที่ ก1

2.1.2 การเจริญเติบโตของสาบเสือในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

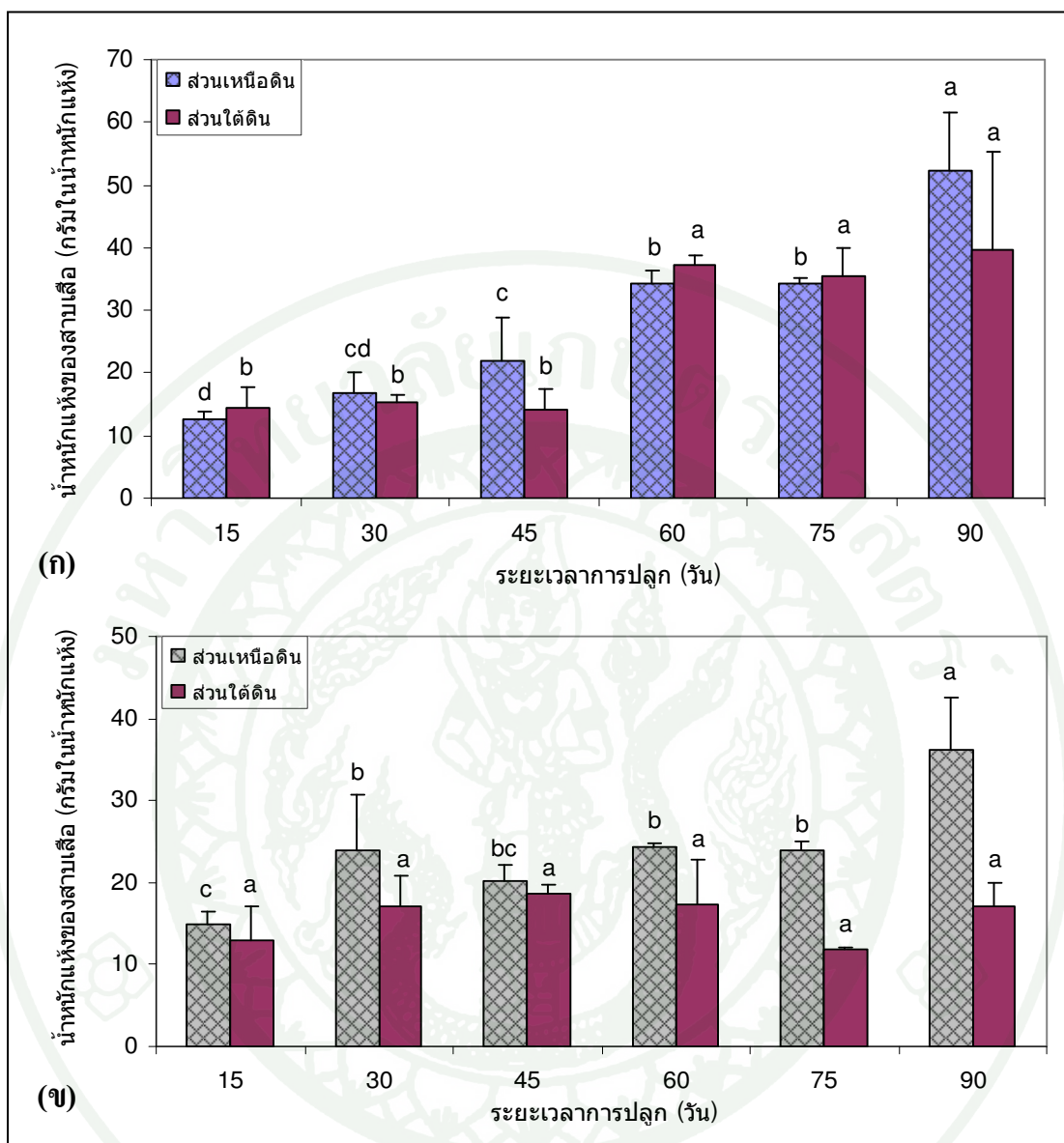
ผลการปลูกสาบเสือในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าสาบเสือน้ำหนักแห้งที่เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดเฉพาะในส่วนเหนือดินเช่นเดียวกับสาบเสือที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อน แต่ไม่พบความแตกต่างในส่วนใต้ดิน โดยพบว่ามีน้ำหนักแห้งโดยเฉลี่ยตามระยะเวลาในการบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 14.9 ± 1.48 , 23.9 ± 6.79 , 20.3 ± 1.92 , 24.4 ± 0.31 , 24.0 ± 1.13 และ 36.18 ± 6.41 กรัมตามลำดับในส่วนเหนือดิน และเท่ากับ 12.90 ± 4.20 , 17.10 ± 3.63 , 18.53 ± 1.15 , 17.39 ± 5.49 , 11.77 ± 0.21 และ 17.07 ± 2.93 กรัมตามลำดับในส่วนใต้ดิน

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติในการเจริญเติบโตของสาบเสือในรูปน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน พบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 90 วัน ให้ค่าการเจริญเติบโตสูงสุด และมีค่าการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 75, 60, 45, 30 และ 15 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 75 วัน ให้ค่าการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 60, 45 และ 30 วัน ตามลำดับ แต่พบการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน อีกทั้งพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน ให้ค่าการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 18ข และตารางผนวกที่ ก1

รวมทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติในการเจริญเติบโตของสาบเสือในรูปน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดิน พบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน ให้ค่าการเจริญเติบโตสูงสุดและไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการบำบัดอื่นๆ ในทุกตำรับการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 18ข และตารางผนวกที่ ก1



ภาพที่ 17 การเจริญเติบโตของสาบเสือในดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (control) และดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว (treatment) ที่ระยะเวลาการปลูก 30 วัน (ก) 45 วัน (ข) 60 วัน (ค) 75 วัน (ง) 90 วัน (จ) และลักษณะการแสดงออกของความเป็นพิษของสาบเสือภายหลังการปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว (จ) (ลูกศรชี้)



ภาพที่ 18 ปริมาณน้ำหนักรากแห้งของสาบเสือที่ได้ภายหลังการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุมใน
โรงเรือนทดลอง; (ก) ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ข) ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว

2.2 ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

2.2.1 ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือในดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

ผลการปลูกสาบเสือในดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในสาบเสือตามระยะเวลาในการบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.13 ± 0 , 0.39 ± 0.08 , 0.71 ± 0.39 , 0.65 ± 0.13 , 1.03 ± 0.21 และ 1.73 ± 0.30 มิลลิกรัมต่อต้นในน้ำหนักแห้ง ตามลำดับในส่วนเหนือดิน และเท่ากับ 1.26 ± 0.28 , 1.09 ± 0.15 , 0.97 ± 0.05 , 3.04 ± 0.05 , 2.99 ± 0.32 และ 3.41 ± 1.14 มิลลิกรัมต่อต้นในน้ำหนักแห้ง ตามลำดับในส่วนใต้ดิน

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วภายหลังการบำบัดในส่วนเหนือดิน พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 90 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วสูงสุดและมีปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 75, 60, 45, 30 และ 15 วันตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 75 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 60 และ 45 วัน แต่พบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสาบเสือที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 30 และ 15 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 30 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 19ก และตารางผนวกที่ ก2

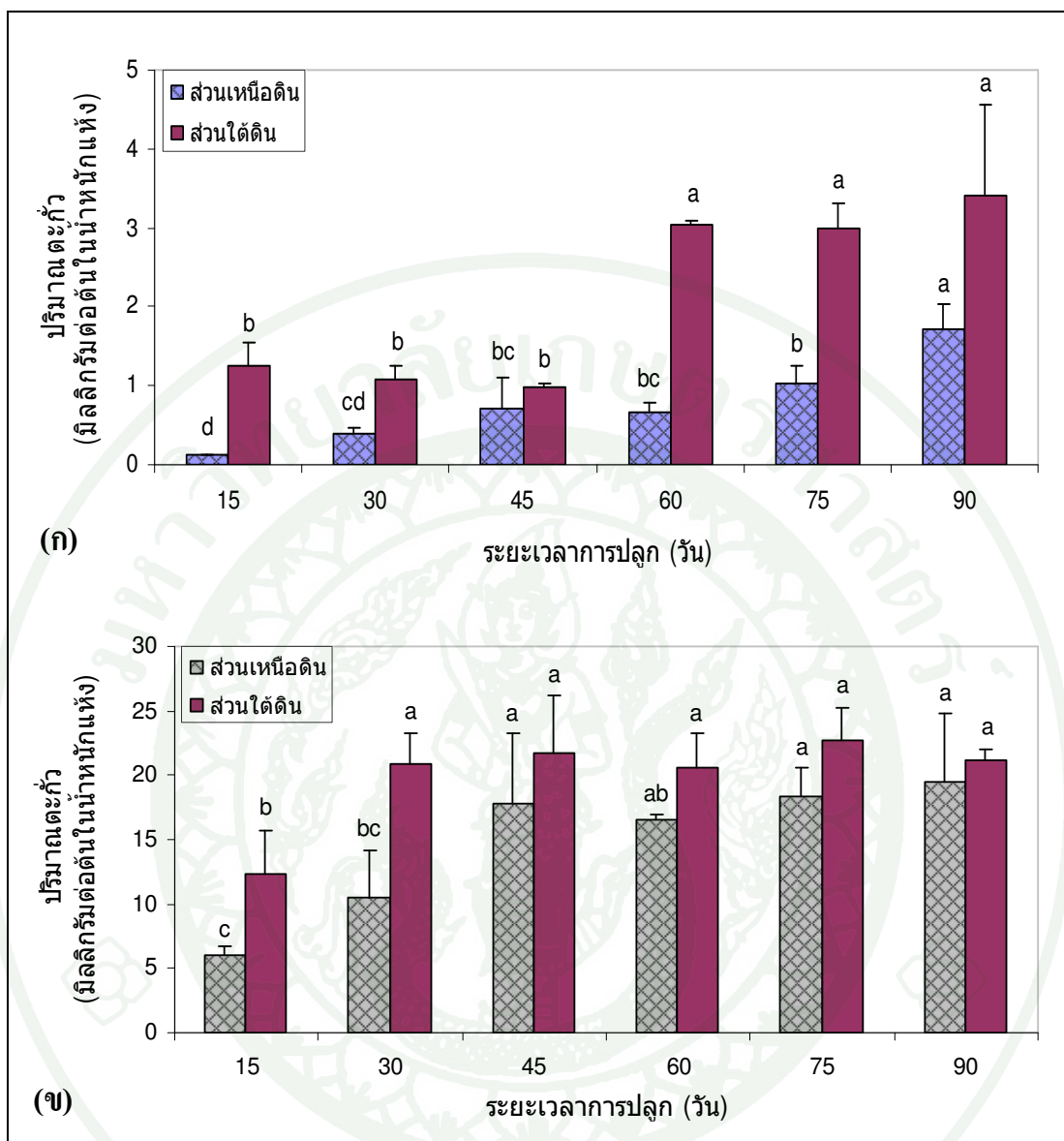
รวมทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วภายหลังการบำบัดในส่วนใต้ดิน พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 90 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วสูงสุดและไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสาบเสือที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 75 และ 60 วันตามลำดับ แต่พบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 45, 30 และ 15 วันตามลำดับ อีกทั้งพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 45 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับสาบเสือที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 15 และ 30 วันตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 19ก และตารางผนวกที่ ก2

2.2.2 ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

ผลการปลูกสาบเสือในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในสาบเสือตามระยะเวลาในการบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 6.07 ± 0.65 , 10.45 ± 3.74 , 17.78 ± 5.54 , 16.49 ± 0.48 , 18.37 ± 2.22 และ 19.54 ± 5.33 มิลลิกรัมต่อต้นในน้ำหนักแห้งตามลำดับในส่วนเหนือดิน และเท่ากับ 12.29 ± 3.46 , 20.87 ± 2.39 , 21.72 ± 4.43 , 20.65 ± 2.63 , 22.68 ± 2.63 และ 21.21 ± 0.82 มิลลิกรัมต่อต้นในน้ำหนักแห้ง ตามลำดับในส่วนใต้ดิน

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วภายหลังการบำบัดในส่วนเหนือดิน พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 90 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วสูงสุดและมีปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 75, 60 และ 45 วันตามลำดับ แต่พบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสาบเสือที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 30 และ 15 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 30 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 15 วันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 19ข และตารางผนวกที่ ก2

รวมทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วภายหลังการบำบัดในส่วนใต้ดิน พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 90 วันพบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วสูงสุดและมีปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 75, 60, 45 และ 30 วันตามลำดับ แต่พบปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสาบเสือที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 19ข และตารางผนวกที่ ก2



ภาพที่ 19 ปริมาณการติดเชื้อและสะสมตะกั่วของสาบเสื่อภายหลังจากการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง; (ก) ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ข) ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว

2.3 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน
ตะกั่วด้วยสารเคลือบผิวภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

2.3.1 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินภายหลังการบำบัดด้วยสารเคลือบผิวในดินที่ไม่
ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

ผลการปลูกสารเคลือบผิวในดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว พบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ในดินภายหลังการบำบัดเมื่อใช้ระยะเวลาในการบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.29 ± 0.02 , 1.29 ± 0.05 , 1.44 ± 0.10 , 1.41 ± 0.02 , 1.43 ± 0.07 และ 1.40 ± 0.02 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัมตามลำดับ และปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดโดยเฉลี่ย เท่ากับ 28.40 ± 5.49 , 30.19 ± 5.26 , 35.84 ± 7.44 , 31.72 ± 2.67 , 33.67 ± 4.86 และ 32.59 ± 0.51 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัมตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ในดินภายหลังการบำบัด พบว่าที่ระยะเวลาการบำบัด 45 วันพบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ในดินสูงสุดและมีปริมาณที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ available Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสารเคลือบผิวที่ระยะเวลาในการบำบัด 30, 75, 60 และ 90 วันตามลำดับ แต่พบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ available Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสารเคลือบผิวที่ระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 20ก และตารางผนวกที่ ก3

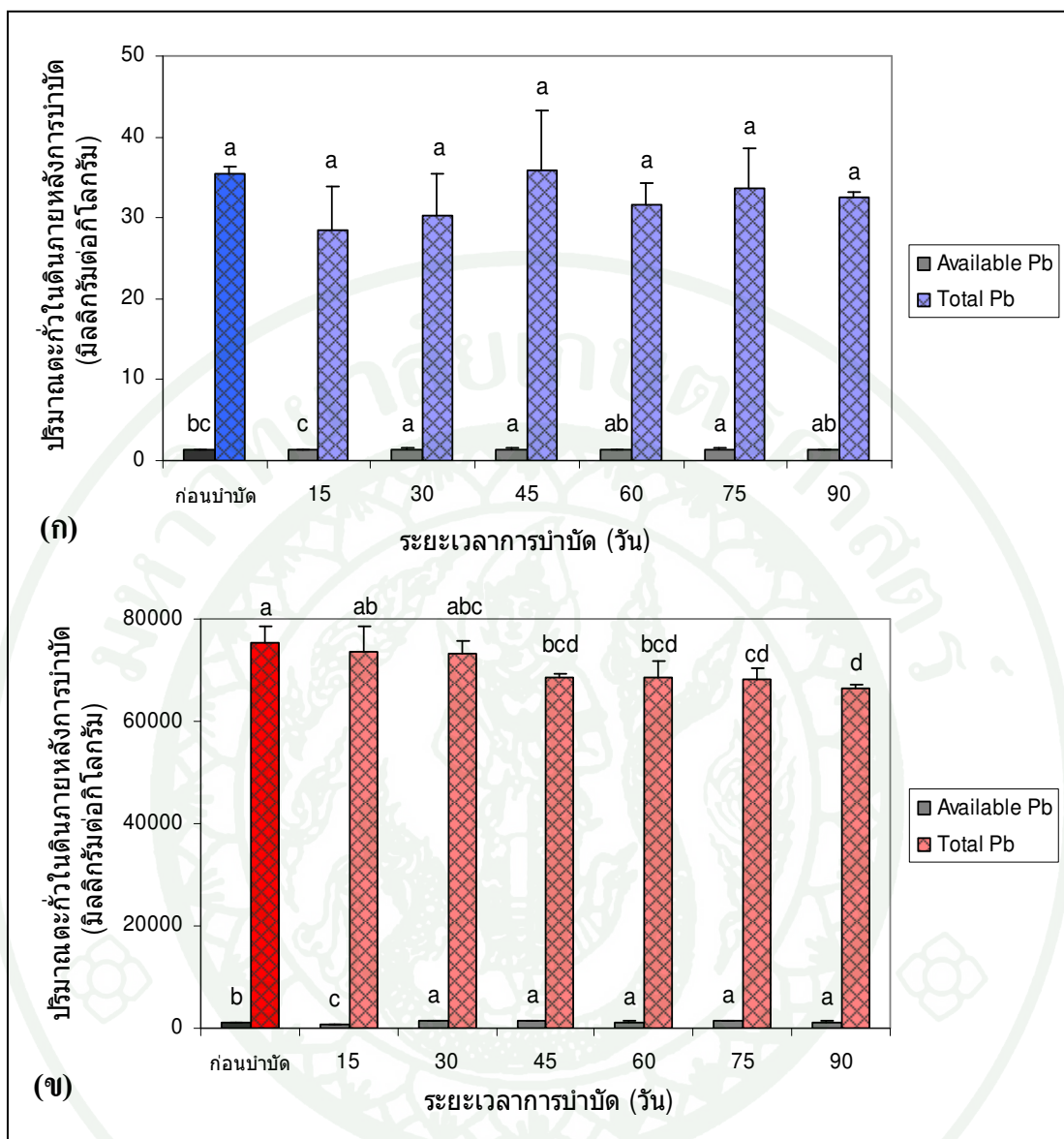
รวมทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังการบำบัด พบว่าที่ระยะเวลาการบำบัด 45 วันพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินสูงสุดแต่มีปริมาณที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสารเคลือบผิวที่ระยะเวลาการบำบัดในทุกดาร์รับการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 20ก และตารางผนวกที่ ก3

2.3.2 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

จากผลการปลูกสาบเสือในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว พบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ในดินภายหลังการบำบัดเมื่อใช้ระยะในการบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 842.60 ± 38.39 , $1,282.54 \pm 41.32$, $1,317.42 \pm 44.18$, $1,246.86 \pm 57.04$, $1,303.77 \pm 22.27$ และ $1,243.27 \pm 81.38$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ $73,570.31 \pm 4,844.88$, $73,351.67 \pm 2,276.03$, $68,446.46 \pm 868.22$, $68,633.85 \pm 3,016.75$, $68,250.0 \pm 2,215.56$ และ $66,530.63 \pm 584.89$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ในดินภายหลังการบำบัด พบว่าที่ระยะเวลาการบำบัด 90 วันพบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ในดินสูงสุด และมีปริมาณตะกั่วที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ available Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัด 75, 60, 45 และ 30 วันตามลำดับ แต่พบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ available Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัด 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 20x และตารางผนวกที่ ก3

รวมทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังการบำบัด พบว่าที่ระยะเวลาการบำบัด 15 วันพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินสูงสุดและมีปริมาณที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัด 30, 45 และ 60 วันตามลำดับ แต่พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัด 75 และ 90 วันตามลำดับ และพบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัด 75 วันที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือที่ระยะเวลาในการบำบัด 90 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 20x และตารางผนวกที่ ก3



ภาพที่ 20 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินภายหลังการบำบัดด้วยسابเสื่อภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง; (ก) ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ข) ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว

แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองถึงศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง พบปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ในดินที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ภายหลังจากการบำบัดทั้งในดินที่ปนเปื้อนและดินไม่ปนเปื้อน โดยมีสาเหตุสำคัญจากอิทธิพลของสารหลั่งราก (root exudates) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของพืช โดย root exudates เป็นสารประกอบอินทรีย์จำพวกกรดอินทรีย์และกรดอะมิโนที่มีประโยชน์ ในเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของแร่ธาตุต่างๆ ในดินให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดใช้และสะสมได้โดยตรง ซึ่งจากการศึกษาของ Uren and Reisenaner (1998); Kim *et al.* (2010) พบความสัมพันธ์ของปริมาณ root exudates ที่แปรผันตามการเจริญเติบโตของพืช รวมทั้งจากการศึกษาของ Krishnamurti *et al.* (1997); Nigam *et al.* (2001); Liu *et al.* (2008) ที่พบอิทธิพลของ root exudates ที่มีความสำคัญต่อปริมาณของโลหะหนักในรูปที่พืชสามารถดูดใช้และสะสมได้ โดยในพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักมีการจะสร้าง root exudates เพิ่มขึ้นเมื่อพืชมีการเจริญเติบโต ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของพืชที่เหมาะสมต่อการบำบัดในเทคนิค phytoremediation

โดยสาเหตุที่พบปริมาณสารหลั่งรากที่เพิ่มขึ้น ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของสาบเสือเมื่อใช้ระยะเวลาในการบำบัดดินที่เพิ่มมากขึ้น พิจารณาจากปริมาณน้ำหนักแห้งของต้นสาบเสือที่ได้ภายหลังการเก็บเกี่ยวทั้งในส่วนของสาบเสือที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน พบน้ำหนักแห้งโดยเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด ทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินดังที่ได้กล่าวมาแล้วในผลการทดลองที่ 2.1 (ภาพที่ 18) จึงส่งผลต่อปริมาณ available Pb ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติภายหลังจากการบำบัดทั้งในส่วนของการปลูกสาบเสือในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ดังภาพที่ 20

จากผลของการศึกษาศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง สามารถสรุปถึงศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดโดยสาบเสือสามารถบำบัดดินที่มีปริมาณความเข้มข้นของ total Pb โดยเฉลี่ยก่อนการบำบัดเท่ากับ $75,529.38 \pm 2,935.98$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้ลดลงจนมีปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินโดยเฉลี่ยภายหลังการบำบัดเท่ากับ $66,530.63 \pm 584.89$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาการบำบัด 90 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 11.91 ต่อหนึ่งรอบของการบำบัด (crop) แต่จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ที่เพิ่มสูงขึ้นจากอิทธิพลของ root exudates ตามระยะการบำบัด ดังนั้นในการใช้สาบเสือหรือพืชชนิดอื่นๆ ที่มีสมบัติ

ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ควรใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายของ available Pb ในดิน ซึ่งเป็นตะกั่วในรูปที่สามารถเคลื่อนย้ายสู่สิ่งแวดล้อมได้ และจากผลการทดลองพบว่าปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือตามระยะเวลาในการบำบัด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน จากผลการทดลองที่ 2.2.2 พบว่าสาบเสือแสดงอาการเป็นพิษต่อตะกั่วโดยมีอาการของรอยไหม้ (necrosis) ในส่วนใบ ตั้งแต่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาบเสือ ดังภาพที่ 17

สำหรับอัตราการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือในดินที่ปนตะกั่ว พบว่ามีแนวโน้มคงที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อระยะเวลาในการบำบัด 30 วัน ในส่วนใต้ดิน และ 45 วัน ในส่วนเหนือดิน (ภาพที่ 19) แม้ว่าจากผลการทดลองพบว่า อัตราการดูดใช้และสะสมตะกั่วมีแนวโน้มคงที่ ณ ระยะเวลาในการบำบัด 30 วัน ในส่วนใต้ดิน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือในดินเหนือดิน ที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 และ 45 วัน ยังพบการเคลื่อนย้ายของตะกั่วในสาบเสือจากรากสู่ลำต้น เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 45 วัน จึงเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการสนับสนุนถึงความสามารถในการเคลื่อนย้ายตะกั่ว (Pb translocation) เมื่อใช้สาบเสือในการบำบัด ส่งผลต่อการพิจารณาถึงประสิทธิภาพและระยะเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมของสาบเสือ ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยเทคนิค phytoremediation

ดังนั้นที่ระยะเวลาดำบัด 45 วัน จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้สาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยพิจารณาจากอัตราการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือที่มีแนวโน้มคงที่ เมื่อเวลาในการบำบัดผ่านไป 45 วัน ในส่วนเหนือดิน อันเนื่องมาจากการศึกษาของ Mattina *et al.* (2003); Deram *et al.* (2006); Khan *et al.* (2006); Branquinho *et al.* (2007) ที่พบว่าปริมาณการดูดใช้และสะสมโลหะหนักในส่วนเหนือดินนั้น เป็นดัชนีชี้วัดที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนย้ายและสะสมของโลหะหนักจากรากสู่ลำต้นของพืช อีกทั้งจากผลการทดลองที่พบปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังจากการบำบัด มีแนวโน้มคงที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 20) จึงเป็นดัชนีชี้วัดที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว จากผลการศึกษาถึงความสามารถในการดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในสภาพพื้นที่จริงเพื่อกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดและเวลาในการเก็บเกี่ยวภายหลังจากการบำบัดด้วยพืช ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการเพิ่มจำนวนรอบของการบำบัดใน 1 ปี ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นจากผลของการใช้ระยะเวลาดำบัดที่สั้นลง

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาสัณยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง ต่อคุณสมบัติของพืชที่มีสัณยภาพเข้าเกณฑ์ lead hyperaccumulator โดยการพิจารณาจากดัชนีชี้วัดต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการตรวจเอกสาร ถึงข้อพิจารณาสัณยภาพของพืชในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าสาบเสือนี้อาจมีลักษณะโดยรวมที่ไม่เข้าเกณฑ์ของพืชที่มีคุณสมบัติเป็น lead hyperaccumulator โดยจากการพิจารณาที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว 45 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดจากการอภิปรายผลในช่วงต้น พบสาบเสือมีปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วในส่วนเหนือดินของสาบเสือโดยเฉลี่ยเท่ากับ 864.6 ± 198.7 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสดของพืช พบค่า TF เท่ากับ 0.74 และ BAF เท่ากับ 0.67 และ C/N ratio เท่ากับ 25.13 เท่า (ตารางที่ 7) ซึ่งจากผลการศึกษาสัณยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วซึ่งไม่เข้าเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากระดับความเป็นพิษของตะกั่วในดินบริเวณลานตะกอนหางแร่ซึ่งเป็นดินที่เลือกใช้ในการศึกษาที่ส่งผลต่อความสามารถในการเจริญเติบโตของสาบเสือ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสัณยภาพในการบำบัด (ตารางที่ 2) จากการพิจารณาถึงสัณยภาพของสาบเสือในการดูดใช้และสะสมตะกั่ว จากการสำรวจการแพร่กระจายของพืชในผลการทดลองที่ 1.5 พบการแพร่กระจายของสาบเสือในพื้นที่โรงเต่งแร่ซึ่งเข้าเกณฑ์ lead hyperaccumulator เพียงบริเวณเดียว (ตารางที่ 5) สามารถสนับสนุนถึงความสามารถในการทนต่อระดับความเป็นพิษของตะกั่วในดินเมื่อใช้สาบเสือในการบำบัด เมื่อมีการปนเปื้อนตะกั่วในดินที่สูงเกินระดับความเข้มข้นของปริมาณตะกั่วที่พบในพื้นที่โรงเต่งแร่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วน of ปริมาณ available Pb ซึ่งเป็นตะกั่วในรูปที่พืชสามารถดูดใช้และสะสมโดยตรง จึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาบเสือในสภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว

ดังนั้นเมื่อกล่าวโดยสรุปจากผลการทดลองถึงศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดดินที่เกิดการปนเปื้อนตะกั่วในพื้นที่จริงได้ โดยสามารถคาดการณ์จำนวนรอบของการบำบัดดินในพื้นที่ลานตะกอนหางแร่ ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินก่อนการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ $75,529.38 \pm 2,935.98$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้ลดลงจนมีปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ $68,446.46 \pm 868.22$ ที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 9.38 ต่อหนึ่งรอบของการบำบัด (crop) ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณประสิทธิภาพของการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในพื้นที่ลานตะกอนหางแร่ โดยใช้สาบเสือในการบำบัดเพื่อให้มีปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ลดลงร้อยละ 50 ของปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วในดินทั้งหมด จะต้องทำการปลูกสาบเสือเพื่อใช้เป็นพืชบำบัดจำนวนทั้งสิ้น 6 รอบการบำบัด (crop) คิดเป็นระยะเวลาในการบำบัดทั้งสิ้น 8 เดือนโดยประมาณ อีกทั้งพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดอาจเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้สาบเสือในการบำบัดดินที่มีปริมาณความเข้มข้นของ available Pb ไม่เกิน 864.6 ± 198.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ที่ไม่เกิน $18,543.0 \pm 3,417.99$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากเหตุผลที่พบสาบเสือมีความสามารถในการดูดซับและสะสมตะกั่วได้สูงสุด เมื่อมีตะกั่วในรูป available Pb ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของสาบเสือ ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น รวมทั้งยังมีปัจจัยทางสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการใช้สาบเสือในการบำบัด อาทิ ระดับของ pH ในดินที่ไม่ต่ำจนเกินไปหรือการเกิดน้ำท่วมขังสลับแห้งในพื้นที่ (flood-drying) ที่ส่งผลต่อระดับ pH ที่ลดต่ำลงตามระยะเวลาของการเกิดน้ำท่วมขังจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation-reduction) ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณตะกั่วในรูป available Pb เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยสาบเสือในพื้นที่จริง

ตารางที่ 7 การพิจารณาสมบัติของสาบเสือต่อความสามารถในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง (lead hyperaccumulator) จากการศึกษาศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลองที่ระยะเวลาในการบำบัด 45 วัน

หลักเกณฑ์ ในการพิจารณา	ค่าเกณฑ์ ขั้นต่ำที่ใช้	ศักยภาพของ สาบเสือจาก การทดลอง	ผลการ พิจารณา	เอกสารอ้างอิง
(1) ปริมาณความเข้มข้น ตะกั่วทั้งหมด (total Pb) ในส่วนเนื้อดินที่ปลูก ในพื้นที่ปนเปื้อน	มากกว่า $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$	864.6 mg kg^{-1}	ไม่เข้าเกณฑ์	Baker and Brooks (1989)
(2) ค่า translocation factor (TF)	มากกว่า 1	0.74	ไม่เข้าเกณฑ์	Baker and Brooks (1989); Baker <i>et al.</i> (1994) Deram <i>et al.</i> (2006);
(3) ค่า bioaccumulation factor (BAF)	มากกว่า 1	0.67	ไม่เข้าเกณฑ์	Khan <i>et al.</i> (2006); Branquinho <i>et al.</i> (2007)
(4) อัตราส่วนปริมาณ ความเข้มข้นตะกั่วใน ส่วนเนื้อดินที่ปลูกใน พื้นที่ปนเปื้อนต่อพื้นที่ ไม่ปนเปื้อน (C/NC ratio)	10-500 เท่า	25.13 เท่า	เข้าเกณฑ์	Shen and Liu (1998)

3. การทดลองที่ 3 การศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

3.1.1 การศึกษาระดับของความดันที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

จากอิทธิพลของระดับความดันต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี steam explosion และ Wayman's method จากการนำตัวอย่างต้นสาบเสือที่ได้จากพื้นที่ไม่ปนเปื้อน เช่นเดียวในการทดลองที่ 2.2 ผ่านกระบวนการ steam explosion ภายใต้สภาวะแตกต่างกันที่ระดับความดัน 15, 17, 19, 21 และ 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และควบคุมระยะเวลาในกระบวนการ steam explosion ที่เวลา 3 นาที ในทุกๆ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง โดยผลจากการทดลองพบสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีแต่ละชนิดในสาบเสือมีความแตกต่างกันภายใต้ระดับความดันต่างๆ ดังนี้

(1) ปริมาณ water-soluble material ในสาบเสือที่พบภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method โดยที่ระดับความดัน 15, 17, 19, 21 และ 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบปริมาณ water-soluble material ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความดันในกระบวนการ steam explosion ซึ่งพบปริมาณ water-soluble material โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.25 ± 0.001 , 0.29 ± 0.001 , 0.29 ± 0.001 , 0.24 ± 0.003 และ 0.25 ± 0.002 กรัมต่อตัวอย่างสาบเสือ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ water-soluble material สูงสุด ณ ระดับความดัน 17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่พบปริมาณ water-soluble material ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 15, 23 และ 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ อีกทั้งพบปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 23 กิโลกรัมต่อตาราง

เซนติเมตร แต่มีปริมาณ water-soluble material ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 21ก และตารางผนวกที่ ก4

(2) ปริมาณ methanol-soluble lignin ในسابเสือที่พบภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ที่ระดับความดัน 15, 17, 19, 21 และ 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความดันในกระบวนการ steam explosion ซึ่งพบปริมาณ methanol-soluble lignin โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.05 ± 0.003 , 0.08 ± 0.005 , 0.09 ± 0.004 , 0.09 ± 0.002 และ 0.11 ± 0.001 กรัมต่อตัวอย่างسابเสือ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ methanol-soluble lignin สูงสุด ณ ระดับความดัน 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยพบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 19, 21, 17 และ 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ และพบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่พบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 17 และ 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ อีกทั้ง ณ ระดับความดัน 17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อีกทั้งพบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 21ข และตารางผนวกที่ ก4

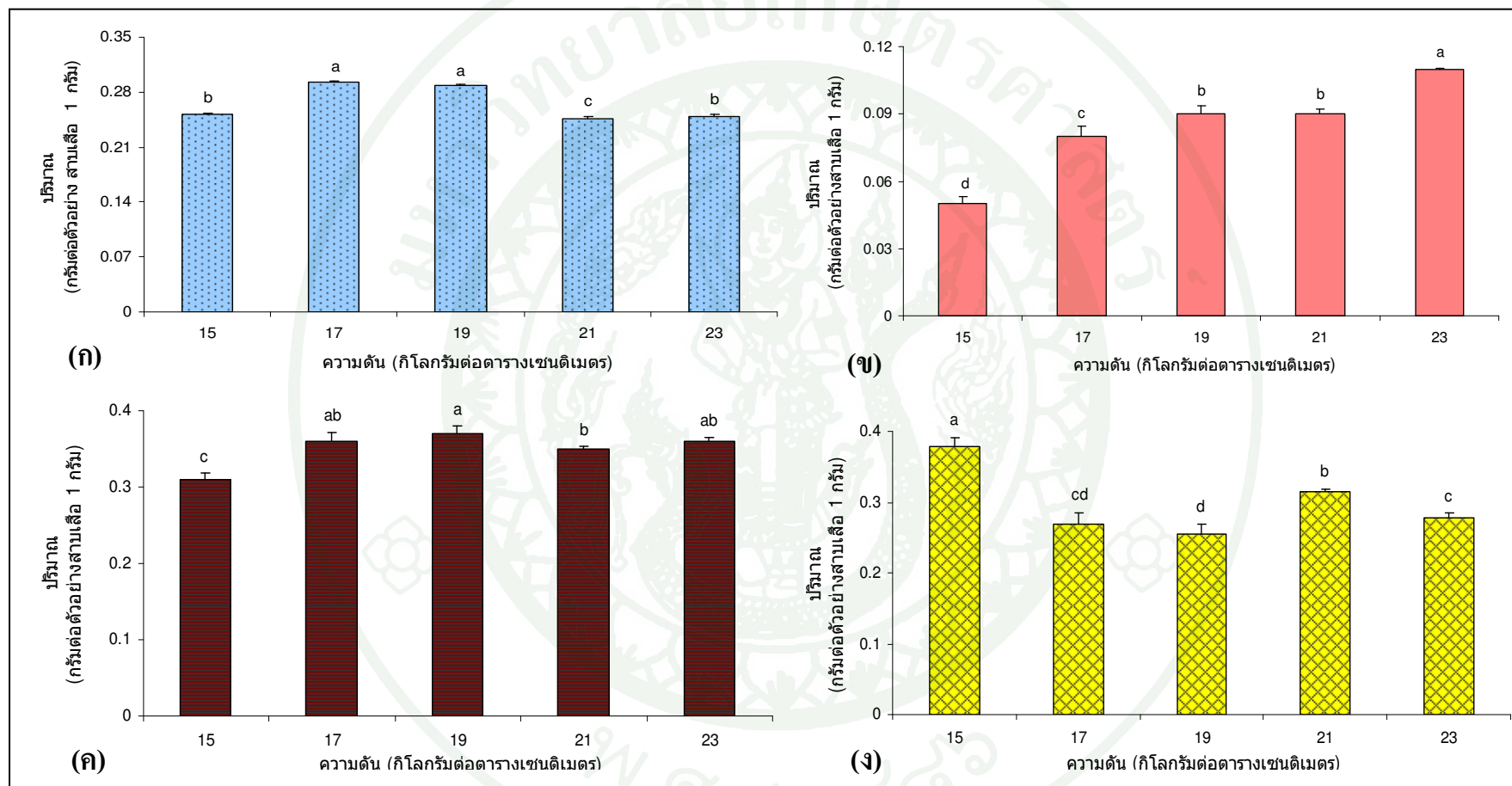
(3) ปริมาณ Klason lignin ในسابเสือที่พบภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ที่ระดับความดัน 15, 17, 19, 21 และ 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบปริมาณ Klason lignin ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความดันในกระบวนการ steam explosion ซึ่งพบปริมาณ Klason lignin โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.31 ± 0.008 , 0.36 ± 0.011 , 0.37 ± 0.01 , 0.35 ± 0.003 และ 0.36 ± 0.004 กรัมต่อตัวอย่างسابเสือ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ Klason lignin สูงสุด ณ ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Klason lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 17 และ 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่พบปริมาณ Klason lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Klason lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 21 และ 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

อีกทั้ง ณ ระดับความดัน 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบปริมาณ Klason lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Klason lignin ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 21ค และตารางผนวกที่ ก4

(4) ปริมาณ cellulose ในสาบเสือที่พบภายหลังจากการคำนวณจากปริมาณของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดข้างต้นที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ที่ระดับความดัน 15, 17, 19, 21 และ 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบปริมาณ cellulose ที่ลดลงเมื่อเพิ่มระดับความดันในกระบวนการ steam explosion ซึ่งพบปริมาณ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.38 ± 0.012 , 0.27 ± 0.016 , 0.25 ± 0.014 , 0.32 ± 0.002 และ 0.28 ± 0.006 กรัมต่อตัวอย่างสาบเสือ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ cellulose สูงสุด ณ ระดับความดัน 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่พบปริมาณ cellulose ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 21, 23, 17 และ 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ และพบว่า ณ ระดับความดัน 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบปริมาณ cellulose ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 23, 17 และ 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ พบปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่มีปริมาณ cellulose ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ ณ ระดับความดัน 17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบปริมาณ cellulose ที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 21ง และตารางผนวกที่ ก4

โดยจากปริมาณที่พบแตกต่างกันขององค์ประกอบเคมีของสาบเสือภายหลังจากระบวนการ steam explosion และ Wayman's method จึงนำไปสู่หลักการพิจารณาถึงระดับความดันที่เหมาะสมในการเลือกใช้ต่อการศึกษาร้อยละขององค์ประกอบของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไปถึงความเป็นไปได้ในการนำโลหะตะกั่วที่มีอยู่ในพืชจากการดูดใช้และสะสมตะกั่วภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งจากการศึกษาของ Kobayashi *et al.* (2005a) ที่ศึกษาสัณยภาพของเฟิร์น (*Athyrium yokoscense*) ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และเหล็ก รวมทั้งการศึกษาร้อยละการสะสมของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ภายหลังจากการดูดใช้และสะสมของพืชชนิดดังกล่าวโดยวิธี steam explosion และ Wayman's method พบว่าปริมาณของโลหะหนักที่พบภายหลังการบำบัดจะมีการสะสมอยู่ในองค์ประกอบภายในแต่ละส่วนที่แตกต่างกันได้แก่ (1) ทองแดง (Cu) จะพบการสะสมมากที่สุด ใน water-soluble material > Klason lignin > methanol-soluble lignin ตามลำดับโดยไม่พบการสะสมของทองแดงใน cellulose จากการวิเคราะห์ในส่วนเหนื่อดิน และพบการสะสมของทองแดงใน Klason lignin > methanol-soluble lignin ตามลำดับโดยไม่พบการสะสมของทองแดงใน water-soluble material และ cellulose จากการวิเคราะห์ในส่วนได้ดิน (2) เหล็ก (Fe) จะพบการสะสมมากที่สุด ใน water-soluble material > cellulose > methanol-soluble lignin > Klason lignin ตามลำดับในส่วนเหนื่อดิน และพบการสะสมของเหล็กใน Klason lignin > water-soluble material > methanol-soluble lignin ตามลำดับโดยไม่พบการสะสมของเหล็กใน cellulose จากการวิเคราะห์ในส่วนได้ดิน และ (3) สังกะสี (Zn) จะพบการสะสมมากที่สุด ใน water-soluble material > Klason lignin > methanol-soluble lignin ตามลำดับ โดยไม่พบการสะสมของสังกะสีใน cellulose จากการวิเคราะห์ในส่วนเหนื่อดิน และพบการสะสมของสังกะสีใน Klason lignin > water-soluble material > methanol-soluble lignin ตามลำดับโดยไม่พบการสะสมใน cellulose จากการวิเคราะห์ในส่วนได้ดิน โดยเฉพาะปริมาณการสะสมของตะกั่ว (Pb) ในองค์ประกอบของพืชชนิดดังกล่าวภายหลังการบำบัดพบว่าการสะสมของตะกั่วมากที่สุด ใน water-soluble material > Klason lignin โดยไม่พบการสะสมของตะกั่วใน methanol-soluble lignin และ cellulose จากการวิเคราะห์ในส่วนเหนื่อดิน และพบการสะสมของตะกั่วใน Klason lignin > methanol-soluble lignin > water-soluble material ตามลำดับโดยไม่พบการสะสมตะกั่วใน cellulose จากการวิเคราะห์ในส่วนได้ดิน

ดังนั้นในการพิจารณาถึงสถานะความดันที่เหมาะสมในسابเสื่อภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และการศึกษาปริมาณการสะสมของตะกั่วโดยวิธี steam explosion และ Wayman's method จึงต้องทำการพิจารณาโดยใช้สมมติฐานเช่นเดียวกับปริมาณการสะสมของตะกั่วเป็นจำนวนมากในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ โดยไม่นำปริมาณของ cellulose ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการสกัดเข้ามาร่วมในการพิจารณา ร่วมกับการพิจารณาตามสมมติฐานของ Kobayashi *et al.* (2005b) ที่พบว่าปริมาณของโลหะหนักจะมีการแปรผันตามสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของพืชแต่ละชนิดภายหลังจากการสกัด ดังนั้นจากการพิจารณาโดยการเปรียบเทียบสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของسابเสื่อที่เกิดขึ้น ภายหลังจากการทดลองที่สถานะความดันในระดับต่างๆ แล้วทำการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี DMRT จึงสรุปได้ว่า ณ ระดับความดันที่ 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นสถานะที่เหมาะสมในการศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของسابเสื่อด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method



ภาพที่ 21 อิทธิพลของระดับความดันต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ด้วยวิธีsteam explosion และ Wayman's method;

(ก) = water-soluble material (ข) = methanol-soluble lignin (ค) = Klason lignin (ง) = cellulose

3.1.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

จากอิทธิพลของระยะเวลาต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีภายในสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี steam explosion และ Wayman's method จากการนำตัวอย่างต้นสาบเสือที่ได้จากพื้นที่ไม่ปนเปื้อน เช่นเดียวในคำรับควบคุมของการทดลองที่ 2.2 โดยทำการ steam explosion ในระยะเวลาแตกต่างกันที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 นาที โดยควบคุมระดับความดันที่ 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรในทุกๆ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นระดับความดันที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองที่ 3.1.1 โดยจากการทดลองพบว่าสัดส่วนปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของต้นสาบเสือที่พบแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ณ ระยะเวลาต่างๆ ดังนี้

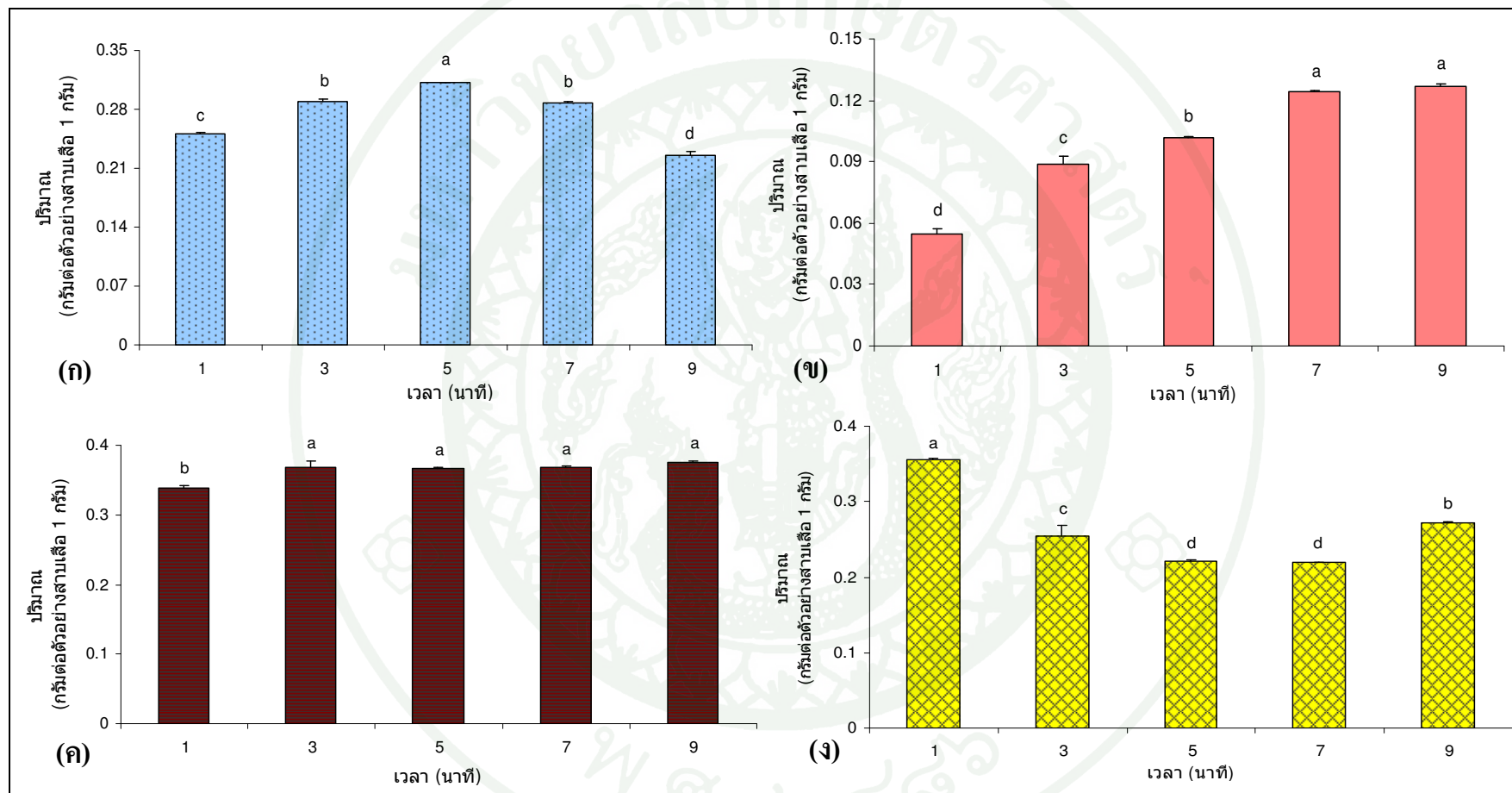
(1) ปริมาณ water-soluble material ในสาบเสือที่พบภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method โดยระยะเวลาที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 นาที พบปริมาณ water-soluble material ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการ steam explosion โดยพบปริมาณ water-soluble material โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.25 ± 0.002 , 0.29 ± 0.004 , 0.31 ± 0.001 , 0.29 ± 0.002 และ 0.23 ± 0.004 กรัมต่อตัวอย่างสาบเสือ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ water-soluble material สูงสุด ณ เวลา 5 นาที โดยพบปริมาณ water-soluble material ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 3, 7, 1 และ 9 นาทีตามลำดับ โดยพบปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 3 นาที ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 7 นาที แต่มีปริมาณ water-soluble material ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 1 และ 9 นาที ตามลำดับ อีกทั้ง ณ เวลา 1 นาที พบปริมาณ water-soluble material ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ water-soluble material ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 9 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 22ก และตารางผนวกที่ 65

(2) ปริมาณ methanol-soluble lignin ในسابเสื้อที่พบภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method โดยระยะเวลาที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 นาที พบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการ steam explosion โดยพบปริมาณ methanol-soluble lignin โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.05 ± 0.002 , 0.09 ± 0.004 , 0.10 ± 0 , 0.12 ± 0.001 และ 0.13 ± 0.001 กรัมต่อตัวอย่างسابเสื้อ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ methanol-soluble lignin สูงสุด ณ เวลา 9 นาที โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 7 นาที แต่พบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 5, 3 และ 1 นาที ตามลำดับ และ ณ เวลา 5 นาทีพบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 3 และ 1 นาที ตามลำดับ อีกทั้ง ณ เวลา 3 นาทีพบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ methanol-soluble lignin ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 1 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 22ข และตารางผนวกที่ ก5

(3) ปริมาณ Klason lignin ในسابเสื้อที่พบภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method โดยระยะเวลาที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 นาที พบปริมาณ Klason lignin ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการ steam explosion โดยพบปริมาณ Klason lignin โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.34 ± 0.004 , 0.37 ± 0.01 , 0.37 ± 0.003 , 0.37 ± 0.001 และ 0.38 ± 0.001 กรัมต่อตัวอย่างسابเสื้อ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ Klason lignin สูงสุด ณ เวลา 9 นาที โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Klason lignin ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 3, 5 และ 7 นาทีตามลำดับ แต่พบปริมาณ Klason lignin ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Klason lignin ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 1 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพ 22ค และตารางผนวกที่ ก5

(4) ปริมาณ cellulose ในสาบเสือที่พบภายหลังจากการคำนวณจากปริมาณของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดข้างต้นที่เกิดขึ้นภายหลังจากระบวนการ steam explosion และ Wayman's method โดยระยะเวลาที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 นาที จะพบปริมาณ cellulose ที่ลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการ steam explosion โดยพบปริมาณของ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.36 ± 0.001 , 0.25 ± 0.014 , 0.22 ± 0.002 , 0.22 ± 0.001 และ 0.27 ± 0.001 กรัมต่อตัวอย่างสาบเสือ 1 กรัมในน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบปริมาณ cellulose สูงสุด ณ เวลา 1 นาที โดยพบปริมาณ cellulose ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 9, 3, 5 และ 7 นาทีตามลำดับ โดย ณ เวลา 9 นาทีพบปริมาณ cellulose ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 3, 5 และ 7 นาทีตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองที่เวลา 3 นาทีพบปริมาณ cellulose ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 5 และ 7 นาทีตามลำดับ อีกทั้งพบปริมาณ cellulose ณ เวลา 5 นาทีไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้น ณ เวลา 7 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพ 22 และตารางผนวกที่ ก5

ในการพิจารณาระยะเวลาที่เหมาะสมในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method โดยทำการพิจารณาตามสมมติฐานของ Kobayashi *et al.* (2005a) ที่มีการพิจารณาที่พบปริมาณการสะสมของตะกั่วเป็นจำนวนมากในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับเป็นหลัก ร่วมกับการพิจารณาตามสมมติฐานของ Kobayashi *et al.* (2005b) ที่ได้กล่าวถึงปริมาณของโลหะหนักที่พบ จะมีปริมาณที่แปรผันตามสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของพืชแต่ละชนิดภายหลังจากการสกัดเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.1.1 เพราะฉะนั้นการพิจารณาโดยการเปรียบเทียบสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทดลองที่สภาวะความดันในระดับต่างๆ แล้วทำการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี DMRT จึงสรุปได้ว่า ณ เวลา 5 นาที จึงเป็นเวลาที่เหมาะสมในการศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบเคมีของสาบเสื่อด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method



ภาพที่ 22 อิทธิพลของระยะเวลาต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเลื้อ ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method;

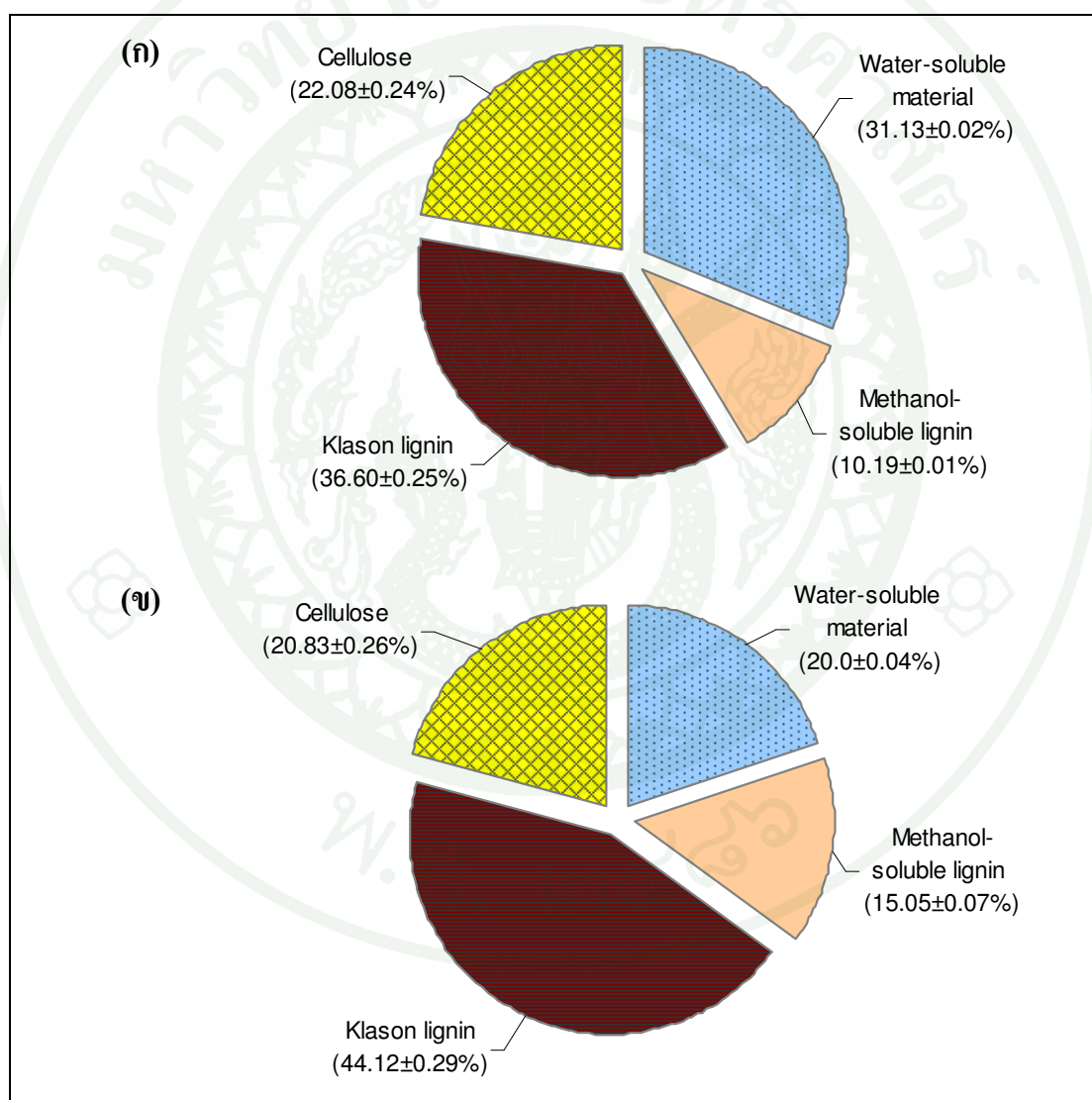
(ก) = water-soluble material (ข) = methanol-soluble lignin (ค) = Klason lignin (ง) = cellulose

3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของสาบเสื่อภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method

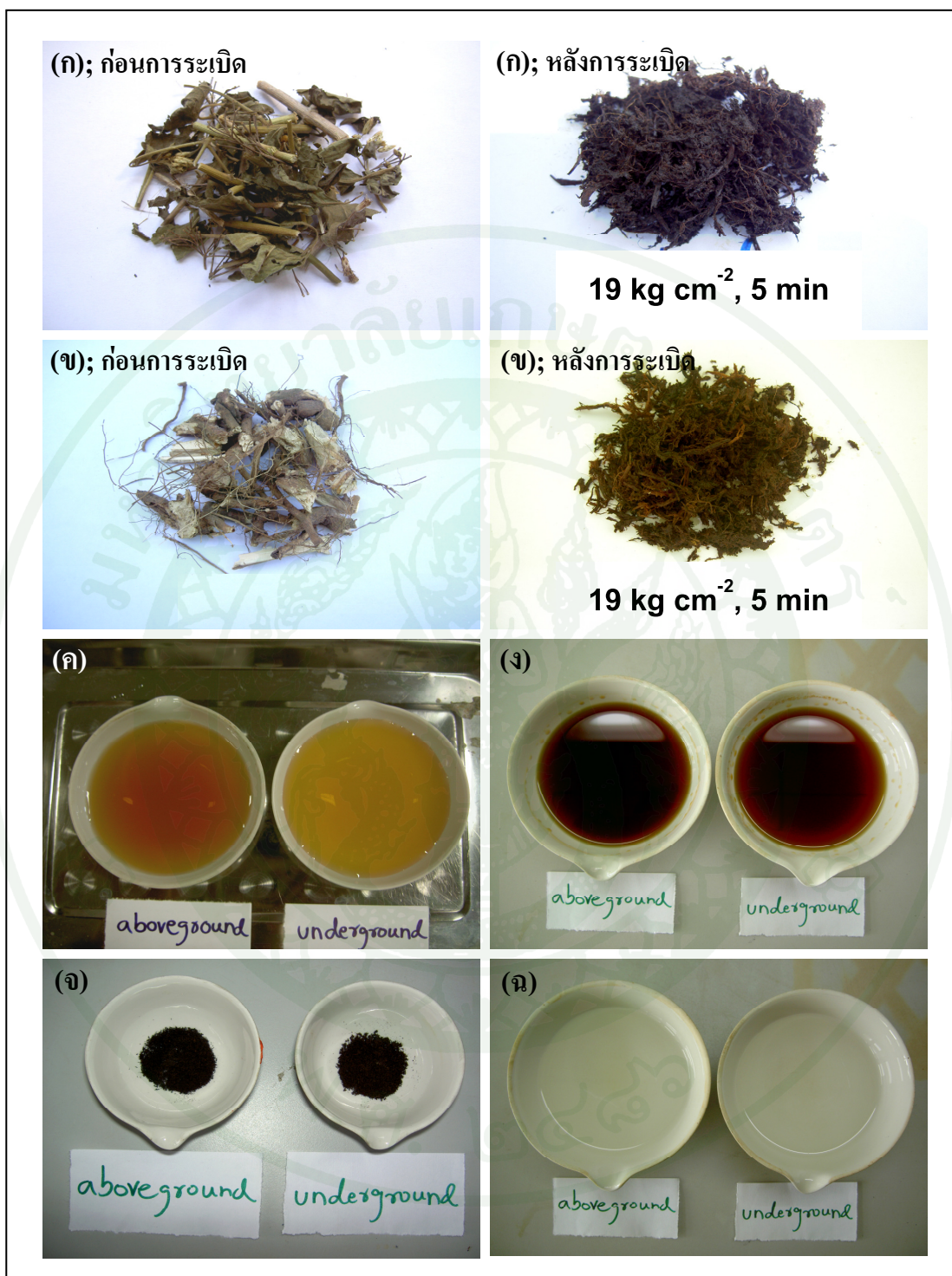
จากการศึกษาสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสื่อภายหลังกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method โดยใช้สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองที่ 3.1.1 และ 3.1.2 โดยทำการทดลองทั้งในส่วนเนื้อดินและส่วนไต้ดิน พบลักษณะทางกายภาพและสัดส่วนของปริมาณ water-soluble materials, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose ที่แตกต่างกัน พบปริมาณโดยเฉลี่ยร้อยละ 31.13 ± 0.02 , 10.19 ± 0.01 , 36.60 ± 0.25 และ 22.08 ± 0.24 ตามลำดับในส่วนเนื้อดิน และร้อยละ 20.0 ± 0.04 , 15.05 ± 0.07 , 44.12 ± 0.29 และ 20.83 ± 0.26 ตามลำดับในส่วนไต้ดิน ดังภาพที่ 23 และ 24

จากผลการทดลองที่พบสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีภายในสาบเสื่อที่แตกต่างกันนี้พบว่าในส่วน Klason lignin และ water-soluble material เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบหลักในส่วนเนื้อดิน และในส่วน Klason lignin เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบหลักในส่วนไต้ดิน ซึ่งสอดคล้องในการพิจารณาถึงการเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมที่พิจารณาในส่วนของ Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับเป็นหลัก โดยไม่ใช่สัดส่วนของปริมาณ cellulose ที่เกิดขึ้นภายหลังการระเบิดและการสกัดด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method เข้าร่วมในการพิจารณาในส่วนของการทดลองที่ 3.1.1 และ 3.1.2 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีภายในสาบเสื่อกับสัดส่วนปริมาณองค์ประกอบทางเคมีภายในพืชชนิดอื่นๆ ได้แก่ White Birch (*Betula platyphylla*) ใผ่ญี่ปุ่น (*Phyllostachys heteroclada*) และเฟิร์นญี่ปุ่น (*Athyrium yokoscense*) เมื่อนำตัวอย่างพืชในแต่ละชนิดผ่านกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method จากตัวอย่าง ในส่วนลำต้นของ White Birch และใผ่ญี่ปุ่น รวมทั้งในส่วนเนื้อดินของเฟิร์นญี่ปุ่นเมื่อเทียบกับสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีภายในสาบเสื่อในส่วนเนื้อดิน พบสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีภายในพืชแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งพบปริมาณ water-soluble material ที่ร้อยละ 28, 14 และ 42 โดยประมาณใน White Birch, ใผ่ญี่ปุ่น และเฟิร์นญี่ปุ่น ตามลำดับ พบปริมาณ methanol-soluble lignin ที่ร้อยละ 8, 5 และ 13 โดยประมาณตามลำดับ พบปริมาณ Klason lignin ที่ร้อยละ 15, 26 และ 37 โดยประมาณตามลำดับ และพบปริมาณ cellulose ที่ร้อยละ 49, 53 และ 24 โดยประมาณตามลำดับ ซึ่งจากการเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของ

สาบเสื่อกับสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของพืชทั้ง 3 ชนิด ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น พบความคล้ายคลึงกันของสัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่ภายหลังจาก กระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ของสาบเสื่อและเฟิร์นญี่ปุ่นจึงสามารถ สันนิษฐานได้ถึงความคล้ายคลึงกันทางสรีรวิทยาเบื้องต้นระหว่างสาบเสื่อ (*Chromolaena odorata*) และเฟิร์นญี่ปุ่น (*Athyrium yokoscense*) (Tanahashi *et al.*, 1988; Kobayashi *et al.*, 2004; Kobayashi *et al.*, 2005b) ดังตารางที่ 8



ภาพที่ 23 สัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ของสาบเสื่อ ภายหลังจากกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที



ภาพที่ 24 ลักษณะทางกายภาพของสาบเสือในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ก่อนและหลัง steam explosion ลักษณะ water-soluble material (ค) methanol-soluble lignin (ง) Klason lignin (จ) และ cellulose (ฉ) ที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี Wayman's method

ตารางที่ 8 สัดส่วนของปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในพืชชนิดต่างๆ ภายหลังจากกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method

ชนิดของพืช	ตำแหน่ง	สภาวะที่ใช้	สัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมี ของพืช (% โดยประมาณ)				เอกสาร อ้างอิง
			WS	ML	KL	C	
White Birch (<i>Betula platyphylla</i>)	ลำต้น	20 kg cm ⁻² , 1 min	28	8	15	49	Tanahashi <i>et al.</i> (1988)
ไผ่ญี่ปุ่น (<i>Phyllostachys heteroclada</i>)	ลำต้น	36 kg cm ⁻² , 1 min	16	5	26	53	Kobayashi <i>et al.</i> (2004)
เฟิร์นญี่ปุ่น (<i>Athyrium yokoscense</i>)	ส่วน เหนือดิน	26 kg cm ⁻² , 3 min	42	13	37	24	Kobayashi <i>et al.</i> (2005b)
	ส่วนใต้ดิน		19	13	37	31	
สาบเสือ (<i>Chromolaena odorata</i>)	ส่วน เหนือดิน	19 kg cm ⁻² , 5 min	31	10	36	22	จากการ ทดลอง
	ส่วนใต้ดิน		20	15	44	20	

หมายเหตุ WS = water-soluble material

ML = methanol-soluble lignin

KL = Klason lignin

C = cellulose

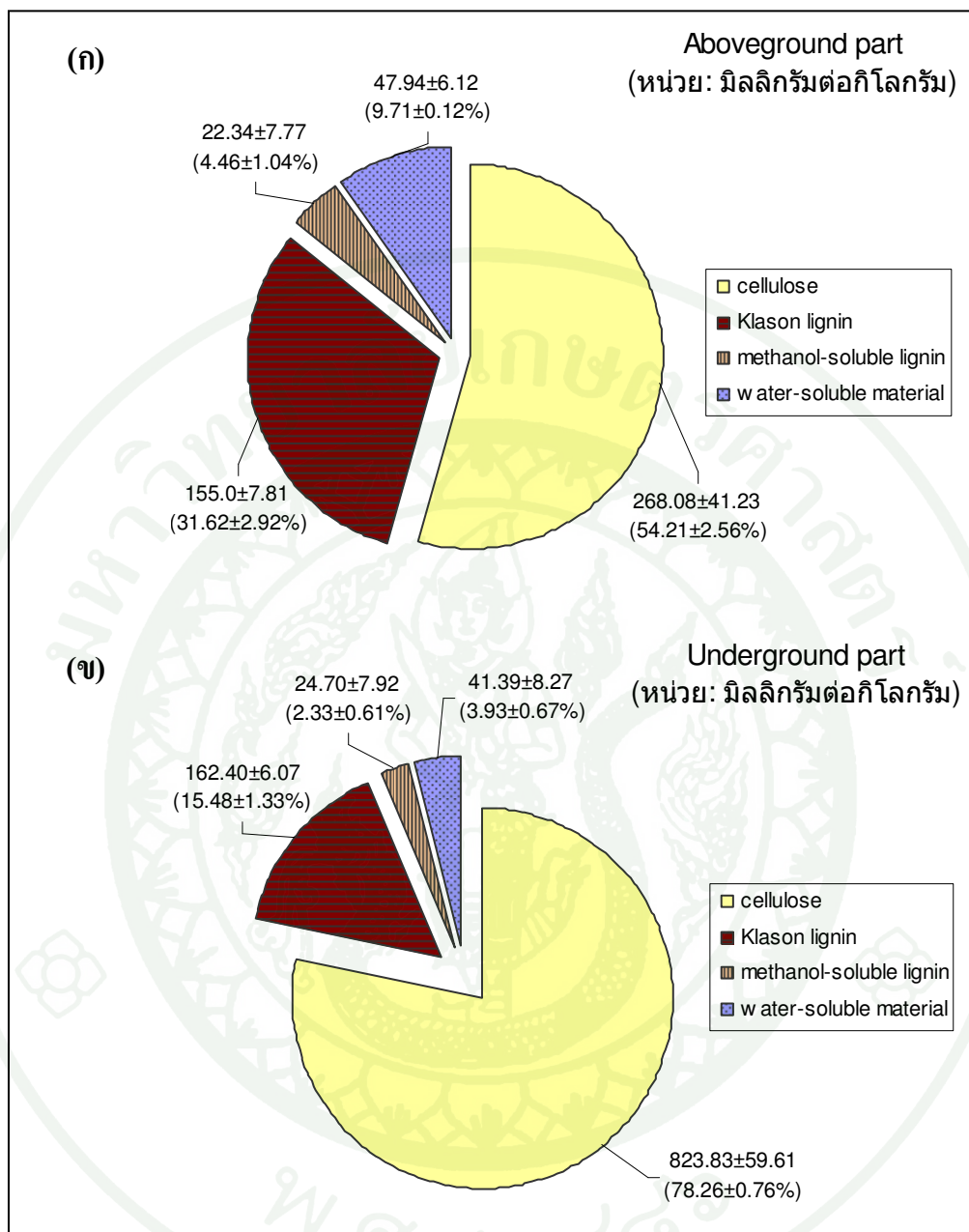
3.2 การศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

3.2.1 ปริมาณการสะสมตะกั่วในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

จากการศึกษาถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน พบปริมาณการสะสมตะกั่ว ในรูปปริมาณความเข้มข้นของ total Pb โดยเฉลี่ย จากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในปริมาณที่แตกต่างกันดังนี้

(1) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วันในส่วนเหนือดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 47.94 ± 6.12 , 22.34 ± 7.77 , 155.0 ± 7.81 และ 268.08 ± 41.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 9.71 ± 0.12 , 4.46 ± 1.04 , 31.62 ± 2.92 และ 54.21 ± 2.56 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน พบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุด และมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 25 และตารางผนวกที่ 6

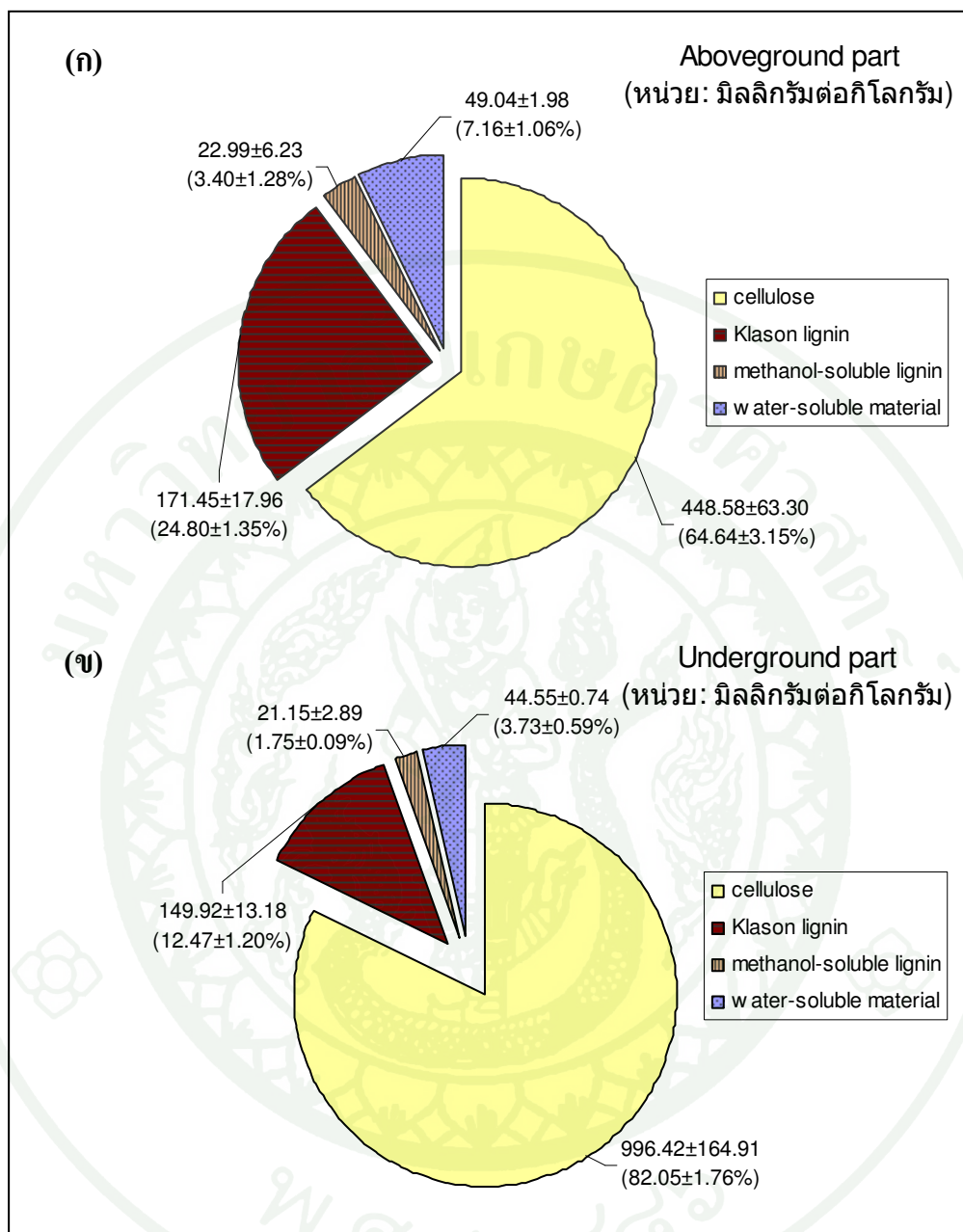
และที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วันในส่วนใต้ดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 41.39 ± 8.27 , 24.70 ± 7.92 , 162.40 ± 6.07 และ 823.83 ± 59.61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.93 ± 0.67 , 2.33 ± 0.61 , 15.48 ± 1.33 และ 78.26 ± 0.76 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน พบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 25 และตารางผนวกที่ ก6



ภาพที่ 25 ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วัน

(2) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันในส่วนเหนือดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 49.04 ± 1.98 , 22.99 ± 6.23 , 171.45 ± 17.96 และ 448.58 ± 63.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 7.16 ± 1.06 , 3.40 ± 1.28 , 24.80 ± 1.35 และ 64.64 ± 3.15 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน พบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 26ก และตารางผนวกที่ ก7

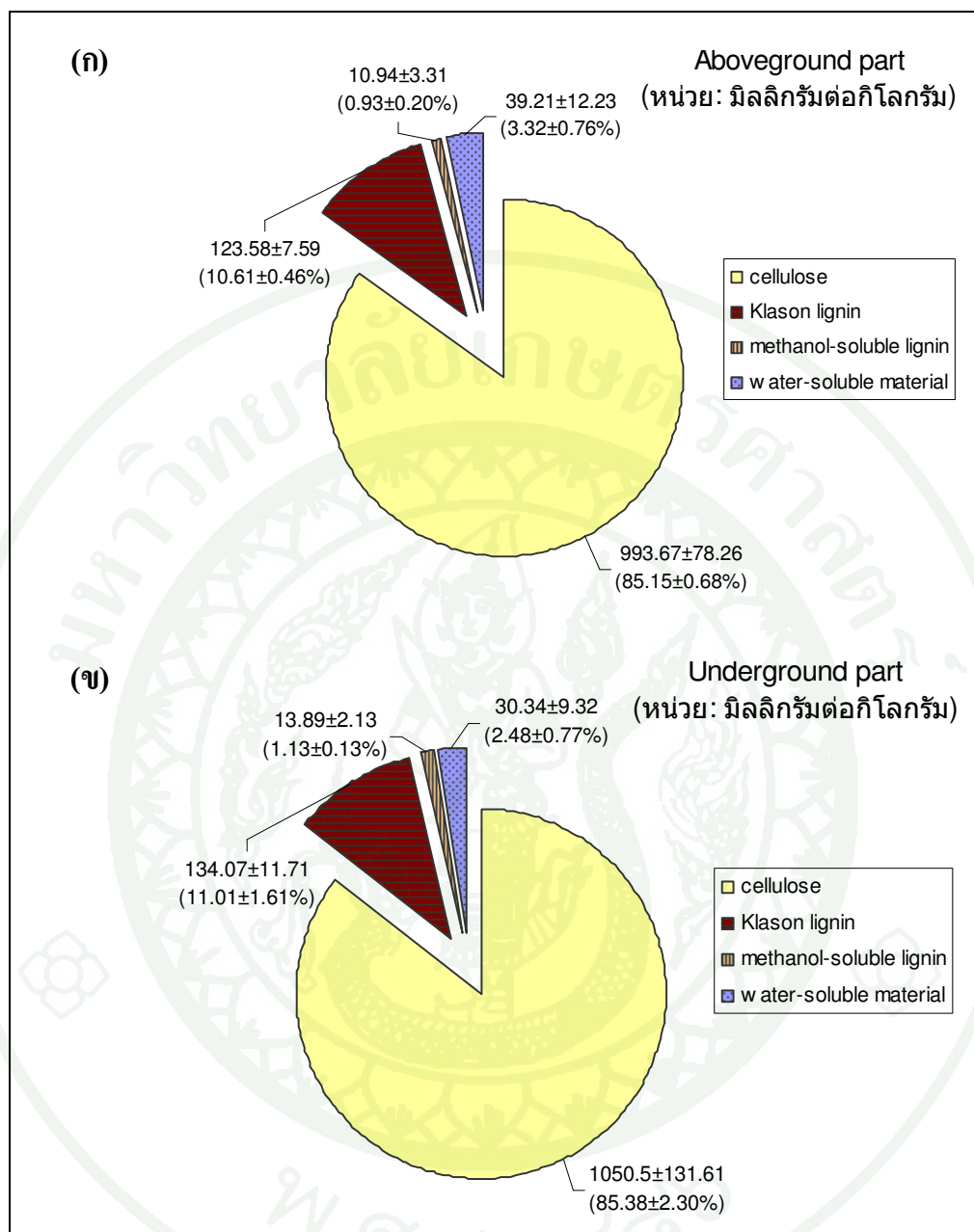
และที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันในส่วนใต้ดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 44.55 ± 0.74 , 21.15 ± 2.89 , 149.92 ± 13.18 และ 996.42 ± 164.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.73 ± 0.59 , 1.75 ± 0.09 , 12.47 ± 1.20 และ 82.05 ± 1.76 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 26ข และตารางผนวกที่ ก7



ภาพที่ 26 ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วัน

(3) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วันในส่วนเหนือดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 39.21 ± 12.23 , 10.94 ± 3.31 , 123.58 ± 7.59 และ 993.67 ± 78.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.32 ± 0.76 , 0.93 ± 0.20 , 10.61 ± 0.46 และ 85.15 ± 0.68 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 27ก และตารางผนวกที่ ก8

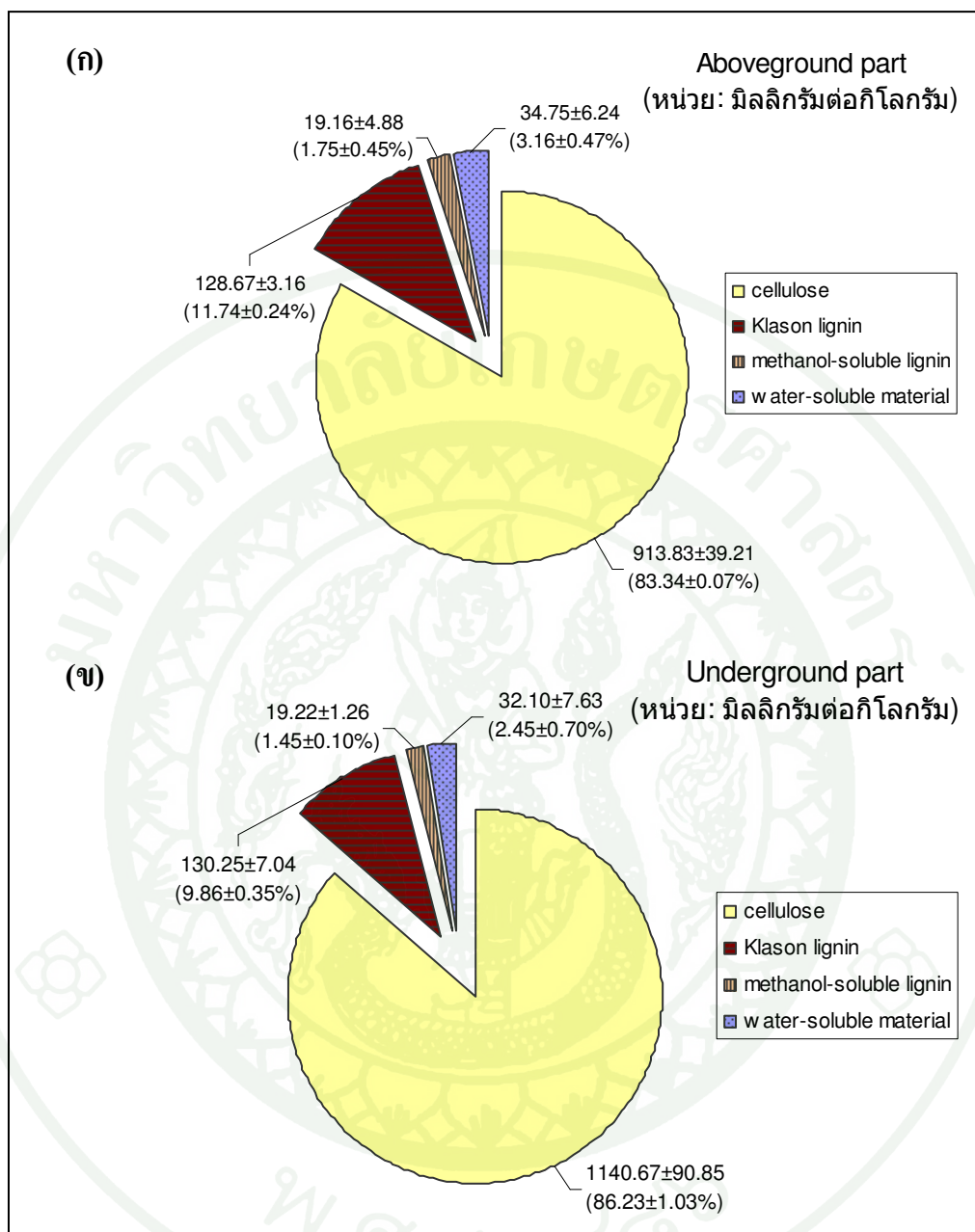
และที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วันในส่วนใต้ดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 30.34 ± 9.32 , 13.89 ± 2.13 , 134.07 ± 11.71 และ $1,050.50 \pm 131.61$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 2.48 ± 0.77 , 1.13 ± 0.13 , 11.01 ± 1.61 และ 85.38 ± 2.30 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน พบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 27ข และตารางผนวกที่ ก8



ภาพที่ 27 ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วัน

(4) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วันในส่วนเหนือดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 34.75 ± 6.24 , 19.16 ± 4.88 , 128.67 ± 3.16 และ 913.83 ± 39.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.16 ± 0.47 , 1.75 ± 0.45 , 11.74 ± 0.24 และ 83.34 ± 0.07 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับอีก และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 28ก และตารางผนวกที่ ก9

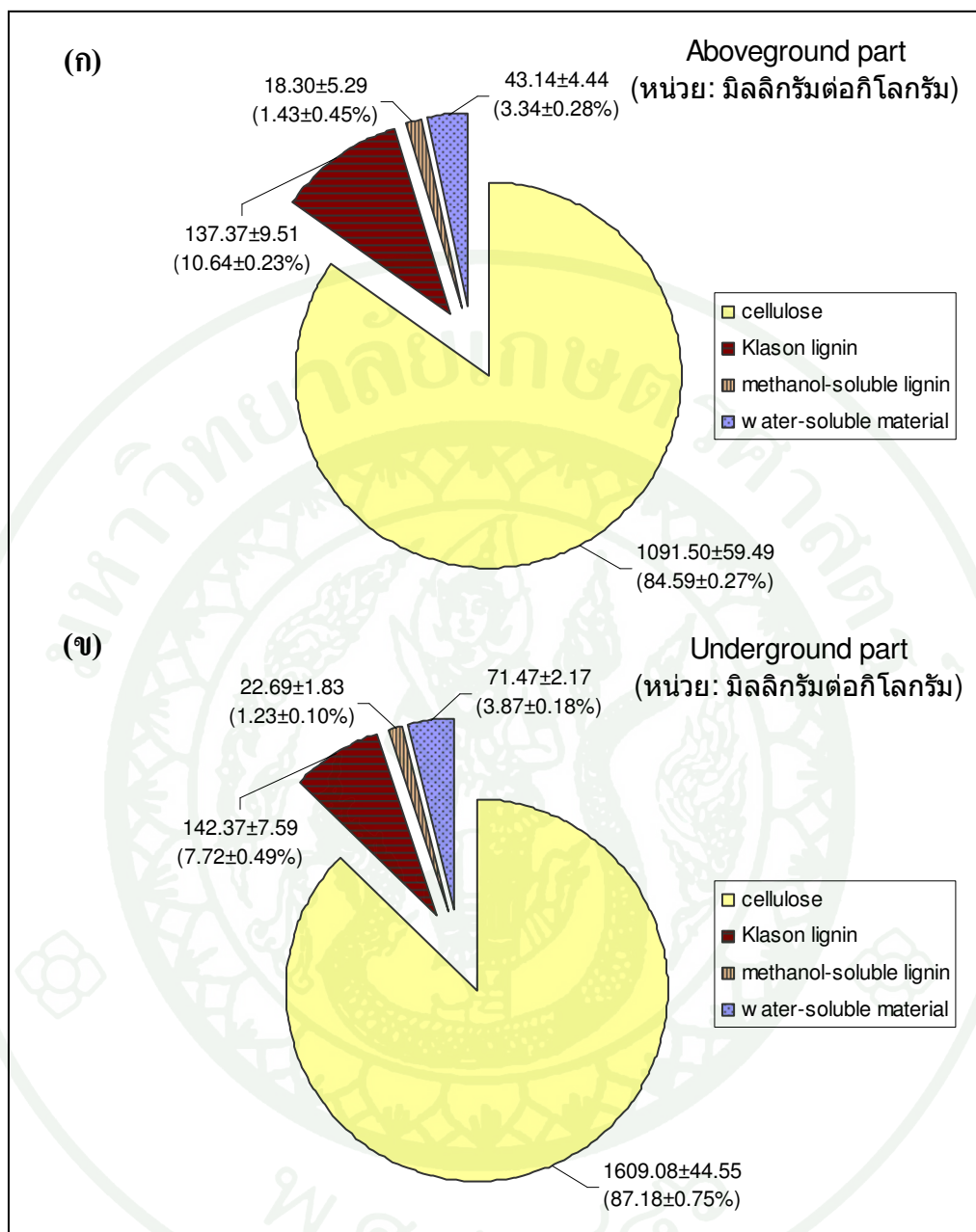
และที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วันในส่วนใต้ดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 32.10 ± 7.63 , 19.22 ± 1.26 , 130.25 ± 7.04 และ $1,140.67 \pm 90.85$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 2.45 ± 0.70 , 1.45 ± 0.10 , 9.86 ± 0.35 และ 86.23 ± 1.03 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 28ข และตารางผนวกที่ ก9



ภาพที่ 28 ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วัน

(5) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วันในส่วนเหนือดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 43.14 ± 4.44 , 18.30 ± 5.29 , 137.37 ± 9.51 และ $1,091.50 \pm 59.49$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.34 ± 0.28 , 1.43 ± 0.45 , 10.64 ± 0.23 และ 84.59 ± 0.27 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 29ก และตารางผนวกที่ ก10

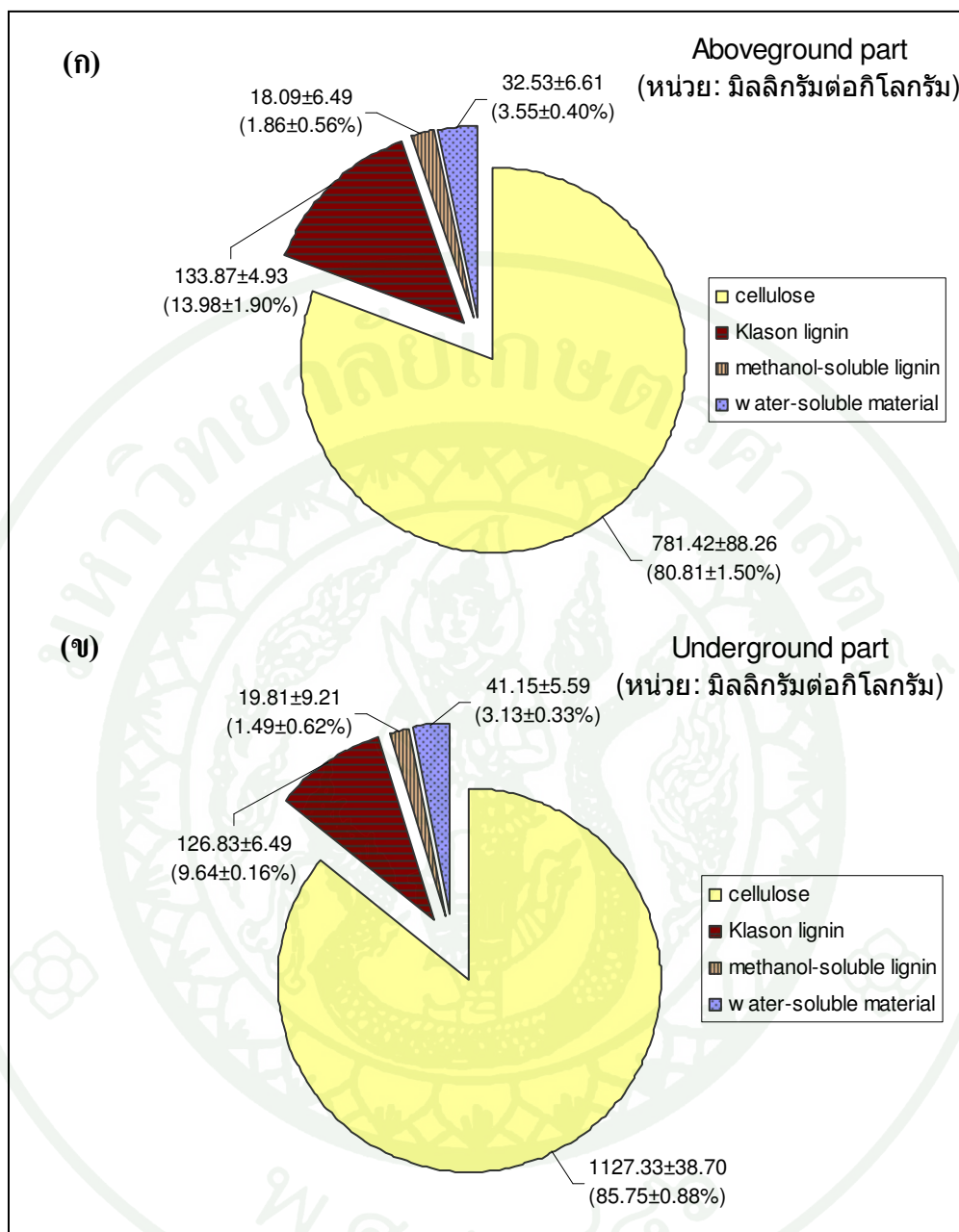
และที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วันในส่วนใต้ดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 71.47 ± 2.17 , 22.69 ± 1.83 , 142.37 ± 7.59 และ $1,609.08 \pm 44.55$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.87 ± 0.18 , 1.23 ± 0.10 , 7.72 ± 0.49 และ 87.18 ± 0.75 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน พบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 29ข และตารางผนวกที่ ก10



ภาพที่ 29 ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วัน

(6) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วันในส่วนเหนือดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 32.53 ± 6.61 , 18.09 ± 6.49 , 133.87 ± 4.93 และ 781.42 ± 88.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.35 ± 0.40 , 1.86 ± 0.56 , 13.98 ± 1.90 และ 80.81 ± 1.50 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 30ก และตารางผนวกที่ ก11

และที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วันในส่วนใต้ดิน พบปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือในส่วน water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose โดยเฉลี่ยเท่ากับ 41.15 ± 5.59 , 19.81 ± 9.21 , 126.83 ± 6.49 และ $1,127.33 \pm 38.70$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนปริมาณการสะสมร้อยละ 3.13 ± 0.33 , 1.49 ± 0.62 , 9.64 ± 0.16 และ 85.75 ± 0.88 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในส่วน cellulose สูงสุดและมีปริมาณการสะสมที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ และพบว่าในส่วนของ Klason lignin พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าในส่วนของ water-soluble material พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในส่วน methanol-soluble lignin อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 30ข และตารางผนวกที่ ก11



ภาพที่ 30 ปริมาณการสะสมตะกั่วที่พบจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วัน

3.2.2 ปริมาณการสะสมตะกั่วในองค์ประกอบทางเคมีภายในแต่ละชนิดของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน

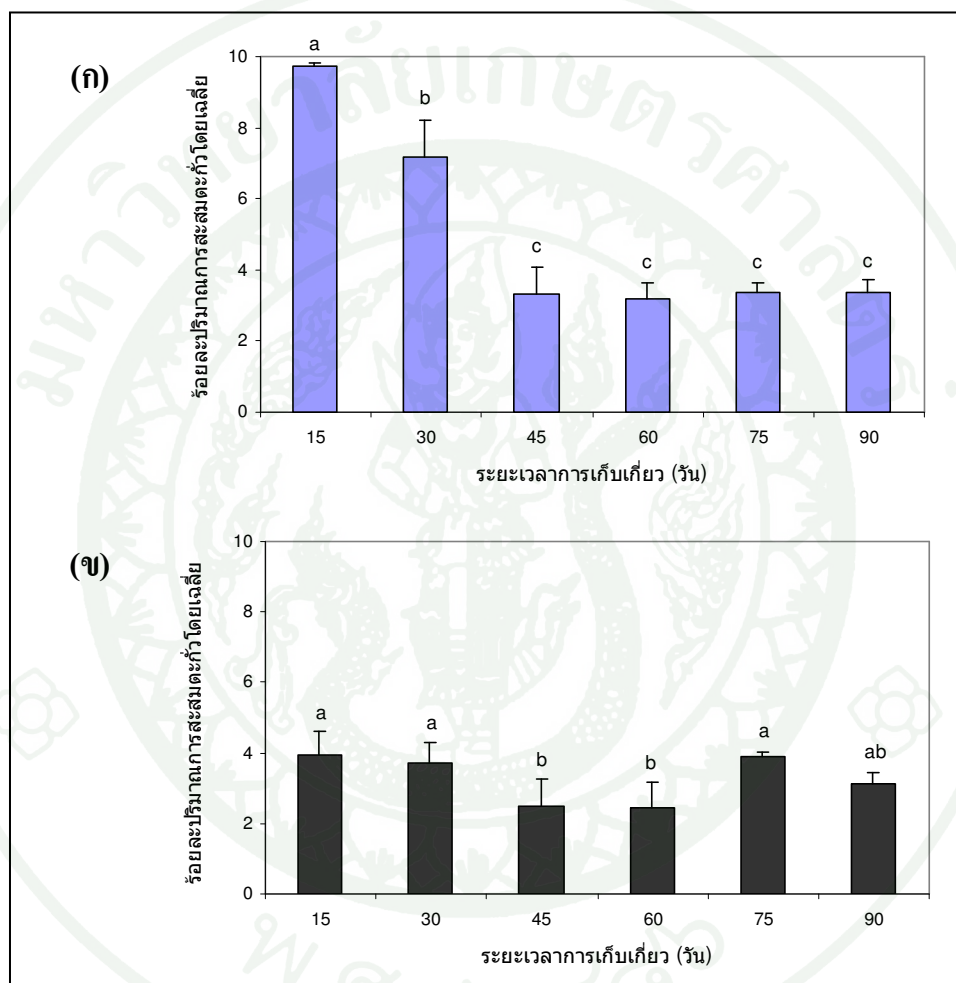
เมื่อทำการพิจารณาถึงปริมาณการสะสมของตะกั่วโดยเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมีภายในแต่ละชนิดของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วันพบปริมาณการสะสมของตะกั่วในรูป total Pb ในหน่วยร้อยละปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ย จากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างกันดังนี้

(1) ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน water-soluble material ของสาบเสือที่พบ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน โดยกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

ในส่วนเหนือดินพบปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 9.71 ± 0.12 , 7.16 ± 1.06 , 3.32 ± 0.76 , 3.16 ± 0.47 , 3.34 ± 0.28 และ 3.35 ± 0.40 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน water-soluble material พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 15 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและมีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30, 90, 75, 45 และ 60 วันตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75, 45, 60 และ 90 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วัน พบของปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45, 60 และ 90 วันตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 ดังภาพที่ 31ก และตารางผนวกที่ ก12

ในส่วนใต้ดินพบปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 3.93 ± 0.67 , 3.73 ± 0.59 , 2.48 ± 0.77 , 2.45 ± 0.70 , 3.87 ± 0.18 และ 3.13 ± 0.33 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน water-soluble material พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วัน พบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75, 30 และ 90 วัน ตามลำดับ แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 และ 60 วันตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 และ 60 วันตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 31 ข และตารางผนวกที่ ก12

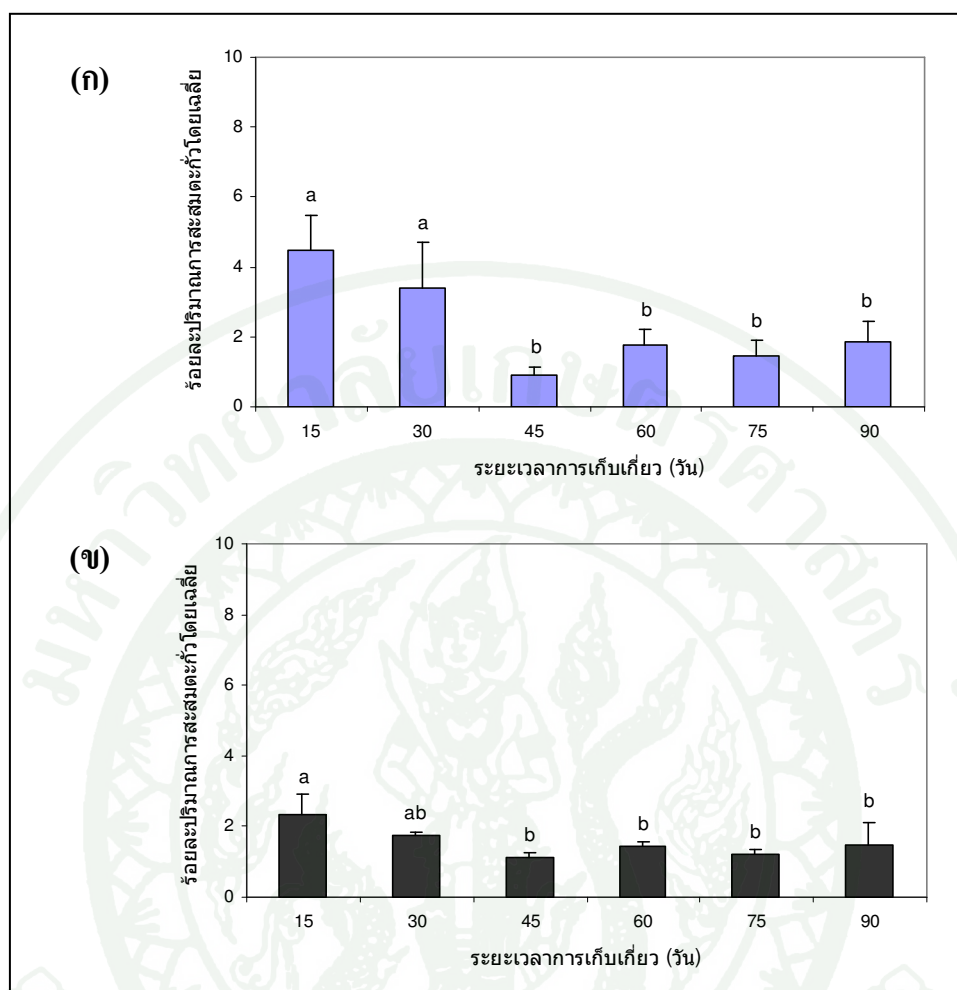


ภาพที่ 31 ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน water-soluble material ของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเนื้อดิน (ก) และส่วนได้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

(2) ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน methanol-soluble lignin ของสาบเสือที่พบ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน โดยกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

ในส่วนเหนือดินพบปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 4.46 ± 1.04 , 3.40 ± 1.28 , 0.93 ± 0.20 , 1.75 ± 0.45 , 1.43 ± 0.45 และ 1.86 ± 0.56 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน methanol-soluble lignin พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วัน แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90, 60, 75 และ 45 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60, 75 และ 45 วันตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 32ก และตารางผนวกที่ ก13

ในส่วนใต้ดินพบของปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 2.33 ± 0.61 , 1.75 ± 0.09 , 1.13 ± 0.13 , 1.45 ± 0.10 , 1.23 ± 0.10 และ 1.49 ± 0.62 ตามลำดับซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างทางสถิติถึงสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน methanol-soluble lignin พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วัน แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90, 60, 75 และ 45 วันตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90, 60, 75 และ 45 วันตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 32ข และตารางผนวกที่ ก13



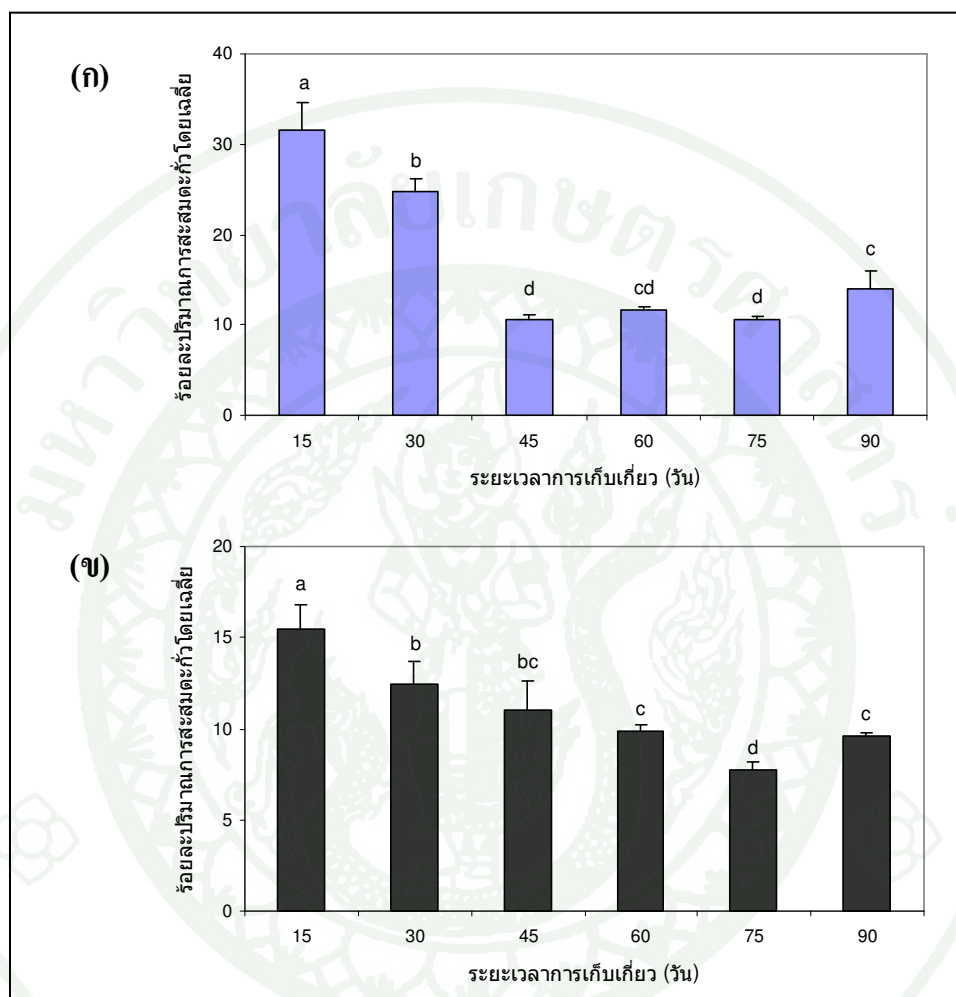
ภาพที่ 32 ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน methanol-soluble lignin ของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเหนือดิน (ก) และส่วนใต้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

(3) ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน Klason lignin ของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน โดยกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

โดยในส่วนเหนือดินพบปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 31.62 ± 2.92 , 24.80 ± 1.35 , 10.61 ± 0.46 , 11.74 ± 0.24 , 10.64 ± 0.23 และ 13.98 ± 1.90 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน Klason lignin พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและมีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30, 90, 60, 75 และ 45 วัน ตามลำดับโดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90, 60, 75 และ 45 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วัน แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 และ 45 วันตามลำดับ อีกทั้งพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 และ 45 วัน ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 33ก และตารางผนวกที่ ก14

ในส่วนใต้ดินพบปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 15.48 ± 1.33 , 12.47 ± 1.20 , 11.01 ± 1.61 , 9.86 ± 0.35 , 7.72 ± 0.49 และ 9.64 ± 0.16 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน Klason lignin พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและและมีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30, 45, 60, 90 และ 75 วันตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วัน แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60, 90 และ 75 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วัน อีกทั้งพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือที่ 60 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วัน แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบ

เทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสับเลื้อ 75 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 33 และตารางผนวกที่ ก14

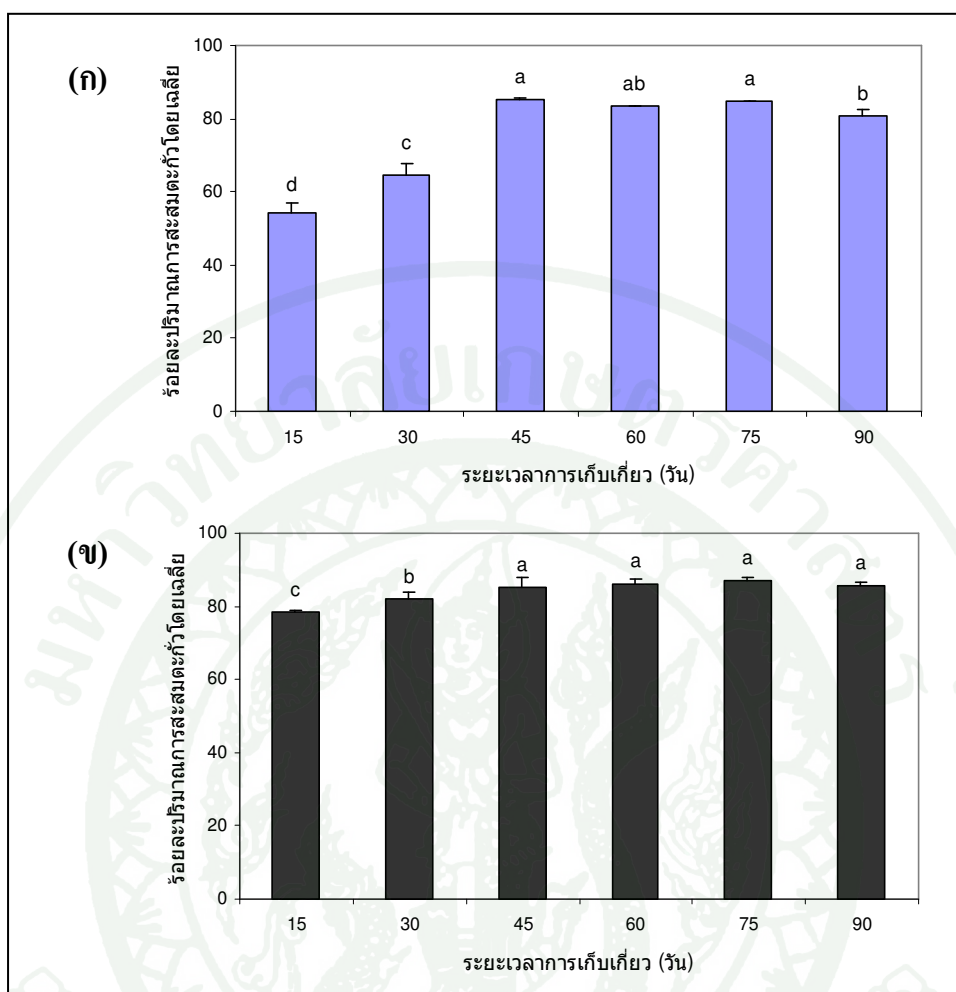


ภาพที่ 33 ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน Klason lignin ของสับเลื้อภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเนื้อดิน (ก) และส่วนไม้ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสับเลื้อ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

(4) ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose ของสาบเสือที่พบภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อน โดยกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

โดยในส่วนเหนือดินพบปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 54.21 ± 2.56 , 64.64 ± 3.15 , 85.15 ± 0.68 , 83.34 ± 0.07 , 84.59 ± 0.27 และ 80.81 ± 1.50 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและมีสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 และ 60 วัน ตามลำดับ แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90, 30 และ 15 วัน ตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือที่ 60 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่ไม่แตกต่างกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วัน แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 และ 15 วันตามลำดับ และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 และ 15 วันตามลำดับ อีกทั้งพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 34ก และตารางผนวกที่ ก15

ในส่วนใต้ดินพบปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยร้อยละ 78.26 ± 0.76 , 82.05 ± 1.76 , 85.38 ± 2.30 , 86.23 ± 1.03 , 87.18 ± 0.75 และ 85.75 ± 0.88 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติถึงปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดและไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60, 90 และ 45 วันตามลำดับ แต่มีปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 และ 15 วันตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วันพบปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังภาพที่ 34ข และตารางผนวกที่ ก15



ภาพที่ 34 ร้อยละการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose ของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ณ สภาวะที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ในส่วนเนื้อดิน (ก) และส่วนไต่ดิน (ข) ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

จากผลการศึกษาถึงปริมาณการสะสมตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อน โดยการพิจารณาปริมาณการสะสมตะกั่วในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน และการพิจารณาสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วโดยเฉลี่ยในองค์ประกอบทางเคมีภายในแต่ละชนิดของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนจากผลการทดลองที่ 3.2.1 และ 3.2.2 ซึ่งกล่าวโดยสรุปพบว่า เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการสะสมของตะกั่วในสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method พบปริมาณการสะสมตะกั่วมากที่สุดในส่วน cellulose > Klason lignin > water-soluble material > methanol-soluble lignin ตามลำดับทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งพบปริมาณ total Pb โดยเฉลี่ยร้อยละ 75.5, 17.2, 5.0 และ 2.3 ตามลำดับในส่วนเหนือดิน และร้อยละ 84.1, 11.0, 3.3 และ 1.6 ตามลำดับในส่วนใต้ดิน

โดยสาเหตุที่พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงในส่วน cellulose ของสาบเสือ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Islam *et al.* (2007); Ho *et al.* (2008) ที่ศึกษาปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วในพืชบางชนิด ได้แก่ ต้น Kujo (*Elsholtzia argyi*) และ ปอแก้ว (*Hibiscus cannabinus*) พบการสะสมและการแพร่กระจายของตะกั่วในปริมาณสูงบริเวณ parenchyma ของผนังเซลล์ในส่วนใต้ดินภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยใช้เทคนิค transmission electron microscopy (TEM) และเทคนิค x-ray ในการตรวจสอบปริมาณการแพร่กระจายของตะกั่ว และจากการตรวจเอกสารของ นฤมล (2548) ที่อธิบายลักษณะขององค์ประกอบที่สำคัญในผนังเซลล์ของพืชโดย cellulose เป็นโพลิเมอร์ที่พบได้โดยทั่วไปในพืชเนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ในพืชทุกชนิด ซึ่งจากผลการทดลองพบสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose และ Klason lignin เป็นหลักนั้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Morrison *et al.* (1981); Nishizono *et al.* (1987) ที่ได้อธิบายถึงพฤติกรรมของโลหะหนักของพืชโดยส่วนใหญ่จะเกิดการสะสมและเชื่อมติดอยู่ในองค์ประกอบหลักทางเคมีของผนังเซลล์โดยเฉพาะในส่วน cellulose และ lignin และจากสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วใน cellulose ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นและจากสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วที่มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในส่วน Klason lignin, water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับนั้น แสดงให้เห็นถึงกลไกในการเคลื่อนย้ายและสะสมตะกั่วในสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งเกิดจากกระบวนการเคลื่อนย้ายตะกั่วในส่วน hemicellulose (water-soluble material) และ lignin (Klason lignin และ methanol-soluble lignin)

เข้าสู่ผนังเซลล์ที่มี cellulose เป็นองค์ประกอบหลักเพื่อลดความเป็นพิษของตะกั่วเมื่อเข้าสู่พืช สอดคล้องกับผลการศึกษาของ ยงยุทธ (2543); Brown and Slingsby (1972); Wierzbicka (1995); Raskin *et al.* (1997); Garbisu and Alkorta (2001); Rascio and Navari-Izzo (2011) ที่อธิบายถึง กลไกในกระบวนการลดความเป็นพิษของตะกั่วเมื่อเกิดการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินเข้าสู่พืชโดย ตะกั่วจะเกิดกระบวนการตะกอนกับสารประกอบที่มีประจุลบบางชนิด ได้แก่ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) หรือ คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และเกิดการสะสมบริเวณผนังเซลล์ของพืช นอกจากนี้ อาจเกิดกระบวนการทำลายพืชหรือลดความเป็นพิษโดยอาศัยโปรตีนจำเพาะบางชนิด ได้แก่ phytochelatins หรือ metallothioneins ที่พบการสะสมเป็นจำนวนมากใน vacuole ภายในเซลล์ภาย หลังการดูดใช้และสะสมตะกั่วของพืช โดยสันนิษฐานจากรูปแบบของเลขออกซิเดชัน (oxidation number) โดยส่วนใหญ่ที่มีความคล้ายคลึงกันของตะกั่วกับโลหะหนักบางชนิด อาทิ สังกะสี (Zn^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่พบรายงานการวิจัยที่แน่ชัดใน การศึกษากลไกของการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินสู่พืช รวมทั้งกลไกการลดความเป็นพิษและการ ทำลายพืชของตะกั่วในสาบเสือซึ่งจะต้องมีการศึกษาถึงกลไกดังกล่าวที่แน่ชัดต่อไปในอนาคต

จากผลการศึกษาที่พบสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงในส่วน cellulose และ Klason lignin และพบสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วที่ต่ำในส่วน water-soluble material และ methanol-soluble lignin ตามลำดับ จึงสามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการ จัดการซากของสาบเสือภายหลังการบำบัด อาทิเช่น การผลิตพลังงานเชื้อเพลิง (ethanol หรือ methane) จากในส่วน water-soluble material (Kobayashi *et al.*, 2005a, 2005b) การผลิต epoxy resin โดยใช้กระบวนการ resinification จากในส่วน methanol-soluble lignin การผลิต activated carbon โดยใช้กระบวนการ carbonization จากในส่วน Klason lignin (Asada *et al.*, 2005) หรือแม้แต่การนำ ตะกั่วที่พบปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงในส่วน cellulose และ Klason lignin เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งอาจใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารประกอบที่มีประจุลบ หรือการทำปฏิกิริยาโดยอาศัยกระบวนการ ทางไฟฟ้าเคมีของตะกั่วที่พบในส่วน cellulose และการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อสกัดตะกั่วในส่วน Klason lignin (Kobayashi *et al.*, 2005b) แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่พบปริมาณการสะสม ตะกั่วที่สูงในส่วน cellulose เป็นหลัก ซึ่งมีความแตกต่างจากผลการศึกษาของปริมาณการสะสม ตะกั่วในเฟิร์นญี่ปุ่น (*Athyrium yokoscense*) ที่พบสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วที่สูงในส่วน Klason lignin เป็นหลัก ซึ่งไม่สอดคล้องกับหลักการพิจารณาถึงสภาวะความดันและเวลาที่ เหมาะสมจากในผลการทดลองที่ 3.1.1-3.1.3 ที่อ้างอิงหลักการพิจารณาในส่วน Klason lignin ที่ เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการ steam explosion และ Wayman's method เป็นหลัก โดยใช้สภาวะ

ที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ที่ส่งผลให้ปริมาณ Klason lignin สูงที่สุด ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนของปริมาณการสะสมตะกั่วที่แตกต่างกันระหว่างสาบเสือและเฟิร์นญี่ปุ่นนั้น เกิดจากลักษณะทางสรีรวิทยาของพืชที่เกี่ยวข้องกับกลไกในการลดความเป็นพิษ และการทำลายพิษของตะกั่วที่มีความแตกต่างกันของพืชทั้ง 2 ชนิด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาภาวะของความดันและเวลาในกระบวนการ steam explosion ของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วเพิ่มเติม โดยมุ่งเน้นพิจารณาในส่วนของ cellulose ที่เกิดขึ้นจากสภาวะของระดับความดันและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ steam explosion เป็นหลัก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง พบว่าสามารถเลือกปรับใช้สภาวะที่ระดับความดันที่ 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 1 นาที จึงเป็นข้อได้เปรียบในการปรับสภาวะความดันและระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาปริมาณตะกั่วในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสียด้วยวิธีการดังกล่าว สามารถลดการใช้สภาวะความดันที่สูงและเวลาที่นานเกินความจำเป็น ซึ่งจะมีผลต่อความคุ้มค่าในการลงทุน เพื่อนำตะกั่วในดินที่ปนเปื้อนนำกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้พืชบำบัดในเทคนิค phytoremediation ต่อไปในอนาคต

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากการสำรวจพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่วซึ่งตั้งอยู่ในเขตหมู่ที่ 5 ตำบลชะแล อำเภอดงหลวง จังหวัดกาญจนบุรี พบปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในปริมาณสูงทั้งในตัวอย่างดิน ตะกอนดิน น้ำ และพืช ที่มีการแพร่กระจายในพื้นที่ จากผลการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่าง พบปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วโดยเฉลี่ยใน ดิน>ตะกอนดิน>พืช>น้ำตามลำดับ และผลการสำรวจพืชที่มีการแพร่กระจายในพื้นที่ พบการแพร่กระจายของสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) และอ้อ (*Arundo donax*) เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของพืชถึงศักยภาพในการบำบัดดิน พบสาบเสือน่าจะมีสมบัติเข้าเกณฑ์พืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง

2. จากการศึกษาศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง พบระยะเวลาในการบำบัดที่ 45 วัน เป็นระยะเวลาที่เหมาะสม โดยสามารถบำบัดดินที่มีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด (total Pb) ก่อนการบำบัดเท่ากับ 75,529.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้ลดลงจนมีปริมาณความเข้มข้นของ total Pb ในดินภายหลังการบำบัดเท่ากับ 68,446.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 9.38 ต่อหนึ่งรอบของการบำบัด (crop)

3. จากการศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือดด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ภายหลังการใช้สาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง พบว่าที่ระดับความดัน 19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่เวลา 5 นาที เป็นสถานะที่สามารถใช้ในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ โดยพบปริมาณ water-soluble material, methanol-soluble lignin, Klason lignin และ cellulose คิดเป็นร้อยละ 31.13, 10.19, 36.60 และ 22.08 ตามลำดับในส่วนเหนือดิน และร้อยละ 20.0, 15.05, 44.12 และ 20.83 ตามลำดับในส่วนใต้ดิน และจากการศึกษาปริมาณการสะสมของตะกั่ว พบปริมาณตะกั่วในส่วน cellulose > Klason lignin > water-soluble material > methanol-soluble lignin ตามลำดับ ทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 75.5, 17.2, 5.0 และ 2.3 ตามลำดับในส่วนเหนือดิน และร้อยละ 84.1, 11.0, 3.3 และ 1.6 ตามลำดับในส่วนใต้ดิน

ข้อเสนอแนะ

1. การพิจารณาสมบัติของพืชแต่ละชนิด ที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง (lead hyperaccumulator) ที่ได้จากการสำรวจ ควรมีการวิเคราะห์ปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วของพืชแต่ละชนิดทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน ในหน่วยของมิลลิกรัมต่อกรัมในน้ำหนักแห้ง ($\text{mg plant}^{-1} \text{ DW}$) แล้วจึงทำการพิจารณาปริมาณการสะสมตะกั่วในเนื้อเยื่อของพืชแต่ละชนิด ในหน่วยของร้อยละโดยน้ำหนัก (w/w) เนื่องจากปริมาณการดูดใช้และสะสมของตะกั่วในพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนตะกั่ว โดยส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช เมื่อทำการพิจารณาถึงปริมาณการดูดใช้และสะสมตะกั่วในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมในน้ำหนักแห้ง ($\text{mg kg}^{-1} \text{ DW}$; ppm) เพียงอย่างเดียว อาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการพิจารณาสมบัติของพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูงดังกล่าวไว้ในข้างต้น
2. การศึกษาถึงศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง ควรมีการทดลองเพิ่มเติมในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่แตกต่างกัน ทั้งในส่วนของปริมาณตะกั่วที่สกัดได้ (available lead) และปริมาณตะกั่วทั้งหมด (total lead) เพื่อศึกษาถึงช่วงความสามารถในการทนต่อความเป็นพิษของตะกั่ว ที่อาจส่งผลต่อศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยใช้สาบเสือ (*Chromolaena odorata*) เป็นพืชบำบัด
3. การพิจารณาสถานะความดันและเวลาที่เหมาะสมในการศึกษาปริมาณตะกั่วจากองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ ภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ควรมีการทดลองเพิ่มเติม โดยทำการทดลอง ณ สถานะที่ระดับความดัน 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 1 นาที เพื่อลดการใช้สถานะที่เกินความจำเป็นในการทดลอง ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานและเกิดความคุ้มค่าในการนำตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้พืชบำบัดด้วยเทคนิค phytoremediation ต่อไปในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2554ก. **มาตรฐานคุณภาพดิน: มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์.**

แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_soil01.html, 5 มีนาคม 2554.

กรมควบคุมมลพิษ. 2554ข. **มาตรฐานคุณภาพน้ำ: มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน.**

แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water05.html, 4 มีนาคม 2554.

กรมควบคุมมลพิษ. 2554ค. **มาตรฐานคุณภาพน้ำ: มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง.**

แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html, 4 มีนาคม 2554.

กรมควบคุมมลพิษ. 2547. **เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง: ตะกั่ว.**

พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2554. **หลักการจัดทำรายงานเรื่อง การจัดการทรัพยากรดินเพื่อการปลูกพืช**

เศรษฐกิจหลักตามกลุ่มชุดดิน. แหล่งที่มา: <http://www.ddd.go.th/thai-html/WorkManegment-Soil/book1.pdf>, 16 มีนาคม 2554.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2552. **สารสกัดจากพืช...ควบคุมศัตรูพืช.** แหล่งที่มา:

<http://actech.agritech.doae.go.th/folder/sptf5004.pdf>, 4 กุมภาพันธ์ 2552.

กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช. 2554. **พื้นที่อุทยานแห่งชาติลำคลองงู.**

แหล่งที่มา: http://park.dnp.go.th/visitor/nationparkshow.php?PTA_CODE=9127,

25 กุมภาพันธ์ 2554.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.**

พิมพ์ครั้งที่ 8. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จิรพร โชติสมิทธิกุล. 2550. การสะสมตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียชุมชนโดยพุทธรักษา และ
 ธรรมชาติที่ปลูกด้วยดินนาในสภาพน้ำขังสลับแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดิเรกธร ศิริสุนนท์. 2549. การปนเปื้อนปรอท ตะกั่ว และแคดเมียม จากการใช้ประโยชน์ที่ดิน
 ประเภทป่าไม้ และเกษตรกรรมในลุ่มน้ำบางปะกง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ถนอมขวัญ ทิพวงศ์. 2548. ผลของการใช้น้ำเสียชุมชนต่อปริมาณแคดเมียม และตะกั่วในหญ้า
 อาหารสัตว์ 3 ชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทัศนีย์ อัดตะนันท์ และ จงรักษ์ จันทรเจริญสุข. 2542. แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการการ
 วิเคราะห์ดินและพืช. พิมพ์ครั้งที่ 7. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ทัศนีย์ อัดตะนันท์ และ จงรักษ์ จันทรเจริญสุข. 2551. แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการการ
 วิเคราะห์ดินและพืช. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นฤมล ศรีวิฑูรย์. 2548. การผลิตฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติจากขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน
 ปนเปื้อนในทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บวร ไชยษา. 2530. ความเข้มข้นของแมงกานีส แคดเมียม และตะกั่ว ในน้ำ และดินตะกอนจากชั้น
 คุณภาพลุ่มน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำชี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บัญชาการ วินัยพานิช. 2548. การบำบัดดินที่ปนเปื้อนทองแดงโดยใช้ผักกาดเขียวปลี ต้อยติ่ง
 และไมยราบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บริษัท เทสโก้. 2529. รายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการเหมืองอุโมงค์แร่ตะกั่ว ตำบลชะแล อำเภอดงพิกุล จังหวัดกาญจนบุรี. บริษัท เทสโก้ จำกัด, กรุงเทพฯ.
(อัครา)

เบญจลักษณ์ พลายน้อย. 2546. การสกัดตามลำดับส่วนของแคดเมียม และตะกั่ว จากดินตะกอน ขยายฝั่งอ่าวไทย จังหวัดระยอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปราโมทย์ ศรีสุวรรณ และ รินทวัฒน์ สมบัติศิริ. 2552. ตะกั่วและพิษของตะกั่ว. แหล่งที่มา:

http://www.diw.go.th/diw_web/html/versionthai/news/%E0%B8%95%E0%B0%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B9%88%E0%B8%A7%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%9E%E0%B8%B4%E0%B8%A9%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%95%E0%B0%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B9%88%E0%B8%A7.pdf, 5 กันยายน 2552.

พันธุ์ส ถัมพันธ์พานิช. 2550. กลไกการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนไทน์ในดินด้วยต้นกล้วยปลา. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พันธุ์ส ถัมพันธ์พานิช. 2552. **Phytoremediation**. แหล่งที่มา:

<http://www.eric.chula.ac.th/eric/course/Kmutnb/Phytoremediation.pdf>, 5 มีนาคม 2552.

พินิจ ภูมิภัทร. 2549. การศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรไลสจากกระบวนการเริ่มต้นปาล์มน้ำมันด้วย ไขมันสำหรับการหมักไขมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ไมตรี สุทธิจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัวเรา. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ดาวคอมพิวกราฟฟิค, เชียงใหม่.

ขงยุทธ โอสดสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. **ภาวะมลพิษทางดินจากการใช้สารเคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 2.
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2554. **แผนที่จังหวัดกาญจนบุรี**.
แหล่งที่มา: <http://www.thaienergydata.in.th/province/71/>, 25 กุมภาพันธ์ 2554.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง. 2554. **องค์ความรู้เพื่อการพัฒนาพื้นที่สูงอย่างยั่งยืน:
หญ้าเมื่องวาย (*Chromolaena odorata*)**. แหล่งที่มา:
http://mis.hrdi.or.th/inforcenter/xml_km/shdet.aspx?mnuid=362, 14 กุมภาพันธ์ 2554.

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2552. **อาชีวอนามัย**. แหล่งที่มา:
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK22/chapter6/t22-6-11.htm#sect1>, 12 กันยายน 2552.

อรอังก์ เวชสิทธิ์. 2551. **การศึกษาคุณภาพน้ำและปริมาณโลหะหนักในน้ำ ดินตะกอน
และพรรณไม้น้ำบางชนิด บริเวณแม่น้ำท่าจีน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอิบ เขียวรัตน์มย์. 2552. **คู่มือปฏิบัติการ การสำรวจดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 6.
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater**. 21st ed. American Public Health Association, Washington D.C.

Asada, C., Y. Nakamura and F. Kobayashi. 2005. Waste reduction system for production of
useful materials from un-utilized bamboo using steam explosion followed by various
conversion methods. **Biochem. Eng. J.** 23: 131-157.

Baker, A.J.M. and R.R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate
metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry.
Biorecovery 1: 81-126.

- Baker, A.J.M., S.P. McGrath, C.M.D. Sidoli and R.D. Reeves. 1994. The possibility of in situ heavy metals decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. **Resour. Conserv. Recy.** 11: 41-49.
- Baker, A.J.M., S.P. McGrath, R.D. Reeves and J.A.C. Smith. 2000. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils, pp. 85-107. *In* N. Terry and G. Baelos, eds. **Phytoremediation of Contaminated Soil and Water.** Lewis Publishers, Inc., Florida.
- Boonlert, S. 2008. **Phytoremediation of Cadmium and Zinc Contaminated Soil by *Chromolaena Odorata*.** M.S. Thesis, Mahidol University.
- Branquinho, C., H.C. Serrano, M.J. Pinto and M.A. Martins-Loução. 2007. Revisiting the plant hyperaccumulation criteria to rare plants and earth abundant elements. **Environ. Pollut.** 146: 437-443.
- Bray, R.H. and N. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. **Soil Sci.** 59: 39-45.
- Brown, D.H. and D.R. Slingsby. 1972. The cellular location of lead and potassium in the lichen *Cladonia rangiformis* (L.) HOFFM. **New. Phytol.** 71: 297-305.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity, pp. 891-901. *In* C.A. Black, ed. **Method of Soil Analysis Part II: Chemical and Microbiological Properties.** Am. Soc. Agron., Inc., Wisconsin.
- Chowdhury, A.R., N.J. Chinoy and A.K. Gautam. 1986. Effect of lead on human semen. **Adv. Contracept. Delivery Syst.** 2: 208-211.

- Chua, M.G.S. and M. Wayman. 1979. Characterization of autohydrolysis aspen (*P. tremuloides*) lignins Part I: Composition and molecular weight distribution of extracted autohydrolysis lignin. **Can. J. Chem.** 57: 1141-1149.
- Clemens S, M.G. Palmgren and U. Kramer. 2002. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. **Trends Plant Sci.** 7: 309-315.
- Cunningham, S.D., T.A. Anderson, A.P. Schwab and F.C. Hsu. 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.** 56: 55-114.
- Davies, B.E. 1980. **Trace Element Pollution.** John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Day, D.R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis, pp. 545-566. *In* C.A. Black, ed. **Method of Soil Analysis Part II: Chemical and Microbiology Properties.** Amer. Soc. Agron., Inc., Wisconsin.
- Deram, A., F.O. Denayer, D. Petit and C.V. Haluwyn. 2006. Seasonal variations of cadmium and zinc in *Arrhenatherum elatius*, a perennial grass species from highly contaminated soils. **Environ. Pollut.** 140: 62-70.
- Ensley, B.D. 2000. Rationale for use of phytoremediation, pp. 3-11. *In* I. Raskin and B.D. Ensley, eds. **Phytoremediation of Toxic Metals using Plants to Clean up the Environment.** John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Farrah, H. and W.F. Pickering. 1977. The sorption of lead and cadmium species by clay minerals. **J. Aust. Chem.** 30: 1417-1425.
- Garbisu, C. and I. Alkorta. 2001. Phytoextraction: A cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. **Bioresource Technol.** 77: 229-236.

Gosselin, R.E., R.P. Smith and H.C. Hodge. 1984. **Clinical Toxicology of Commercial Products**. Williams and Wilkins, Inc., Maryland.

Hardman, J.G., L.E. Limbird, P.B. Molonoff, R.W. Ruddon and A.G. Goodman. 1996. A human in vivo model for the determination of lead bioavailability using stable isotope dilution. **Environ. Health Perspect.** 104: 176-179.

Ho, W.M., L.H. Ang and D.K. Lee. 2008. Assessment of Pb uptake, translocation and immobilization in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) for phytoremediation of sand tailings **J. Environ. Sci.** 20: 1341-1347.

IPCS. 1995. **Inorganic Lead**. World Health Organization, Geneva.

Islam, E., X. Yang, T. Li, D. Liu, X. Jin and F. Meng. 2007. Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. **J. Hazard. Mater.** 147: 806-816.

ITRC. 2001. **Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document**.
Available Source: <http://www.itrcweb.org/Documents/PHYTO-2.pdf>, March 27, 2011.

Khan, S., Q. Cao, B.D. Chen and Y.G. Zhu. 2006. Humic acids increase the phytoavailability of Cd and Pb to wheat plants cultivated in freshly spiked contaminated soil. **J. Soils Sediments** 6: 236-242.

Kilmer, V.J. and L.T. Alexander. 1949. Method of making mechanical analysis of soils. **Soil Sci.** 68: 15-24.

Kim, S., H. Lim and I. Lee. 2010. Enhanced heavy metal phytoextraction by *Echinochloa crus-galli* using root exudates. **J. Biosci. Bioeng.** 109: 47-50.

- Kitagishi, K. and I. Yamane. 1981. **Heavy Metal Pollution in Soils of Japan**. Japan Science Society, Tokyo.
- Kobayashi, F., C. Asada and Y. Nakamura. 2005a. Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals and recovery of valuable metals. **Kagaku Ronbun**. 31: 476-480.
- Kobayashi, F., H. Take, C. Asada and Y. Nakamura. 2004. Methane production from steam-exploded bamboo. **J. Biosci. Bioeng.** 97: 426-428.
- Kobayashi, F., T. Maki, Y. Nakamura and K. Ueda. 2005b. Determination of Cu, Pb, Fe and Zn in plant component polymers of a hyperaccumulating plant. **Anal. Sci.** 21: 1553-1556.
- Krishnamurti, G.S.R., G. Cielinski, P.M. Huang, and K.C.J. Van Rees. 1997. Kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids: implication in cadmium availability. **J. Environ. Qual.** 26: 271-277.
- Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 42: 421-428.
- Liogier, H.A. 1990. **Plantas medicinales de Puerto Rico y del Caribe**. Iberoamericana de Ediciones, Inc., San Juan.
- Liu, D., E. Islam, T. Li, X. Yang, X. Jin and Q. Mahmood. 2008. Comparison of synthetic chelators and low molecular weight organic acids in enhancing phytoextraction of heavy metals by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance. **J. Hazard. Mater.** 153: 114-122.
- Macek, T., M. Mackova and J. Kas. 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. **Biotechnol. Adv.** 18: 23-34.

- Mattina, M.I., W. Lannucci-Berger, C. Musante and J.C. White. 2003. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. **Environ. Pollut.** 124: 375-378.
- McCutcheon, S.C. and J.L. Schnoor. 2003. Overview of phytotransformation and control of wastes. pp. 3-58. *In* S.C. McCutcheon and J.L. Schnoor, eds. **Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants**. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.
- McFadyen, R. and Bryce Skarratt. 1996. Potential distribution of *Chromolaena odorta* (siam weed) in Australia, Africa and Oceania. **Agric. Ecos. Environ.** 59: 89-96.
- Medina, V. F., E. Maestri, M. Marmiroli, A. C. Dietz and S.C. McCutcheon. 2003. Plant tolerances to contaminants, pp. 189-232. *In* S.C. McCutcheon and J. L. Schnoor, eds. **Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants**. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.
- Michael, C.A. 1982. Nickel, Cadmium and Lead, pp. 739-767. *In* A.L. Page, ed. **Method of Soil Analysis Part II: Chemical and Microbiology Properties**. Amer. Soc. Agron., Inc., Wisconsin.
- Morrison, R.S., R.R. Brooks, R.D. Reeves, F. Malaisse, P. Horowitz, M. Aronson and G. R. Merriam. 1981. The diverse chemical forms of heavy metals in tissue extracts of some metallophytes from Shaba province, Zaïre. **Phytochemistry** 20: 455-458.
- Nigam, R., S. Srivastava, S., Prakash and M.M. Srivastava. 2001. Cadmium mobilization and plant availability-the impact of organic acids commonly exuded from roots. **Plant Soil** 230: 107-113.

Nishizono H., H. Ichikawa, S. Suzuki and F. Ishii. 1987. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense*. **Plant Soil** 101: 15-20.

Pokaeo, K. 2008. **The Potential use of Eucalyptus (*Eucalytus camaldulensis* Dehn.) for Phytoremediation of Lead.** M.S. Thesis, Mahidol University.

Pratt, P.E. 1965. Potassium, pp. 1022-1030. In C.A. Black, ed. **Method of Soil Analysis Part II: Chemical and Microbiology Properties.** Amer. Soc. Agron., Inc., Wisconsin.

Rascio, N. and F. Navari-Izzo. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? **Plant Sci.** 180: 169-181.

Raskin, I., R.D. Smith and D.E. Salt. 1997. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. **Curr. Opin. Biotechnol.** 8: 221-226.

Rotkittikhun, P., M. Kruatrachue, R. Chaiyarat, C. Ngernsansaruay, P. Pokethitiyook, A. Paijitpraporn and A.J.M. Baker. 2006. Uptake and accumulation of lead by plants from the Bo Ngam lead mine area in Thailand. **Environ. Pollut.** 144: 681-688.

Schnoor, J.L. 2000. Phytostabilization of metals using hybrid poplar trees, pp 133-150. In I. Raskin and B.D. Ensley, eds. **Phytoremediation of Toxic Metals using Plants to Clean up the Environment.** John Wiley and Sons, Inc., New York.

Shen, Z.G. and Y.L. Liu. 1998. Progress in the study on the plants that hyperaccumulate heavy metal. **Plant Physiol. Commun.** 34: 133-139.

Singh, S., V. Thorat, C.P. Kaushik, K. Raj, S. Eapen and S.F. D'Souza. 2009. Potential of *Chromolaena odorata* for phytoremediation of ¹³⁷Cs from solution and low level nuclear waste. **J. Hazard. Mater.** 162: 743-74.

Srivastava, M., L.Q. Ma and J.A.G. Santos. 2006. Three new arsenic hyperaccumulating ferns.

Sci. Total Environ. 364: 24-31.

Tanahashi, M., K. Tamabuchi, T. Goto, T. Aoki, M. Karina and T. Higuchi. 1988.

Characterization of steam-exploded wood II: Chemical changes of wood components by steam explosion. **Wood Res.** 75: 1-12.

Tanhan, P., M. Kruatrachue, P. Pokethitiyook and R. Chaiyarat. 2007. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson].

Chemosphere 68: 323-329.

TAPPI. 1983. **Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp: Official Test Method T-222 om-8.**

TAPPI Press, Georgia.

TAPPI. 1996. **The Technical Association of the Pulp and Paper Industry.**

TAPPI Press, Georgia.

Tomsett, A.B. and D.A. Thurman. 1988. Molecular biology of metal tolerances of plants.

Plant Cell Environ. 11: 383-394.

Triratana, T., R. Suwannuraks and W. Naengchomnong. 1991. Effect of *Eupatorium odoratum*

on blood coagulation. **J. Med. Assoc. Thai.** 74: 283-287.

Uren, N. C. and H.M. Reisenaner. 1998. The role of root exudates in nutrient acquisition.

pp. 79-114. In P. B. Tinker and A. Lanchli, eds. **Advances in Plant Nutrition.**

Praeger, Inc., New York.

USDA. 2011. ***Chromolaena odorata* (seed).** Available Source:

http://plants.usda.gov/java/largeImage?imageID=euod_001_ahp.tif, March 14, 2011.

USEPA. 1993. **Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide.**

Available Source: http://www.frtr.gov/matrix2/appd_e/appd_e07.html,
September 16, 2009.

USEPA. 2000. **Introduction to Phytoremediation.**

Available Source: <http://www.cluin.org/download/remed/introphyto.pdf>,
March 27, 2011.

Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of Degitjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chronic acid titration method. **Soil Sci.** 37: 29-38.

Wei, S., Q. Zhou, U.K. Saha, H. Xiao, Y. Hu, L. Ren and G. Ping. 2009.

Identification of a Cd accumulator *Conyza canadensis*. **J. Hazard. Mater.** 163: 32-35.

Wierzbicka, M. 1995. How lead loses its toxicity to plants. **Acta Soc. Bot. Pol.** 64: 81-90.

Wilson, C. 2006. ***Chromolaena odorata* (herb).** Available Source:

http://www.hear.org/pier/species/chromolaena_odorata.htm, September 7, 2009.





ตารางผนวกที่ ก1 น้ำหนักแห้งของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุม
ในโรงเรือนทดลอง

ระยะเวลา การปลูก	น้ำหนักแห้งของสาบเสือ (g DW)			
	ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว		ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว	
	ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน
15	12.51±1.41d ¹	14.30±3.30b	14.9±1.48c	12.90±4.20a
30	16.79±3.25cd	15.23±1.19b	23.9±6.79b	17.10±3.63a
45	22.07±6.91c	14.27±3.10b	20.3±1.92bc	18.53±1.15a
60	34.10±2.31b	37.30±1.49a	24.4±0.3b	17.39±5.49a
75	34.35±0.74b	35.32±4.74a	24.0±1.13b	11.77±0.21a
90	52.13±9.34a	39.73±15.5a	36.18±6.41a	17.07±2.93a
CV (%)	13.93	18.80	12.57	18.58
F-test	*	*	*	ns

หมายเหตุ ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก2 การดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินภายใต้สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

ระยะเวลา การปลูก	การดูดใช้และสะสมตะกั่วของสาบเสือ (mg plant ⁻¹ DW)			
	ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว		ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว	
	ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน
15	0.13±0d ¹	1.26±0.28b	6.07±0.65c	12.29±3.46b
30	0.39±0.08cd	1.09±0.15b	10.45±3.74bc	20.87±2.39a
45	0.71±0.39bc	0.97±0.05b	17.78±5.54a	21.72±4.43a
60	0.65±0.13bc	3.04±0.05a	16.49±0.48ab	20.65±2.63a
75	1.03±0.21b	2.99±0.32a	18.37±2.22a	22.68±2.63a
90	1.73±0.30a	3.41±1.14a	19.54±5.33a	21.21±0.82a
CV (%)	24.09	15.68	20.23	13.70
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก3 ความเข้มข้นของตะกั่วในดินภายหลังการบำบัดด้วยสาบเสือภายใต้
สภาพควบคุมในโรงเรือนทดลอง

ระยะเวลา การปลูก	ความเข้มข้นของตะกั่วในดิน (mg kg^{-1})			
	ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว		ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว	
	ปริมาณตะกั่ว ที่สกัดได้	ปริมาณตะกั่ว ทั้งหมด	ปริมาณตะกั่ว ที่สกัดได้	ปริมาณตะกั่ว ทั้งหมด
15	$1.29 \pm 0.02a^1$	$28.40 \pm 5.49b$	$842.60 \pm 38.39b$	$73,570.31 \pm 4,844.88a$
30	$1.29 \pm 0.05a$	$30.19 \pm 5.26a$	$1,282.54 \pm 41.32a$	$73,351.67 \pm 2,276.03ab$
45	$1.44 \pm 0.10a$	$35.84 \pm 7.44a$	$1,317.42 \pm 44.18a$	$68,446.46 \pm 868.22abc$
60	$1.41 \pm 0.02a$	$31.72 \pm 2.67a$	$1,246.86 \pm 57.04a$	$68,633.85 \pm 3,016.75abc$
75	$1.43 \pm 0.07a$	$33.67 \pm 4.86a$	$1,303.77 \pm 22.27a$	$68,250.0 \pm 2,215.56bc$
90	$1.40 \pm 0.02a$	$32.59 \pm 0.51a$	$1,243.27 \pm 81.38a$	$66,530.63 \pm 584.89c$
CV (%)	3.26	13.63	6.55	0.88
F-test	ns	*	*	*

หมายเหตุ ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก4 อิทธิพลของระดับความดันต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ
ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

ความดัน	องค์ประกอบเคมีของสาบเสือ (g g^{-1} DW)			
	Water-soluble material	Methanol-soluble lignin	Klason lignin	Cellulose
15 kg cm^{-2}	0.25 $\pm$ 0.001b ¹	0.05 $\pm$ 0.003d	0.31 $\pm$ 0.008c	0.38 $\pm$ 0.012a
17 kg cm^{-2}	0.29 $\pm$ 0.001a	0.08 $\pm$ 0.005c	0.36 $\pm$ 0.011ab	0.27 $\pm$ 0.016cd
19 kg cm^{-2}	0.29 $\pm$ 0.001a	0.09 $\pm$ 0.004b	0.37 $\pm$ 0.01a	0.25 $\pm$ 0.014d
21 kg cm^{-2}	0.24 $\pm$ 0.003c	0.09 $\pm$ 0.002b	0.35 $\pm$ 0.003b	0.32 $\pm$ 0.002b
23 kg cm^{-2}	0.25 $\pm$ 0.002b	0.11 $\pm$ 0.001a	0.36 $\pm$ 0.004ab	0.28 $\pm$ 0.006c
CV (%)	0.57	3.38	2.10	3.40
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

² จากการคำนวณ

ตารางผนวกที่ ก5 อิทธิพลของระยะเวลาต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือ
ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method

เวลา	องค์ประกอบเคมีของสาบเสือ (g g^{-1} DW)			
	Water-soluble material	Methanol-soluble lignin	Klason lignin	Cellulose ²
1 min	0.25±0.002c ¹	0.05±0.002d	0.34±0.004b	0.36±0.001a
3 min	0.29±0.004b	0.09±0.004c	0.37±0.01a	0.25±0.014c
5 min	0.31±0.001a	0.10±0b	0.37±0.003a	0.22±0.002d
7 min	0.29±0.002b	0.12±0.001a	0.37±0.001a	0.22±0.001d
9 min	0.23±0.004d	0.13±0.001a	0.38±0.001a	0.27±0.001b
CV (%)	0.93	1.67	1.01	1.51
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

² จากการคำนวณ

ตารางผนวกที่ 6 ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลัง
จากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion
และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15 วัน

ชนิดของ องค์ประกอบ ทางเคมี	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg kg ⁻¹)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
Water-soluble material	15.38±1.87a ¹	47.94±6.12c	11.82±3.52b	41.39±8.27c
Methanol-soluble lignin	6.97±0.92b	22.34±7.77c	7.61±0.90c	24.70±7.92c
Klason lignin	9.03±0.74b	155.0±7b	6.38±0.28c	162.40±6.07b
Cellulose	17.52±5.88a	268.08±41.23a	55.07±0.86a	823.83±59.61a
CV (%)	19.23	12.75	6.87	7.78
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก7 ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลัง
จากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion
และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 30 วัน

ชนิดของ องค์ประกอบ ทางเคมี	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg kg^{-1})			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
Water-soluble material	$15.65 \pm 2.07b^1$	$49.04 \pm 1.98c$	$13.79 \pm 2.45b$	$44.55 \pm 0.74b$
Methanol-soluble lignin	$9.65 \pm 1.59b$	$22.99 \pm 6.23c$	$9.21 \pm 3.70b$	$21.15 \pm 2.89b$
Klason lignin	$7.00 \pm 0.32b$	$171.45 \pm 17.96b$	$7.54 \pm 0.45b$	$149.92 \pm 13.18b$
Cellulose	$25.49 \pm 9.66a$	$448.58 \pm 63.30a$	$57.63 \pm 6.94a$	$996.42 \pm 164.91a$
CV (%)	23.61	12.93	15.35	14.99
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ๘ ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลัง
จากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion
และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 45 วัน

ชนิดของ องค์ประกอบ ทางเคมี	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg kg^{-1})			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
Water-soluble material	21.36 $\pm$ 3.53b ¹	39.21 $\pm$ 12.23c	21.60 $\pm$ 5.28bc	30.34 $\pm$ 9.32b
Methanol-soluble lignin	11.29 $\pm$ 2.02b	10.94 $\pm$ 3.31c	13.05 $\pm$ 1.67c	13.89 $\pm$ 2.13b
Klason lignin	13.28 $\pm$ 2.15b	123.58 $\pm$ 7.59b	31.45 $\pm$ 10.35b	134.07 $\pm$ 11.71b
Cellulose	41.17 $\pm$ 9.59a	993.67 $\pm$ 78.26a	50.78 $\pm$ 4.34a	1,050.50 $\pm$ 131.61a
CV (%)	8.69	19.85	12.60	18.52
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก9 ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลัง
จากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion
และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 60 วัน

ชนิดของ องค์ประกอบ ทางเคมี	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg kg ⁻¹)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
Water-soluble material	26.06±4.41a ¹	34.75±6.24c	21.45±9.37b	32.10±7.63c
Methanol-soluble lignin	15.89±0.92b	19.16±4.88c	13.64±2.47b	19.22±1.26c
Klason lignin	10.64±0.54b	128.67±3.16b	11.15±0.55b	130.25±7.04b
Cellulose	24.65±5.10a	913.83±39.21a	54.13±8.64a	1,140.67±90.85a
CV (%)	14.20	4.88	20.96	8.08
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก10 ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลัง
จากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion
และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 75 วัน

ชนิดของ องค์ประกอบ ทางเคมี	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg kg ⁻¹)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
Water-soluble material	30.76±6.01a ¹	43.14±4.44c	29.71±1.24b	71.47±2.17c
Methanol-soluble lignin	13.35±7.31b	18.30±5.29c	14.74±1.92c	22.69±1.83d
Klason lignin	9.93±1.34b	137.37±9.51b	10.95±0.87c	142.37±7.59b
Cellulose	34.58±9.62a	1,091.50±59.49a	49.06±10.04a	1,609.08±44.55a
CV (%)	27.39	6.10	13.47	3.04
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก11 ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบในองค์ประกอบทางเคมีของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 90 วัน

ชนิดของ องค์ประกอบ ทางเคมี	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg kg ⁻¹)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
Water-soluble material	24.27±1.12b ¹	32.53±6.61c	22.22±2.31b	41.15±5.59c
Methanol-soluble lignin	12.47±4.39c	18.09±6.49c	13.05±2.90b	19.81±9.21c
Klason lignin	12.17±0.62c	133.87±4.93b	12.37±0.37b	126.83±6.49b
Cellulose	50.91±4.79a	781.42±88.26a	48.28±13.59a	1,127.33±38.70a
CV (%)	10.94	11.00	19.98	4.56
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก12 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน water-soluble material ของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

ระยะเวลา การปลูก	ปริมาณการสะสมตะกั่ว (%)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
15	31.58±2.53ab ¹	9.71±0.12a	14.51±3.87b	3.93±0.67a
30	27.72±6.55ab	7.16±1.06b	15.86±3.96b	3.73±0.59a
45	24.57±3.79b	3.32±0.76c	19.08±7.18b	2.48±0.77b
60	33.67±3.63a	3.16±0.47c	20.79±6.07ab	2.45±0.70b
75	34.86±4.11a	3.34±0.28c	28.56±2.01a	3.87±0.18a
90	24.44±2.42b	3.35±0.40c	23.59±4.29ab	3.13±0.33ab
CV (%)	13.98	10.26	22.36	16.55
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก13 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน methanol-soluble lignin ของสาบเสือภายหลังจากการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

ระยะเวลา การปลูก	ปริมาณการสะสมตะกั่ว (%)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
15	14.64±3.85a ¹	4.46±1.04a	9.44±1.37a	2.33±0.61a
30	16.92±3.04a	3.40±1.28a	10.29±3.25a	1.75±0.09ab
45	12.94±1.73a	0.93±0.20b	11.37±2.57a	1.13±0.13b
60	20.66±1.45a	1.75±0.45b	13.92±4.16a	1.45±0.10b
75	15.25±7.77a	1.43±0.45b	14.28±3.04a	1.23±0.10b
90	12.32±3.53a	1.86±0.56b	13.57±1.52a	1.49±0.62b
CV (%)	23.09	29.73	23.68	13.13
F-test	ns	*	ns	*

หมายเหตุ ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก14 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน Klason lignin ของสาบเสือหลังจากการ
บำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ
Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ
90 วัน

ระยะเวลา การปลูก	ปริมาณการสะสมตะกั่ว (%)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
15	18.57±1.16a ¹	31.62±2.92a	7.90±0.47b	15.48±1.33a
30	12.43±2.78b	24.80±1.35b	8.61±1.17b	12.47±1.20b
45	15.51±3.90ab	10.61±0.46d	19.65±7.81a	11.01±1.61bc
60	13.84±1.15b	11.74±0.24cd	11.32±2.24b	9.86±0.35c
75	11.30±0.79b	10.64±0.23d	10.52±1.04b	7.72±0.49d
90	12.26±1.51b	13.98±1.90c	13.22±2.85b	9.64±0.16c
CV (%)	13.97	6.05	21.44	9.03
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับ
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางผนวกที่ ก15 ปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วน cellulose ของสาบเสือภายหลังการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสาบเสือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

ระยะเวลาการปลูก	ปริมาณการสะสมตะกั่ว (%)			
	ส่วนเหนือดิน		ส่วนใต้ดิน	
	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน	ดินที่ไม่ปนเปื้อน	ดินที่ปนเปื้อน
15	35.22±6.52bc ¹	54.21±2.56d	68.15±2.69a	78.26±0.76c
30	42.93±10.49abc	64.64±3.15c	65.24±2.62a	82.05±1.76b
45	46.97±7.61ab	85.15±0.68a	43.64±2.49c	85.38±2.30a
60	31.83±4.92c	83.34±0.07ab	53.97±4.62b	86.23±1.03a
75	38.59±4.79abc	84.59±0.27a	46.65±5.35bc	87.18±0.75a
90	50.99±1.66a	80.81±1.50b	49.62±6.32bc	85.75±0.88a
CV (%)	16.71	1.78	6.51	1.57
F-test	*	*	*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

¹ ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

เกณฑ์มาตรฐานในการพิจารณาสมบัติของดิน ตะกอนดิน และน้ำ
และผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีบางประการของดิน
ที่ใช้ในการทดลองศักยภาพของسابเสือในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว

พ.ศ. ๒๕๕๖

ตารางผนวกที่ ข1 เกณฑ์มาตรฐานของปฏิกิริยาดิน ตะกอนดิน และน้ำ

ช่วง pH	ปฏิกิริยา (reaction)	
< 3.5	กรดรุนแรงมาก	Ultra acid
3.5-4.4	กรดรุนแรง	Extremely acid
4.5-5.0	กรดจัดมาก	Very strongly acid
5.1-5.5	กรดจัด	Strongly acid
5.6-6.0	กรดปานกลาง	Moderately acid
6.1-6.5	กรดเล็กน้อย	Slightly acid
6.6-7.3	เป็นกลาง	Neutral
7.4-7.8	ด่างเล็กน้อย	Slightly alkaline
7.9-8.4	ด่างปานกลาง	Moderately alkaline
8.5-9.0	ด่างจัด	Strongly alkaline
> 9.0	ด่างจัดมาก	Very strongly alkaline

ที่มา: คัดแปลงจาก เอิบ (2552)

ตารางผนวกที่ ข2 เกณฑ์มาตรฐานของค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการของดิน
และตะกอนดินที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะทางเคมีของ ดิน และตะกอนดิน	เกณฑ์มาตรฐาน						
	ต่ำมาก	ต่ำ	ต่ำปาน กลาง	ปาน กลาง	สูง ปาน กลาง	สูง	สูง มาก
Organic matter (%)	< 5	5-10	10-15	15-25	25-35	35-45	> 45
Total N (%)	< 0.1	0.1-0.2	-	0.2-0.5	-	0.5-0.75	> 0.75
Available P (mg kg ⁻¹)	< 3	3-6	6-10	10-15	15-25	25-45	> 45
Available K (mg kg ⁻¹)	< 30	30-60	-	60-90	-	90-120	> 120
CEC (cmol kg ⁻¹)	< 3	3-5	5-10	10-15	15-20	20-30	> 30
EC (dS m ⁻¹)	< 2	2-4	-	4-8	-	8-16	> 16
Total Pb (mg kg ⁻¹)	ไม่เกิน 400 หรือ 750 ตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน						

ที่มา: ดัดแปลงจาก เอิบ (2552); กรมควบคุมมลพิษ (2554ก); กรมพัฒนาที่ดิน (2554)

ตารางผนวกที่ ข3 สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีบางประการ และปริมาณความเข้มข้นตะกั่ว
ในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว

สมบัติของดิน	ดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว
Texture ^{1/}	Clay	Sand
Sand (%)	10.42	90.24
Silt (%)	44.88	2.96
Clay (%)	44.70	6.80
pH ^{2/}	7.93±0.06	8.07±0.06
EC ^{3/} (dS m ⁻¹)	0.8±0.01	0.07±0.01
CEC ^{4/} (cmol kg ⁻¹)	26.67±2.52	4.25±0.17
Organic matter ^{5/} (%)	3±0.1	0.30±0.08
Total Nitrogen ^{6/} (%)	2.83±0.16	0.02±0
Available P ^{7/} (mg kg ⁻¹)	1,415±43.21	6.83±1.04
Available K ^{8/} (mg kg ⁻¹)	353±12.12	12.64±3.47
Available Pb ^{9/} (mg kg ⁻¹)	1.33±0.02	1,114.61±53.06
Total Pb ^{10/} (mg kg ⁻¹)	37.34±3.05	75,529.38±2,935.98

หมายเหตุ ^{1/} Pipette method (Kilmer and Alexander, 1949; Day, 1965)

^{2/} pH meter (soil: water; 1:1) (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{3/} Electric conductrometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{4/} Extracted with NH₄OAc pH 7.0 (ดัดแปลงจาก Chapman, 1965)

^{5/} Walkley and Black method (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Walkley and Black, 1934)

^{6/} Micro-Kjeldahl method (ดัดแปลงจาก ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

^{7/} Extracted with NH₄OAc pH 7.0 (ดัดแปลงจาก ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Pratt, 1965)

^{8/} Bray II method (Bray and Kurtz, 1945)

^{9/} Extracted with 0.005M DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)

^{10/} Wet-digestion method (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Michael, 1982)



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สมบัติของดิน และปริมาณตะกั่วในดิน ตะกอนดิน น้ำ
และสาบเสือที่ใช้ในการทดลอง

1. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดิน โดยใช้การวิเคราะห์เนื้อดินโดยวิธีปิเปต (Kilmer and Alexander, 1949; Day, 1965)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างดินขนาด 2-0.25 มิลลิเมตร (10-60 mesh) จำนวน 10 กรัม ลงใน centrifuge ขนาด 100 มิลลิลิตร โดยในขั้นตอนแรกนั้นเป็นการไล่สารประกอบคาร์บอนेट (ในกรณีที่ดินตัวอย่างมีสารประกอบจำพวกเกลือคาร์บอนेटสูงหรือเป็นดินเค็มจัด) โดยการเติม สารละลาย 1M NaOAc ที่ pH 5.0 (โดยการละลาย NaOAc 82 กรัม และน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเติม CH_3COOH 25 มิลลิลิตร ลงใน volumetric flask ขนาด 1 ลิตร จากนั้นจึงทำการ ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร และปรับ pH ของสารละลายให้ได้ 5.0 ด้วย conc. CH_3COOH) จำนวน 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างไปอุ่นบน water bath ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงตัวอย่างที่ได้เข้าเครื่อง centrifuge ทำการปั่นเหวี่ยงจนตัวอย่างเกิดการตกตะกอนแล้วจึงทำการเทส่วนของสารละลายใสด้านบนทิ้ง เติมน้ำกลั่นจำนวน 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างไปอุ่นบน water bath ที่อุณหภูมิและเวลาเดิม แล้วจึงตัวอย่างที่ได้เข้าเครื่อง centrifuge อีกครั้ง ทำการเทส่วนของสารละลายใสด้านบนทิ้ง และถ่ายตัวอย่างที่ได้ลงใน beaker ขนาด 600 มิลลิลิตร จากนั้นในขั้นตอนที่สองจึงทำการไล่สารประกอบจำพวกอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในดิน (ในกรณีที่ดินตัวอย่างมีอินทรีย์วัตถุเกินร้อยละ 3) โดยการเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรลงในตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนแรก จากนั้นจึงค่อยๆ เติม H_2O_2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร (v/v) จำนวน 5 มิลลิลิตรลงใน beaker ตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปอุ่นบน water bath ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนเกิดปฏิกิริยา oxidation ที่สมบูรณ์โดยดูจากลักษณะของฟองแก๊สและสีของดินที่ไม่ เกิดขึ้นภายหลังจากปฏิกิริยา เสร็จสิ้น (โดยสามารถตรวจสอบได้จากการเติม H_2O_2 เพื่อตรวจสอบ การเกิดปฏิกิริยา) จากนั้นจึงทำการไล่ H_2O_2 ที่มากเกินไปโดยการอุ่น beaker ตัวอย่างบน hot plate ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โดยระวังไม่ให้ตัวอย่างแห้ง จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปอบที่ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนมีน้ำหนักคงที่ แล้วจึงนำตัวอย่างเข้าสู่ใน ขั้นตอนที่สาม โดยการทำให้ตัวอย่างดินเกิดการแตกตัว (dispersing) ซึ่งถ้าตัวอย่างดินที่ทำการ วิเคราะห์ไม่ใช่ดินเค็มและมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์สามารถเริ่มวิเคราะห์เนื้อดิน โดยวิธีปิเปตในขั้นตอนนี้ได้ โดยการนำตัวอย่างดิน 10 กรัม เติม calgon solution (โดยการเตรียม sodium hexametaphosphate จำนวน 35.7 กรัม น้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร sodium carbonate 7.94 กรัม ลงใน volumetric flask ขนาด 1 ลิตร จากนั้นจึงทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร) จำนวน 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างใส่เครื่องปั่น (high-speed stirrer) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงทำการถ่ายตัวอย่างลงในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ผ่านกรวยกรอง

ที่มีตะแกรงร่อนขนาด 0.053 มิลลิเมตร (270 mesh) ซึ่งอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียวจะผ่านลงไป ในกระบอกตวง ทำการล้างอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียวออกจากอนุภาคทรายจนหมด แล้วทำการปรับปริมาตรของสารละลายในกระบอกตวงให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร ทำการกวนอนุภาค อนุภาคทรายแป้งและดินเหนียวที่อยู่ในกระบอกตวงให้ฟุ้งกระจายด้วย plunger เป็นเวลา 30 นาที และทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการถ่ายอนุภาคทรายที่กรองได้ลงในถ้วยอบที่ทราบน้ำหนักแล้ว และนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนมีน้ำหนักคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้นและจดบันทึกค่าที่ได้ ในส่วนของสารละลายดินที่อยู่ในกระบอกตวงภายหลังจากทิ้งไว้ ครบ 6 ชั่วโมง จึงทำการแยกอนุภาคดินเหนียวที่รวมอยู่กับอนุภาคทรายแป้งในกระบอกตวงโดย เครื่อง automatic pipette โดยทำการดูดสารละลายดินที่มีความลึก 10 เซนติเมตรนับจากความสูงของ ผิวหน้าในสารละลายเป็นจำนวน 25 มิลลิลิตร จากนั้นจึงทำการถ่ายอนุภาคดินเหนียวที่ได้ลงในถ้วย อบที่ทราบน้ำหนักแล้ว และนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนมีน้ำหนักคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นและจดบันทึกค่าที่ได้ จากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งหมดไปคำนวณสมบัติทาง กายภาพของดินตามสูตรตามลำดับดังนี้

$$(1) \text{ อนุภาคทราย (ร้อยละ) } = \frac{A}{B} \times 100$$

โดยที่ A = น้ำหนักของอนุภาคทรายอบแห้งที่ได้ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างดินใช้ (กรัม)

$$(2) \text{ อนุภาคดินเหนียว (ร้อยละ) } = \frac{100}{C} \times \frac{1000 \times A}{B}$$

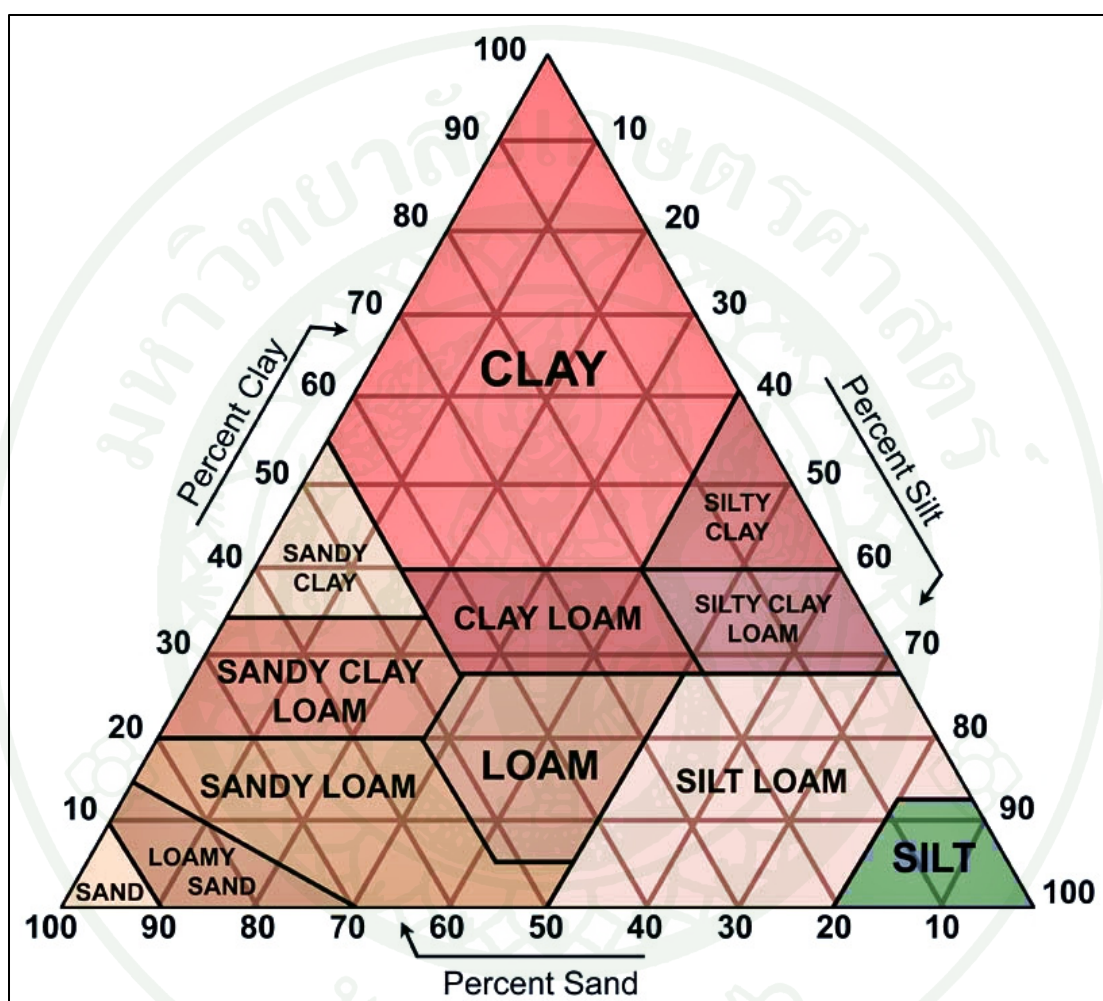
โดยที่ A = น้ำหนักของอนุภาคดินเหนียวอบแห้งที่ได้ (กรัม)

B = ปริมาตรของสารละลายดินที่ดูดจากเครื่อง automatic pipette (มิลลิลิตร)

C = น้ำหนักตัวอย่างดินใช้ (กรัม)

$$(3) \text{ อนุภาคทรายแป้ง (ร้อยละ) } = 100 - (\text{ร้อยละของอนุภาคทราย} + \text{ร้อยละของอนุภาคดินเหนียว})$$

โดยเมื่อทราบสัดส่วนของอนุภาคแต่ละชนิดในตัวอย่างดินที่ทำการวิเคราะห์ จึงนำผลที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับ soil texture diagram เพื่อให้ทราบลักษณะของเนื้อดินตัวอย่าง ดังภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ค1 Soil texture diagram

2. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการของดิน

2.1 การวัด pH ของดิน (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

ทำการวัดโดยชั่งตัวอย่างดินขนาด 2-0.25 มิลลิเมตร (10-60 mesh) จำนวน 20 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที หลังจากนั้นคนให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ซ้ำเช่นเดิมอีกครั้ง รอจนดินตกตะกอน แล้วจึงทำการวัด pH ของดินตรงบริเวณสารละลายด้วย pH meter โดยก่อนวัดต้องทำการ standardize เครื่องด้วย buffer solution ที่ pH 7.0 และ 4.0 ตามลำดับก่อนเสมอ

2.2 การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

ทำการวัดโดยชั่งตัวอย่างดินขนาด 2-0.25 มิลลิเมตร (10-60 mesh) จำนวน 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที หลังจากนั้นคนให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ซ้ำเช่นเดิมอีกครั้งเช่นเดียวกับการวัด pH ของดิน รอจนดินตกตะกอน แล้วจึงทำการวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินตรงบริเวณสารละลายด้วย EC meter โดยก่อนวัดต้องทำการ standardize เครื่องด้วย buffer solution ที่ทราบค่าการนำไฟฟ้าที่แน่นอนก่อนเสมอ

2.3 การวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (ดัดแปลงจาก Chapman, 1965)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างดินขนาด 2-0.25 มิลลิเมตร (10-60 mesh) จำนวน 10 กรัม ในดินร่วนและดินเหนียว หรือ 25 กรัม ในดินทราย ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 5 ลิตร เติมน้ำยาสกัด 1N NH_4OAc (อันประกอบด้วย NH_4OH 680 มิลลิลิตร ผสมในน้ำ 500 มิลลิลิตร เติม CH_3COOH 565 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 10 ลิตร แล้วทำการปรับ pH ของสารละลายให้ได้ 7 ด้วย 1N NH_4OH หรือ 1N CH_3COOH) จำนวน 250 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ค้างคืน จากนั้นทำการกรองด้วย suction โดยใช้ Buchner funnels ล้างดินด้วย 1N NH_4OAc เช่นเดิม เพื่อไล่ Ca^{2+} Mg^{2+} และ K^+ โดยทำการล้างทีละน้อยๆ และระวังมิให้เกิดการแห้งและแตกกระแหงของดิน ทำการล้างจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นจึงเริ่มทำการล้างดินด้วย 1N NH_4Cl 4 ครั้ง และ 0.25N NH_4Cl จำนวน 1 ครั้ง และล้างดินต่อด้วย isopropyl alcohol บริสุทธิ์ (GC grade) จำนวน 150

มิลลิลิตรเพื่อไล่ Cl^- โดยล้างที่ละน้อยๆ เช่นเดียวกับในขั้นตอนแรก ที่ใส่ไว้สักครู่เพื่อให้ดินหมด แต่ต้องระวังไม่ให้ดินเกิดการแตกกระแหง หลังจากนั้นจึงทำการไล่ NH_4^+ ด้วย acidified NaCl ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร (v/v) (ละลาย NaCl 100 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร และ conc. HCl 0.5 มิลลิลิตร) โดยทำการล้างอย่างซ้ำๆ เช่นเดียวกันจนกระทั่งได้สารละลายปริมาตรประมาณ 230 มิลลิลิตรจึงหยุด แล้วจึงถ่ายสารละลายนี้ลงใน volumetric flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 250 มิลลิลิตร และเขย่าให้เข้ากัน (โดยถ้ามีความจำเป็นต้องเก็บสารละลายนี้ไว้ก่อนทำการกลั่นเกิน 3 วัน ควรหยด toluene ลงไปใน flask 3 หยด) จากนั้นจึงการวิเคราะห์หา NH_4^+ ถูกที่ไล่ ออกโดยวิธี micro-Kjeldahl ซึ่งการทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน จากนั้นทำการไตเตรทสารละลายที่กลั่นได้ด้วย 0.01N H_2SO_4 แล้วคำนวณค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่ได้จากสูตร

$$\text{ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)} = \frac{(A - B) \times C \times 100 \times D}{E \times F}$$

โดยที่ A = ปริมาตรของกรดที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดที่ใช้ไตเตรทตัว blank (มิลลิลิตร)

C = ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ไตเตรท (นอร์มอล)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

E = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่นำมากลั่น (มิลลิลิตร)

F = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Walkley and Black, 1934)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างดินที่บดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร (> 60 mesh) จำนวน 0.5 กรัมลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นละลาย 1N $K_2Cr_2O_7$ (ละลาย $K_2Cr_2O_7$ 49.04 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร) จำนวน 5 มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่น conc. H_2SO_4 10 มิลลิลิตร ค่อยๆ เขย่า 1-2 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร หยด 0.025M o-phenanthroline ferrous sulfate indicator (อันประกอบด้วย o-phenanthroline 1.48 กรัม และ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.7 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร) ลงไป 3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ นำไปไทเทรตกับสารละลาย 0.5N $FeSO_4$ (ละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4) \cdot H_2O$ 196.1 กรัมในน้ำกลั่น เติมน้ำกลั่น conc. H_2SO_4 15 มิลลิลิตร รอจนเย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร) จนกระทั่งถึงจุดยุติโดยจะเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีน้ำตาลปนแดง บันทึกปริมาตรของสารละลาย 1N $K_2Cr_2O_7$ และ 0.5N $FeSO_4$ ที่ใช้นำมาคำนวณหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุตามสูตรตามลำดับดังนี้

$$(1) \text{ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (ร้อยละ) } = \frac{(A \times B) - (C \times D) \times 0.003 \times 100 \times 1.33}{E}$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นของ $K_2Cr_2O_7$ ที่ใช้ (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของ $K_2Cr_2O_7$ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

C = ความเข้มข้นของ $FeSO_4$ ที่ใช้ (นอร์มอล)

D = ปริมาตรของ $FeSO_4$ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

$$(2) \text{ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ) } = \text{ร้อยละของปริมาณอินทรีย์คาร์บอน} \times 1.72$$

2.5 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี micro-Kjeldahl method (ดัดแปลงจาก ทักษิณีย์ และ จงรักษ์, 2542)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างดินที่บดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร (> 60 mesh) จำนวน 1 กรัมลงในหลอดทดลองสำหรับย่อยตัวอย่าง เดิม digestion mixture (อันประกอบด้วย Na_2SO_4 หรือ K_2SO_4 250 กรัม กับ selenium 2.5 กรัม และ conc. H_2SO_4 2.5 ลิตร ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 5 ลิตร ที่ผ่านการต้มจนได้สารละลายใส ไม่มีสี) จำนวน 5 มิลลิลิตร ทำการย่อยตัวอย่างบนเครื่อง block digester ที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะได้ตะกอนเป็นสีขาว ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วทำการปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร จากนั้นกรองลงในกระดาศกรองเบอร์ 2 ลงในขวดตัวอย่าง ทำการกลั่นตัวอย่างภายหลังจากการย่อยด้วยเครื่องกลั่นไนโตรเจน โดยดูดตัวอย่างจำนวน 10 มิลลิลิตร ลงใน distillation flask เติม 10N NaOH (ละลาย NaOH 400 กรัม ในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร) จำนวน 6 มิลลิลิตร ทำการกลั่น โดยจับก๊าซ NH_3 ที่เกิดขึ้นไว้ในสารละลาย boric acid solution indicator (อันประกอบด้วย H_3BO_3 80 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 3.8 ลิตร ทำให้ร้อนจนสารละลายทั้งหมด แล้วจึงเติม mixed indicator 80 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วย bromocresol green 0.099 กรัม ใน $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 100 มิลลิลิตร แล้วจึงเติม 1N NaOH ที่ละน้อย จนกระทั่งได้สารละลายสีม่วงแดง ที่ pH ประมาณ 5 จากนั้นจึงเติมน้ำจนได้ปริมาตร 4 ลิตร) ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีม่วงแดงเป็นสีเขียวอำพัน และมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเป็น 25 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาในการกลั่นทั้งสิ้นประมาณ 7 นาที จากนั้นทำการไตเตรทสารละลายที่กลั่นได้ด้วย 0.01N H_2SO_4 แล้วคำนวณปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)} = \frac{(A - B) \times C \times 0.014 \times 100 \times D}{E \times F}$$

โดยที่ A = ปริมาตรของกรดที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดที่ใช้ไตเตรทตัว blank (มิลลิลิตร)

C = ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ไตเตรท (นอร์มอล)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

E = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่นำมากลั่น (มิลลิลิตร)

F = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

2.6 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Bray and Kurtz, 1945)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างดินขนาด 2-0.25 มิลลิเมตร (10-60 mesh) จำนวน 2 กรัม ใส่ในขวดตัวอย่าง เติมน้ำยาสกัด Bray II (อันประกอบด้วย 1N NH_4F 3 มิลลิลิตร ผสมกับ 0.5N HCl 200 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำให้เป็น 1 ลิตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร เขย่า 40 วินาที แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นดูดสารละลายมา 1-5 มิลลิลิตร (ขึ้นอยู่กับปริมาณของฟอสฟอรัสในสารละลายตัวอย่าง) ใส่ใน volumetric flask ขนาด 25 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำยา reagent B (อันประกอบด้วย $(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 12 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร และ $\text{KSbO} \cdot \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ 0.2908 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และ 5N H_2SO_4 1 ลิตร ทั้งหมดผสมกันและปรับปริมาตรเป็น 2 ลิตร จากนั้นละลาย ascorbic acid 1.056 กรัม ต่อน้ำยา 200 มิลลิลิตร โดย reagent B ที่เตรียมได้นี้จะต้องใช้ทันที ไม่ควรเก็บไว้เกิน 24 ชั่วโมง) จำนวน 4 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นจนครบ 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที จะได้สารละลายสีน้ำเงิน วัดความเข้มของสีโดยเทียบกับสารละลายมาตรฐาน (จากการละลาย KH_2PO_4 (AR grade) 0.2195 กรัม ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร แล้วนำสารละลายที่ได้มาเจือจางลงอีก 10 เท่า ให้มีความเข้มข้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อนำไปเตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อไป) ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร ถ้าสารละลายตัวอย่างมีความเข้มของฟอสฟอรัสสูงเกินสารละลายมาตรฐาน ให้ลดปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ลง แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบ 25 มิลลิลิตร ทำการคำนวณหาฟอสฟอรัสจากสูตร

$$\text{ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)} = \frac{A \times B \times C}{D \times E}$$

โดยที่ A = ปริมาตรของน้ำยาสกัด Bray II (มิลลิลิตร)

B = ปริมาณฟอสฟอรัสที่อ่านได้จาก standard curve

C = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

2.7 การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ดัดแปลงจาก ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542; Pratt, 1965)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างดินขนาด 2-0.25 มิลลิเมตร (10-60 mesh) จำนวน 2 กรัม ใส่ในขวดตัวอย่าง เติมน้ำยาสกัด 1N NH_4OAc (อันประกอบด้วย NH_4OH 68 มิลลิลิตร ผสมในน้ำ 500 มิลลิลิตร เติม CH_3COOH 57 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร แล้วทำการปรับ pH ของสารละลายให้ได้ 7 ด้วย 1N NH_4OH หรือ 1N CH_3COOH) จำนวน 50 มิลลิลิตร เขย่านาน 30 นาที แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโพแทสเซียมด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ทำการคำนวณหาปริมาณของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินตามสูตร

$$\text{ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)} = \frac{(A - B) \times C \times D}{E}$$

โดยที่ A = ค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่วัดได้จากเครื่อง AAS

B = ค่าความเข้มข้นของ blank ที่วัดได้จากเครื่อง AAS

C = จำนวนเท่าของการ dilute (ถ้ามี)

D = ปริมาตรของน้ำยาสกัด NH_4OAc (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

3. การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในดิน น้ำ ตะกอนดิน สาบเสือ และองค์ประกอบเคมีของสาบเสือ

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่สกัดได้ในดิน ตะกอนดิน (Lindsay and Norvell, 1978)

ทำการวิเคราะห์โดยซังตัวอย่างดินและตะกอนดินขนาด 2-0.25 มิลลิเมตร (10-60 mesh) อย่างละ 25 กรัม ใส่ในขวดตัวอย่าง เติมน้ำยาสกัด 0.005M DTPA (diethylene triamine pentaacetic acid) (อันประกอบด้วย DTPA 3.9340 กรัม ที่ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ผสมกับ CaCl_2 2.940 กรัม ที่ละลายในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร และ triethanolamine 27 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 2 ลิตร รวมทั้งปรับ pH เท่ากับ 7.3 โดยใช้ CH_3COOH) จำนวน 50 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วด้วย AAS ทำการคำนวณหาปริมาณตะกั่วที่สกัดได้ตามสูตร

$$\text{ปริมาณตะกั่วที่สกัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)} = \frac{(A - B) \times C \times D}{E}$$

โดยที่ A = ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS

B = ค่าความเข้มข้นของ blank ที่วัดได้จากเครื่อง AAS

C = จำนวนเท่าของการ dilute (ถ้ามี)

D = ปริมาตรของน้ำยาสกัด DTPA (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน ตะกอนดิน (ทักษิณ และ จงรักษ์, 2542; Michael, 1982)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างดินและตะกอนดินที่บดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร (> 60 mesh) จำนวน 1 กรัมลงในหลอดทดลองสำหรับย่อยตัวอย่างเดิม digestion mixture (อันประกอบด้วย conc. HNO_3 และ conc. HClO_4 ในอัตราส่วน 5 ต่อ 2 ตามลำดับ) จำนวน 5 มิลลิลิตร ทำการย่อยตัวอย่างบนเครื่อง block digester ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะได้ตะกอนเป็นสีขาว ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วทำการปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร ทำการกรองลงในกระดวยกรองเบอร์ 2 นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วด้วย AAS ทำการคำนวณหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดตามสูตร

$$\text{ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)} = \frac{(A - B) \times C \times D}{E}$$

โดยที่ A = ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS

B = ค่าความเข้มข้นของ blank ที่วัดได้จากเครื่อง AAS

C = จำนวนเท่าของการ dilute (ถ้ามี)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในพืช (ทักษิณ และ จงรักษ์, 2542)

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างสาบเสือที่บดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.4 มิลลิเมตร (> 40 mesh) จำนวน 0.4 กรัม ลงในหลอดทดลองสำหรับย่อยตัวอย่าง เดิม digestion mixture และทำการย่อยตัวอย่างภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ และเวลาเช่นเดียวกับวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน จนได้ตัวอย่างสาบเสือที่ผ่านการย่อยที่สมบูรณ์เป็นสารละลายที่ใสไม่มีสี ทำการคำนวณหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดตามสูตร

$$\text{ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)} = \frac{(A - B) \times C \times D}{E}$$

โดยที่ A = ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS

B = ค่าความเข้มข้นของ blank ที่วัดได้จากเครื่อง AAS

C = จำนวนเท่าของการ dilute (ถ้ามี)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างพืช (กรัม)

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำ และจากองค์ประกอบทางเคมีของพืชภายหลังจากการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยวิธี steam explosion และ Wayman's method (ดัดแปลงจาก ทศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำ water-soluble material และ cellulose

ทำการวิเคราะห์โดยตวงน้ำ และสารละลายทั้ง 2 ชนิด (ที่ผ่านการปรับปริมาตรแล้ว) จำนวนอย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่สำหรับตัวอย่างที่เป็นสารละลายเดิม digestion mixture และทำการย่อยตัวอย่างภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ และเวลาเช่นเดียวกับวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินและพืช จนได้ตัวอย่างของน้ำ water-soluble material และ cellulose ที่ผ่านการย่อยที่สมบูรณ์เป็นสารละลายที่ใสไม่มีสี ทำการคำนวณหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดตามสูตร

$$\begin{aligned} &\text{ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำ water-soluble material และ cellulose (มิลลิกรัมต่อ} \\ &\text{กิโลกรัม)} \\ &= \frac{(A - B) \times C \times D}{E} \end{aligned}$$

โดยที่ A = ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS

B = ค่าความเข้มข้นของ blank ที่วัดได้จากเครื่อง AAS

C = จำนวนเท่าของการ dilute (ถ้ามี)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างพืชก่อนการสกัดในแต่ละชนิด (กรัม)

3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดใน Klason lignin

ทำการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่าง Klason lignin ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จำนวน 0.05 กรัม ลงในหลอดทดลองสำหรับย่อยตัวอย่าง เติม digestion mixture และทำการย่อยตัวอย่าง ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ และเวลาเช่นเดียวกับวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินและพืช จนได้ตัวอย่างของ Klason lignin ที่ผ่านการย่อยที่สมบูรณ์เป็นสารละลายที่ใสไม่มีสี ทำการคำนวณหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดตามสูตร

ปริมาณตะกั่วทั้งหมดใน Klason lignin (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

$$= \frac{(A - B) \times C \times D}{E}$$

โดยที่ A = ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS

B = ค่าความเข้มข้นของ blank ที่วัดได้จากเครื่อง AAS

C = จำนวนเท่าของการ dilute (ถ้ามี)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่าง Klason lignin (กรัม)

3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดใน methanol-soluble lignin

ทำการวิเคราะห์โดยดองสารละลายที่ผ่านการปรับปริมาตรแล้ว จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่สำหรับตัวอย่างที่เป็นสารละลาย เติม digestion mixture เช่นเดียวกับวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินและพืช ทำการย่อยเพื่อไล่ CH_3OH ที่อยู่ในสารละลายโดยใช้อุณหภูมิไม่เกิน 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จน CH_3OH ระเหยออกจนหมด ทำการเติม digestion mixture อีกครั้งในปริมาตรเดิม ทำการย่อยตัวอย่างต่อภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ และเวลาเช่นเดียวกับวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินและพืชจนได้ตัวอย่างของ methanol-soluble lignin ที่ผ่านการย่อยที่สมบูรณ์เป็นสารละลายที่ใสไม่มีสี ทำการคำนวณหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดตามสูตร

ปริมาณตะกั่วทั้งหมดใน methanol-soluble lignin (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

$$= \frac{(A - B) \times C \times D}{E}$$

โดยที่ A = ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS

B = ค่าความเข้มข้นของ blank ที่วัดได้จากเครื่อง AAS

C = จำนวนเท่าของการ dilute (ถ้ามี)

D = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด (มิลลิลิตร)

E = น้ำหนักตัวอย่างพืชก่อนการสกัด (กรัม)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายกนกศักดิ์ อุดมสิน
วัน เดือน ปี ที่เกิด	20 ธันวาคม พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ประมง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2553 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์