

เปรียบเทียบผลของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระและ  
กากขานอ้อยต่อการดูดซับดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม

COMPARISON THE EFFECTS OF NAPIER GRASS  
BIOCHAR AND BAGASSE BIOCHAR ON ADSORPTION OF  
CADMIUM CONTAMINATED SOIL

ปิยวัฒน์	ไหมชู
พรภัทธา	ปิ่นน้อย
ศุภวัลย์	จรรยาสุภาภรณ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

COMPARISON THE EFFECTS OF NAPIER GRASS  
BIOCHAR AND BAGASSE BIOCHAR ON ADSORPTION OF  
CADMIUM CONTAMINATED SOIL

PIYAWAT	MAICHU
PORNPATTRA	PINNOI
SUPAWAN	JAROONWARASATE

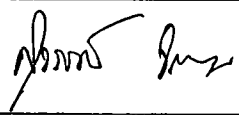

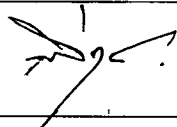
A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ      เปรียบเทียบผลของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะและกากขาน  
 อ้อยต่อการดูดซับดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม

ชื่อนักศึกษา      นายปิยวัฒน์      ไหมชู      รหัสนักศึกษา 58050652  
                                  นางสาวพรภัทรา      ปิ่นน้อย      รหัสนักศึกษา 58050657  
                                  นางสาวศุภวัลย์      จรูญวราเสฏฐ์      รหัสนักศึกษา 58050686

ปริญญา      วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
 ภาควิชา      เคมี  
 ปีการศึกษา      2561  
 อาจารย์ที่ปรึกษา      ดร.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
 (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการ	
ดร.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	เปรียบเทียบผลของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะและกากขานอ้อยต่อการดูดซับดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม		
ชื่อนักศึกษา	นายปิยวัฒน์ ไหมชู	รหัสนักศึกษา	58050652
	นางสาวพรภัทรา ปิ่นน้อย	รหัสนักศึกษา	58050657
	นางสาวศุภวัลย์ จรุงวรารเสฏฐ์	รหัสนักศึกษา	58050686
ปริญญา ภาควิชา คณะ	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) เคมี วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมในดินปนเปื้อน โดยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะและกากขานอ้อย, ศึกษาอัตราส่วนของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับ, ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะและถ่านชีวภาพจากกากขานอ้อย, ศึกษาการสกัดของแคดเมียมด้วยสารละลาย EDTA, ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแคดเมียม และศึกษาการปลดปล่อยแคดเมียมหลังผสมถ่านชีวภาพ ในกรณีฝนตกในสภาวะปกติและสภาวะฝนกรดจากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดูดซับแคดเมียม และความสามารถในการดูดซับแคดเมียมจะเพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดลองอัตราส่วนที่ 15% ของถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด ซึ่งถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะและกากขานอ้อยมีค่าร้อยละการดูดซับอยู่ที่ 66.85% และ 57.21% ตามลำดับ ผลจากการสกัดแคดเมียมด้วยสารละลาย EDTA พบว่าเมื่ออัตราส่วนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น สารละลายแคดเมียมที่สกัดออกมาได้มีปริมาณความเข้มข้นที่ลดลง ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดสอดคล้องทั้งสมการแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช และในกรณีการชะด้วยน้ำในสภาวะกรดและเบสพบว่าดินสังเคราะห์แคดเมียมที่ผสมกับถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะและกากขานอ้อย ในทุกอัตราส่วนพบการการรั่วไหลของแคดเมียมที่น้อยมาก

คำสำคัญ : กากขานอ้อย การดูดซับ แคดเมียม ถ่านชีวภาพ หญ้าเนเปียร์แคะ

<b>Title</b>	Comparison The Effects of Napier grass biochar and Bagasse biochar on absorption of cadmium contaminated soil		
<b>Students</b>	Mr. Piyawat	Maichu	Student ID 58050654
	Miss Pornpattra	Pinnoi	Student ID 58050656
	Miss Supawan	Jaroonwarasate	Student ID 8050665
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2561		
<b>Advisor</b>	Dr. Glinsukol Suwannarat		

### Abstract

The purpose of this research is to study the adsorption of cadmium in contaminated soil by Napier grass biochar and Bagasse biochar. The research studied the ratio of biochar to adsorption, the comparison of adsorption efficiency of Napier grass biochar and Bagasse biochar. The extraction of cadmium with EDTA solution, adsorbent Isotherm and study of cadmium release after biochar mixture, in the event of raining in normal condition and acid rain condition. The experiment result that when the ratio of biochar increases, cadmium adsorption percentage and cadmium adsorption capacity will increase. In the experiment ratio 15% of biochar has the highest absorption efficiency. The Biochar from Napier grass and Bagasse had the adsorption percentage of 66.85% and 57.21%, respectively. As the ratio of biochar increased, cadmium solution extracted by EDTA has lower concentration. Isotherm adsorption of two types of biochar were both fitted to Langmuir and Freundlich isotherms equations. And in the simulation of water leaching in acid condition at pH 5 and base condition at pH 8, the cadmium contaminated in soil with Napier grass biochar and Bagasse biochar, in all ratios was low amount detected for cadmium leakage.

**Keyword :** Bagasse, Adsorption, Cadmium, Biochar, Napier

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่านเป็นอย่างดี ทางคณะผู้จัดทำจึงอยากขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมไปถึงให้ความช่วยเหลือเพื่อการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้เพิ่มเติมและตรวจสอบข้อบกพร่องเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษซึ่งได้แก่ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ผศ.ดร.ชมพูนุช ไชยรักษ์ ที่ช่วยชี้แนะถึงข้อบกพร่อง ให้คำแนะนำและตรวจสอบโครงการพิเศษเพื่อให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.พินิจภณ ปิตุยะ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์นำถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ แคระให้กับคณะผู้จัดทำนำมาศึกษาทดลองเพื่อสร้างประโยชน์และคุณค่าให้กับพืชทางเกษตร

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เสาวนีย์ บัวโตน ซึ่งเป็นเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิทยาศาสตร์เพื่อการศึกษารังสิต ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ยืมเตาเผาถ่านแบบไพโรไลซิสกับคณะผู้จัดทำ ส่งผลให้การทดลองสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลอง และอำนวยความสะดวกทางด้านเอกสารต่างๆ ส่งผลให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ให้กำลังใจ ดูแล และให้ความช่วยเหลืออยู่เสมอ รวมไปถึงเพื่อนๆ ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจตลอดจนโครงการพิเศษฉบับเสร็จสมบูรณ์

ปิยวัฒน์ ไหมชู  
พรภัทธา ปิ่นน้อย  
ศุภวัชย์ จรุงวรราเสฏฐ์

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....ค	ค
สารบัญ.....ง	ง
สารบัญตาราง.....ช	ช
สารบัญรูป.....ญ	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....ฉ	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ..... 1</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4</b>	<b>4</b>
2.1 เหมืองแร่..... 4	4
2.1.1 การทำเหมืองแบบเปิด หรือเหมืองผิวดิน (Surface Mining)..... 4	4
2.1.2 การทำเหมืองแบบปิด หรือเหมืองใต้ดิน (Underground Mining)..... 5	5
2.2 ผลกระทบของเหมืองแร่..... 6	6
2.2.1 ผลกระทบด้านคุณภาพอากาศ..... 6	6
2.2.2 ผลกระทบด้านคุณภาพเสียงและแรงสั่นสะเทือน..... 6	6
2.2.3 ผลกระทบด้านการคมนาคม..... 6	6
2.2.4 ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน..... 6	6
2.2.5 ผลกระทบด้านทัศนียภาพ..... 7	7
2.3 การรั่วไหลของโลหะหนัก..... 7	7
2.3.1 โลหะหนัก (Heavy Metal)..... 7	7
2.4 สถานการณ์ปนเปื้อนในประเทศไทย..... 8	8

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1	เหมืองแร่ชาติรี จังหวัดพิจิตร จังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดพิษณุโลก .....	8
2.4.2	เหมืองแร่บ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี .....	9
2.4.3	เหมืองแร่แม่เมาะ จังหวัดลำปาง .....	10
2.4.4	เหมืองแร่ตีบุก จังหวัดนครศรีธรรมราช .....	11
2.4.5	เหมืองแร่ดอยผาแดง จังหวัดตาก.....	11
2.5	แคดเมียม (Cadmium).....	13
2.5.1	ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	13
2.5.2	เกณฑ์มาตรฐานและค่ากำหนดของแคดเมียม .....	14
2.5.3	ปฏิกิริยาแคดเมียมในดิน.....	15
2.6	การกำจัดโลหะหนักในดิน .....	15
2.6.1	การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification).....	16
2.6.2	ไวทริฟิเคชัน (Vitrification).....	16
2.6.3	เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation).....	17
2.6.4	การล้างดิน (Soil washing).....	18
2.6.5	ถ่านดูดซับ.....	19
2.7	กระบวนการดูดซับ (Adsorption) .....	19
2.7.1	ประเภทของการดูดซับ.....	20
2.7.2	ขั้นตอนการดูดซับ .....	20
2.7.3	สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium).....	21
2.8	ถ่านชีวภาพ (Biochar).....	21
2.9	การล้างดินด้วยสารประเภทคีเลตติงค์ เอเจนต์ (Chelating agent) .....	23
2.9.1	Ethylene diamine tetra-acetic acid (EDTA) .....	24

## สารบัญ' (ต่อ)

	หน้า
2.10 พืชที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ .....	24
2.10.1 หล้าเนเปียร์แคระ (Dwarf Napier).....	24
2.10.2 อ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 50 (Suphanburi 50 Juice Cane Variety) .....	25
2.11 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	26
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>31</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	31
3.1.1 อุปกรณ์ .....	31
3.1.2 สารเคมี.....	32
3.2 แหล่งที่มาของดิน .....	33
3.3 การเตรียมตัวอย่างดินและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของดิน .....	33
3.4 การเตรียมดินสังเคราะห์แคดเมียม .....	34
3.5 การเตรียมถ่านชีวภาพและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของถ่านชีวภาพ .....	34
3.6 การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์แคดเมียมผสมกับถ่านชีวภาพ .....	36
3.7 การศึกษาหาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพ.....	36
3.8 ศึกษาการปลดปล่อยของแคดเมียมหลังผสมถ่านชีวภาพ ในกรณีการชะด้วยน้ำที่สภาวะกรด-เบส.....	38
3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	38
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>39</b>
4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมี.....	39
4.2 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆของตัวดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์.....	41
4.2.1 ศึกษาการสกัดแคดเมียมด้วยสารละลาย EDTA .....	41
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของถ่านชีวภาพที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียม .....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ศึกษาการปลดปล่อยแคดเมียมที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านชีวภาพ ในกรณีการชะด้วยน้ำที่ สภาวะกรด-เบส.....	45
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>46</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	46
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>47</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>53</b>
ภาคผนวก ก .....	54
ภาคผนวก ข .....	62
ภาคผนวก ค .....	67
ภาคผนวก ง.....	71
ภาคผนวก จ .....	74
ภาคผนวก ฉ.....	76

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณสัดส่วนของผลผลิตจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน .....	22
2.2 สมบัติกายภาพทั่วไปของถ่านชีวภาพ.....	22
2.3 ประโยชน์การนำมาใช้ของถ่านไม้ ถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์.....	23
3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของดิน .....	34
3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพ .....	35
4.1 ผลการทดสอบของการวิเคราะห์ BET .....	41
ก.1 การแปลผล pH ของดินในน้ำ.....	54
ก.2 การแปลผล การจำแนกค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเค็มของดินและผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช .....	55
ก.3 การแปรผล ระดับอินทรีย์วัตถุ.....	56
ก.4 การแปรผลระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน .....	57
ก.5 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีเบื้องต้นของดิน .....	60
ก.6 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ.....	61
ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม.....	62
ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส .....	64
ข.3 ค่าความเข้มแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม .....	65
ค.1.1 ค่าความเข้มเริ่มต้นของดินสังเคราะห์แคดเมียมและความเข้มข้นของดินสังเคราะห์แคดเมียมที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ ที่อัตราถ่านชีวภาพ 5%, 10%, 15% .....	67
ค.1.2 ค่าความเข้มเริ่มต้นของดินสังเคราะห์แคดเมียมและความเข้มข้นของดินสังเคราะห์แคดเมียมที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย ที่อัตราถ่านชีวภาพ 5%, 10%, 15% .....	68
ค.2.1 ผลต่อการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์เข้มข้น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ด้วยถ่านชีวภาพหญ้าเนเปียร์แคระ ที่อัตราส่วน 5%, 10%, 15% .....	69

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.2.2 ผลต่อการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์เข้มข้น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ด้วยถ่านชีวภาพ กากชานอ้อย ที่อัตราส่วน 5%, 10%, 15% .....	70
ง.1 ค่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ .....	72
ง.2 ค่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไฮโดรคลอริก.....	73

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขอบเขตพื้นที่เหมืองแร่ชาติรี .....	9
2.2 บริเวณเหมืองแร่ จังหวัดกาญจนบุรี.....	10
2.3 เหมืองแม่เมาะ .....	11
2.4 บริเวณเหมืองแร่ จังหวัดตาก.....	12
2.5 อาการของโรคฮีไต-ฮีไต .....	14
2.6 ethylene diamine tetra-acetic acid (EDTA).....	24
2.7 หล้าเนเปียร์แคระ .....	24
2.8 อ้อย พันธุ์สุพรรณบุรี .....	25
3.1 การสุ่มตัวอย่างดิน.....	33
3.2 เตาเผาสำหรับเผาถ่านชีวภาพ .....	35
3.3 การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์แคดเมียมผสมกับถ่านชีวภาพ.....	36
4.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ จากกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วย กำลังขยาย 8000 เท่า.....	40
4.2 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม และร้อยละการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพหล้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย เมื่อใช้ถ่านชีวภาพ 5%, 10% และ 15% ต่อปริมาณดินสังเคราะห์แคดเมียม 1 กิโลกรัม ที่ความเข้มข้น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม.....	42
4.3 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพจากหล้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย เมื่อใช้อัตราส่วนถ่านชีวภาพ 5%, 10% และ 15% ต่อปริมาณดินสังเคราะห์แคดเมียม 1 กิโลกรัม ที่ความเข้มข้น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม.....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายแคดเมียม.....	63
ข.2 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอสฟอรัส .....	64
ข.3 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียม .....	66
จ.1 ถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย ที่กำลังขยาย 8000 เท่า.....	74
จ.2 ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ ที่กำลังขยาย 8000 เท่า.....	74
จ.3 ถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย ที่กำลังขยาย 6000 เท่า.....	74
จ.4 ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะ ที่กำลังขยาย 6000 เท่า .....	74
จ.5 ถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	74
จ.6 ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	74
จ.7 ถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	75
จ.8 ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะ ที่กำลังขยาย 2000 เท่า .....	75
ฉ.1 ผลการวิเคราะห์ BET ของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะ .....	76
ฉ.2 ผลการวิเคราะห์ BET ของถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย .....	77

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
°C	องศาเซลเซียส
AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์
A°	อังสตรอม
BDS	Borium diphenylamin sulfonate indicator
BET	เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน
CEC	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน
C <sub>0</sub>	ความเข้มข้นของสารที่เวลาเริ่มต้น
C <sub>0</sub>	ความเข้มข้นที่เหลือของแคดเมียม
C <sub>1</sub>	ความเข้มข้นสารละลายก่อนเจือจาง
C <sub>2</sub>	ความเข้มข้นสารละลายหลังเจือจาง
C <sub>e</sub>	ความเข้มข้นของสารที่ดูดซับที่สภาวะสมดุล
C <sub>e</sub>	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของไอออนโลหะ
C <sub>e</sub>	ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม
cm <sup>3</sup> /g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
cmol/kg	เซนติโมลต่อกิโลกรัม
C <sub>t</sub>	ความเข้มข้นของสารที่เวลาใดๆ
dm <sup>3</sup> /kg	ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อกิโลกรัม
EC	ค่าการนำไฟฟ้า
kg/m <sup>3</sup>	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
K <sub>t</sub>	ค่าคงที่ของฟรอนดิช
L/g	ลิตรต่อกรัม
L/mg	ลิตรต่อมิลลิกรัม
m <sup>2</sup> /g	ตารางเมตรต่อกรัม
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
N	ค่าคงที่ของฟรุนด์ิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของตัวดูดซับ
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
$q_e$	มวลของสารถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล
$q_e$	จำนวนโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นสมดุล
$q_m$	มวลของสารถูกดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับ แบบชั้นเดียว
$q_t$	มวลของสารถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ
$R^2$	ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
V	ปริมาตรสารละลาย
$V_1$	ปริมาตรสารละลายก่อนเจือจาง
$V_2$	ปริมาตรสารละลายหลังเจือจาง
W	มวลของสารดูดซับ
w/w	น้ำหนักต่อน้ำหนัก

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวิวัฒนาการของอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองการพัฒนาประเทศ ส่งผลให้อัตราการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีอัตราการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการใช้ส่วนประกอบหรือวัตถุดิบที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมักจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามกรณีมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมเหมืองแร่เป็นอุตสาหกรรมรูปแบบหนึ่งที่หากบริหารจัดการไม่ดี จะก่อให้เกิดการรั่วไหลของโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีปัจจัยจากการพัฒนาจากกระแสน้ำ หรือการปลดปล่อยน้ำทิ้งจากเหมือง ส่งผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในระบบนิเวศ เช่น การปนเปื้อนของโลหะหนักผ่านทางห่วงโซ่อาหาร การสะสมตัวของโลหะในสิ่งมีชีวิต หรือก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านมลพิษทางดิน มลพิษทางน้ำ เป็นต้น สำหรับมนุษย์การได้รับสารพิษของโลหะหนักส่วนใหญ่พบจากการรับผ่านห่วงโซ่อาหาร เมื่อมนุษย์บริโภคผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ที่มีการปนเปื้อนก็จะทำให้เกิดอันตรายตามพิษของโลหะหนักที่มีการสะสมเพิ่มขึ้นตามระบบห่วงโซ่อาหาร ซึ่งหมายถึง ถ้าน้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่เข้าสู่ดิน พืช สัตว์ และเข้าสู่มนุษย์ที่เป็นผู้บริโภคลำดับสุดท้ายก็จะได้รับโลหะหนักมากกว่าพืชและสัตว์ จึงทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (สุลลทา, 2549)

สำหรับประเทศไทยปัญหาอันตรายจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม พบในหลายพื้นที่ เช่น เหตุการณ์การปนเปื้อนตะกั่วในดินตะกอนของลำห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี การปนเปื้อนสารหนู อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา และการปนเปื้อนแคดเมียมในดินนาข้าว จากการทำเหมืองแร่สังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (ธนภัทร, 2558) ซึ่งธรรมชาติจะพบแคดเมียมบริเวณที่มีสายแร่ของธาตุสังกะสี โดยเฉพาะการปนเปื้อนแคดเมียมในดินนาข้าวดังกล่าว เกิดจากกระบวนการผุพังชะล้างของชั้นเปลือกดินบริเวณพื้นที่แร่สังกะสี พบว่ามีสารแคดเมียมปนเปื้อนในตะกอนท้องน้ำรวมอยู่ด้วย ส่งผลให้ตะกอนที่อยู่ในลำน้ำแม่ตาจะมีปริมาณแคดเมียมสูง และเกิดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน ทำให้ดินขาดความอุดมสมบูรณ์ ทำลายผลผลิตทางการเกษตร และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ (นุศราพร, 2560) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะศึกษาแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยแคดเมียมเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษเมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายทางหายใจ การรับประทาน และการสัมผัสทางผิวหนังเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดความผิดปกติของไตและสะสมในส่วนต่างๆ ของร่างกาย อาทิ ในกรณีประเทศญี่ปุ่นพบว่า มีการบริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคอิไต-อิไต (กัญญกุลณัช และคณะ, 2559)

ปัจจุบันมีการคิดค้นวิธีการกำจัดโลหะหนักในดินหลายวิธี อย่างเช่น ไวตรีพีเคชัน เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนกับดินที่ปนเปื้อนสารพิษที่อุณหภูมิสูงกว่า 1600 องศาเซลเซียส ดินที่ปนเปื้อนสารพิษจะหลอมตัว จึงทำการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว และกลายเป็นผลึกแข็งลักษณะเป็นแก้ว หรือคริสตัล (ชมพูนุท, 2560) หรือการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งคือ ทำการเติมวัสดุหรือสารเพิ่มเติมลงไปบนดิน ทำให้คุณสมบัติฟิสิกส์ของดินเปลี่ยนแปลงไป ลดพื้นที่ผิวสัมผัสของดินลง ทำให้สารปนเปื้อนหลุดออกจากดินยากมากขึ้น (ชมพูนุท, 2560) จากวิธีการที่ได้กล่าวมานั้น เป็นวิธีการที่นำมาปฏิบัติตามได้ยาก ต้นทุนสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางคณะผู้จัดทำมีความสนใจที่จะแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีการนำถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์ (Biochar) มาช่วยลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน วิธีนี้สามารถทำตามได้ง่าย ต้นทุนต่ำ และเป็นวัสดุธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน และเพิ่มความสมบูรณ์ของดิน รวมทั้งมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนลงสู่ดิน โดยผ่านกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน จากคุณสมบัติความคงตัว จึงสามารถทำให้กักเก็บในดินได้เป็นเวลานาน เพราะถ่านชีวภาพมีรูพรุนและพื้นที่ผิวภายในสูงทำให้สามารถดูดซับน้ำ และธาตุอาหารได้ดี (พินิจภณ และอนัญญา, 2560) ดังนั้นการนำถ่านชีวภาพมาใช้ในการปรับปรุงดิน จึงอาจเป็นแนวทางในการช่วยลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน

การศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระและกากชานอ้อย นำมาใช้ประโยชน์เพื่อดูดซับแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน เนื่องจากคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้สามารถดูดซับน้ำ และธาตุอาหารได้ดี โดยพืชที่เลือกใช้มาผลิตเป็นถ่านชีวภาพคือหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย ซึ่งเป็นพืชที่เหลือทิ้งทางการเกษตร ปลูกง่าย และราคาถูก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระและกากชานอ้อย
- 2) ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียมในดินของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อยในอัตราส่วน 5, 10 และ 15 %
- 3) ศึกษาการปลดปล่อยแคดเมียมหลังผสมถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย ในกรณีการชะด้วยน้ำที่สภาวะกรดที่พีเอช 5 และสภาวะเบสที่พีเอช 8

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ดินที่ใช้ในการทดลอง ได้มาจากตำบลห้วยบง อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี และมีการเติมสารมาตรฐานแคดเมียมเพื่อใช้เป็นดินสังเคราะห์ในการทดลอง ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
- 2) ถ่านชีวภาพที่นำมาใช้ทดลอง คือ ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อยพันธุ์สุพรรณ 50 ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

- 3) ศึกษาการดูดซับของดินที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมทั้งก่อน-หลัง การใช้ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย
- 4) ศึกษาการปลดปล่อยแคดเมียมหลังผสมถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย ในกรณีการชะด้วยน้ำที่สภาวะกรดที่พีเอช 5 และสภาวะเบสที่พีเอช 8
- 5) วิธีที่ใช้ในการสกัดแคดเมียมในดินสังเคราะห์คือ กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) โดยใช้สารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 M เป็นตัวสกัด
- 6) เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียมในดิน คือ Atomic Absorption Spectrophotometer

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงความสามารถของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระและกากชานอ้อย ในการลดการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน
- 2) สามารถเป็นข้อมูลที่น่าไปใช้ในการลดปริมาณการปนเปื้อนโลหะหนักของดิน ในพื้นที่บริเวณที่เกิดการปนเปื้อน
- 3) ใช้เป็นแนวทางในการลดความเสี่ยงของการกระจายโลหะหนักสู่ห่วงโซ่อาหารและสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปนเปื้อนจริง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เหมืองแร่ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

การทำเหมืองแร่ คือ การสกัดแร่ธาตุหรือ วัสดุทางธรณีวิทยา ออกจากพื้นดินหรือใต้พื้นดิน ซึ่ง วัสดุแร่โลหะที่สกัด ได้แก่ ทองแดง เหล็ก ทองคำ ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล สังกะสี ฯลฯ หรือแร่ อโลหะ พวกถ่านหินหรือ แร่รัตนชาติ เช่น เพชร พลอย เป็นต้น หรือรวมไปถึงการขุดเจาะน้ำมัน ปิโตรเลียมก๊าซธรรมชาติ เป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจขุดเจาะแร่ การลำเลียงขนส่งแร่ การคัดแยก ปรับปรุงแร่ และการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการทำเหมือง ซึ่งการทำเหมืองแบ่ง ออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

#### 2.1.1 การทำเหมืองแบบเปิด หรือเหมืองผิวดิน (Surface Mining) (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

คือ มีการขุด เจาะหน้าดินโดยใช้ เครื่องเจาะ รถขุด รถขนแร่ขนาดใหญ่ ไปจนถึงบริเวณที่เป็นแหล่งแร่ จากนั้นก็มีการระเบิดหน้าเหมือง ซึ่งในการขุด เจาะ จะทำเป็นชั้นๆแบบขั้นบันไดวน ทำแบบนี้เพื่อใช้ เป็นเส้นทางในการลำเลียงแร่ที่อยู่ด้านล่างขึ้นมา การทำเหมืองแร่แบบเปิดก็จะแบ่งประเภทอีก 6 วิธี คือ

##### 1. เหมืองแล่น (Ground Sluicing)

เป็นการทำเหมืองที่อยู่ในบริเวณไหล่เขา เขิงเขา โดยใช้แรงงานคนกับแรงน้ำเป็นตัวการที่จะ พังทลายหน้าเหมือง แล้วปล่อยให้ไหลไปตามทางรางน้ำหรือที่เรียกว่า รางกู่แร่ วิธีการนี้เหมาะ สำหรับผู้ที่มีเงินลงทุนน้อย และเหมาะที่จะทำในช่วงฤดูฝน

##### 2. เหมืองขุด (Dredging)

เป็นการทำเหมืองแร่โดยใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ทำเหมืองไปติดตั้งไว้บนเรือ ทุ่นหรือ โปะเรือ จากนั้นขุดดินบริเวณที่ปนแร่ด้วยเครื่องตัก แล้วใช้เครื่องขุดหรือเครื่องสูบลำเลียงไปเพื่อเอาแร่ขึ้นมา และแยกแร่ออกจากดินตามลำดับ วิธีการนี้สามารถทำได้ทั้งบนบก และในน้ำ วิธีการนี้นิยมใช้ใน บริเวณแถบชายฝั่งภาคใต้

### 3. เหมืองสูบ (Gravel Pumping)

เป็นการทำเหมืองแร่โดยใช้แรงงานคนกับแรงน้ำ ในการพังทลายหน้าเหมือง แล้วใช้เครื่องสูบดินทรายปนแร่ขึ้นมาด้านบน จากนั้นก็นำไปล้างเพื่อแยกแร่ออกจากดินวิธีการนี้จะมีข้อดีคือจะช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย นิยมทำกันมากในภาคใต้

### 4. เหมืองฉีด (Hydraulicking)

เป็นการทำเหมืองแร่โดยใช้แรงงานคนและแรงน้ำในการพังทลายหน้าเหมืองและเครื่องฉีดน้ำที่มีแรงดันสูงเพื่อพังทลายดินทรายที่มีแร่ปนอยู่ในบริเวณจากนั้นนำแร่แยกออกมา วิธีนี้จะมีลักษณะการพังทลายหน้าเหมืองคล้ายกับวิธีของเหมืองสูบ

### 5. เหมืองเรือสูบ (Suction Boat)

เป็นการทำเหมืองแร่โดยใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ทำเหมืองไปติดตั้งไว้บนเรือ จากนั้นใช้เครื่องสูบดินทราย หิน ขึ้นมาล้างแยกแร่ด้านบน วิธีการนี้เป็นการทำเหมืองในทะเลซึ่งในประเทศไทยมีเพียงจังหวัดพังงา เท่านั้นที่ได้รับการอนุญาต

### 6. เหมืองหาบ (Open Pitting or Opencast)

เป็นการทำเหมืองแร่โดยใช้แรงงานคนกับเครื่องจักรในการขุดหรือการระเบิด เพื่อเป็นการเปิดหน้าเหมืองให้เป็นบ่อหรือชั้นบันได จากนั้นให้นำหิน ดินทรายที่ปนไปเข้าเครื่องเพื่อแยกแร่ออก ในการทำเหมืองลึกในตของการไฟฟ้าฝ่ายการผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเหมืองแร่สังกะสี จังหวัดตาก ที่มีการใช้วิธีนี้ในการทำเหมือง

## 2.1.2 การทำเหมืองแบบปิด หรือเหมืองใต้ดิน (Underground Mining) (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

คือ มีแหล่งแร่ในชั้นใต้ดินลึกลงไปจะมีการเจาะช่องทางลึกลงไปเป็นระดับชั้น โดยใช้ระเบิด หรือเครื่องจักรอื่นๆ เพื่อให้สามารถเข้าไปในบริเวณแหล่งเพื่อไปขุดเอาแร่ที่อยู่ใต้ดินออกมาและลำเลียงแร่ผ่านทางสายผ่านหรือรถเหมือง การทำเหมืองแบบปิดจะมีอันตรายและความเสี่ยงสูงมาก ทั้งทางด้านมลพิษทางฝุ่น สารพิษจากระเบิดที่ตกค้าง รวมไปถึงความเสี่ยงของการเกิดการถล่มของถ้ำ ในการทำเหมืองแบบปิดก็สามารถแบ่งได้อีก 4 วิธี ดังนี้

#### 1. เหมืองอุโมงค์ (Underground Mining)

การทำเหมืองด้วยวิธีนี้เหมาะกับแหล่งแร่ที่อยู่ลึกจากผิวดินมาก โดยการเจาะรูปล่องหรืออุโมงค์ลงไปใต้ดินไปจนถึงบริเวณแหล่งแร่ จากนั้นใช้เครื่องจักรหรือระเบิดเพื่อทำการเปิดหน้าเหมืองและใช้เครื่องบด แยกแร่ตามลำดับ วิธีการนี้จะใช้เงินทุนสูงมาก

#### 2. เหมืองปล่อง (Shaft Sinking)

จะมีการขุด เจาะรูจากหน้าดินไปจนถึงบริเวณที่มีชั้นแร่ จากนั้นนำดินบริเวณนั้นขึ้นมาแยกแร่ ออก วิธีการนี้จะทำในบริเวณลานดินที่มีเปลือกดินหนา แต่วิธีนี้ก็มีความเสี่ยงเนื่องจากอาจจะมีการทรุดตัวลงของดินได้

### 3. เหมืองเจาะงัน (Gophering)

การทำเหมืองวิธีนี้จะทำในบริเวณภูเขา โดยจะใช้แรงงานคนกับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์การระเบิด เพื่อจะเปิดทางดินให้เป็นช่องอุโมงค์เข้าไปในภูเขาขุดลึกไม่เกิน 10 เมตร จากนั้นลำเลียงหินปนแร่ออกมาเพื่อทำการแยกแร่

### 4. เหมืองละลายแร่ (Solution Mining)

จะมีการขุด เจาะรูลงไปใต้ดินจนถึงบริเวณแหล่งแร่ จากนั้นทำการสูบน้ำออกและอัดน้ำหรือไอน้ำร้อนลงไปละลายแร่ให้เป็นของเหลว แล้วทำการสูบน้ำที่มีแร่ขึ้นมาจากช่องทางเดิม

อุตสาหกรรมเหมืองแร่จัดเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสำคัญของประเทศ ซึ่งจะมีการนำแร่ที่ได้จากการขุดเจาะมาแปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าในการค้าขายเพื่อสร้างความมั่นคงทางด้านเศรษฐกิจ ลดต้นทุนในการนำเข้าและด้านวัตถุดิบของอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมด้านการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมอัญมณี เป็นต้น โดยหน่วยงานราชการที่มีหน้าที่กำกับดูแลอุตสาหกรรมเหมืองแร่ของประเทศไทย คือ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม

## 2.2 ผลกระทบของเหมืองแร่ (กรมทรัพยากรธรณี, 2553)

### 2.2.1 ผลกระทบด้านคุณภาพอากาศ

กิจกรรมในเหมืองแร่ที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ เช่น ฝุ่นที่เกิดจากการเจาะรูระเบิดหน้าเหมือง การระเบิดแร่ การโม่บด การย่อยหินแยกแร่ และรวมไปถึงการรบกวนและการฟุ้งกระจายขณะการขนส่งแร่ เป็นต้น

### 2.2.2 ผลกระทบด้านคุณภาพเสียงและแรงสั่นสะเทือน

สาเหตุที่เกิดขึ้นมาจากการขุดเจาะ การระเบิดเพื่อเปิดหน้าเหมืองและการทำงานของอุปกรณ์เครื่องจักรที่ใช้ในการทำเหมือง เช่น รถแบ็คโฮ รถดักถ้อย่าง เครื่องเจาะกระแทก รถบรรทุกน้ำ เป็นต้น

### 2.2.3 ผลกระทบด้านการคมนาคม

ขั้นตอนของการขนส่งบรรทุกแร่ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่สร้างผลกระทบให้กับประชาชนที่ใช้เส้นทางคมนาคมเดียวกัน ซึ่งอาจจะเกิดจากรถบรรทุกแร่ที่มีน้ำหนักมากส่งผลให้เส้นทางชำรุดเสียหาย ความคล่องตัวของการสัญจรบนถนนลดลงเนื่องจากรถบรรทุกแร่มีการกำหนดความเร็วในการขับ รวมถึงการเกิดอุบัติเหตุจากความประมาทของผู้ขับ และส่งผลกระทบไปยังผู้ขับขึ้นท้องถนนคนอื่นๆ

### 2.2.4 ผลกระทบจากการทรุดตัวของดิน

การทำเหมืองแร่จะมีการขุดเจาะและการระเบิดดิน เพื่อที่จะนำแร่ออกมา ซึ่งการกระทำนี้ส่งผลทำให้พื้นที่ในบริเวณเกิดช่องว่างระหว่างชั้นดินและเกิดการทรุดตัวของดินได้ในภายหลัง

### 2.2.5 ผลกระทบด้านทัศนียภาพ

ด้านของทัศนียภาพของพื้นที่ในบริเวณที่ทำเหมืองแร่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน เช่น จำนวนต้นไม้ที่ลดลงจากการรื้อถอน การขุดเจาะ ระเบิดหน้าดินเกิดช่องว่าง และความไม่เรียบของพื้นดินซึ่งจะส่งผลกระทบในด้านการมองเห็นของประชาชนในบริเวณ

ผลกระทบของเหมืองแร่ที่กล่าวมาข้างต้น ล้วนก่อให้เกิดความเสียหายในหลายๆด้าน แต่ยังมีอีกหนึ่งผลกระทบที่สำคัญซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของสิ่งแวดล้อม และระบบนิเวศในระยะยาวซึ่งก็คือ การรั่วไหลของโลหะหนัก

## 2.3 การรั่วไหลของโลหะหนัก (ธัญญาภรณ์, 2553)

การรั่วไหลของโลหะหนักสามารถเกิดได้ทั้งในกระบวนการผลิต และ แร่โลหะหนักที่ได้จากการทำเหมือง เช่น สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการแยกแร่หรือปรับปรุงสินแร่, ขั้นตอนการระเบิดหน้าเหมืองเพื่อทำการขุดเปิดหน้าเหมืองจนทำให้มีแร่โลหะหนักรั่วไหล เป็นต้น ซึ่งการรั่วไหลของโลหะหนักจะส่งผลกระทบต่อในด้านคุณภาพน้ำและคุณภาพดิน เนื่องจากจะเกิดการตกค้างและปนเปื้อนของสารโลหะหนัก

### 2.3.1 โลหะหนัก (Heavy Metal) (ดวงกลม และรัชนิกร, 2548)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะหรือธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป จัดอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม เช่น แคดเมียม ปรอท สังกะสี ตะกั่ว โครเมียม นิกเกิล ฯลฯ โดยทั่วไปโลหะหนักส่วนใหญ่จะมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่จะมีสถานะเป็นของเหลวที่สภาวะอุณหภูมิปกติ สมบัติทางกายภาพของโลหะจะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ มีลักษณะมันเงา นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี แต่เนื่องจากธาตุกลุ่มนี้มีความเสถียรและสลายตัวในธรรมชาติได้ค่อนข้างยาก แหล่งที่มาของโลหะหนักที่สำคัญหลักๆจะมาจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอาจจะเกิดการแพร่กระจายและมีการปนเปื้อนของโลหะในสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดผลกระทบในด้านมลพิษทางดิน มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ และ มลพิษทางห่วงโซ่อาหาร ซึ่งผลกระทบของห่วงโซ่อาหารนี้จะส่งผลโดยที่เมื่อได้รับสารโลหะหนักเข้าไปสะสมยังเนื้อเยื่อต่างๆของสิ่งมีชีวิต จะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษและความผิดปกติขึ้น เช่น ทำให้เซลล์ตาย ทำให้โครงสร้างและการทำงานของระบบเซลล์เปลี่ยนแปลง เป็นตัวการก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครโมโซมทางพันธุกรรมและอาจก่อให้เกิดความอันตรายต่อชีวิตในที่สุด

สำหรับในประเทศไทยมีสถานการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักเกิดขึ้นในหลายพื้นที่ ดังหัวข้อต่อไป

## 2.4 สถานการณ์ปนเปื้อนในประเทศไทย

### 2.4.1 เมืองแร่ชาติ จังหวัดพิจิตร จังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดพิษณุโลก (บุญชัย, 2558)

เมืองแร่ชาติ หรือเมืองแร่อัครา เป็นเมืองแร่ทองคำที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย โดยมีพื้นที่อาณาเขตคาบเกี่ยวถึง 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดพิจิตร ที่อำเภอทับคล้อ ตำบลเขาเจ็ดลูก จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่อำเภอวังโป่ง ตำบลท้ายดง และจังหวัดพิษณุโลก ที่อำเภอเนินมะปราง ตำบลวังโพรง ซึ่งพื้นที่ทั้งหมดของเมืองอยู่ที่ประมาณ 10,600 ไร่

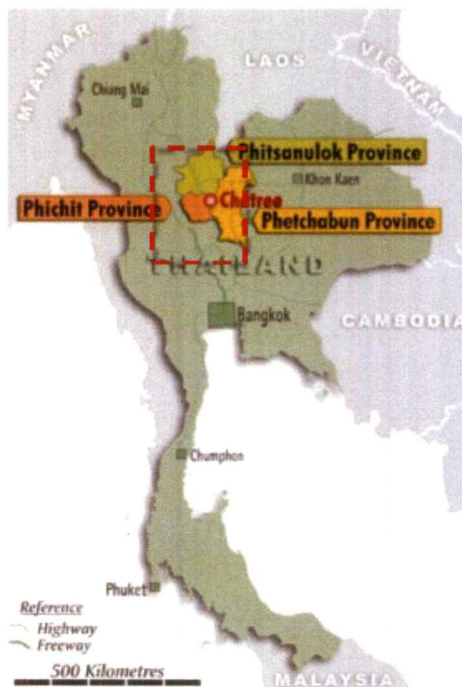
ในปี พ.ศ. 2536 บริษัท อัครา รีซอร์สเซส จำกัด (มหาชน) หรือชื่อเดิมคือ บริษัท อัคราไมนิ่ง จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทข้ามสัญชาติจากประเทศออสเตรเลีย ได้รับอนุญาตอาชญาบัตรพิเศษในการสำรวจแหล่งแร่ทองคำ และได้รับประทานบัตรในเวลาต่อมา

พ.ศ.2544 ได้มีการเริ่มดำเนินการผลิตเชิงพาณิชย์ขึ้น เมืองแร่ชาติเป็นเมืองแร่ทองคำที่ทำการผลิตแร่ทองคำได้เป็นจำนวนมากกว่า 130,000 ออนซ์ต่อปี และผลิตแร่เงินได้เป็นจำนวนมากกว่า 1,000,000 ออนซ์ต่อปี ซึ่งกำลังการผลิตของเมืองชาติจะมีปริมาณแร่อยู่ที่ประมาณ 6.2 ล้านตันต่อปี

พ.ศ.2551 เมืองแร่ชาติได้รับการอนุมัติประทานบัตรพื้นที่ทำเหมืองแร่เพิ่มอีกจำนวน 9 แปลง และในปีเดียวกันนั้นประชาชนในพื้นที่บริเวณได้มีการยื่นเรื่องร้องเรียนกับหน่วยงานราชการซึ่งเรื่องที่ร้องเรียนว่าด้วยเรื่องเสียงรบกวนที่ดัง ผุน น้ำที่ใช้อุปโภค-บริโภค และปัญหาด้านสุขภาพ (อาการมีผื่นคันเป็นส่วนใหญ่) ทำให้ทางบริษัท อัครา รีซอร์สเซส จำกัด ได้มีการเข้ามาดูแลประชาชนที่ได้รับความเดือดร้อนและแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าไปบางส่วน

พ.ศ.2557 ประชาชนในพื้นที่บริเวณได้ร้องเรียนถึงคสช. จึงได้มีการดำเนินการให้มีการตรวจสุขภาพของประชาชน และสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ โดยมีทีมนักวิชาการจากมหาวิทยาลัยรังสิต

พ.ศ.2558 ผลจากการตรวจค่าปนเปื้อนของสิ่งแวดล้อมพบว่าน้ำบาดาลมีการปนเปื้อนของปรอทและตะกั่วที่เกินค่ามาตรฐาน (ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำของกรมควบคุมมลพิษกำหนดค่ามาตรฐานปรอทที่ 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่ามาตรฐานตะกั่วที่ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในส่วนของดินตะกอนก็พบการปนเปื้อนของสารหนู แมงกานีสและแคดเมียมที่เกินค่ามาตรฐานเช่นกัน (ค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมของกรมควบคุมมลพิษกำหนดค่ามาตรฐานสารหนูไว้ว่าต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่ามาตรฐานของแมงกานีสต้องไม่เกิน 1,800 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่ามาตรฐานแคดเมียมต้องไม่เกิน 37 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม) และยังมีการตรวจพบการปนเปื้อนของไซยาไนด์ ตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในพืชผักหลายชนิด เช่น ต้นข้าว ผักบุ้ง กระชาย โดยค่าแคดเมียมและแมงกานีสที่พบในพืชมีค่าเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าพืชอาจได้รับการปนเปื้อนของสารจากในแหล่งน้ำและดิน ส่วนผลของการตรวจสุขภาพของประชาชนพบว่าประชาชนในพื้นที่ในบริเวณเมืองแร่ชาติส่วนใหญ่มีค่าโลหะหนักในเลือดสูงกว่าค่าปกติอยู่ 483 ราย จากจำนวนประชาชนทั้งหมด 731 ราย



รูปที่ 2.1 ขอบเขตพื้นที่เมืองแร่ชาติรี (บุญชัย, 2558)

#### 2.4.2 เหมืองแร่บ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี (อดิสร, 2547)

เหมืองแร่บ่องาม เป็นแหล่งเหมืองแร่ตะกั่ว-สังกะสี อยู่บนเทือกเขาหินปูนเขาบ่องาม ที่อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี มีลักษณะการทำเหมืองแร่แบบเปิดซึ่งทำด้วยวิธีการทำเหมืองแบบหาบแร่ที่พบในบริเวณนี้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางหลักธรณีวิทยาโดยแร่จะมีลักษณะเคลื่อนตัวไปสะสมตัวแล้วตกผลึกใหม่ ตามสันยอดแนวโค้งของหินและตามแนวรอยแยกหรือรอยเลื่อน ซึ่งทำให้แร่ที่พบมีขนาดเม็ดที่ใหญ่ ส่วนใหญ่แร่ที่พบจะเป็นแร่ตะกั่ว โดยมีบริษัท ตะกั่วคอนเซนเตรตส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้รับประทานบัตรเป็นผู้ดำเนินการ

นอกจากเหมืองแร่บ่องาม ในอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ยังมีแหล่งแร่ที่สำคัญอื่นๆ เช่น เหมืองแร่สองท่อ เหมืองแร่บ่อใหญ่ เหมืองแร่บ่อน้อย เหมืองแร่บ้านเกริง-กระเวีย เหมืองแร่คลิตี้ล่าง เหมืองแร่ช่องข่า เหมืองแร่เขากะลา และเหมืองแร่ทิซุ ซึ่งส่วนใหญ่แหล่งเหมืองแร่ในจังหวัดกาญจนบุรีมักเป็นแร่ตะกั่ว และสังกะสี

ในปี พ.ศ.2541 ค้นทำนบป้องกันกักเก็บตะกอนทางแร่ของโรงแต่งแร่ของบริษัท ตะกั่วคอนเซนเตรตส์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งอยู่ในเขตพื้นที่ของเหมืองแร่บ่องามเกิดพังทลายเสียหายทำให้กากตะกอนของแร่แพร่กระจายลงสู่ห้วยคลิตี้จึงเกิดการปนเปื้อนของสารตะกั่วในลำห้วยจากบริเวณโรงแต่งแร่จนถึงห้วยคลิตี้ล่างเป็นระยะทาง 19 กิโลเมตร ทำให้ประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ได้รับความเดือดร้อนในการอุปโภค-บริโภค

จากการตรวจสอบพื้นที่ในบริเวณของกรมควบคุมมลพิษ พบว่าคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินมีค่าของของตะกั่วบางจุดมีค่ามากกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ เนื่องด้วยช่วงเวลาที่เข้าไปทำการตรวจสอบพื้นที่อยู่ในช่วงฤดูฝนอาจทำให้น้ำไหลแรงทำให้ตะกอนฟุ้งกระจาย ส่วนของค่าตะกั่วในตะกอนดินมีค่า 115-87,918 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ของกรมควบคุมมลพิษ กำหนดค่ามาตรฐานตะกั่วไว้ต้องไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และพีซีบีบริเวณห้วยคลิตี้ล่างจาก



ชนทั่วไปที่อาศัยอยู่นอกบริเวณพื้นที่ถึง 3 เท่า และในส่วนของประชาชนในพื้นที่ที่มีอาการที่ผิดปกติของหู ตา คอ จมูก และผิวหนัง มีจำนวนสูงกว่าคนนอกพื้นที่ถึง 1.6-3.3 เท่า



รูปที่ 2.3 เหมืองแม่เมาะ (การไฟฟ้าฝ่ายการผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ ลำปาง, 2559)

#### 2.4.4 เหมืองแร่ดีบุก จังหวัดนครศรีธรรมราช (จันทร์เพ็ญ, 2537)

เหมืองแร่ดีบุก ในตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นแหล่งเหมืองแร่ดีบุก พลวง วุลแฟลม และแร่อาร์เซนไนต์ ซึ่งจะมักพบแร่สารหนูรวมอยู่ โดยบริษัท เรือชุดแร่สหะพิบูลย์ จำกัด เป็นผู้ได้ประทานบัตรบริเวณโดยเหมืองแร่นี้เป็นเหมืองแร่แบบเปิด ใช้วิธีแบบเหมืองหาบ

ในปี พ.ศ. 2530 ประชาชนรายหนึ่งได้มีอาการที่ฝ่ามือ ฝ่าเท้า ผิวหนังบริเวณลำตัวมีสีดำผิดปกติ จึงเข้ารับรักษาตัวที่โรงพยาบาล ผลการรักษาจากทางแพทย์ชี้แจงว่าโรคมะเร็งผิวหนังที่เกิดจากพิษของสารหนูเรื้อรัง และเมื่อตรวจวัดระดับสารหนูที่เส้นผม เล็บ เนื้อเยื่อ และเลือด พบว่ามีสารหนูสูงผิดปกติ เวลาต่อมาพบว่าผู้ป่วยที่มีลักษณะอาการคล้ายกันมารักษาตัว ทำให้ทางกองระบาดวิทยา สำนักงานสาธารณสุขจังหวัด และโรงพยาบาลมหาราชนครศรีธรรมราชได้เข้าไปทำการลงพื้นที่ตรวจสอบพบว่าประชาชนส่วนใหญ่กว่า 85 เปอร์เซ็นต์ มีอาการทางผิวหนังโดยฝ่ามือมีสีดำผิดปกติ ทำให้หน่วยงานต่างๆได้เข้ามาสำรวจตรวจสอบสภาพแวดล้อมในพื้นที่พบว่าดินในพื้นที่มีสารหนูปนเปื้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 50-5,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ของกรมควบคุมมลพิษกำหนดค่ามาตรฐานสารหนูไว้ว่าต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ค่าสารหนูที่พบในตะกอนท้องน้ำอยู่ในช่วง 120-6,700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่าสารหนูในแหล่งลำธารใกล้ชุมชนอยู่ในช่วง 0.026-1.45 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสารหนูจากน้ำบาดาลมีมากกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินค่ามาตรฐานของน้ำดื่มที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อหน่วยงานที่เข้ามาตรวจสอบสรุปสาเหตุได้ว่าที่เกิดการปนเปื้อนของสารหนูในแหล่งต่างๆ มาจากการทำเหมืองของกระบวนการแยกแร่ ทำให้สารหนูจะถูกแยกไปกับหางแร่ถูกปล่อยออกสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีกักบำบัดหรือการจัดการที่เหมาะสม จึงทำให้สารหนูเกิดการแพร่กระจายเป็นจำนวนมาก

#### 2.4.5 เหมืองแร่ตอยผาแดง จังหวัดตาก (คะเนิงนิจและฉันทนา, 2548)

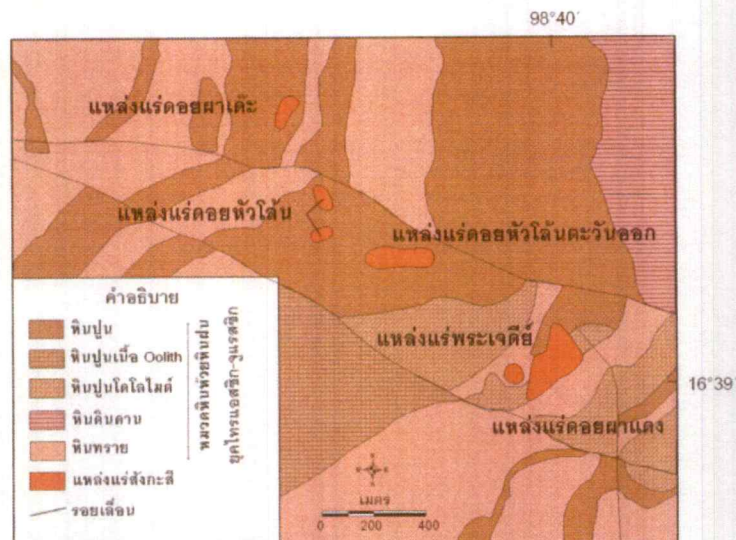
เหมืองแร่ตอยผาแดง ตั้งอยู่ที่ตำบลพระธาตุ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จัดเป็นแหล่งแร่สังกะสีที่ใหญ่ที่สุดในประเทศแห่งหนึ่ง โดยในปีพ.ศ.2524 บริษัท ผาแดง อินดัสทรี จำกัด ได้มาสำรวจ ก่อตั้งเหมืองแร่ และสร้างโรงถลุงในบริเวณดังกล่าว จากการสำรวจมีการคาดการณ์ปริมาณแร่ในบริเวณอยู่ที่ 4.6 ล้านเมตริกตัน ซึ่งแร่ส่วนใหญ่ที่พบ คือ แร่สังกะสีเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 28.9 และแร่แคดเมียม

เฉลี่ยที่ร้อยละ 0.17 ที่เหลือจะเป็นพวกซิลิเกต คาร์บอนेट และออกไซด์ เช่น แร่สมิทซอไนท์ แร่ฮีโมไรต์ แร่ไฮโดรซิงโคต์ แร่ซิงโคต์ เป็นต้น

ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก นอกจากเมืองแร่สังกะสีดอยผาแดงก็ยังมีเมืองแร่ดอยผาเตี้ย ที่มีแหล่งแร่สังกะสีซัลไฟด์ซึ่งควบคุมการผลิตโดยบริษัท ตากไมนิ่ง จำกัด แต่ในส่วนแหล่งแร่อื่นๆ เช่น เมืองแร่สังกะสีดอยหัวโล้น เมืองแร่สังกะสีดอยหัวโล้นตะวันออก และเมืองแร่สังกะสีพระเจดีย์ ซึ่งจัดเป็นแหล่งแร่ในบริเวณอำเภอแม่สอด ที่มีขนาดเล็กและไม่จัดเป็นเมืองแร่ที่ผลิตสินแร่ในเชิงพาณิชย์ได้

ในปี พ.ศ.2543 กรมวิชาการเกษตรร่วมกับสถาบันการทรัพยากรน้ำสากล (International Water Management Institute หรือ IWMI) ได้มีศึกษาของการปนเปื้อนของแคดเมียมจึงตรวจพบว่ามีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำ แปลงนาที่ดินและพืชผลการเกษตร ที่ตำบลพระธาตุผาแดง ตำบลแม่ตาว และตำบลแม่กุ อำเภอแม่สอด ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณเมืองแร่สังกะสีดอยผาแดง เมืองแร่สังกะสีพระเจดีย์ เมืองแร่สังกะสีดอยหัวโล้น เมืองแร่สังกะสีดอยหัวโล้นตะวันออก และเมืองแร่สังกะสีดอยผาเตี้ย เนื่องด้วยนักวิจัยที่เข้าไปสำรวจในพื้นที่มีการสรุปว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่ฝนตกแล้วชะแร่สังกะสีและแคดเมียมในดินลงสู่แหล่งน้ำซึ่งก็คือ ห้วยแม่ตาว แล้วส่วนใหญ่พื้นที่ที่มีการทำการเกษตรก็จะใช้น้ำจากห้วยแม่ตาวเหตุนี้ทำให้เกิดมีการปนเปื้อนของแคดเมียมขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถบอกได้ว่าแคดเมียมที่ปนเปื้อนมาจากแหล่งเมืองแร่ใด

โดยปริมาณแคดเมียมที่ตรวจพบในดิน คือ 3.4-284 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ กำหนดค่ามาตรฐานไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และพบปริมาณแคดเมียมในข้าวอยู่ที่ 0.1-4.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยปกติของแคดเมียมที่อยู่ในข้าว คือ 0.043 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (คณะกรรมการอาหารและยา กำหนดค่ามาตรฐานอยู่ที่ 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งค่าของแคดเมียมที่ตรวจพบอยู่ในช่วงเสี่ยงก่อให้เกิดโรคอิไต-อิไต



รูปที่ 2.4 บริเวณเมืองแร่ จังหวัดตาก (กรมทรัพยากรธรณี, 2559)

จากสถานการณ์การปนเปื้อนแคดเมียมของเมืองแร่ดอยผาแดง จังหวัดตากนี้ทำให้ทางคณะผู้จัดทำสนใจที่จะศึกษาธาตุโลหะหนักแคดเมียม

## 2.5 แคดเมียม (Cadmium) (เขมซิต และคณะ, 2551)

แคดเมียม เป็นธาตุโลหะทรานซิชันในตารางธาตุเคมีโดยมีเลขอะตอมเท่ากับ 48 ลักษณะของธาตุจะมีความอ่อนตัว น้ำหนักเบา มันเงา แวววาว ไม่มีกลิ่น ทนต่อการกัดกร่อน เป็นโลหะที่มีสีเงิน-ขาว มีจุดเดือด จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 767 องศาเซลเซียส และ 321.07 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในธรรมชาติจะพบแคดเมียมได้น้อยโดยส่วนใหญ่มักจะพบแคดเมียมร่วมกับแร่สังกะสี ทองแดง และ ดีบุก ในเหมืองแร่สังกะสี ทองแดงหรือดีบุกก็จะมักพบแคดเมียมเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่ เป็นต้น ในแหล่งอุตสาหกรรมจะพบแคดเมียมในแหล่งที่ผลิตแบตเตอรี่ ถ่านไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า พลาสติก โลหะชุบเคลือบเงา ผลิตภัณฑ์รถยนต์ทั้งในส่วน of เครื่องยนต์และรถยนต์

### 2.5.1 ความเป็นพิษของแคดเมียม

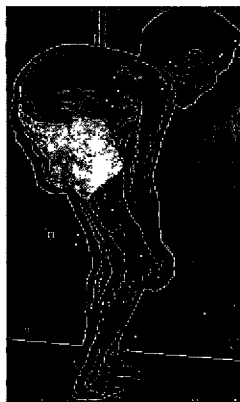
แคดเมียมได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆในภาคอุตสาหกรรม จึงทำให้ในสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ ดิน และอาหารมีการปนเปื้อนของแคดเมียม โดยแคดเมียมจะเข้าสู่ร่างกายได้จากการบริโภคอาหาร และจากระบบหายใจ อวัยวะเป้าหมายที่แคดเมียมไปสะสมไว้คือบริเวณตับและไต การขับแคดเมียม ออกจากร่างกายจะใช้เวลาระยะเวลานานมาก โดยความเป็นพิษของแคดเมียม แบ่งเป็น 2 ลักษณะ

#### 1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมจากการบริโภคอาหารหรือเครื่องดื่มไม่ว่าจะมีการปนเปื้อนของอาหารหรือภาชนะที่บรรจุ ลักษณะอาการที่พบ คือ จะมีการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง เป็นตะคริว หากได้รับแคดเมียมในปริมาณที่มากร่างกายก็จะอยู่ในสภาวะช็อก เนื่องจากขาดน้ำ ระบบการทำงานของไตถูกทำลายและอาจถึงเสียชีวิตแต่ถ้าหากได้รับแคดเมียมจากทางระบบทางเดินหายใจ โดยการสูดดมไอของแคดเมียมจะมีการระคายเคืองที่จมูก ปวด หลอดลม มีไข้ ไอ เจ็บหน้าอก หนาวสั่น อ่อนเพลีย

#### 2. ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง คือ ร่างกายได้รับแคดเมียมเข้าไปในระยะที่ติดต่อกันเป็นเวลานาน หากได้รับแคดเมียมจากการสูดดมไอแคดเมียมเข้าไปติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้เนื้อเยื่อเกิดอาการบวมและพองขึ้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอากาศของปอดลดลง หายใจติดขัด มีพังผืดในปอดจนทำให้เป็นสาเหตุของการเกิดโรคถุงลมโป่งพอง ถ้าตับและไตได้รับความเป็นพิษของแคดเมียมก็การทำงานของเอนไซม์ของตับที่เปลี่ยนไป และจะมีผลเกิดขึ้นที่ไต มีอาการจะมีการขับปัสสาวะที่มีโปรตีนมากกว่าปกติ ตามลำดับ ความเป็นพิษของแคดเมียมจะส่งผลต่อความผิดปกติต่อกระดูกอย่างเห็นได้ชัดเจน คือ จะมีกระดูกพรุน โค้งงอ กระดูกผิดรูปเนื่องจากร่างกายสามารถดูดซับแคลเซียมได้ลดลง จึงเป็นสาเหตุให้เกิดโรคที่ชื่อว่า โรคอิไต-อิไต (itai-itai) ซึ่งในภาษาญี่ปุ่นแปลว่า เจ็บปวด โรคอิไต-อิไตนอกจากมีความผิดปกติที่กระดูกแล้ว ยังมีความผิดปกติของระบบหมุนเวียนโลหิตและระบบการสร้างเม็ดเลือด คือ มีโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง อัตราการเต้นของหัวใจผิดปกติจึงหวั่นจะเป็นสาเหตุให้เกิดโรคหัวใจ



รูปที่ 2.5 อาการของโรคฮีไต-ฮีไต (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและการจัดการภัยพิบัติ, 2552)

#### 2.5.2 เกณฑ์มาตรฐานและค่ากำหนดของแคดเมียม (คุณากร, 2554)

เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมของแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียมของกรมควบคุมมลพิษ ค่ามาตรฐานต้องไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรม และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการนอกเหนือจากการอยู่อาศัย และเกษตรกรรมของแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียมของกรมควบคุมมลพิษ ค่ามาตรฐานต้องไม่เกิน 810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

เกณฑ์มาตรฐานของของกรมควบคุมมลพิษ ได้กำหนดค่าคุณภาพน้ำดื่มของแคดเมียมอยู่ที่ 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่ามาตรฐานของน้ำบริโภคของแคดเมียมที่ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

เกณฑ์ค่ากำหนดของแคดเมียมในปนเปื้อนในอาหารและยา โดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ค่ากำหนดไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

### 2.5.3 ปฏิกริยาแคดเมียมในดิน (สิทธิชัย, 2558)

แคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด เมื่อหินสลายตัวจะพบแคดเมียมที่อยู่ในรูป  $Cd^{2+}$  เป็นส่วนใหญ่ อาจพบอยู่ในรูปสารประกอบต่าง ๆ ได้เช่น

แคตไอออน  $CdCl^+$ ,  $CdOH^+$ ,  $CdHCO_3^+$

แอนไอออน  $CdCl_3^-$ ,  $CdCl_4^{2-}$ ,  $Cd(OH)_3^-$

สารประกอบต่างๆ  $CdO$ ,  $CdCO_3$

ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน คือ พีเอช ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และศักย์รีดอกซ์ ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ดีในสภาวะพีเอช ระหว่าง 4.5-5.5 ส่วนการละลายของแคดเมียมในดินจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กอลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

สถานการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีค่าของโลหะหนักที่ปนเปื้อนสูงเกินกว่าค่าเกณฑ์มาตรฐานของที่หน่วยงานกำหนดไว้ สำหรับวิธีการกำจัดโลหะหนักในดินก็มีด้วยกันหลายวิธี

## 2.6 การกำจัดโลหะหนักในดิน

ในปัจจุบันโลหะหนักเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากของเสียต่างๆ ในกระบวนการผลิตที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากที่อยู่อาศัยของมนุษย์ ทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยโลหะหนักเป็นสารพิษที่ไม่สามารถเผาผลาญสะสมในตัวในเนื้อเยื่ออ่อนได้ จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านทางอาหาร น้ำ และอากาศ ในประเทศไทยประสบปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักทั้งในน้ำ ดิน อาหาร และอากาศ เช่น น้ำประปาที่มีโลหะหนักต่างๆ ละลายอยู่ ดินจังหวัดตากที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม หรือการพบปริมาณตะกั่วในไข่เหี้ยมั่ว โดยสืบเนื่องมาจากดินและน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักนั่นเอง เพราะฉะนั้นปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่ทำการคิดค้นวิธีการกำจัดโลหะหนักขึ้นมาทั้งด้านน้ำ ดิน และอากาศ แต่ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การกำจัดโลหะหนักในน้ำ เนื่องจากน้ำมีประโยชน์มากมายและยังมีความสำคัญต่อระบบนิเวศเป็นอย่างมาก จนลืมนึกไปว่าดินก็สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นแหล่งผลิตอาหารของมนุษย์ สัตว์ และพืช ตลอดจนเป็นที่อยู่อาศัย ที่ตั้งของเมือง บ้านเรือน และเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์บางชนิด อีกทั้งยังเป็นแหล่งกักเก็บน้ำ เมื่อน้ำซึมลงดินในปริมาณที่มากก็จะกลายเป็นน้ำใต้ดิน น้ำเหล่านั้นก็จะค่อยๆ ซึมลงต่ำ เช่น แม่น้ำลำคลอง เนื่องจากโลหะหนักมักจะสะสมในห่วงโซ่อาหาร เมื่อมนุษย์บริโภคโดยการสัมผัส ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ ก็อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้ อย่างไรก็ตามในระบอบห่วงโซ่อาหาร พืชของโลหะหนักก็จะสะสมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ถ้าแหล่งน้ำมีการปนเปื้อนโลหะหนัก เมื่อน้ำเหล่านั้นไปรดบนดินที่ปลูกพืชทางการเกษตรทั้งดินและพืชก็จะได้รับการปนเปื้อนโลหะหนักไปด้วย เกษตรกรก็จะนำพืชที่ออกผลแล้วนำไปจำหน่าย เมื่อผู้บริโภคบริโภคพืชเหล่านั้นก็ทำให้ได้รับโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายไปด้วยคนสุดท้ายซึ่งก็คือผู้บริโภคจะได้รับโลหะหนักมากกว่าพืชหรือสัตว์ เพราะมีการสะสมมากขึ้น (สมลทา, 2549)

ปัจจุบันอาหารไทยได้รับความนิยมติดอันดับโลก อุตสาหกรรมด้านอาหารจึงพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการผลิตอาหารมากขึ้น ซึ่งดินเป็นแหล่งผลิตอาหารสำคัญอย่างหนึ่งของมนุษย์ งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญแก่ดิน และทำให้การศึกษาการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน

การกำจัดโลหะหนักมีหลายวิธีและขั้นตอน ขึ้นอยู่กับสภาพและวัตถุประสงค์ในการบำบัด เช่น การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Precipitation) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process)

การแยกด้วยแผ่น membrane (Membrane separation) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process) การใช้สารดูดซับ (Adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange) และอื่นๆ.

**ตัวอย่างการกำจัดสารพิษออกจากดิน**

### 2.6.1 การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification) (ชมพูนุท, 2560)

เป็นกระบวนการที่ใช้ลดมลพิษและลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม นิยมนำมาใช้ในดินปนเปื้อน ซึ่งจะทำให้การเติมวัสดุหรือสารเพิ่มเติมลงไป在地 ทำให้คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของดินเปลี่ยนแปลงไป ลดพื้นที่ผิวสัมผัสของดินลง ทำให้สารปนเปื้อนหลุดออกจากดินยากมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าการละลายได้ในน้ำและลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อนอีกด้วย

ขั้นตอนการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งมีดังนี้ คือ

1. การจับแบบแคปซูลระดับแมโคร (Macroencapsulation) สารปนเปื้อนจะถูกล้อมรอบด้วยวัสดุที่เติมลงไปด้วยกลไกทางกายภาพ เมื่อมีการทำให้ดินแตกออกสารที่ปนเปื้อนจะถูกปล่อยออกมาได้ง่าย
2. การจับแบบแคปซูลระดับไมโคร (Microencapsulation) สารปนเปื้อนจะถูกล้อมรอบด้วยสารที่เติมลงไปด้วยกลไกทางกายภาพเหมือนกับการจับแบบแคปซูลแมโคร แต่สารปนเปื้อนจะถูกจับอยู่ในโครงสร้างวัสดุที่เติมลงไป จึงทำให้มีการจับตัวแน่นกว่าขั้นตอนข้างต้น
3. การดูดซึม (Absorption) สารปนเปื้อนจะถูกดูดซึมเข้าไปในตัวดูดซึม เช่น ฟาง ขี้เลื่อย ถั่วลอ่ย และฝุ่นจากเตาเผาซีเมนต์
4. การดูดซับ (Adsorption) สารปนเปื้อนจะถูกยึดติดกับผิววัสดุด้วยแรงพันธะเคมีต่างๆ เช่น แร่รัตนควาล์ว ไอออนิกหรือไฮโดรเจน เป็นต้น

### 2.6.2 ไวตรีฟิเคชัน (Vitrification) (ชมพูนุท, 2560)

เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนกับดินที่ปนเปื้อนสารพิษที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,600 องศาเซลเซียส ดินที่ปนเปื้อนสารพิษจะหลอมตัว จึงทำการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ดินที่ปนเปื้อนสารพิษจะกลายเป็นผลึกแข็งลักษณะเป็น แก้ว หรือคริสตัล วิธีนี้สามารถนำไปกำจัดสารปนเปื้อนในดินได้ไม่ว่าจะเป็น สารกัมมันตรังสี โลหะ สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ และสามารถใช้กับดินได้ทุกประเภท แต่อย่างไรก็ตามค่าความชื้นในดินและการซึมผ่านเป็นข้อจำกัดของวิธีนี้

### 1. ไวตรีฟิเคชันในพื้นที่ (In-situ vitrification, ISV)

วางอิเล็กโทรดลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยความห่างที่เหมาะสมในพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนระยะห่างปกติอยู่ที่ 18 ฟุต กราไฟต์หรือแก้วถูกนำไปวางไว้ตรงกลางพื้นที่ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวหลอม เมื่อให้กระแสไฟฟ้าลงไป อุณหภูมิภายในจะสูงถึง 1,600-2,000 องศาเซลเซียส ดินที่อยู่ใกล้กราฟไฟต์หรือแก้วจะหลอมตัวก่อน และเกิดการหลอมตัวลึกลงไปถึง 30 ฟุต หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ดินจะแข็งตัวและยุบตัวลง เนื่องจากการลดช่องว่างในดิน ทำให้สูญเสียน้ำและก๊าซไป สารบางตัวจะระเหยออกจากดินจึงทำให้ต้องมีการสร้างเครื่องดูดเหนือดินด้วย

### 2. ไวตรีฟิเคชันนอกพื้นที่ (Ex-situ vitrification, ESV)

จะใช้วิธีนี้ต่อเมื่อไม่สามารถบำบัดในพื้นที่ได้ สามารถขุดดินออกมาแล้วนำไปบำบัดในโรงงานเตาเผาที่ใช้ก็เป็นเตาเผาแก้ว ปรับอุณหภูมิในการเผาเป็น 1,600 องศาเซลเซียส การเผาจะใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง โดยเศษแก้ว ถ้ำลอย หรือหินปูนขาว สามารถนำมาใช้เป็นตัวเริ่มหลอมได้

### 2.6.3 เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) (วรภรณ์, 2551)

เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช หมายถึง กระบวนการการใช้พืชเพื่อกำจัดความเป็นพิษของสารมลพิษที่ปนเปื้อนและตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งกลไกของพืชในการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนอาจเกิดโดยวิธีทางตรง ได้แก่ การย่อยสลายสารมลพิษนั้นๆ ในต้นพืช หรือโดยวิธีอ้อม ได้แก่ การดูดซึม การดูดซับ การสะสม การลดความเป็นพิษหรือการตรึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ และอากาศโดยกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมีหรือทางชีวภาพ เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืชเป็นทางเลือกที่อาศัยความสามารถของพืชที่ทนโลหะหนักได้ ซึ่งเทคโนโลยีการบำบัดพืชมีทั้งหมด 6 ประเภท ดังนี้

1. การสกัดด้วยพืช (Phytoextraction) พืชดูดซึมสารมลพิษขึ้นจากดินเข้าสู่รากของพืช แล้วนำไปสะสมที่ยอดหรือราก พบทั้งในกรณีการสะสมโลหะหนัก สารประกอบของโลหะหนัก และกัมมันตภาพรังสี
2. การใช้พืชสะสมธาตุโลหะหนักมีข้อเสียคือ พืชมักจะสะสมธาตุโลหะได้ดีชนิดเดียว มีการเจริญเติบโตช้าและต้นมีขนาดเล็กกว่าพืชชนิดเดียวกันที่ไม่ได้สะสมโลหะ
3. การกรองด้วยรากพืช (Rhizofiltration) หรือการดูดซับทางชีวภาพ(Biosorbition) พืชดูดซับหรือตกตะกอนสารมลพิษด้วยราก หรือดูดซับไว้ในเซลล์ ส่วนใหญ่เป็นพืชน้ำ
4. การตรึงด้วยพืช (Phytostabilization) พืชดูดซับสารพิษไว้ในรูปที่เคลื่อนที่ได้น้อยลง หรืออยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ไม่ได้ วิธีนี้สามารถใช้ได้ผลเพียงชั่วคราวเท่านั้น เพราะการควบคุมให้โลหะทุกชนิดอยู่ในรูปที่ไม่เคลื่อนที่และไม่เป็นพิษนั้นทำได้ยาก
5. การทำให้ระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization) เป็นการทำให้ธาตุโลหะหรือสารประกอบของโลหะที่ระเหยได้ขึ้นมาจากดินโดยแรงดึงจากการคายน้ำ แล้วปล่อยออกทางใบ เหมาะกับธาตุโลหะที่เมื่ออยู่ในรูปที่เป็นไอแล้วมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อยลง
6. การย่อยสลายด้วยพืช (Phytodegradation) พืชดูดซึมสารมลพิษเข้าไปในพืชแล้วย่อยสลายหรือเปลี่ยนแปลงด้วยเมตาบอลิซึมของพืชเอง หรือเปลี่ยนเป็นสารที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายต่อไปได้
7. การกระตุ้นด้วยพืช (Phytostimulation) รากหลั่งสารออกมาจากรากพืชที่ยังมีชีวิตอยู่หรือจากการสลายตัวของรากพืชที่ตายแล้ว เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในดิน หรือเชื้อราไมคอร์ไรซา ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารมลพิษได้ดีขึ้น เป็นกระบวนการที่ใช้กับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้น้อย เช่น ปิโตรเลียม พีเอเอช และ พีซีบี

#### 2.6.4 การล้างดิน (Soil washing) (คมสรร และปนัดดา, 2547)

วิธีกำจัดโลหะหนักออกจากดินปนเปื้อนโดยการใช้สารละลายสกัดต่าง ๆ ได้แก่

1. คีเลตติงค์ เอเจนต์ (Cheleting agent) ได้แก่ Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), Nitritoltriacetic acid (NTA)
2. กรดอนินทรีย์ (Inorganic acid) ได้แก่ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก
3. กรดอินทรีย์ (Organic acid) ได้แก่ กรดอะซิติก และกรดซิตริก
4. สารละลายเบส ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์
5. สารลดแรงตึงผิว ได้แก่ Biosurfactants
6. ตัวทำละลายซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำ ได้แก่ เมทานอล
7. การใช้สารละลายกรด ร่วมกับ คอมเพลกซิงค์ เอเจนต์
8. ไอออนบวกที่ไม่เป็นพิษ (Nontoxic cation)
9. ออกซิไดส์ซิงค์ เอเจนต์
10. รีดิวิสซิงค์ เอเจนต์
11. อื่น ๆ

กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนในดิน แบ่งเป็น 3 ประเภท (คมสรร และปนัดดา, 2547) ดังนี้

1. การสกัดด้วยน้ำซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการสกัดต่างๆ มี 3 ประเภท คือ
  - 1) การเติมสารลดแรงตึงผิว เพื่อช่วยในการเพิ่มการละลายของสารปนเปื้อนในน้ำ
  - 2) การเติมคีเลตติงค์ เอเจนต์ เพื่อช่วยให้สารปนเปื้อนละลายได้ดีขึ้น เนื่องจากสารคีเลตติงค์ เอเจนต์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก
  - 3) การเติมสารละลายกรด หรือด่าง เพื่อทำให้เป็นกลาง เพิ่มการเคลื่อนที่ และทำลายสารปนเปื้อน
2. การใช้สารละลายสกัดสารอินทรีย์ที่ละลายได้ โดยสารอินทรีย์จะเคลื่อนเข้าไปอยู่ในสารละลาย
3. การกำจัดสารปนเปื้อน หรือสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่ายด้วยอากาศ โดยใช้ไอน้ำหรืออากาศมากำจัดสารปนเปื้อน อาศัยการให้ความร้อนและสภาวะสุญญากาศ

### 2.6.5 ถ่านดูดซับ (เดซา, 2552)

เป็นตัวดูดซับที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำคัญ ถ่านดูดซับทั้งชนิดเม็ดและชนิดผงมักมีพื้นที่จำเพาะมากกว่า 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถแบ่งโพรงของถ่านดูดซับเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. โพรงเล็ก มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร
2. โพรงกลาง มีขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร แต่ไม่เกิน 50 นาโนเมตร
3. โพรงใหญ่ มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

ซึ่งอาจจะจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ตามขนาดโพรงได้ เช่น ถ่านดูดซับที่มีขนาดเล็ก หรือถ่านดูดซับโพรงเล็กจะใช้สำหรับดูดซับก๊าซ ส่วนสารดูดซับโพรงใหญ่จะใช้ดูดซับสารที่เป็นของเหลว เป็นต้น

สมบัติทางกายภาพทั่วไปของถ่านดูดซับ ได้แก่ ความหนาแน่นของถ่าน ปริมาตรโพรงจำเพาะ และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านดูดซับ วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ จะนิยมนำมาผลิตเป็นถ่านดูดซับ โดยจำแนกออกเป็น

1. วัสดุจากซากสิ่งมีชีวิตโบราณ เป็นวัสดุที่เกิดจากการทับถมของซากสิ่งมีชีวิต ซึ่งประกอบไปด้วยหินลิกไนต์ถ่านหิน ถ่านโค้ก มักจะเป็นของแข็ง
2. วัสดุจากชีวมวล วัสดุที่เกี่ยวข้องกับเกษตรกรรม ประกอบด้วยวัสดุที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ทางการเกษตรแล้ว เช่น กากชานอ้อย เปลือกผลไม้ต่างๆ หรือจะเป็นพวก กระจุกสัตว์ก็ได้
3. วัสดุจากวัสดุอินทรีย์อุตสาหกรรม วัสดุดิบสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

#### 2.6.5.1 ขั้นตอนการผลิตถ่านดูดซับ

การเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ของวัสดุดิบขั้นต้นให้เป็นถ่าน ด้วยความร้อนในบรรยากาศไร้ก๊าซออกซิเจน ณ อุณหภูมิและคาบของการผลิตถ่านที่เหมาะสมสำหรับวัสดุดิบแต่ละชนิด เช่น ถ่านกะลามะพร้าวต้องทำการเผาที่บรรยากาศไร้ออกซิเจน ณ อุณหภูมิ 620 องศาเซลวิน นาน 3 ชั่วโมง เป็นต้น ซึ่งอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการผลิตถ่านดูดซับเป็นอย่างมาก โดยการผลิตถ่านดูดซับจากวัสดุดิบที่มีขนาดใหญ่และแข็ง จะต้องเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อระเหยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย สลายพันธะสารประกอบอินทรีย์ในวัสดุดิบ และลดความแข็งของวัสดุดิบ แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิและคาบของการเผาจะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของวัสดุดิบ

เนื่องจากมีวิธีการกำจัดโลหะหนักในดินมากมายหลายวิธี แต่ส่วนใหญ่จะต้องใช้งบประมาณและกระบวนการที่ยุ่งยาก ทำให้ประชาชนทั่วไปทำตามได้ยาก ด้วยเหตุนี้กลุ่มของข้าพเจ้าจึงเลือกใช้วิธีบำบัดโดยใช้ถ่านชีวภาพเป็นตัวดูดซับโลหะหนักในดิน ซึ่งถ่านชีวภาพผลิตได้ง่ายและวัสดุดิบที่ใช้เป็นของเหลือใช้จากทางเกษตร หาได้ง่าย ราคาไม่แพง อีกทั้งยังเป็นวิธีที่บำบัดโดยธรรมชาติไม่ต้องใช้สารเคมีในการบำบัด และไม่มีสารเคมีตกค้าง

## 2.7 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) “เป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็งโดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของแข็งนั้น” ของแข็งที่สะสม

สารประกอบไวบนผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ ส่วนสารประกอบต่างๆ ที่ไปสะสมบนผิวของแข็ง เรียกว่า สารถูกดูดซับ ดังนั้น ตัวดูดซับจะมีโพรงเป็นจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากขึ้น เพื่อที่จะทำให้ดูดซับสารดูดซับได้จำนวนมากขึ้น (เดชา, 2552)

### 2.7.1 ประเภทของการดูดซับ (เดชา, 2552)

การดูดซับจะเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับหรือผิวของแข็ง แบ่งออกเป็นแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี

#### 1. การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption)

- 1.1 แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ เป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วลบของอีกโมเลกุลหนึ่ง เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกความชื้น
- 1.2 แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียมและไอออนแมกนีเซียม ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์
- 1.3 แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่นด้วยถ่านดูดซับ

ลักษณะสำคัญของการดูดซับแบบกายภาพคือ จะดูดซับได้ดีในอุณหภูมิปกติ หรือ บรรยากาศทั่วไป และจะเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้นก็ต่อเมื่อ อยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนตัวดูดซับหรือเกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน เรียกว่า การดูดซับหลายชั้น

#### 2. การดูดซับแบบเคมี (Chemisorption)

การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ หรือการเกิดพันธะทางเคมี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ลักษณะสำคัญของการดูดซับแบบเคมี คือ จะดูดซับได้ดีในอุณหภูมิสูง และจะเกิดที่บริเวณบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือการดูดซับแบบเคมีจะไม่เกิดการดูดซับหลายชั้นแบบการดูดซับทางกายภาพ โดยจะเรียกว่า การดูดซับชั้นเดียว

### 2.7.2 ขั้นตอนการดูดซับ (ชมพูนุท, 2560)

1. สารปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน โดยจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับด้วยการแพร่แบบบราวเนียน ในขณะที่สารปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ตามการไหลของน้ำ และชนกับตัวดูดซับอีกทั้งยังอาจเกิดการตกตะกอนอีกด้วย
2. เมื่อสารปนเปื้อนเข้ามาถึงตัวดูดซับ สารปนเปื้อนจะเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มเข้าไป
3. โมเลกุลของสารปนเปื้อนเหล่านั้นจะแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับ
4. โมเลกุลของสารปนเปื้อนจับการผิวของตัวดูดซับและไม่สามารถหลุดออกไปได้ จึงเกิดการดูดซับแบบสมบูรณ์

### 2.7.3 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) (ชมพูนุท, 2560)

เมื่อการเติมตัวดูดซับลงไปในสารที่มีตัวถูกดูดซับอยู่นั้น โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่ผิวตัวดูดซับ ขณะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเกาะที่พื้นที่ผิวของสารดูดซับนั้นจะมีเกิดการคายซับออกมา แต่อัตราการคายซับจะน้อยกว่าการดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไป อัตราการคายซับจะเพิ่มขึ้น และอัตราการดูดซับจะลดลง จนกระทั่งอัตราการคายซับเท่ากับอัตราการดูดซับ หรือเรียกว่า ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

จากการศึกษาถ่านดูดซับและทฤษฎีการดูดซับจึงทำให้นำไปสู่การศึกษาเรื่องของถ่านชีวภาพ ดังนี้

### 2.8 ถ่านชีวภาพ (Biochar) (พินิจภณ, 2557)

วัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งอุดมไปด้วยคาร์บอน มีสีดำ ไม่มีซีเมนต์ ผลิตจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่หาได้ตามท้องถิ่น เช่น เปลือกผลไม้ชนิดต่างๆ เศษไม้-ใบไม้ ชังข้าวโพด กากขานอ้อย และอื่นๆ ซึ่งจะนำวัสดุที่กล่าวมานั้นผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) เป็นการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศ โดยจำกัดออกซิเจนให้เข้าไปในกระบวนการเผาไหม้ได้น้อยที่สุด ความร้อนจากการเผาจะไปทำลายพันธะทางเคมีในอินทรีย์วัตถุในส่วนต่างๆ ของพืชหรือวัสดุต้นแบบที่นำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ทำให้ความชื้นและอินทรีย์สารเปลี่ยนรูปกลายเป็นก๊าซกระจายออกไปเหลือไว้เฉพาะส่วนคาร์บอนเข้มข้นที่พืชหรือวัสดุต้นแบบเก็บสะสมไว้ กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีดังนี้

1. การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายความร้อนแบบช้าๆ ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้นานเป็นชั่วโมงๆ และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน
2. การแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายความร้อนแบบเร็ว ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้แค่ไม่กี่วินาที และใช้อุณหภูมิระหว่าง 500-1,000 องศาเซลเซียส ในสภาวะไม่มีออกซิเจน

ทั้ง 2 วิธีจะได้ผลผลิตออกมาแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ส่วนที่เป็นน้ำมัน (Bio-Oil)
2. ส่วนที่เป็นแก๊ส (Bio-Gass)
3. ส่วนที่เป็นถ่านชีวภาพ (Bio-Char)

ปริมาณสัดส่วนของผลผลิตที่ได้จะแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการผลิตซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 2.1 และในตารางที่ 2.2 จะเป็นข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพทั่วไปของถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสัดส่วนของผลผลิตจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	ถ่าน	ของเหลว	แก๊ส
แบบช้า	35 %	30 %	35 %
แบบเร็ว	12 %	75 %	13 %

ที่มา : พินิจถน, 2557

### คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 2.2 สมบัติกายภาพทั่วไปของถ่านชีวภาพ

ถ่านดูดซับ		ถ่านดูดซับ โพรงขนาดเล็ก	ถ่านดูดซับโพรง ขนาดกลาง	ถ่านดูดซับโพรง ขนาดใหญ่
ความหนาแน่น (Kg/m <sup>3</sup> )	ถ่าน ( $\rho_s$ )	2,100-2,200	2,100-2,200	2,100-2,200
	เม็ดถ่าน ( $\rho_p$ )	800	700	600
	ชั้นถ่านดูดซับ ( $\rho_b$ )	400-500	350-450	300-400
ปริมาตรโพรง จำเพาะ (dm <sup>3</sup> /Kg)	โพรงเล็ก ( $V_{p,s}$ )	0.5-0.7	0.4-0.6	0.3-0.5
	โพรงอื่นๆ ( $V_{p,l}$ )	0.3-0.5	0.5-0.7	0.5-1.1
พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $S_p$ ) (m <sup>2</sup> /g)		800-1,200	800-1,400	800-1,500

ที่มา : เดชา, 2552

ถ่านชีวภาพ (Biochar) จะแตกต่างจากถ่านทั่วไป (Charcoal) และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งถ่านทั้งสามแบบล้วนผลิตมาจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แต่แตกต่างกันตรงที่ประโยชน์การนำมาใช้

ตารางที่ 2.3 ประโยชน์การนำมาใช้ของถ่านไม้ ถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์

	Charcoal	Biochar	Activated Carbon
Feedstock	Hardwood, sawdust	Forestry, organic materials	Coconut, shell, petroleum pitch
Common use	Fuel (Cooking)	Soil Amendment Remediation Filtration	Filtration Remediation
Relevant Qualities	Burn ability Low smoke	Adsorption	Adsorption
Carbon footprint	Carbon neutral	Carbon negative	Carbon positive

ที่มา : สถาบันส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2559

ถ่านทั่วไปจะเหมาะแก่การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำอาหาร ขณะที่ถ่านชีวภาพจะเหมาะแก่การใช้ประโยชน์เพื่อกักเก็บคาร์บอนลงในดิน ปรับปรุงสภาพทางกายภาพของดิน หรือช่วยในการดูดซับธาตุอาหารหรือโลหะหนักที่เป็นประจุบวก เนื่องจากถ่านชีวภาพมีสภาพเป็นลบ และมีรูพรุนจำนวนมาก เมื่อเติมลงดินจะช่วยในการอุ้มน้ำ ดูดซับธาตุอาหาร และยังสามารถช่วยลดความเป็นกรดของดินได้อีกด้วย แต่ถ่านชีวภาพไม่ใช่ปุ๋ย เพียงแต่เป็นตัวช่วยในการเพิ่มคุณภาพของดินและปุ๋ยให้สูงขึ้น โดยรูพรุนของถ่านจะช่วยดูดซับธาตุอาหารจากปุ๋ยเอาไว้ และเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ทำให้ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน จากสิ่งที่กล่าวมานี้ ทำให้ประหยัดการใช้ปุ๋ย ลดต้นทุน ของเสียที่มาจากปุ๋ยสามารถเพิ่มผลผลิตและรายได้ให้แก่เกษตรกร และชุมชนได้

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย ซึ่งจะทำการสกัดแคดเมียมในดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) โดยการสกัดด้วยสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จึงกล่าวถึงรายละเอียดของสารละลาย EDTA ดังนี้

## 2.9 การล้างดินด้วยสารประเภทคีเลตติ้ง เอเจนต์ (Chelating agent)

คีเลชัน คือกระบวนการรวมตัวของโลหะเข้ามาเป็นสารประกอบใหม่ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน โดยมีไอออนของโลหะเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง (Chelation is the incorporation of a metal into a heterocyclic ring structure)

สารคีเลต (Chelating agent) กักโลหะไว้โดยการเข้าปิดกั้นจุดที่ไวต่อปฏิกิริยาของไอออนโลหะ ทำให้ไอออนไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ (สำนักแพทย์ทางเลือก, 2554)



### ลักษณะทั่วไป

หญ้าเนเปียร์แคระเป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี มีลำต้นใต้ดินแบบเหง้า (Rhizome) ลักษณะต้นเป็นกอพุ่มตั้ง ลำต้นอวบ และเตี้ยกว่าหญ้าเนเปียร์ธรรมดา มีความสูงประมาณ 1-2 เมตร มีการแตกกอดี มีสัดส่วนของใบมากกว่าลำต้น สามารถทนแล้งได้ เนื่องจากมีระบบรากที่แข็งแรง และหยั่งลึกลงในดิน มีความสามารถในการดูดซึมอาหารได้ดีมากจึงทำให้ผลผลิตสูง สามารถเจริญเติบโตได้ในดินหลายชนิด เหมาะสำหรับปลูกในเขตชลประทานหรือพื้นที่ที่มีระบบการให้น้ำดี เมื่อโตเต็มที่จะออกดอก โดยจะมีลักษณะยาวเรียวยาว เรียกว่า ช่อดอกแบบ spike มีสีเหลืองอ่อนยาวประมาณ 10 นิ้ว ตรงส่วนปลายของดอกจะโค้งงอเล็กน้อย

### การใช้ประโยชน์

หญ้าเนเปียร์แคระพบว่า เป็นหญ้าที่มีคุณค่าทางอาหารสัตว์ที่ดีที่สุดในระดับหญ้าเนเปียร์ด้วยกัน เพราะมีค่าทางโปรตีนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 11.83 และมีค่าส่วนของเยื่อใยรวม (Neutral Detergent Fiber, NDF) เท่ากับร้อยละ 73.15 และเยื่อใยที่ย่อยยาก (Acid Detergent Fiber, ADF) เฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 42.39 ทำให้นำไปเลี้ยงสัตว์จำพวก โค กระบือ แพะ และแกะ โดยใช้ในรูปแบบของการตัดสดให้สัตว์กินในโรงเรือน ไม่ควรทำเป็นหญ้าแห้ง (Hay) ในการตัดหญ้าเนเปียร์แคระควรตัดครั้งแรกที่อายุ 60-70 วันหลังปลูกและตัดอีก 30-45 วันต่อมา ช่วงฤดูควรตัดที่อายุน้อยกว่า 30 วัน เนื่องจากหญ้าเนเปียร์แคระเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว อีกทั้งหญ้าเนเปียร์ยังสามารถนำไปใช้เพื่อการผลิตพลังงานทดแทนได้ และยังสามารถใช้เป็นพืชคลุมดิน และยังมี การนำน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมาปลูกหญ้าก่อให้เกิดประโยชน์อีกหลายด้าน เช่น ลดมลภาวะลดโลกร้อน เพิ่มความมั่นคงด้านผลผลิตพืชและสัตว์ และพลังงานด้วย

#### 2.10.2 อ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 50 (Suphanburi 50 Juice Cane Variety)



รูปที่ 2.8 อ้อย พันธุ์สุพรรณบุรี (อ้อยคั้นน้ำสุพรรณบุรี50, 2559)

### อ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 50 (Suphanburi 50 Juice Cane Variety)

เป็นพืชที่นิยมในการนำมาคั้นน้ำทำน้ำอ้อยสด โดยศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงอ้อยพันธุ์สิงคโปร์ ให้มีคุณภาพ มีปริมาณน้ำในการคั้นมากกว่าปกติ รสหวาน ทนต่อโรค และให้ผลผลิตมากขึ้น

#### ลักษณะทั่วไป

มีลำต้นสีเขียวอมเหลือง ลำปล้องมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ไม่มีร่อง รอยบุมบริเวณตาหรือข้ออายุเก็บเกี่ยว 8-10 เดือนหลังปลูกซึ่งถือว่าเป็นระยะให้น้ำที่มีคุณภาพ และปริมาณมากที่สุดสามารถปลูกได้ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย เพราะปรับตัวเข้ากับสภาพอากาศท้องถิ่นได้ดี เจริญเติบโตเร็ว อัตราการแตกกอมีมากถึง 12,000-12,500 ลำ/ไร่ สืบพันธุ์โดยการแตกหน่อ มีความต้านทานโรคเส้ดำ โรคราใบขาว โรคลำต้นหรือไส้เน่าแดง และหนอนกออ้อยได้ดี หากปลูกในพื้นที่ที่เป็นชลประทานหรือพื้นที่ที่จัดการระบบน้ำดีจะให้ผลผลิตถึง 19-20 ตัน/ไร่ หรือคั้นน้ำอ้อยสดได้ถึง 4,900-5,000 ลิตร

#### 2.11 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากขานอ้อยต่อการดูดซับแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยมีทฤษฎีพื้นฐาน และวิธีการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัญหาวิจัย ประกอบด้วย

- 1) การปนเปื้อนโลหะหนักในดิน
- 2) การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพ
- 3) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในดิน
- 4) การล้างดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### งานวิจัยด้านการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน

ธนภัทร (2558) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินและการสะสมในข้าว พื้นที่ตำบลแม่ตาว และตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยทำการปลูกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และสุ่มเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น และปริมาณแคดเมียมในรูปที่สามารถละลายน้ำและรูปที่สกัดได้ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณแคดเมียมในรูปที่ละลายน้ำได้มีค่าสูงสุด เท่ากับ 0.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับปริมาณแคดเมียมในรูปที่สกัดได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 46.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าดังกล่าวสูงกว่ามาตรฐานของสหภาพยุโรปที่กำหนดไว้ในดิน ซึ่งห้ามเกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากนั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างข้าว (แกลบ เมล็ด และข้าวสารขัดสี) และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ผลการศึกษาพบว่า การสะสมของแคดเมียมในข้าวมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐาน Codex (0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

ธวัชชัย และคณะ (2560) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ในน้ำ ตะกอนดิน และปลาในอ่างเก็บน้ำห้วยแก่ง จังหวัดกาฬสินธุ์ เก็บตัวอย่างปลาโดยการแยกอวัยวะเป็น เนื้อ ตับ ลำไส้ และเหงือกของปลามาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะ

หนักโดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณตะกั่วในน้ำมีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน และพบว่าปริมาณแคดเมียม และตะกั่วในเนื้อปลาทุกชนิดมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด

#### งานวิจัยด้านการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพ

Abbas, et al (2017) ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวในการลดการสะสมของแคดเมียมในข้าวสาลีที่ปลูกในดินปนเปื้อนในสภาวะแห้งแล้ง โดยทำการศึกษาดูด้วยการนำข้าวสาลีที่มีอายุ 45 วัน ปลูกในดินปนเปื้อนเป็นเวลา 15 วัน และใส่ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวในอัตรา 0, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ผลการทดลองพบว่า ความเครียดจากภัยแล้ง ระดับความเค็ม ความแห้งแล้งและความสามารถในการรองรับน้ำมีค่าเท่ากับ 70, 50 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยความเครียดจากความแห้งแล้งจะลดลงตามความสูงของพืช รวมทั้งระดับความเข้มข้นของแคดเมียมก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน หากแต่หลังจากเติมถ่านชีวภาพจากฟางข้าวลงไป พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมลดลงตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพจากฟางข้าวลงไปพบว่า ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวสามารถแก้ไขปัญหาดินที่ปนเปื้อนโลหะได้ สามารถช่วยปรับปรุงบำรุงดิน เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของข้าวสาลี และช่วยลดระดับความเข้มข้นของแคดเมียมภายใต้สภาวะแห้งแล้งได้

Bian, et al (2013) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากฟางข้าว เพื่อแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อนแคดเมียมในข้าว โดยได้นำถ่านชีวภาพมาปรับปรุงการทำนาปลูกข้าว ในอัตรา 20-40 เฮกเตอร์ต่อวัน เก็บตัวอย่างดินและเมล็ดข้าวที่ผ่านการบำบัดด้วยถ่านชีวภาพแล้วมาวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม ผลการทดลองพบว่า การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพนั้นสามารถช่วยลดปริมาณแคดเมียมในข้าว ได้ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ด่างของดินด้วย

Brendova, et al (2015) ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวในการลดการเคลื่อนที่แคดเมียมและสังกะสีโดยใช้ต้นหลิว (*Salix babylonica* L.) ทำการทดลองในเรือนกระจก และใช้ดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมมากถึง 43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสังกะสี 4,340 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแบ่งการทดลองเป็นชุดควบคุมที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ และชุดการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพที่ทำมาจากกะลามะพร้าว ในอัตรา 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ และใส่ปุ๋ยเคมีโดยมีอัตราส่วนของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม เท่ากับ 0.1, 0.16 และ 0.4 กรัมต่อดิน ซึ่งได้เก็บตัวอย่างพืชสองครั้งเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่สะสมในพืช โดยใช้เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ปริมาณแคดเมียมและสังกะสี ผลการทดลองพบว่า ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีลดลง 99 เปอร์เซ็นต์ในทุกอัตราส่วน การศึกษาครั้งนี้จึงได้มีการแนะนำว่า ถ่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวนั้นมีประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักได้

He, et al (2016) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ยักษ์ ที่เผาในอุณหภูมิต่างกันต่อการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม และสารบิวทาคลอร์ (Butachlor) โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่กวางเจา ประเทศจีน นำไปร่อนด้วย

ตะแกรงขนาด 60 เมช แล้วนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของดิน หลังจากนั้นนำหญ้าเนเปียร์ยักษ์ มาเผาที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อทำเป็นถ่านชีวภาพ และนำถ่านชีวภาพไป ใส่ในดินอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) หลังจากนั้น 30 วัน เก็บตัวอย่างดินมาทำ การวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้นและปริมาณสารปนเปื้อนในดิน และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของ ถ่านชีวภาพ ดิน:น้ำ (1:2.5 กรัมต่อมิลลิลิตร) ใช้เครื่องมือ sensION-156 meter จากนั้นปลูกต้น กะหล่ำปลี ลงในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม และบิวทาคลอร์ 30 วัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ ปนเปื้อนของแคดเมียมในพืช ด้วยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) จากผลการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพที่เผาอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ที่ เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรดต่างของดิน และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณแคดเมียมลดลงอย่างมี นัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และยังพบว่า มีค่าลดลงสูงสุด 66.08 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะเมื่อนำถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และใส่ลงไปพร้อมปลูกกะหล่ำปลี ซึ่งผลการทดลอง พบว่า ปริมาณแคดเมียมลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนเหนือดินของพืช และ 70 เปอร์เซ็นต์ ในส่วน ใต้ดินของกะหล่ำปลี

Ishii, *et al* (2015) ได้ศึกษาศักยภาพของการตรึงโลหะหนักด้วยหญ้าเนเปียร์ที่เพาะเลี้ยงใน สารละลายไฮโดรฟอนิกส์ที่ปนเปื้อนแคดเมียม นำหญ้าเนเปียร์ยักษ์ไปปลูกในดินก่อนการทดลอง หลังจากนั้นจึงนำไปปลูกในสารละลายไฮโดรฟอนิกส์ที่มีระดับความเข้มข้นแคดเมียมเป็น 0, 50 และ 100 ไมลาร์ ซึ่งแคดเมียมที่ใช้จะอยู่ในรูปของแคดเมียมคลอไรด์ ( $CdCl_2$ ) ทำการปลูกเป็นเวลา 3 วันมี การจัดเตรียมภาชนะบรรจุ 9 ชนิด ในแบบบล็อกแบบสุ่มโดยในแต่ละตัวสุ่มตัวอย่าง 3 วิธีรวมเป็น 81 ชนิด และทำการเก็บตัวอย่างพืชโดยวัดความสูงของพืช 5 เซนติเมตรเหนือระดับน้ำ ทุกๆ 2, 4 และ 8 สัปดาห์ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาแคดเมียมโดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) ผลการทดลองพบว่า หลังการบำบัดดินปริมาณแคดเมียมลดลงอย่างมี นัยสำคัญ และการเจริญเติบโตของพืชที่มีการสะสมแคดเมียมนั้นไม่ได้มีการตอบสนองแต่อย่างใด จึงอาจกล่าวได้ว่า หญ้าเนเปียร์ยักษ์อาจจะปรับตัวให้เข้ากับดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมได้อย่างมี นัยสำคัญ

Puga, *et al* (2015) ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวโพดในการลดการดูดซึม ของสังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมในพืช โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างดินจากเหมืองแร่สังกะสีในพื้นที่ Vazante ประเทศบราซิล มาทำการทดลองในเรือนกระจกเป็นเวลา 120 วัน และปลูกถั่วพุ่ม และ หมามุ่ยในดินปนเปื้อนดังกล่าว จากนั้นทำการใส่ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวโพด อุณหภูมิการอบที่ 700 องศาเซลเซียส ในอัตรา 1.5, 3.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) จากนั้นนำมาวิเคราะห์หา ปริมาณโลหะด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) และวิเคราะห์ด้วยการสกัด DTPA เพื่อหาความเข้มข้นของโลหะที่มีอยู่ และเก็บตัวอย่างพืชมา ทำการวิเคราะห์ SEM ผลการทดลองพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพสามารถช่วยแก้ไขในเรื่องปริมาณ สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมได้ และยังสามารถช่วยลดการดูดซึมของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีใน

พืชทั้งสองชนิดได้ โดยเฉพาะแคดเมียมในหมามูยนั้นมีการสะสมในรากเป็นจำนวนมาก หากแต่ก็พบว่า มีการดูดซึมในพืชน้อยลง

Rehman, et al (2018) ได้ทำการศึกษาวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงดินต่อการลดความเป็นพิษของแคดเมียมที่สะสมในข้าวสาลี โดยวัสดุที่ใช้ได้แก่ ถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบ ปุ๋ยคอก และลิกไนต์ ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างดิน และวัสดุปรับปรุงดินมาวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น และทำการเตรียมดินโดยเติมแคดเมียมลงไปดินใช้ความเข้มข้นที่ 25 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม และแบ่งการทดลองเป็น 8 ชุดการทดลองได้แก่ 1) ดินปนเปื้อนแคดเมียม 25 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม 2) ลิกไนต์:1 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน 3) ถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบ:1 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน 4) ปุ๋ยคอก:1 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน 5) ถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน ผสมกับลิกไนต์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน 6) ปุ๋ยคอก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน ผสมกับลิกไนต์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน 7) ถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน ผสมกับปุ๋ยคอก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน และ 8) ถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบ 0.33 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน ผสมกับลิกไนต์ 0.33 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน ผสมกับปุ๋ยคอก 0.33 เปอร์เซ็นต์ ออแกนิกคาร์บอน และทำการปลูกข้าวสาลี ลงไปในชุดการทดลองทั้ง 8 ชุด เป็นระยะเวลาทั้งหมด 45 วัน จึงนำตัวอย่างพืชมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ผลการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพจากแกลบเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช และช่วยลดความเข้มข้นของแคดเมียมในเนื้อเยื่อข้าวสาลี โดยสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตธัญพืชได้ 91 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้วัสดุชนิดอื่นๆ ก็สามารถช่วยลดปริมาณแคดเมียมได้เช่นเดียวกัน หากแต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าถ่านชีวภาพจากแกลบ

**ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในดิน**

กุลธิดา (2557) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด กะลามะพร้าว เมล็ดลำไย เปลือกขนุนโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้น เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ โดยแบ่งปริมาณถ่านชีวภาพเป็น 0.5, 1.0, 1.5 กรัม ผลการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนที่ระดับ 1.5 กรัมมีประสิทธิภาพมากที่สุด และถ่านชีวภาพจากเมล็ดลำไยที่ระดับ 0.5 กรัมมีประสิทธิภาพน้อยที่สุด โดยประสิทธิภาพการดูดซับ และร้อยละการกำจัดไอออนทองแดงจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารดูดซับ ลักษณะ และขนาดรูพรุนของถ่าน

ยุทธพิชัย (2559) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านจากชั่งข้าวโพด โดยทำการศึกษาระยะเวลาการดูดซับเข้าสู่สมดุล ไอโซเทอมของการดูดซับ และพีเอช ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาการดูดซับเข้าสู่สมดุลไม่น้อยกว่า 30 นาที ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงสุดร้อยละ 40 และสามารถกำจัดสารละลายเหล็กได้ดีในสภาวะเบส

## การล้างดิน

**ธรรมัญญู (2550)** ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในดินจากพื้นที่ที่ปนเปื้อนในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยการสกัดทั้งหมด 4 วิธีได้แก่ อีตีทีเอ ดีพีเอ และแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งจัดเป็นสารสกัดที่นำมาใช้สกัดโลหะที่อยู่ในรูปแบบที่ดูดซึมได้โดยพืช และการสกัดลำดับส่วนด้วยลำดับแรกโดยใช้กรดแอสติกเป็นสารสกัดตามมาตรฐานวิธีการสกัดลำดับส่วนของดินและตะกอนดินของยุโรป (Community Bureau of Reference: BCR) ปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าวได้ทำการปลูกอ้อย จึงได้ทำการทดลองโดย เก็บตัวอย่างอ้อยทั้งหมด 6 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น ใต้ดิน ขานอ้อย น้ำอ้อย ใบ และยอด มาวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในราก และลำต้น ใต้ดินสูงกว่าทุกส่วน จากการสกัดด้วยวิธีทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้โปรแกรม SRSS เวอร์ชัน 11.5 ด้วยการหาสัมประสิทธิ์สัมพันธ์แบบสเปียร์แมน พบว่า วิธีการสกัดด้วยอีตีทีเอ เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาใช้ในการตรวจวัดหาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน

**คมสร และปนัดดา (2547)** ได้ทำการศึกษาการล้างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม เหล็ก แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว และทองแดง โดยสารละลายโซเดียมอีตีทีเอ ซึ่งทำการทดลองโดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมอีตีทีเอ และอัตราส่วนดินต่อสารละลายที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นและอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.15 โมลาร์ และอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 30 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของโลหะในรูปต่าง ๆ ในดินโดยการสกัดแบบเป็นลำดับชั้น ผลการทดลองพบว่า สารละลายอีตีทีเอมีประสิทธิภาพชะล้างโลหะหนักในรูปที่ละลายน้ำได้ และรูปที่แลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่ารูปอื่น ๆ

**พิมพ์ชนก และคณะ (2555)** ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการล้างดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก(ตะกั่ว, ตะกั่วร่วมกับทองแดง, ตะกั่วร่วมกับนิกเกิล, ตะกั่วร่วมกับแคดเมียม, ตะกั่วร่วมกับสังกะสี) ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์กับอีตีทีเอ และโซเดียมอีตีทีเอที่ความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.15 โมลาร์ ผลการทดลองพบว่า การเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ไม่มีส่วนช่วยในการสกัดตะกั่ว และโลหะหนักชนิดอื่นๆ ออกมาดีขึ้น แต่เมื่อเติม 0.2 โมลาร์ อีตีทีเอกลับพบว่าสกัดตะกั่วออกมามากที่สุด 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ เมื่อสกัดโลหะหนักสังกะสี นิกเกิล ทองแดง และแคดเมียม โดยใช้ 0.2 โมลาร์ อีตีทีเอเพียงอย่างเดียว พบว่าสกัดโลหะหนักออกมาได้สูงสุด 43.65, 26.74, 75.47 และ 112.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. พีเอชมิเตอร์ (pH meter) ยี่ห้อ pH multi-parameter analyser c 860
2. เครื่องกลั่นพร้อมอุปกรณ์ (Distillation apparatus) ยี่ห้อ BUCHI Distillation Unit K-350
3. เครื่องอะตอมมิคแอปซฟชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ยี่ห้อ Shimadzu AA-680
4. ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) มาตรฐาน ASTM No. 1.152 H อ่านสเกลในหน่วยกรัมต่อลิตร
5. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ UH5300
6. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo
7. ชุดเครื่องย่อย (Digestion apparatus) บริษัท ไชแอนติฟิค โพรโมชัน จำกัด
8. เครื่องเขย่า (Shaker)
9. ครกหิน
10. ตะแกรงร่อนขนาด 70, 100 เมช
11. เครื่องกรองแบบลดความดัน
12. กระดาษกรองเบอร์ 5, 42
13. เดซิเคเตอร์ (Desicator)
14. ตู้อบ (Oven)
15. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ
16. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด รุ่น LT760GX บริษัท LEGA

### 3.1.2 สารเคมี

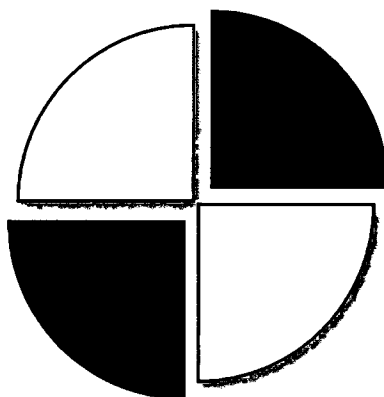
1. โพลีเอทิลีนไดโครเมท เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. เพอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอินเดีย
3. สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
4. บรูซีนฟัลเฟตแฮปต้าไฮเดรต เกรดวเคราะห์ บริษัท Acros Organics ประเทศเบลเยียม
5. เพอร์รัสซัลเฟต เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
6. สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
8. แอมโมเนียมออกซาลेट เกรดวเคราะห์ บริษัท Breaker ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. แอมโมเนียมคลอไรด์ เกรดวเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. ซิลเวอร์ไนเทรต เกรดวเคราะห์บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
11. เอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้น เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
12. โซเดียมคลอไรด์ เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
14. กรดบอริก เกรดวเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
15. โพลีเอทิลีนไฮโรเจนพทาเลต เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
16. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
17. โบรโมกรีซอลกรีน เกรดวเคราะห์ บริษัท Acros Organics ประเทศเบลเยียม
18. เมธิลเรด บริษัท Fluka chemika ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
19. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
20. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
21. สารละลายมาตรฐานแคดเมียม บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
22. ฟินานโทรลีน โมโนไฮเดรต เกรดวเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
23. โพลีเอทิลีนคลอไรด์ เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
24. เพอร์รัส ซัลเฟต เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
25. โซเดียม เฮกซะ เมต้า ฟอสเฟต เกรดวเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
26. โซเดียมคาร์บอเนตแอนไฮไดรด์ เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
27. กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอาเซติก เกรดวเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศเยอรมนี

## 28. น้ำกลั่น

### 3.2 แหล่งที่มาของดิน

ตัวอย่างดินที่ได้นำมาศึกษาได้จากตำบลห้วยบง อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี ที่ไม่ใช้ดินในพื้นที่อุตสาหกรรมเหมืองแม่ตาวเพราะว่าในพื้นที่บริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ห้ามบุคคลภายนอกเข้า-ออก ผู้จัดทำจึงนำดินบริเวณที่กล่าวมาข้างต้นใช้ในการทดลองเนื่องจากเป็นดินที่อยู่ในพื้นที่บ้านของผู้จัดทำ โดยจะทำการเก็บที่ระดับความลึกประมาณ 0-15 เซนติเมตร ทำการกำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่างดินโดยใช้เชือกทำเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 x 3 เมตรทำการขุดดินที่มุมทั้งสี่ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและจุดตัดของเส้นทแยงมุมรวมเป็น 5 จุด

จากนั้นใช้พลั่วขุดดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมประมาณ 15 เซนติเมตรให้ครบทั้ง 5 จุด นำดินมาเทรวมกันบนแผ่นพลาสติก คลุกเคล้าให้เข้ากัน กองดินรวมกันเป็นวงกลมแล้วทำการแบ่งเป็น 4 ส่วนให้เท่ากัน โดยเก็บดินตัวอย่างมาเพียงแค่ 2 ส่วนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 2.9 การสุ่มตัวอย่างดิน

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างดินและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของดิน

นำตัวอย่างดินที่เก็บมาผึ่งประมาณ 2 อาทิตย์ โดยเกลี่ยดินบนแผ่นพลาสติก ทำการแยกกรวดหินออกจากดิน หลังจากดินแห้งแล้ว นำมาบดด้วยครกหินและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 10 เมช (2 มิลลิเมตร) เก็บตัวอย่างดินที่ผ่านการบดและร่อนแล้วใส่ในถุงซิปล็อค เขียนฉลากบนถุงซิปล็อคและทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินต่อไปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของดิน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์ / เครื่องมือ
ค่าพีเอช	pH meter 1:5 (soil:water)
ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter 1:5 (soil:water)
การหาปริมาณอนุภาคทราย ซิลต์ และเคลย์	เครื่องมือไฮโดรมิเตอร์
ปริมาณสารอินทรีย์ (%OM)	วิธีการ Walkley and Black
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC)	วิธีที่ทำให้ดินอิ่มตัวด้วยแอมโมเนียมอะซิเตรท
ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น	Atomic Absorption Spectrophotometer
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl method
การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช	ใช้น้ำยาสกัดโดยแอมโมเนียมอะซิเตรท
การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช	Bray II

### 3.4 การเตรียมดินสังเคราะห์แคดเมียม

นำดินตัวอย่าง 20 กิโลกรัมมาแบ่งใส่ถุง ถุงละ 1 กิโลกรัม เติมสารมาตรฐานแคดเมียมโดยสเปรย์เป็นละอองให้ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นนำมาเทลงใส่กระบะและคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำดินไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และบ่มทิ้งไว้ประมาณ 14 วัน โดยค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่เลือกมานั้นอยู่ในช่วงค่าความเข้มข้นของแคดเมียมในดินปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่แม่ตาว และค่าความเข้มข้นนี้เกินค่ามาตรฐานแคดเมียมตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดซึ่งกำหนดไว้ที่ 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

### 3.5 การเตรียมถ่านชีวภาพและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของถ่านชีวภาพ

#### ชีวภาพ

#### 1. ถ่านชีวภาพที่ทำมาจากหญ้าเนเปียร์แคะ

ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะได้รับความอนุเคราะห์จากดร.พินิจภณ ปิตุยะ นำมาจากศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี โดยเตรียมจากลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคะสด และผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

#### 2. ถ่านชีวภาพที่ทำมาจากกากขานอ้อย

นำกากขานอ้อยพันธุ์สุพรรณ 50 ที่ได้จากร้านขายน้ำอ้อยบริเวณแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ นำไปอบด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นผึ่งให้แห้งต่ออีก 1 วัน และนำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสโดยเตาเผาถ่านชีวภาพดังรูปที่ 3.2 ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 เตาเผาสำหรับเผาถ่านชีวภาพ

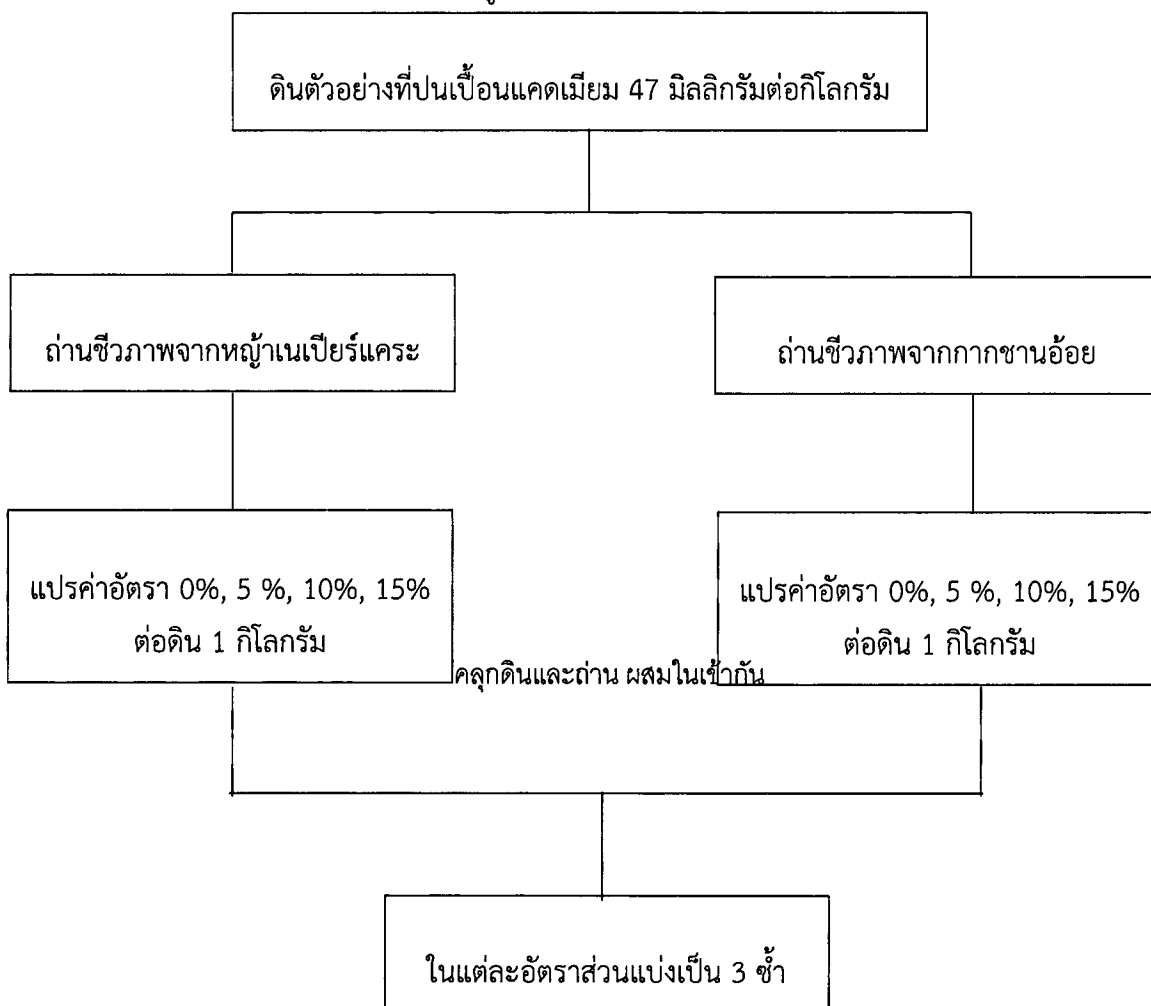
หลังจากทำการเผาถ่านชีวภาพและหั่นเป็นชิ้นแล้วให้นำถ่านที่ได้มาทำการบดด้วยครกหินและนำไปอบในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากอบเสร็จแล้ว ทำการร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช จะได้ขนาดของถ่านชีวภาพเป็น 0.21 มิลลิเมตร จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี ดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์ / เครื่องมือ
ค่าพีเอช	pH meter 1:5 (soil:water)
ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter 1:5 (soil:water)
พื้นที่ผิว	Surface area and porosity analyzer (BET)
ขนาดรูพรุน	Surface area and porosity analyzer (BET)
ปริมาตรรูพรุน	Surface area and porosity analyzer (BET)
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)
ปริมาณสารอินทรีย์ (%OM)	วิธีการ Walkley and Black
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC)	วิธีที่ทำให้ดินอิ่มตัวด้วยแอมโมเนียมอะซิเตรท
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl method
การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช	ใช้น้ำยาสกัดโดยแอมโมเนียมอะซิเตรท
การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช	Bray II
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ	Scanning Electron Microscope

### 3.6 การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์แคดเมียมผสมกับถ่านชีวภาพ

ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์แคดเมียมผสมถ่านชีวภาพ

### 3.7 การศึกษาหาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพ

จากรูปที่ 3.3 นำตัวอย่างดินที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 0 (ชุดควบคุม), 5, 10 และ 15 % ที่บ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 2 อาทิตย์ นำมาวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ด้วยวิธีการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) โดยใช้สารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (ธรรมนัญญา, 2550) เป็นตัวสกัดโดยปริมาณแคดเมียมที่ได้จะอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ และวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม โดยใช้ เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

วิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในรูปที่ดูดซึมได้โดยพืชในดิน ด้วยวิธีสกัดด้วยสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 M (ธรรมนัญญา, 2550)

นำตัวอย่างดินที่ใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 5, 10 และ 15 % มาชั่ง 1.0000 กรัม แล้วเติมสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ 30 มิลลิลิตร และนำไปเขย่าในเวลา 2 ชั่วโมง โดยความเร็ว 175 รอบต่อนาที กรองสารละลายออกด้วยวิธีกรองแบบสุญญากาศ เก็บส่วนใสและใส่กรดไนตริกปริมาณ 2 ใน 3 ของสารละลายใส นำบรรจุใส่ขวดพลาสติกใส เพื่อรอวิเคราะห์หาความเข้มข้นและปริมาตรของแคดเมียมที่เหลือในสารละลายโดยใช้เครื่อง อะตอมมิกแอ็บซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

นำข้อมูลที่ได้นำมาหาร้อยละและความสามารถในการดูดซับ ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 (เกษราพร และโกวิทย์, 2555)

เปอร์เซ็นต์การดูดซับ และความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในดินด้วยถ่านชีวภาพที่มาจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากขานอ้อย

เปอร์เซ็นต์การดูดซับ ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\% \text{การดูดซับ} = \frac{(C_0 - C_e)}{W} \times 100 \dots \dots \dots (3.1)$$

$C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_e$  = ความเข้มข้นที่สมดุลของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความสามารถในการดูดซับ ดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{W} \times V \dots \dots \dots (3.2)$$

$q_e$  = ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$V$  = ปริมาณของแคดเมียม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$W$  = น้ำหนักของถ่านชีวภาพ (กรัม)

### 3.8 ศึกษาการปลดปล่อยแคดเมียมหลังผสมถ่านชีวภาพ ในกรณีการชะด้วยน้ำที่สภาวะกรด-เบส

1. นำดินที่ผสมถ่านชีวภาพในอัตรามาซึ่งน้ำหนัก 2.5000 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ 125 มิลลิลิตร
2. กรณีที่ทำการชะด้วยน้ำที่สภาวะเบส นำดินที่ผสมถ่านชีวภาพที่ซึ่งมาใส่น้ำประปาที่มีค่าพีเอช 8 ในปริมาณ 20 มิลลิลิตร และสำหรับกรณีที่ทำการชะด้วยน้ำที่สภาวะกรด นำดินที่ผสมถ่านชีวภาพที่ซึ่งมาใส่กรดไนตริกเจือจางที่มีค่าพีเอช 5 ในปริมาณ 20 มิลลิลิตร
3. จากข้อ 2 นำตัวอย่างไปเขย่า ที่ความเร็วต่อรอบ 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง
4. จากนั้นนำตัวอย่างมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
5. นำไปวิเคราะห์หาปริมาณและความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ทันที

### 3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ และทดสอบความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ทดสอบข้อมูลด้วย ANOVA โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชนิดของพืชที่นำมาใช้ผลิตเป็นถ่านชีวภาพ โดยใช้โปรแกรม MINITAP version 18

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของถ่านชีวภาพระหว่างหญ้าเนเปียร์แคระและกากชานอ้อย โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย Scanning Electron Microscope (SEM), Surface area and porosity analyzer (BET) และการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆของการดูดซับแคดเมียมจากถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระและกากชานอ้อย ได้แก่ ศึกษาการสกัดปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้โดยพืชด้วยสารละลาย EDTA, ปริมาณของตัวดูดซับ, ศึกษาการปลดปล่อยของแคดเมียมหลังผสมถ่านชีวภาพ ในกรณีการชะด้วยน้ำที่สภาวะกรด-เบส

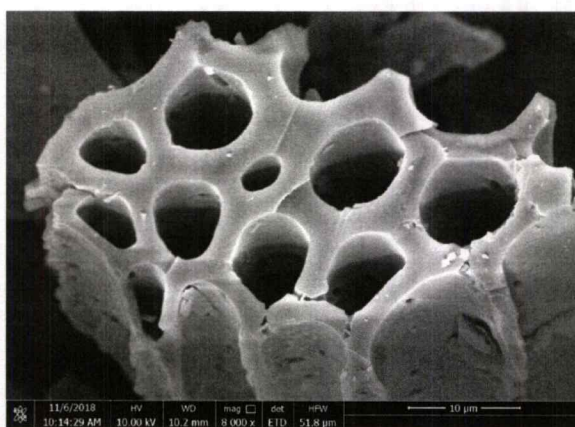
#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมี

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

นำถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระและกากชานอ้อยบดให้เป็นผงละเอียด ร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 70-100 เมช ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพสามารถตรวจวัดได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ด้วยกำลังขยาย 8,000 เท่า ดังรูป 4.1 (ก) ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ จะมีลักษณะพื้นที่ผิวขรุขระเล็กน้อย รูพรุนที่ปรากฏจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยม และเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย ดังรูป 4.1 (ข) รูพรุนจะมีลักษณะที่เป็นวงกลม ลักษณะพื้นที่ผิวค่อนข้างเรียบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ จากกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วยกำลังขยาย 8,000 เท่า

(ก) หญ้าเนเปียร์แคระ

(ข) กากชานอ้อย

โครงสร้างของถ่านชีวภาพที่มีลักษณะดังกล่าวเหมาะสมต่อการนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากเป็นแหล่งสะสมอาหารและความชื้นในดิน และเป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ในดินด้านการเป็นที่อยู่อาศัย ยิ่งถ่านชีวภาพที่มีผิวสัมผัสมากซึ่งมีลักษณะเป็นประจุลบบริเวณผิวสัมผัส จะส่งผลให้เพิ่มการแลกเปลี่ยนประจุในดินกับธาตุที่มีประจุบวก กันยาพร และสิทธิบุรณ์ (2559) โดยถ่านชีวภาพมีขนาดเล็ก มีพรุนมาก และมีพื้นที่ผิวเป็นจำนวนมากจะช่วยให้การดูดซับสารได้ปริมาณมากขึ้น เดชา (2552)

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Surface area and porosity analyzer (BET)

นำถ่านชีวภาพหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย มาศึกษาหาขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพ วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity

Analyzer (BET) ซึ่งใช้หลักการการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่าง เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะมีค่าของขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนที่มีค่ามากกว่าถ่านชีวภาพจากกากขานอ้อย ซึ่งผลจะแสดงดังตารางที่ 4.1

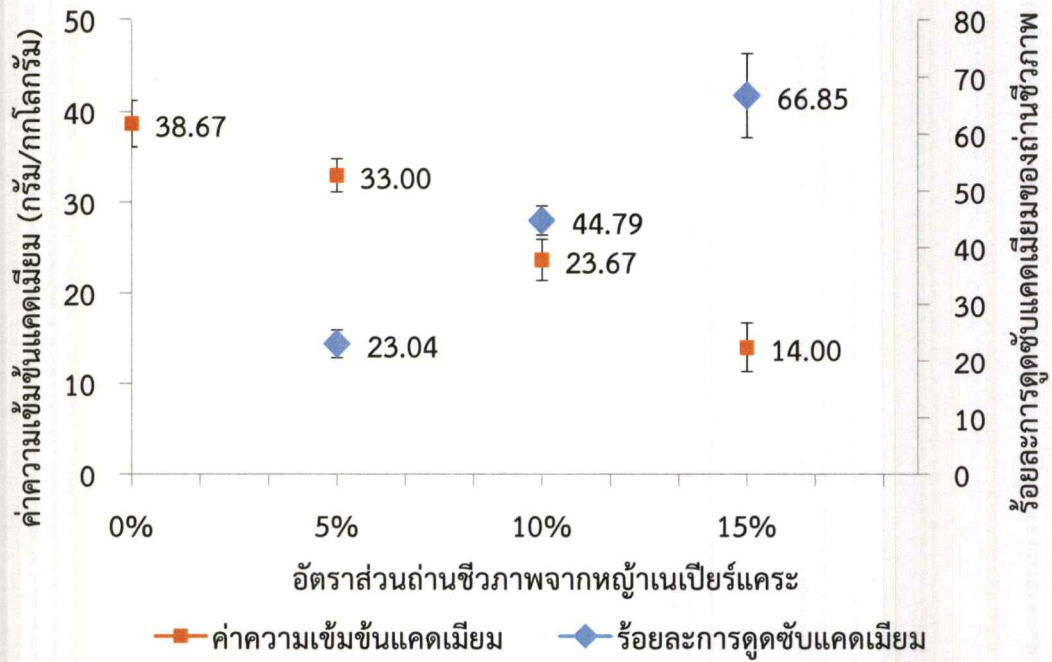
**ตารางที่ 4.1** ผลการทดสอบของการวิเคราะห์ BET

	พารามิเตอร์	หญ้าเนเปียร์แคะ	กากขานอ้อย
ผลการวิเคราะห์	BET Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	11.6797	3.0440
	Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	0.0193	0.0033
	Pore Size (Å)	66.2770	43.7291

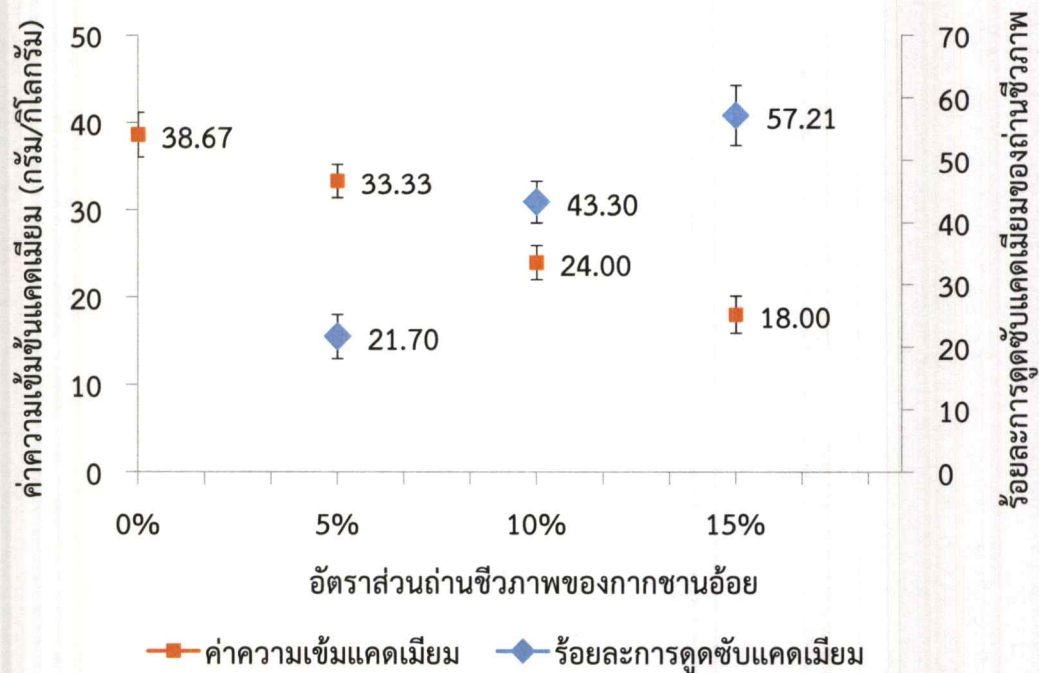
## 4.2 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆของตัวดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์

### 4.2.1 ศึกษาการสกัดแคดเมียมด้วยสารละลาย EDTA

ผลการวิเคราะห์หาแคดเมียมในดินสังเคราะห์ด้วยการสกัดแบบขั้นตอนนี้ (Single-step extraction) เพื่อหาปริมาณแคดเมียมในรูปแบบที่ดูดซึมได้โดยพืช โดยใช้สารละลาย EDTA ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เป็นตัวสกัด ซึ่งค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ได้จากดินสังเคราะห์แคดเมียมที่มีการผสมของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาร้อยละและความสามารถในการดูดซับ ดังรูป 4.2, 4.3 (ก) และถ่านชีวภาพชีวภาพจากกากขานอ้อย ดังรูป 4.2, 4.3 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ค่าความเข้มข้นของแคตเมียม และร้อยละการดูดซับแคตเมียมของถ่านชีวภาพหญ้าเนเปียร์แคระ และกากขานอ้อย เมื่อใช้ถ่านชีวภาพ 5%, 10% และ 15% ต่อปริมาณดินสังเคราะห์แคตเมียม 1 กิโลกรัม ที่ความเข้มข้น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(ก) หญ้าเนเปียร์แคระ

(ข) กากขานอ้อย

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 พบว่าดินที่บำบัดด้วยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อยในอัตราส่วน 5%, 10% และ 15% มีค่าความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 33.00, 23.67, 14.00 กรัมต่อกิโลกรัม และ 33.33, 24.00, 18.00 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยที่ดินชุดควบคุมที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพจะมีความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดออกมีค่า 38.67 กรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของแคดเมียมจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ของ Puga, *et al.* (2015) เมื่อทำการเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพ ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมก็จะลดลงเป็นเชิงเส้นตรง จึงสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพสามารถช่วยลดปริมาณโลหะหนักในดินได้ และเมื่อนำค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ได้จากการสกัดเทียบกับค่ามาตรฐานแคดเมียมที่ 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรม และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการนอกเหนือจากการอยู่อาศัย และเกษตรกรรม ตามลำดับ โดยกรมควบคุมมลพิษ พบว่าค่าความเข้มข้นที่ได้มีค่าของแคดเมียมไม่เกินตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้

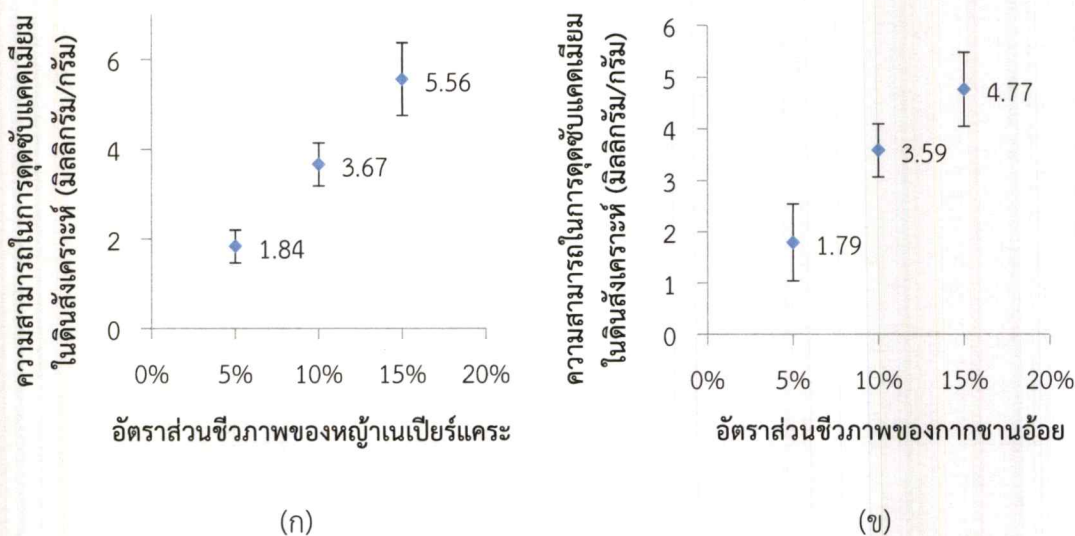
จากข้อมูลค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกสกัดมาข้างต้น จึงได้มีการหาค่าร้อยละการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์ของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระและกากชานอ้อยต่อ ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการดูดซับ และค่าอัตราส่วนถ่านชีวภาพทั้งสองชนิด เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ANOVA ที่ความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) จะพบว่า ค่าร้อยละการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วน แต่ถ้าหากกล่าวถึงค่าร้อยละการดูดซับของถ่านชีวภาพที่อัตราส่วนเดียวกัน แต่ต่างกันที่ชนิดของถ่านชีวภาพ เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ANOVA ที่ความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) จะพบว่า ค่าร้อยละการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ในอัตราส่วนเดียวกัน

จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละการดูดซับของถ่านชีวภาพจากเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อยที่อัตราส่วน 15% มีค่าร้อยละการดูดซับที่ดีที่สุดจากการทดลองนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 66.85% และ 57.21% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กุลธิดา (2557) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด กะลามะพร้าว เมล็ดลำไย ผลการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนที่ระดับตัวดูดซับสูงสุด มีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยจะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ อีกทั้งยังขึ้นกับลักษณะ ขนาดรูพรุน และชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็นถ่านชีวภาพอีกด้วย

#### 4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของถ่านชีวภาพที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียม

ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์ได้มีการแปรค่าอัตราส่วนของถ่านชีวภาพเป็นเท่ากับ 5%, 10% และ 15% ต่อน้ำหนักดิน

1 กิโลกรัม โดยแสดงผลการศึกษาความสามารถการดูดซับแคดเมียมในดินที่บำบัดด้วยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และถ่านชีวภาพชีวภาพจากกากขานอ้อย ดังรูปที่ 4.3 (ข) ที่ได้จากการสกัดแคดเมียมด้วยสารละลาย EDTA



รูปที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากขานอ้อย เมื่อใช้อัตราส่วนถ่านชีวภาพ 5%, 10% และ 15% ต่อปริมาณดินสังเคราะห์แคดเมียม 1 กิโลกรัม ที่ความเข้มข้น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(ก) หญ้าเนเปียร์แคระ (ข) กากขานอ้อย

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพ และอัตราส่วนถ่านชีวภาพทั้งสองชนิด เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ANOVA ที่ความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) จะพบว่า ที่อัตราส่วนที่ต่างกันความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากขานอ้อยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งทั้งถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากขานอ้อยมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ โดยจากผลการทดลองพบว่า ความสามารถการดูดซับของถ่านชีวภาพจากเนเปียร์แคระ และกากขานอ้อยที่อัตราส่วน 5, 10, 15% มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.84, 3.67, 5.56, 1.79, 3.59, และ 4.77 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยกุลธิดา (2557) ที่ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพโดยที่อัตราส่วนถ่านชีวภาพสูงที่สุดในการทดลองมีประสิทธิภาพการดูดซับมากที่สุด

#### 4.3 ศึกษาการปลดปล่อยแคดเมียมหลังผสมถ่านชีวภาพ ในกรณีการชะด้วยน้ำที่สภาวะกรด-เบส

ผลการวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยแคดเมียมในดินสังเคราะห์หลังผสมถ่านชีวภาพโดยกรณีศึกษาจะเป็นการจำลองการชะของน้ำที่สภาวะกรดและเบส ที่มีค่าพีเอช 5 และ 8 ตามลำดับ พบว่าค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ตรวจวัดได้ทั้งในสภาวะกรดและเบส ในทุกอัตราส่วนของถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดมีค่าความเข้มข้นแคดเมียมที่น้อยมากจนเครื่องวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจวัดได้ซึ่งเป็นไปได้ว่าดินจะดูดซับแคดเมียมเอาไว้เนื่องจากดินมีคุณสมบัติของการดูดซับเช่นกัน

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมในดินปนเปื้อนโดยบำบัดด้วยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ แคระ และกากชานอ้อย ซึ่งทำการสังเคราะห์ดินด้วยสารละลายแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 47 mg/kg วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพพบว่าขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าที่มากกว่ากากชานอ้อย และการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่ดูดซับได้โดยพืชด้วยการสกัดแคดเมียมด้วยสารละลาย EDTA 0.05 M. ซึ่งอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการทดลองคืออัตราส่วน 15% ที่มีค่าร้อยละในการดูดซับของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย มีค่าเท่ากับ 66.58% และ 57.21% ตามลำดับโดยประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับปริมาณของถ่านชีวภาพ ลักษณะ ขนาดรูพรุน และ ชนิดวัสดุที่นำมาทำเป็นถ่านชีวภาพ ดังนั้นอัตราส่วนหรือปริมาณของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดูดซับก็จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ANOVA ที่ความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ได้ทำการการจำลองสถานการณ์เป็นน้ำฝนสภาวะต่างๆ การปลดปล่อยของแคดเมียมในดินที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านชีวภาพที่ทำจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อยแล้วในกรณีการชะน้ำที่สภาวะกรดและเบสผลทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของแคดเมียมมีค่าน้อยมากทั้งสองกรณี

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพ เช่น ค่า BI,  $\text{pH}_{(zpc)}$
2. ศึกษาความสามารถในการดูดซับของโลหะหนักชนิดอื่น ด้วยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ และกากชานอ้อย
3. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์ โดยการเพิ่มการแปรค่าอัตราส่วนของถ่านชีวภาพขึ้น
4. ศึกษาการนำถ่านชีวภาพจากพืชชนิดอื่นๆ ในการดูดซับโลหะหนัก
5. ศึกษาการเจริญเติบโตของพืช และการตกค้างของโลหะหนักในพืชโดยใช้ดินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยถ่านชีวภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. 2559. แหล่งแร่ตะกั่ว แร่สังกะสี อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี. กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมอนามัย และกรมควบคุมโรค. 2558. แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยง กรณีเหมืองแร่ทองคำ. กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2554. การทำเหมืองแร่. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : ประชาชน.2552.
- กองอาหารสัตว์. 2561. **หญ้าเนเปียร์กระจายพันธุ์ด้วยเมล็ดได้?** [Online]. Available : [http://www.dld.go.th/nutrition/Nutrition\\_Knowledge/ARTICLE/Pro10.htm](http://www.dld.go.th/nutrition/Nutrition_Knowledge/ARTICLE/Pro10.htm).
- กัญญกุลณัช คำปวง, พลยุทธ สุขสมิติ สมชัย, ลาภอนันต์ นพคุณ, ยุทธดนัย ยอดทองดี และชนกานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย. 2559. “การตอบสนองของผลผลิตในข้าว 3 พันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีปริมาณแคดเมียมแตกต่างกัน”. *วารสารแก่นเกษตร*, 44(3), 409-416.
- การประปานครหลวง. 2561. **โลหะหนักในน้ำ**. [Online]. Available : [https://www.mwa.co.th/ewt\\_dl\\_link.php?nid=509](https://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=509).
- กุลธิดา สะอาด. 2557. “ประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- เกษราพร สุอรุณ และโกวิทย์ ปิยะมังคลา. 2555. “จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน.” *วารสารวิทยาศาสตร์ มช*, 40(4), 1285-1300.
- คมสรรร ศิริติกุล และปนัดดา รุจะศิริ. 2547. “การล้างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้สารละลายโซเดียมอิตีทีเอ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาคเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- คะนิงนิจ นิชานนท์ และฉันทนา ผดุงเทศ. 2548. “การจัดการปัญหาผลกระทบต่อสุขภาพจากสิ่งแวดล้อม : กรณีแคดเมียมที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก” *วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม*. 28(3) : 39-46.
- คุณากร สิ้นทพวงศ์. 2554. “Cadmium” กรุงเทพฯ : มูลนิธิสมาอาชีวะ.

- เครือข่ายคุ้มครองผู้บริโภคภาคใต้. 2552. **กรณีศึกษา การปนเปื้อนตะกั่วของลำห้วยคลิตี้**. [Online]. Available : <http://consumersouth.org/paper/303>.
- จันทร์เพ็ญ ชูประภาวรณ. 2537. **ปัญหาพิษสารหนู อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช**. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยสาธารณสุข มูลนิธิสาธารณสุขแห่งชาติ.
- ชมพูนุท ไชยรักษ์. 2560. **การจัดการสารเคมีและของเสีย**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี สาขา เคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เชมชิต ธนาภิชาตเจริญ, นางนาถ เมฆรังสีมันต์ และสุรชัย ศิลามณีโชติ. 2551. “ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม” กรุงเทพฯ : กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- ดวงกลม วิรุฬห์อุดมผล และรัชนีกร มิ่งขวัญ, (ผู้รวบรวม). 2548. **โลหะหนัก**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยมหิดล.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. **กระบวนการดูดซับ**. พิมพ์ครั้งที่ 1.บริษัท ส.เอเชียเพลส (1989) จำกัด : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนภัทร ปลื้มพวง, จันทร์จรัส วีรสาร, อรุณศิริ กำลัง และธงชัย มาลา. 2558. “ในการปนเปื้อนแคดเมียมในดินและการสะสมในผลผลิตข้าวบนพื้นที่ตำบลแม่ตาว และตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.” *วารสารเกษตรพระวรุณ*, 12(1). 1-8.
- ธรรมณัญญา ศักดิ์เจริญ. 2550. “การดูดซึมได้ของแคดเมียมและสังกะสีในพื้นที่การเพาะปลูกอ้อยที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม , จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธวัชชัย ธาณี, เพ็ญแข ธรรมเสนานุภาพ, รุ่งลาวัลย์ สุ่มมูล และอรุณรัตน์ ฉวีราช. 2560. “การสะสมทางชีวภาพของโลหะหนักในน้ำ ตะกอนดิน และปลาในอ่างเก็บน้ำห้วยแก่ง อำเภอตอนจาง จังหวัดกาฬสินธุ์”. *วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม*, 13(1), 6-19.
- ธัญญาภรณ์ สุรภักดี. 2553. “ผลกระทบกรณีเหมืองแร่กับมาตรา 67 : โอกาสของการเรียนรู้” กรุงเทพฯ : มูลนิธินโยบายสุขภาพ.
- นุศราพร เกษสมบุรณ์. 2560. **ลดความเสี่ยงจากพิษตะกั่ว และแคดเมียม ด้วยอาหารปลอดสารพิษ**. [Online]. Available : <https://m.mgronline.com/qo/detail/9600000103014>.

- บริษัท อัครา รีซอร์สเซส จำกัด (มหาชน). บริษัท อัครา รีซอร์สเซส จำกัด (มหาชน). [Online]. Available : <http://www.akararesources.com/upload/20140909-akara-factsheet.pdf>.
- เบญจวรรณ นิลวงศ์ และกรรณิการ์ แก้วกิม. 2559. “การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์และตัวดูดซับทางชีวภาพ.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*, 2(2): 1-10.
- พดาร์ตัน นิลเจียรนัย. 2548. “ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แผ่นไคโตซาน.” หน้า.112-120 ใน รายงานสืบเนื่องจากการประชุมสัมมนาวิชาการนำเสนองานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ (Proceedings) เครือข่ายบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ ครั้งที่ 15. นครสวรรค์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.
- พรพรรณ พนาปวุฒิกุล. 2561. โลหะหนัก : ตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม. [Online]. Available : <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=7>.
- พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์. 2560. “การพัฒนาและฟื้นฟูดินทรายในเขตเงาฝนด้วยถ่านชีวภาพ.” *วารสารวิจัยและพัฒนาวิจัยและพัฒนาวลัยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 12(3). 27-38.
- พินิจภณ ปิตุยะ. 2557. ถ่านชีวภาพ. [Online]. Available : <http://www.huaysaicenter.org>.
- พิมพ์ชนก แพงไตร วราลี ตริรัตน์กุลพร และโสภิตา วรรณบวร. 2555. “การกำจัดโลหะตะกั่วออกจากดินปนเปื้อนโดยการล้างดินด้วยสารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และโซเดียมอิตีทีเอ.” *วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาคเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, เกียรติคุณ รัตนาปนนท์ และนิธยา รัตนาปนนท์. Ethylene diamine tetra-acetic acid (EDTA). [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com>.
- โพสต์ทูเดย์. 2558. เผยพบโลหะหนักปนเปื้อนร่องเหมืองทองพิจิตร. [Online]. Available : <https://www.posttoday.com/social/general/346404>.
- มัลลิกา ภาบุตร. 2553. “การพัฒนาตัวดูดซับโลหะหนักและสีย้อมผ้าแทนถ่านกัมมันต์เชิงการค้า.” *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร*, 18(2), 17-27.
- มูลนิธิบูรณะนิเวศ. 2561. พิษสารหนูที่ร้อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช. [Online]. Available : <http://earththailand.org/th/pollution/22>.

- ยุทธพิชัย มากร. 2559. “การกำจัดเหล็กในน้ำด้วยถ่านจากซังข้าวโพด.” วิทยานิพนธ์ปริญญา  
 บัณฑิต, ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์  
 ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- วารสารณ ฤฉาย. 2551. “การฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อมด้วยพืช: phytoremediation.”  
 วารสารวิชาการราชภัฏตะวันตก. 3(1): 134-145.
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุพรรณบุรี. 2561. อ้อยคั้นน้ำ. [Online]. Available :  
[http://www.doa.go.th/ardc/suphan/sp50\\_GAP.htm](http://www.doa.go.th/ardc/suphan/sp50_GAP.htm).
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559. ถ่านไม้ ไบโอสชาร์ และถ่านกัมมันต์.  
 [Online]. Available : <http://stemforlife.ipst.ac.th>.
- สมชาย พิมพ์ธนประทีป. 2548. หญ้าเนเปียร์แคะ. [บทความวิทยุรายการสาระความรู้ทาง  
 การเกษตร].
- สำนักงานทางแพทย์. ม.ป.ป. แนวทางดำเนินการจัดทำมาตรฐานการแพทย์ทางเลือกคือเลชัน  
 บำบัด. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก.
- สิทธิชัย อินทร์ปนาม. 2558. “รูปของโลหะหนักตามความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน ที่สกัดด้วยวิธี  
 sequential extraction Heavy Metal Fractions in Sandy Loam Soil at Different  
 Concentrations of Metal by Sequential Extraction Method”. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
 ตรี ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สุนทร ใจแก้ว และศุภวัฒน์กร วงศ์ธนวุฒ. 2554. “แนวทางในการป้องกันและแก้ไขผลกระทบที่  
 เกิดขึ้นจากการผลิตกระแสไฟฟ้า.” วารสารบริหารท้องถิ่น. 4(4) ; 37-44.
- สุพัฒน์ บุตรดี, ปริญญาธิปไตย รัตน์บุรี, ประกิต ไชยธาดา, ผการัตน์ โรจน์ดวง และธารหทัย มาลาเวช.  
 2549. “การดูดซับโลหะหนักโดยใช้หญ้าแฝกและธูปฤาษี.” หน้า 1111 ใน โครงการ  
 ประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ‘ราชภัฏวิจัยครั้งที่ 4’(กลุ่มวิทยาศาสตร์และ  
 เทคโนโลยี). เพชรบุรี : มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.
- สมลทา วาจาบัณฑิตย์. โลหะ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์,  
 2549.
- อดิสร อิศรางกูร ณ อยุธยา. 2547. แร่ตะกั่วที่ห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี. กรุงเทพฯ : สถาบัน  
 บัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

- อดุลย์ ใจตาบุตร และจิตติศักดิ์ เปรมมณี. 2559. แหล่งแร่สังกะสี จังหวัดตาก. กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี.
- อุเทน จันละบุตร และภูวตล โกมณเทียร. 2559. “ปริมาณคาร์บอนสะสมในดิน ในพื้นที่เกษตรกรรม ในลุ่มน้ำชีตอนกลาง จังหวัดมหาสารคาม.” *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 34(1), 79-88.
- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Muhmood, A., Ur Rehman, M. Z., Ibrahim, M., Arshad, M. and Qayyum, M. F. 2017. “Biochar application increased the growth and yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil.” *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 148 ; 825-833.
- Bian, R. J., Chen, D., Liu, X., Cui, L., Li, L., Pan, G., Xia, D., Zheng, J., Zhang, X., Zheng, J. and Chang, A. 2013. “Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd tainted rice from China : Results from a cross-site field experiment.” *Ecological Engineering*. 58 : 378-383.
- Brendova, K., Tlustos, P. and Szakova, J. 2015. “Biochar immobilizes cadmium and zinc improves phytoextraction potential of willow plants on extremely contaminated soil.” *Plant Soil Environmental*. 61(7) : 303-308.
- Fernandes, R. B. A., Junior, I. A. C., Junior, E. S. R. and Mendonca, E. D. S. 2015. “Comparison of different methods for the determination of total organic carbon and humic substances in Brazilian soils.” *Revista Ceres*. 62(5) : 496-501.
- He, H. Z., Pan, J. J., Yu, P. F., Chen, G. K. and Li, H. S. 2016. “Effects of Hybrid Giant Napier Biochar on Cadmium Migration in a Cabbage-Soil System Contaminated with Cadmium and Butachlor.” *Polish Journal of Environmental Studies*. 26(2) : 619-625.
- Ishii, Y., Hamano, K., Kang, D. J., Idota, S. and Nishiwaki, A. 2015. “Cadmium phytoremediation potential of napiergrass cultivated in Kyushu, Japan.” *Applied and Environmental Soil Science*. 1-6.
- Puga, A.P., Abreu, C.A., L. C. A., Paz-Ferreiro, L. and Beesley, L. 2015. “Cadmium, lead, and zinc mobility and plant uptake in a mine soil amended with sugarcane straw biochar.” *Environmental Science and Pollution Research*. 22(22) : 17606-17614.

Ur Rehman, M. Z., Rizwan, M., Hussain, A., Saqib, M., Ali, S., Sohail, M. I., Shafiq, M. and Hafeez, F. 2018. "Alleviation of cadmium (Cd) toxicity and minimizing its uptake in wheat (*Triticumaestivum*) by using organic carbon sources in Cd-spiked soil." *Environmental Pollution*. 241 : 557-565.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### พารามิเตอร์และผลการทดลองของดินและถ่านชีวภาพ

#### ก.1 วิธีวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่างของดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

การวัด pH ในน้ำอัตราส่วน ดิน : น้ำ เท่ากับ 1:1 (w/w)

ชั่งดิน 20 กรัม ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้ว เป็นระยะๆ ให้บ่อยครั้งในระยะ 30 นาทีแรกหลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 30 นาที จึงวัดค่า pH ของดินในส่วนที่เป็นน้ำใสด้วยเครื่อง pH Meter หรือใช้ช้อนตวงตักดินและตวงน้ำแทนการชั่งดินเพื่อวัดค่า pH ก็ได้

#### หมายเหตุ

ในการทดลองใช้อัตราส่วน ดิน : น้ำ เท่ากับ 1 : 5 (w/w)

#### ตารางที่ ก.1 การแปลผล pH ของดินในน้ำ

ระดับ	ช่วง pH <sub>water</sub> , 1:1
กรดรุนแรงมากที่สุด	< 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.5 – 4.4
กรดจัดมาก	4.5 – 5.0
กรดจัด	5.1 – 5.5
กรดปานกลาง	5.6 – 6.0
กรดเล็กน้อย	6.1 – 6.5
เป็นกลาง	6.6 – 7.3
ด่างอ่อน	7.4 – 7.8
ด่างปานกลาง	7.9 – 8.4
ด่างจัด	8.5 – 9.0
ด่างจัดมาก	> 9.0

#### ก.2 วิธีวิเคราะห์การนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity, EC) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

การสกัดในอัตราส่วน ดิน : น้ำ เท่ากับ 1 : 5

ชั่งดิน 4 กรัม ในหลอดทดลองขนาด 40 มิลลิลิตร ใส่ น้ำ 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วเป็นระยะๆ นาน 30 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีแล้วจึงนำไปอ่านค่า EC โดยเครื่อง Electrical Conductivity meter โดยใช้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) 0.01 M หรือ 0.1 M ปรับค่าคงที่ของเครื่อง Electrical Conductivity meter ที่ 25 องศาเซลเซียส จะมีค่าเท่ากับ 1.412 dS/m หรือ 12.88 dS/m

ตารางที่ ก.2 การแปลผล การจำแนกค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเค็มของดินและผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช

ECe (mS/cm)	เกลือในดิน(%)	ระดับความเค็มของดิน	อิทธิพลต่อพืช
< 2	< 0.1	ไม่เค็ม	ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช
> 2 - 4	> 0.1 - 0.2	เค็มเล็กน้อย	มีผลต่อพืชที่ไม่ทนเค็ม
> 4 - 8	> 1.2 - 0.4	เค็มปานกลาง	จำกัดการเจริญเติบโตและมีผลผลิตของพืชหลายชนิด
> 8 - 16	> 0.4 - 0.8	เค็มมาก	พืชทนเค็มเท่านั้นที่เจริญเติบโต
> 16	> 0.8	เค็มจัด	พืชทนเค็มบางชนิดเท่านั้นที่เจริญเติบโต

ก.3 วิธีวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุของดิน (Walkley Black modified acid-dichromate digestion, FeSO<sub>4</sub> titration method) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. ชั่งดิน 1 กรัม ขวดใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ปริมาณตัวอย่างอาจลดลงได้ตามความเหมาะสม ถ้าดินนั้นมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง สังเกตได้จากสีของดิน ถ้าเป็นดินสีดำหรือสีน้ำตาลเข้มต้องชั่งดินให้ลดลง แต่ถ้ากรณีเป็นดินทรายต้องเพิ่มปริมาณดินให้มากขึ้นกว่าเดิม)
2. เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 1.0 N ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยใช้ Dispenser
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยใช้ Dispenser พยายามให้กรดไหลลงข้างๆขวดให้ชะล้างตัวอย่างลงไปอยู่ในขวดให้หมด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดดินเกาะติดอยู่ตามข้างขวด เขย่าเอาให้ตัวอย่างเข้ากันดีเป็นเวลาประมาณ 1 นาที
4. ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายเย็นถ้าอุณหภูมิห้อง
5. เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
6. หยดอินดิเคเตอร์ออร์โธฟีแนนโทรลีน 5 หยด
7. ไทเทรทด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 N ที่จุด end point สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง
8. ทำ blank โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 6

### หมายเหตุ

1. ในการทดลองใช้ปริมาณดิน 0.25 กรัมและ ใช้ปริมาณถ่านชีวภาพอ้อย,เนเปียร์ 0.05 กรัม
2. อินดิเคเตอร์ในการทดลองเปลี่ยนจากอินดิเคเตอร์ออร์โรฟีแนนโทรลีน เป็น อินดิเคเตอร์ BDS เพื่อมองเห็นสีของจุดยุติได้ง่ายขึ้น โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากน้ำตาลแดงเป็นสีเขียว

### ตารางที่ ก.3 การแปรผล ระดับอินทรีย์วัตถุ

ระดับ	พิสัย (ร้อยละ)
ต่ำมาก	< 0.5
ต่ำ	0.5 – 1.0
ค่อนข้างต่ำ	1.0 – 1.5
ปานกลาง	1.5 – 2.5
ค่อนข้างสูง	2.5 – 3.5
สูง	3.5 – 4.5
สูงมาก	> 4.5

### ก.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Cation Exchange Capacity, C.E.C) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. ชั่งดิน 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate,  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) 1 M pH 7.0 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี ทิ้งไว้ค้างคืน
2. นำมากรองโดยใช้กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ต่อเข้ากับขวดกรอง ใช้กระดาษกรอง Whatman No.5 จำนวน 1 แผ่น (หรือใช้ No.42 จำนวน 1 แผ่น หรือ No.1 จำนวน 2 แผ่น แทนกันได้) ล้างตัวอย่างดินด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7.0 ทีละน้อยหลายๆครั้งจนได้ปริมาตรเกือบ 100 มิลลิลิตร นำสารละลายที่กรองได้นี้ถ่ายใส่ขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเก็บไว้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ Exchangeable Cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  และ  $\text{K}^+$  ต่อไป
3. ล้างตัวอย่างดินในกรวยบุชเนอร์ในข้อ 2 ต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate,  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) 1 M pH 7.0 อีก 5 ครั้ง ครั้งละประมาณ 20 มิลลิลิตร
4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 1 M pH 7.5 ครั้ง ครั้งละประมาณ 20 มิลลิลิตร
5. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 0.25 M pH 7.0 ประมาณ 20 มิลลิลิตร 1 ครั้ง
6. ล้างด้วย Ethyl alcohol 95% อีก 5-6 ครั้ง ครั้งละประมาณ 20 มิลลิลิตร ทุกครั้งที่ล้างใช้กระบอกฉีด ฉีดตัวอย่างดินที่อาจติดค้างอยู่ที่ปากกรวยบุชเนอร์ให้ลงไปรวมอยู่ในกรวยให้หมด สารละลายที่ได้จากข้อ 3 - 6 เททิ้งไป (การล้างด้วยแอลกอฮอล์เพื่อล้างแอมโมเนียมส่วนเกินที่ดินไม่ได้แลกเปลี่ยนออกให้หมด ซึ่งทดสอบได้จากปริมาณคลอไรด์ไม่มีหลงเหลืออยู่ในดินโดยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{AgNO}_3$ ) 0.1 M จำนวน 1-2 หยด ลงในสารละลายที่รองรับมาจากกรวยบุชเนอร์ ตรงยังไม่ได้หยดลงสู่ขวดกรอง ถ้ามีตะกอนสีขาวเกิดขึ้นแสดงว่ายังล้างแอมโมเนียมไม่

หมด ต้องล้างตัวอย่างดินด้วย Ethyl alcohol 95% ต่อไปอีก แล้วทดสอบคลอไรด์ใหม่ตั้งที่กล่าวมาแล้วจนไม่มีตะกอนสีขาวนั้นแสดงว่าล้างแอมโมเนียหมดแล้ว)

7. เปลี่ยนขวดกรองใหม่สำหรับรองรับสารละลายใหม่ ล้างตัวอย่างดินที่ยังอยู่ในกรวยบุชเนอร์ ในข้อ 6 ด้วย acidified NaCl 10% แต่ครั้งที่ล้างให้ใส่สารละลาย NaCl ให้ท่วมตัวอย่างดินจนกระทั่งได้สารละลายที่กรองได้ประมาณ 300-350 มิลลิลิตร
8. ถ่ายได้สารที่กรองได้ใส่ขวดกลั่น ล้างขวดกรองด้วยน้ำกลั่นและเทน้ำที่ล้างรวมลงไปขวดกลั่น
9. นำขวดกลั่นไปกลั่น โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไปในขวดกลั่นให้มากเกินพอ (ประมาณ 30 มิลลิลิตร) สารละลายกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) 3% ประมาณ 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร คอยรองรับสารละลายที่กลั่นออกมาได้ และในสารละลายกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) นี้ใส่อินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator) ประมาณ 5 หยด ใช้เวลากลั่นประมาณ 40-45 นาที หรือจนกลั่นได้สารละลายประมาณ 250-275 มิลลิลิตร
10. นำสารละลายที่กลั่นได้ในขวดรูปชมพู่ที่รองรับไปไทเทรตกับสารละลายกรดเกลือ 0.1 N จุดยุติคือสีของอินดิเคเตอร์ในสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง บันทึกปริมาตรของกรดเกลือที่ใช้ไทเทรตแล้วนำมาคำนวณค่าCEC
11. นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) 10% ที่ใช้ล้างดินมาทำเป็น blank โดยทำเช่นเดียวกันกับตัวอย่างดิน

ตารางที่ ก.4 การแปรผลระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน

ระดับ	CEC (cmol/kg)
ต่ำมาก	< 5
ต่ำ	5 - 15
ปานกลาง	15 - 25
สูง	25 - 40
สูงมาก	> 40

### ก.5 วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจน (Total N) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

#### 1. การย่อยสลาย (digestion)

- 1.1 ชั่งตัวอย่างที่อบและบดละเอียดแล้ว 0.5-1.00 กรัม (ผ่านการอบที่ 65-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) บนกระดาษกรองและห่อใส่ใน Kjeldahl flask ขนาด 800 มิลลิลิตร หรือหลอดย่อย digestion tube ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารสำเร็จรูปอัดเม็ดจำนวน 2 เม็ด
- 1.2 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) 2 มิลลิลิตร ลงใน Kjeldahl flask หรือ 15 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้ว
- 1.3 ทำ Blank และตัวอย่างอ้างอิง (reference sample) โดยวิธีเดียวกัน
- 1.4 นำไปย่อยใน Kjeldahl digestion apparatus ใช้อุณหภูมิประมาณ 100-400 องศาเซลเซียส หรือ digestion block ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใสใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นเติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร หรือถ้าอุปกรณ์ในการย่อยเป็นหลอดแก้วเติมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร จนได้สารละลายใส

#### 2. การกลั่น (distillation)

- 2.1 เครื่อง Kjeldahl : ใส่สารละลายกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร หยด Mixed indicator 4-5 หยด นำไปวางรองรับ distillate จากเครื่องกลั่น โดยให้ปลายหลอดแก้วจุ่มอยู่ในสารละลายบอริก ( $H_3BO_3$ ) แล้วเติมสารละลายกรดโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaHO) (1:1) จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงใน Kjeldahl flask ที่มีสารละลายตัวอย่าง ทำการกลั่น (ประมาณ 1 ชั่วโมง) จนได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรต
- 2.2 เครื่องกลั่นสำหรับ Block : ใส่สารละลายกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร หยด Mixed indicator 4-5 หยด ในทำนองเดียวกันเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงในหลอดแก้วที่มีสารละลายตัวอย่างปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากเครื่องทำการกลั่นจนได้ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ใช้เวลาประมาณ 7-10 นาที แล้วนำไปไทเทรต

### ก.6 วิธีวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินโดยวิธี Bray II (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
  2. เติมน้ำยา Bray II 10 มิลลิลิตร เขย่า 1 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง No.5 ขนาด 11 เซนติเมตร
  3. ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ในข้อ 2 อัตราส่วน 1 ส่วนต่อ working solution 16 ส่วน (เท่ากับ 17 เท่า โดยใช้ Auto-dilutor) ลงในหลอดแก้ว ทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง นำไปอ่านค่าความเข้มข้น (concentration) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร
  4. ทำ blank และชุดของสารละลายมาตรฐาน (Standard set) เช่นเดียวกับข้อ 3
- หมายเหตุ ตัวอย่างมีการเจือจาง 10 เท่า

**ก.7 วิธีวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (Available Potassium) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)**

1. ชั่งดิน 2.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
  2. เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate,  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) 1 M. pH 7.0 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที
  3. กรองดินและ เก็บสารละลายที่กรองได้
  4. วิเคราะห์ปริมาณ ด้วยเครื่อง Flame spectrophotometer โดยเปรียบเทียบกราฟมาตรฐาน
- หมายเหตุ** ตัวอย่างถ่านชีวภาพกากขานอ้อยมีการเจือจาง 10 เท่า ตัวอย่างชีวภาพหญ้าเนเปียร์แคะมีการเจือจาง 100 เท่า

**ก.8 วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก (กรมทรัพยากรธรณี, 2543)**

1. ชั่งตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพ 1 กรัม ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น (conc.  $\text{HNO}_3$ ) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ปิดด้วยกระจกนาฬิกา
2. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $95 \pm 5$  องศาเซลเซียส (Reflux) โดยไม่ให้สารละลายเดือดเป็นเวลา 15 นาที ยกกลงทิ้งไว้ให้เย็น
3. เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น (conc.  $\text{HNO}_3$ ) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ให้ความร้อน 15 นาที ถ้ามีไอสีส้มอมน้ำตาลให้เติมกรดไนตริกเข้มข้น (conc.  $\text{HNO}_3$ ) ครั้งละ 5 มิลลิลิตร จนกระทั่งไม่มีไอสีส้มอมน้ำตาล แล้วทำการให้ความร้อนต่อจนเหลือสารละลาย 5 มิลลิลิตร หรือประมาณ 2 ชั่วโมง ยกกลงทิ้งไว้ให้เย็น
4. เติมน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร เติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ทีละ 1 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่เกิดฟอง (ไม่เกิน 10 มิลลิลิตร)
5. ให้ความร้อนจนเหลือสารละลาย 5 มิลลิลิตร หรือประมาณ 2 ชั่วโมง ยกกลงทิ้งไว้ให้เย็น
6. เติมสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc.  $\text{HCl}$ ) 10 มิลลิลิตร ให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 15 นาที
7. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman No.42) เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
8. หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

ก.9 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของดิน  
ตารางที่ ก.5 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีเบื้องต้นของดิน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ วิเคราะห์คุณสมบัติ ทางกายภาพและเคมี ของดิน
ค่าพีเอช	pH meter 1:5 (soil:water)	6.83
ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter 1:5 (soil:water)	1.61 (mS/cm)
การหาปริมาณอนุภาคทราย ซิลต์ และเคลย์	เครื่องมือไฮโดรมิเตอร์	Clay
ปริมาณสารอินทรีย์ (%OM)	วิธีการ Walkley and Black	13.11 %
ความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุ (CEC)	วิธีที่ทำให้ดินอิ่มตัวด้วย แอมโมเนียมอะซิเตรท	10.56
ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น	Atomic Absorption Spectrophotometer	ND
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl method	0.11 %
การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่ เป็นประโยชน์ต่อพืช	ใช้น้ำยาสกัดโดยแอมโมเนียมอะ ซิเตรท	26.4 mg/L
การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็น ประโยชน์ต่อพืช	Bray II	42.08 mg/kg

หมายเหตุ ND = Not Detection

ก.10 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ

ตารางที่ ก.6 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพ	
		กากชานอ้อย	หญ้าเนเปียร์แคะ
ค่าพีเอช	pH meter 1:5 (soil:water)	6.50	9.86
ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter 1:5 (soil:water)	6.47 (mS/cm)	160.33 (mS/cm)
พื้นที่ผิว	Surface area and porosity analyzer	3.0440 m <sup>2</sup> /g	11.6797 m <sup>2</sup> /g
ขนาดรูพรุน	Surface area and porosity analyzer	43.7291 A°	66.2770 A°
ปริมาตรรูพรุน	Surface area and porosity analyzer	0.003328 cm <sup>3</sup> /g	0.019352 cm <sup>3</sup> /g
ปริมาณสารอินทรีย์ (%OM)	วิธีการ Walkley and Black	33.65 %	16.73 %
ความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุ (CEC)	วิธีที่ทำให้ดินอิ่มตัว ด้วยแอมโมเนียมอะ ซิเตรท	17.58	18.61
ปริมาณไนโตรเจน ทั้งหมด	Kjeldahl method	0.22 %	0.07 %
การวิเคราะห์ โพแทสเซียมที่เป็น ประโยชน์ต่อพืช	ใช้น้ำยาสกัดโดย แอมโมเนียมอะ ซิเตรท	47.91 mg/L	112.1 mg/L
การวิเคราะห์ ฟอสฟอรัสที่เป็น ประโยชน์ต่อพืช	Bray II	19.74 mg/kg	66.85 mg/kg

## ภาคผนวก ข

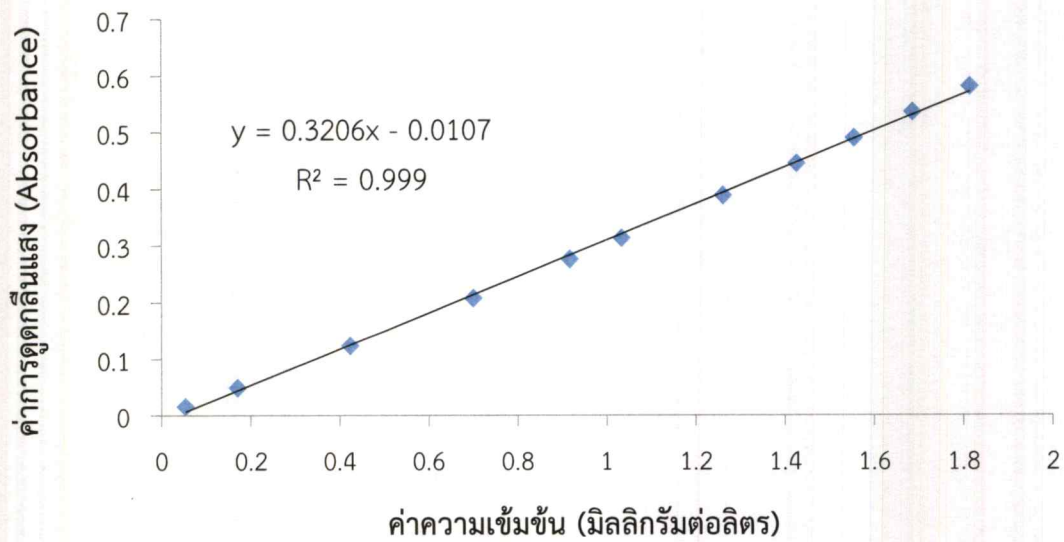
### กราฟมาตรฐานสารละลาย

#### ข.1 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายแคดเมียม

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาณ 10 มิลลิลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิลิตร มาปริมาณ 10 มิลลิลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาณ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ นำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
4. เก็บสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดพลาสติก และแช่ตู้เย็น รอนำไปวัดหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยเครื่องอะตอมมิคแอนาไลเซอร์พลาสมาสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

ตารางที่ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.1	0.0155
0.2	0.0490
0.4	0.1236
0.6	0.2078
0.8	0.2760
1.0	0.3133
1.2	0.3883
1.4	0.4442
1.6	0.4889
1.8	0.5349
2.0	0.5808



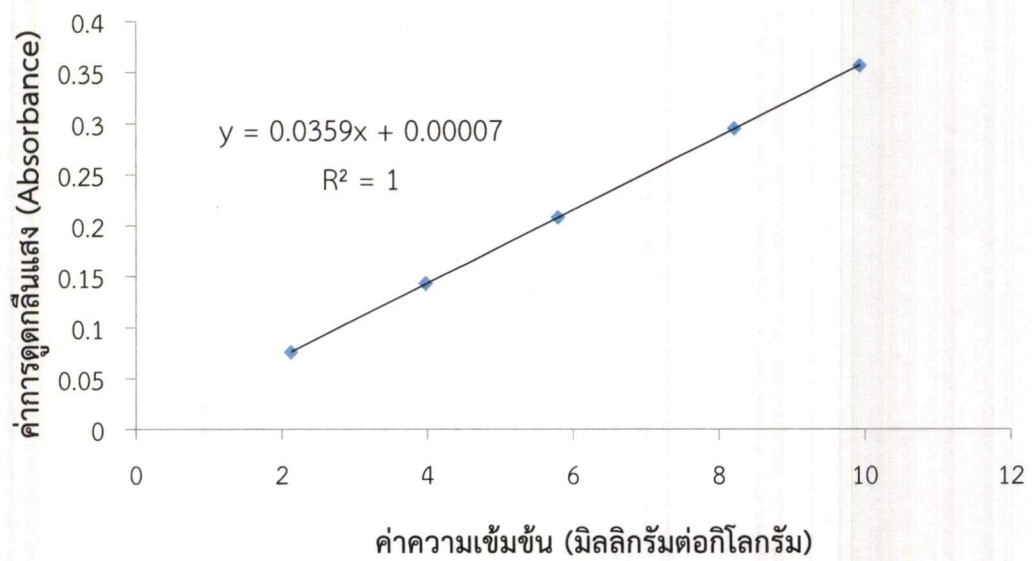
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายแคดเมียม

## ข.2 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายฟอสฟอรัส

1. นำสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง) จำนวน 0.2195 กรัม ละลายในน้ำกลั่นพอสมควร ปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริก 1-2 หยด จากนั้นนำไปปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ซึ่งจะได้สารละลายมาตรฐาน ฟอสฟอรัสเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
2. จากนั้นเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มาปริมาณ 2, 4, 6, 8, 10 และ 15 มิลลิลิตร ตามลำดับ นำมาเจือจางด้วยน้ำยาสกัดในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำไปวัดหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร

ตารางที่ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส

ค่าความเข้มข้น	ค่าการดูดกลืน
2	0.076
4	0.143
6	0.208
8	0.295
10	0.356



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอสฟอรัส

### ข.3 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียม

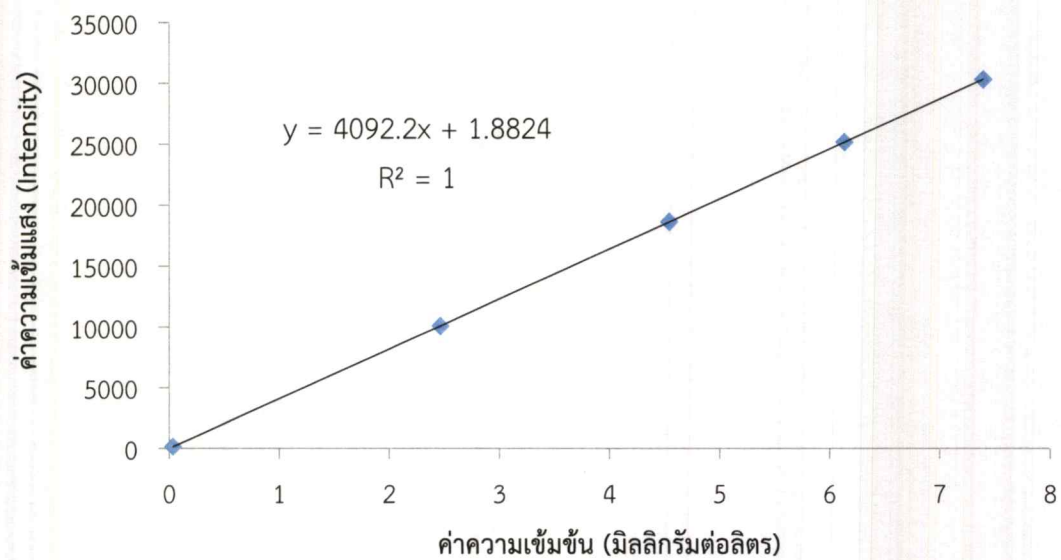
1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาณ 10 มิลลิลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาณ 10 มิลลิลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 0, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาณ 0, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิลิตร ตามลำดับ นำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
4. นำไปวัดหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยเครื่อง Flame spectrophotometer

#### หมายเหตุ

ในการทดลองนำสารละลายมาตรฐานวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

### ตารางที่ ข.3 ค่าความเข้มแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม

ค่าความเข้มข้น	intensity
0	141
2	10081
4	18601
6	25115
8	30268



รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียม

**ภาคผนวก ค**  
**ผลของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาอิทธิพล**  
**ของปัจจัยต่อการดูดซับแคดเมียม**

ค.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ที่สภาวะดุลโดยใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่อัตราส่วนต่างๆของถ่าน

ตารางที่ค.1.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของดินสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้น 47 ppm. และความเข้มข้นของดินสังเคราะห์แคดเมียมที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะที่อัตราถ่านชีวภาพ 5%, 10%, 15%

อัตราส่วนถ่านชีวภาพ	ความเข้มข้น (มิลลิลิตรต่อกิโลกรัม)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม ( $C_0$ ) (มิลลิลิตรต่อกิโลกรัม)	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ ( $C_e$ ) (มิลลิลิตรต่อกิโลกรัม)	$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5%	50	41.8590	34.4285	1.4618
			30.7967	2.1979
			32.3910	1.8586
10%	50	41.8590	20.8375	4.1718
			23.3055	3.6033
			25.1938	3.2297
15%	50	41.8590	17.7901	4.7576
			9.9940	6.3692
			13.8477	5.5413

ตารางที่ค.1.2 ค่าความชื้นเริ่มต้นของดินสังเคราะห์แคะเมียมและความชื้นของดินสังเคราะห์แคะเมียมที่ผ่านการการดูดซับแคะเมียมด้วยถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย ที่อัตราถ่านชีวภาพ 5%, 10%, 15%

อัตราส่วน ถ่านชีวภาพ	ความชื้น (มิลลิตรต่อ กิโลกรัม)	ความชื้นเริ่มต้น ของแคะเมียม ( $C_0$ ) (มิลลิตรต่อ กิโลกรัม)	ความชื้นของ แคะเมียมที่เหลือ ( $C_e$ ) (มิลลิตรต่อกิโลกรัม)	$q_e$ (มิลลิกรัมต่อ กรัม)
5%	50	41.8590	37.0082	0.9448
			29.8626	2.3883
			31.4589	2.0448
10%	50	41.8590	25.5604	3.2046
			24.7427	3.3880
			20.9038	4.1718
15%	50	41.8590	13.9804	5.5679
			18.8492	4.5654
			20.8997	4.1718

ค.2 ผลต่อการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์ ด้วยถ่านชีวภาพในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ค.2.1 ผลต่อการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์เข้มข้น 47 มิลลิตรต่อกิโลกรัม ด้วยถ่านชีวภาพหญ้าเนเปียร์แคะ ที่อัตราส่วน 5%, 10%, 15% หรือเท่ากับน้ำหนักถ่านชีวภาพ 50, 100, 150 กรัม ตามลำดับ โดยตารางจะแสดงค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ

ขวดที่	อัตราส่วน ถ่านชีวภาพ	ค่าความเข้มข้น ที่วัดได้ (mg/kg)	น้ำหนักดิน และถ่าน (g)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (mg/g)
Blank	-	41.8560	-	-	-
1	5%	34.4285	1.0166	23.04	1.84
2		30.7967	1.0066		
3		32.3910	1.0188		
1	10%	20.8375	1.0078	44.79	3.67
2		23.3055	1.0298		
3		25.1938	1.0320		
1	15%	17.7901	1.0118	66.85	5.56
2		9.9940	1.0008		
3		13.8477	1.0110		

ตารางที่ 2.2 ผลต่อการดูดซับแคดเมียมในดินสังเคราะห์เข้มข้น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ด้วยถ่านชีวภาพจากชานอ้อย ที่อัตราส่วน 5%, 10%, 15% หรือเท่ากับ 50, 100, 150 กรัม ตามลำดับ โดยตารางจะแสดงค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ

ขวดที่	อัตราส่วน ถ่านชีวภาพ	ค่าความเข้มข้น ที่วัดได้ (mg/kg)	น้ำหนักดิน และถ่าน (g)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (mg/g)
Blank	-	41.8560	-	-	-
1	5%	37.0082	1.0268	21.70	1.79
2		29.8626	1.0046		
3		31.4589	1.0172		
1	10%	25.5604	1.0172	43.30	3.59
2		24.7427	1.0104		
3		20.9038	1.0046		
1	15%	13.9804	1.0014	57.21	4.77
2		18.8492	1.0080		
3		20.8997	1.0048		

## ภาคผนวก ง

### การคำนวณ

#### ง.1 การเตรียมดินสังเคราะห์แคดเมียม

การคำนวณการเตรียมสารละลาย Stock ( $\text{Cd}^{2+}$ ) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

หาปริมาตรของสารละลาย Stock  $\text{Cd}^{2+}$  ที่ใช้ โดยเตรียมจาก Stock  $\text{Cd}^{2+}$  เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{จากสูตร} \quad C_1V_1=C_2V_2$$

$C_1$  = ความเข้มข้นสารละลายก่อนเจือจาง (มิลลิกรัมต่อลิตร : mg/L)

$C_2$  = ความเข้มข้นสารละลายหลังเจือจาง (มิลลิกรัมต่อลิตร: mg/L)

$V_1$  = ปริมาตรสารละลายก่อนเจือจาง (มิลลิลิตร mL)

$V_2$  = ปริมาตรสารละลายหลังเจือจาง (มิลลิลิตร mL)

$$1,000 \text{ mg/L} \times V_1 = 50 \text{ mg/L} \times 1,000 \text{ mL}$$

$$V_1 = 50 \text{ mL}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลาย Stock  $\text{Cd}^{2+}$  ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการปิเปิดจากสารละลาย Stock  $\text{Cd}^{2+}$  ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตรหรือ 1 ลิตร

เนื่องจากความเข้มข้นที่เราต้องการคือ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงทำการแปลงหน่วยจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดย

$$50 \text{ mg/L} \times 1,000 \text{ mL} = 50 \text{ mg/kg}$$

$$1 \text{ kg.} \times 1,000 \text{ ml}$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรจึงเท่ากับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

#### ง.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ (NaOH 0.1 N)

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

โดยมวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 39.997 g/mol

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{g}{\text{MW}} &= \frac{CV}{1,000} \\ \frac{g}{39.997 \text{ g/mol}} &= \frac{0.1 \text{ M} \times 1,000 \text{ mL}}{1,000} \end{aligned}$$

$$g = 3.9997 \text{ g}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 3.99 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

### ง.3 สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (KHP 0.1 N)

เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยมวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทเท่ากับ 204.22 g/mol

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{g}{MW} &= \frac{CV}{1,000} \\ \frac{g}{204.22 \text{ g/mol}} &= \frac{0.1 \text{ M} \times 100 \text{ mL}}{1,000} \\ g &= 2.04 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทจำนวน 2.04 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร

#### ง.4.1 ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์

โดยทำการไทเทรตระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท อินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ ฟีนอล์ฟทาลีน

ตารางที่ ง.1 ค่าปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

ตัวอย่าง	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
1	21.00
2	21.00
3	21.00
เฉลี่ย	21.00

ดังนั้น เมื่อน้ำหนักของ KHP เท่ากับ 2.04 g มีค่า 0.1456 N ปริมาตร KHP ที่ใช้เท่ากับ 20 mL

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad N_1V_1 (\text{KHP}) &= N_2V_2 (\text{NaOH}) \\ 0.1456 \text{ N} \times 20 \text{ mL} &= N_2 \times 21.00 \text{ mL} \\ N_2 &= 0.1387 \text{ N} \end{aligned}$$

#### ง.4.2 ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl)

โดยทำการไทเทรตระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรคลอริก อินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ ฟีนอล์ฟทาลีน

ตารางที่ ง.2 ค่าปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไฮโดรคลอริก

ตัวอย่าง	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
1	17.00
2	17.00
3	17.00
เฉลี่ย	17.00

$$\text{จากสูตร} \quad N_1V_1(\text{NaOH}) = N_2V_2(\text{HCl})$$

$$0.1387 \text{ N} \times 20 \text{ mL} = N_2 \times 17.00 \text{ mL}$$

$$N_2 = 0.1632 \text{ N}$$

#### ง.5 สารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ pH 7

เตรียมสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร หรือ 1 ลิตร

โดยมวลโมเลกุลของกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกเท่ากับ 292.24 g/mol

$$\text{จากสูตร} \quad \frac{g}{\text{MW}} = \frac{CV}{1,000}$$

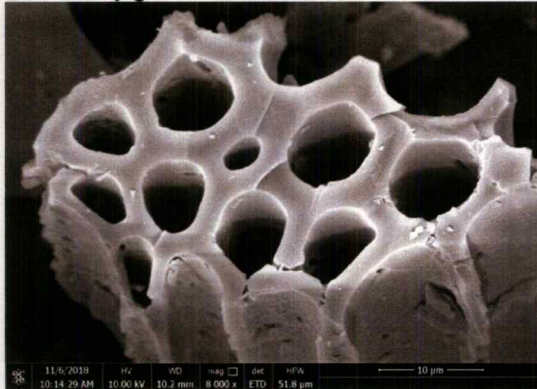
$$\frac{g}{292.24 \text{ g/mol}} = \frac{0.05 \text{ M} \times 1,000 \text{ mL}}{1,000}$$

$$g = 14.612 \text{ g.}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยชั่งกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติกจำนวน 14.612 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปรับสารละลายให้ค่าพีเอช เท่ากับ 7 โดย 0.1 โมลาร์ NaOH และปรับปริมาตรจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร หรือ 1 ลิตร

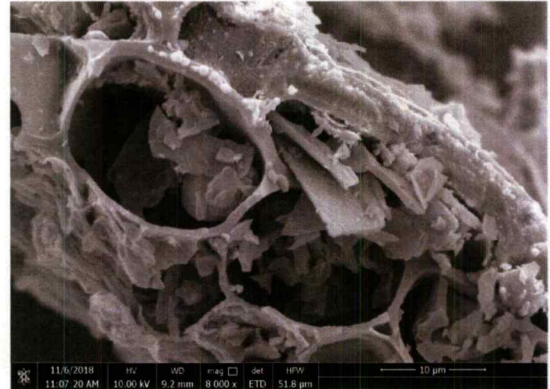
## ภาคผนวก จ

ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาลักษณะพื้นที่ผิวของ  
วัสดุดูดซับโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope



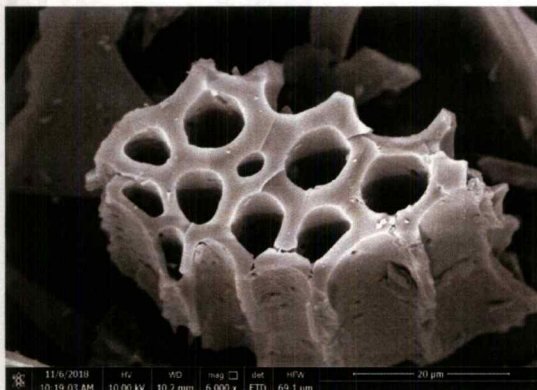
(จ.1)

8000X



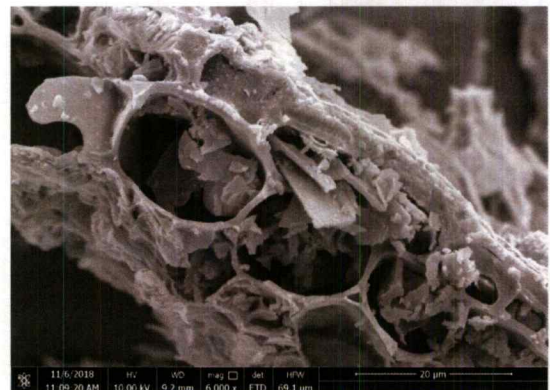
(จ.2)

8000X



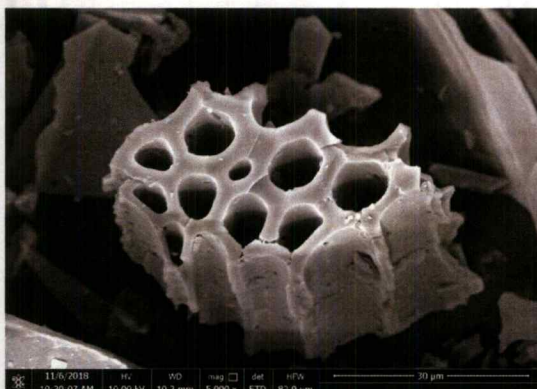
(จ.3)

6000X



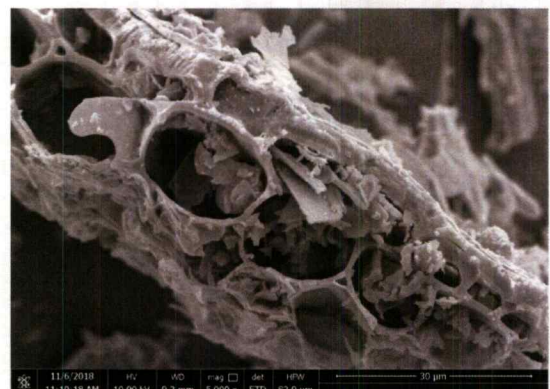
(จ.4)

6000X



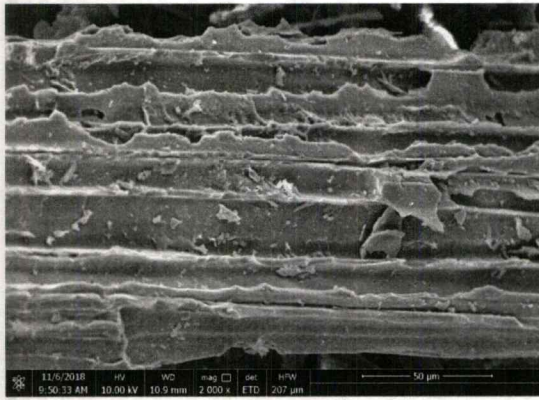
(จ.5)

5000X



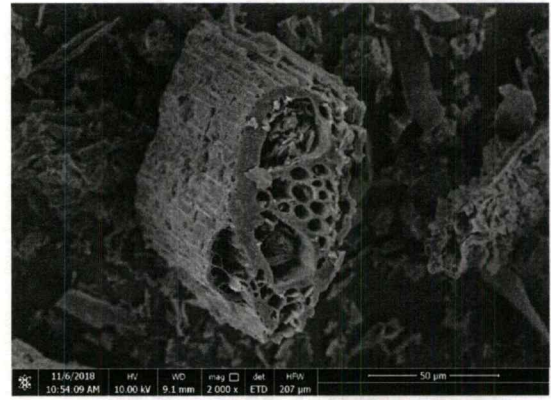
(จ.6)

5000X



(จ.7)

2000X



(จ.8)

2000X

รูปที่ จ.1, จ.3, จ.5, จ.7 ถ่านชีวภาพจากกากขานอ้อย ที่กำลังขยายต่างๆ

รูปที่ จ.2, จ.4, จ.6, จ.8 ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคระ ที่กำลังขยายต่างๆ

โดยลักษณะทางสัณฐานของถ่านชีวภาพที่ได้ วิเคราะห์ได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

ภาคผนวก ฉ  
 ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาขนาดพื้นที่ผิว  
 ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ของวัสดุดูดซับโดยใช้  
 เครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET)



MicroActive for ASAP 2460 2.01

MicroActive for ASAP 2460 Version 2.01  
Serial # 375 Unit 1 Port 1

Page 1

Sample: Napier glass  
 Operator: wachiraporn  
 Submitter:  
 File: D:\USERDATA\2561\4876-61พรักทรา\Napier glass2.SMP

Started: 22/11/2561 13:49:53	Analysis Adsorptive: N2
Completed: 23/11/2561 17:43:55	Analysis Bath Temp.: 77.300 K
Report Time: 4/12/2561 16:51:44	Thermal Correction: No
Sample Mass: 0.6011 g	Warm Free Space: 16.8382 cm <sup>3</sup> Measured
Cold Free Space: 49.4939 cm <sup>3</sup>	Equilibration Interval: 5 s
Low Pressure Dose: None	Sample Density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic Degas: No	

#### Summary Report

##### Surface Area

BET Surface Area: 11.6797 m<sup>2</sup>/g

##### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
 less than 1,759.901 Å width at p/p<sup>0</sup> = 0.988992043: 0.019352 cm<sup>3</sup>/g

##### Pore Size

Adsorption average pore diameter (4V/A by BET): 66.2770 Å

รูปที่ ฉ.1 ผลการวิเคราะห์ BET ของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์แคะระ



MicroActive for ASAP 2460 2.01

MicroActive for ASAP 2460 Version 2.01  
Serial # 375 Unit 1 Port 2

Page 1

Sample: Sugar cane baggasse  
Operator: wachiraporn  
Submitter:  
File: D:\USERDATA\2561\4876-61พรณ...\Sugar cane baggasse.SMP

Started: 21/11/2561 14:29:31	Analysis Adsorptive: N2
Completed: 23/11/2561 14:13:02	Analysis Bath Temp.: 77.300 K
Report Time: 4/12/2561 16:54:05	Thermal Correction: No
Sample Mass: 0.5872 g	Warm Free Space: 17.0650 cm <sup>3</sup> Measured
Cold Free Space: 49.8793 cm <sup>3</sup>	Equilibration Interval: 5 s
Low Pressure Dose: None	Sample Density: 1.000 g/cm <sup>3</sup>
Automatic Degas: No	

#### Summary Report

##### Surface Area

BET Surface Area: 3.0440 m<sup>2</sup>/g

##### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
less than 2,707.854 Å width at p/p\* = 0.992884232: 0.003328 cm<sup>3</sup>/g

##### Pore Size

Adsorption average pore diameter (4V/A by BET): 43.7291 Å

รูปที่ ๑.2 ผลการวิเคราะห์ BET ของถ่านชีวภาพจากกากชานอ้อย