

การปรับปรุงดินโดยการดูดซับโลหะหนักด้วย ซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์
และไดอะตอมไมต์

SOIL AMENDMENT BY ADSORPTION OF HEAVY METALS WITH
ZEOLITE, SEPIOLITE AND DIATOMITE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-016-023

การปรับปรุงดินโดยการดูดซับโลหะหนักด้วย ซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์
และไดอะตอมไมต์

SOIL AMENDMENT BY ADSORPTION OF HEAVY METALS WITH
ZEOLITE, SEPIOLITE AND DIATOMITE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-016-023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOIL AMENDMENT BY ADSORPTION OF HEAVY METALS WITH
ZEOLITE, SEPIOLITE AND DIATOMITE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-SC-M-016-023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงดินโดยการดูดซับโลหะหนักด้วย ซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์ และไดอะตอมไมต์
Soil amendment by adsorption of heavy metals with zeolite, sepiolite and diatomite

ชื่อนักศึกษา นางสาวมินตรา ตุ่มทอง

รหัสประจำตัว 57605045

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ประธานกรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการ	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 305 อาคารพระจอมเกล้า

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ ๑๐ เดือน ๓๐ พ.ศ. ๒๕๖๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงดินโดยการดูดซับโลหะหนักด้วย ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์ และไดอะตอมไมต์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมินตรา ตุ่มทอง
รหัสประจำตัว	57605045
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแร่ดินเหนียว ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์ และ ไดอะตอมไมต์ ในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินกรด ทำการสังเคราะห์ดินเหนียว และดินร่วนปนทรายให้ปนเปื้อนสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดง 350 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โครเมียม 700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และนิกเกิล 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เติมแร่ดินเหนียวลงในดิน ปริมาณ 2.5% 5% และ 7.5% ทำการตรวจสอบรูปฟอร์มของโลหะที่ถูกดูดซับในดินที่ผสมแร่ดินเหนียวและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30 และ 60 วันด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น ผลการศึกษาชี้ว่านิกเกิล และสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (F2) ในขณะที่ทองแดงและโครเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) และรูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุในดิน (F5) ผลรูปฟอร์มโลหะที่เกิดขึ้นแสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะที่แตกต่างกัน จากการประเมินผลดัชนีทางชีวภาพ (BI) นิกเกิลมีความเสี่ยงที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตมากที่สุด รองลงมาคือ สังกะสี ทองแดงและโครเมียม ตามลำดับ ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ มีขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมด เท่ากับ 33.51, 169.20 และ 25.71 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และมีประจุลบบนพื้นที่ผิวเท่ากับ -20.79, -23.41 และ -19.77 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เนื่องมาจากการมีขนาดพื้นที่ผิวและประจุลบบนพื้นที่ผิวที่สูง จึงส่งผลทำให้ซีพีโอไลต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะในดินได้มากที่สุด ดังนั้นในการปรับปรุงดินเหนียวและดินร่วนปนทรายปนเปื้อนโลหะด้วยการเติมซีพีโอไลต์ จึงมีประสิทธิภาพในการลดความสามารถของโลหะที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตได้ดีที่สุด (BI ต่ำ)

คำสำคัญ : ซีพีโอไลต์ ซีโอไลต์ ดิน ไดอะตอมไมต์ โลหะหนัก

Thesis Title	Soil amendment by adsorption of heavy metals with zeolite, sepiolite and diatomite
Student Name	Ms. Mintra Tumtong
Student ID	57605045
Degree	Master of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa

ABSTRACT

The purpose of this research was to study the effectiveness of clay minerals including zeolite, sepiolite and diatomite to reduce the heavy metal movement in soils. The clay soil and sandy loam soil were synthesized to contaminate with 200 mg/kg zinc, 350 mg/kg copper, 700 mg/kg chromium and 250 mg/kg nickel. The amount of clay minerals added to soil was 2.5%, 5% and 7.5%. The examination of various forms of heavy metals attached to soil mixed with clay minerals and left in the period of 30 and 60 days was carried out by the sequential extraction method. The results indicated that mostly nickel and zinc were in an exchangeable form (F2) while copper and chromium were mostly in an oxide bound form (F4) and an organic bound form (F5). The results indicated the differences in the mobile ability of the metals in soil. From the evaluation of bioavailable index (BI), nickel transferred into plants and organisms at the highest risk followed by zinc, copper, and chromium. The specific surface area of zeolite, sepiolite and diatomite were 33.51, 169.20 and 25.71 m²/g, respectively. The surface charge of zeolite, sepiolite and diatomite were -20.79, -23.41 and -19.77 mV, respectively. The highest of the specific surface area and negative surface charge of sepiolite resulted in the highest adsorption ability and the lowest of BI.

Keywords : sepiolite, zeolite, soil, diatomite, heavy metals

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและได้รับคำปรึกษาที่ดีจากหลายบุคคล จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและช่วยแก้ปัญหา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ดร.ชวัลย์ ศรีวงษ์ ที่เข้าร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำเพื่อนำไปแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาในระดับมหบัณฑิต

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ให้คำแนะนำและความรู้สึกดีๆตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นแรงผลักดันให้การสนับสนุนด้านการศึกษาตลอดมา จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

มินตรา ตุ่มทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ดิน.....	4
2.1.1 นิยามและความหมายของดิน.....	4
2.1.2 สมบัติทางกายภาพของดิน.....	4
2.1.3 สมบัติทางเคมีของดิน.....	6
2.2 คอลลอยด์ในดิน.....	7
2.2.1 ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์.....	8
2.2.2 ชนิดของสารคอลลอยด์.....	8
2.2.3 ที่มาของประจุลบของซิลิเกตเคลย์.....	10
2.3 ธาตุพิษในดิน.....	11
2.3.1 แหล่งที่มา.....	11
2.3.2 เกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะหนัก.....	11
2.3.3 โลหะหนักที่ศึกษา.....	12
2.3.4 รูปแบบของโลหะหนักในดิน.....	16
2.3.5 การสกัดลำดับขั้น.....	18
2.3.6 ทฤษฎี hard soft acids bases.....	18
2.4 สารปรับปรุงดิน.....	19
2.4.1 ประเภทของสารปรับปรุงดิน.....	19
2.4.2 สารปรับปรุงดินที่ศึกษา.....	21
2.5 การดูดซับ.....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 สารเคมี.....	31
3.1.2 อุปกรณ์.....	32
3.2 การเก็บตัวอย่างดิน	33
3.3 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดินและสารปรับปรุงดิน.....	33
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดิน.....	33
3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน	33
3.4 การสังเคราะห์ดินปนเปื้อน.....	34
3.5 การผสมสารปรับปรุงดิน.....	35
3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดิน.....	35
3.6.1 การสกัดลำดับชั้น.....	35
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	36
3.7.1 การประเมินค่าดัชนีทางชีวภาพ.....	36
3.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	38
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินและสารปรับปรุงดิน	38
4.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน	38
4.1.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารปรับปรุง.....	40
4.2 ความเป็นกรดต่างของดินหลังการปรับปรุง.....	43
4.3 การสกัดแบบลำดับชั้น.....	45
4.3.1 สังกะสี.....	46
4.3.2 ทองแดง.....	50
4.3.3 โครเมียม.....	53
4.3.4 นิกเกิล.....	56
4.4 การประเมินค่าดัชนีทางชีวภาพ.....	61
4.4.1 ดัชนีทางชีวภาพในดินเหนียว.....	61
4.4.2 ดัชนีทางชีวภาพในดินร่วนปนทราย.....	64
4.4.3 การประเมินผลระยะเวลาการปรับปรุงดิน.....	66
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ดินและสารปรับปรุงดิน.....	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค ผลการสกัดแบบลำดับขั้น	89
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดัชนีทางชีวภาพ.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับสภาพกรดและต่างของดิน.....	6
2.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกตามการจำแนกเนื้อดิน.....	7
2.3 ค่าสูงสุดต่ำสุดและระดับเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักในดินประเทศไทย.....	12
2.4 การแบ่งกลุ่มตามสมบัติการเป็น hard – soft acids ของไอออน.....	19
2.5 การแบ่งกลุ่มตามสมบัติการเป็น hard – soft bases ของไอออน.....	19
3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดิน.....	33
3.2 การวิธีการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน.....	34
4.1 สมบัติเบื้องต้นของดิน.....	38
4.2 สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน.....	40
4.3 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารปรับปรุงดิน.....	40
4.4 พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของสารปรับปรุงดิน.....	41
4.5 ความเป็นกรดต่างของดินเหนียวหลังการเติมสารปรับปรุงดิน.....	44
4.6 ความเป็นกรดต่างของดินร่วนปนทรายหลังการเติมสารปรับปรุงดิน.....	44
4.7 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว.....	63
4.8 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว.....	64
4.9 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	66
4.10 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	66
4.11 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินเหนียว.....	67
4.12 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	68
4.13 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับดินเหนียว.....	68
4.14 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับดินร่วนปนทราย.....	69
ข-1 ความเป็นกรดต่างของดินตัวอย่าง.....	83
ข-2 ความชื้นของดินตัวอย่าง.ง.....	83
ข-3 ความหนาแน่นของดินตัวอย่าง.....	83
ข-4 ขนาดอนุภาคของดินตัวอย่าง.....	83
ข-5 ปริมาณอินทรีย์วัตถุดินตัวอย่าง.....	83
ข-6 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่าง.....	84
ข-7 ปริมาณไนโตรเจนดินตัวอย่าง.....	84
ข-8 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินตัวอย่าง.....	84
ข-9 ปริมาณโพแทสเซียมในดินตัวอย่าง.....	84
ข-10 ปริมาณโลหะทั้งหมดของดินเหนียว.....	84
ข-11 ปริมาณโลหะทั้งหมดของดินร่วนปนทราย.....	85
ข-12 ความชื้นของสารปรับปรุงดิน.....	85
ข-13 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของสารปรับปรุงดิน.....	85
ข-14 ปริมาณโลหะทั้งหมดของซีโอไลท์.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-15 ปริมาณโลหะทั้งหมดของซีพีโอไลต์.....	85
ข-16 ปริมาณโลหะทั้งหมดของไดอะตอมไมต์.....	86
ข-17 ค่าศักย์ซีต้าที่ผิวของสารปรับปรุงดิน.....	86
ข-18 ผลการวิเคราะห์หาจุดที่ซีโอไลต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์	86
ข-19 ผลการวิเคราะห์หาจุดที่ซีพีโอไลต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์.....	87
ข-20 ผลการวิเคราะห์หาจุดที่ไดอะตอมไมต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์.....	87
ค-1 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว.....	90
ค-2 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว.....	91
ค-3 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย..	92
ค-4 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย..	93
ค-5 ปริมาณทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว	94
ค-6 ปริมาณทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว	95
ค-7 ปริมาณทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย	96
ค-8 ปริมาณทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย	97
ค-9 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว	98
ค-10 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว	99
ค-11 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย	100
ค-12 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย	101
ค-13 ปริมาณนิกเกิลจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว.....	102
ค-14 ปริมาณนิกเกิลจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว.....	103
ค-15 ปริมาณนิกเกิลจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย	104
ค-16 ปริมาณนิกเกิลจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย	105
ง-1 ดัชนีทางชีวภาพที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนดินเหนียว.....	111
ง-2 ดัชนีทางชีวภาพที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนดินเหนียว.....	112
ง-3 ดัชนีทางชีวภาพที่เวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	113
ง-4 ดัชนีทางชีวภาพที่เวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	114

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแจกแจงประเภทเนื้อดิน.....	5
2.2 โครงสร้างของแผ่นซิลิกาและอลูมินา.....	9
2.3 การดูดซับโลหะของแร่ดินเหนียว.....	17
2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์.....	21
2.5 โครงสร้างของซีพีโอไลต์.....	23
2.6 ลักษณะของไดอะตอม.....	23
2.7 ชั้นของไดอะตอมไมต์.....	24
2.8 ภาพถ่ายขยายผ่านกล้อง Scanning Electron Microscope.....	25
3.1 สารปรับปรุงดินซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์.....	35
3.2 ขั้นตอนการสกัดแบบลำดับขั้น.....	37
4.1 จุดที่พื้นผิวของสารปรับปรุงมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH _{pzc}).....	42
4.2 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	47
4.3 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	47
4.4 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	49
4.5 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	49
4.6 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	51
4.7 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	51
4.8 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	52
4.9 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	53
4.10 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	54
4.11 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	55
4.12 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	56
4.13 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 สัดส่วนรูปฟอร์ม निकเกิดจากการสกัดแบบลำดับชั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	58
4.15 สัดส่วนรูปฟอร์ม निकเกิดจากการสกัดแบบลำดับชั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินเหนียว.....	58
4.16 สัดส่วนรูปฟอร์ม निकเกิดจากการสกัดแบบลำดับชั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	59
4.17 สัดส่วนรูปฟอร์ม निकเกิดจากการสกัดแบบลำดับชั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลัง การปรับปรุงดินร่วนปนทราย.....	60
ค-1 กราฟมาตรฐานสังกะสี.....	106
ค-2 กราฟมาตรฐานทองแดง.....	106
ค-3 กราฟมาตรฐานโครเมียม.....	107
ค-4 กราฟมาตรฐานนิกเกิล.....	107



คำย่อ/สัญลักษณ์

mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
AAS	เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
CEC	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
cmol/kg	เซนติโมลต่อกิโลกรัม
M	ความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์
BI	ดัชนีส่วนบ่งชี้โลหะที่สามารถเคลื่อนย้ายออกมาจากดิน
m ² /g	ตารางเมตรต่อกกรัม
OM	อินทรีย์วัตถุ
pH	พีเอช
XRF	เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์
w/w	ร้อยละโดยมวล
%	เปอร์เซ็นต์
°C	องศาเซลเซียส
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
cm	เซนติเมตร
mV	มิลลิโวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาด้านเทคโนโลยีและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญคือ มลพิษทางดิน (soil pollution) เนื่องจากการปนเปื้อนโลหะหนัก ทรัพยากรดินเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อถูกรบกวน การเกิดมลพิษทางดินเกิดจากสารเคมีที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเช่น สังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล เป็นต้น สารเหล่านี้เป็นโลหะหนักจากการจัดลำดับผลกระทบของโลหะหนักที่มีต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของหน่วยงาน ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) พบว่า สังกะสี เป็นโลหะหนักอันตรายลำดับที่ 74 ใช้เป็นสารเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ทองแดง เป็นโลหะอันตรายลำดับที่ 128 มักนำมาใช้ในการผลิตสายไฟฟ้า โครเมียม เป็นโลหะอันตรายลำดับที่ 18 ใช้ในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ ฟอกหนัง เป็นต้น และ นิกเกิล ถูกจัดให้อยู่ในลำดับที่ 57 นำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม (ATSDR, 2015) โลหะหนักเหล่านี้เมื่อถูกปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดการแพร่กระจายและสะสมส่งผลให้ดินและน้ำเกิดการปนเปื้อน ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินนอกจากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศแล้วยังส่งผลกระทบต่อมนุษย์โดยตรงก็คือ สารพิษตกค้างในห่วงโซ่อาหาร (food chain) เนื่องจากการใช้ประโยชน์จากดิน โดยเฉพาะการทำเกษตรกรรม หากมีการปลูกพืชบนพื้นที่ที่ปนเปื้อนโลหะหนักพืชจะดูดซับสารพิษเข้าไป เมื่อมนุษย์และสัตว์บริโภคทำให้ได้รับสารพิษเข้าสู่ร่างกายและไปสะสมในเนื้อเยื่อทำให้เกิดอันตรายถึงชีวิต (สุธีลาและคณะ, 2544) ดังเช่น กรณีของโรงงานกำจัดขยะอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งที่ตำบลห้วยแห้ง อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ก่อให้เกิดปัญหามลพิษขึ้นกับชุมชนเนื่องจากขยะอุตสาหกรรม ประชาชนได้รับความเดือดร้อนจากกลิ่นเหม็นและสารพิษตกค้างในกระแสเลือด เนื่องจากการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำและพื้นที่เกษตรกรรมโลหะหนักที่ตรวจพบได้แก่ แมงกานีส เหล็ก พรอท ตะกั่วและสังกะสี (Greenpeace, 2552) หรือ กรณีเหตุการณ์การลักลอบทิ้งสารเคมีและน้ำเสียอุตสาหกรรมของนิคมอุตสาหกรรมบางปู โดยตรวจพบแหล่งน้ำสาธารณะมีการปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น นิกเกิล เหล็ก เป็นต้น และในตะกอนดินมีการสะสมของ นิกเกิล สังกะสีและโครเมียมในปริมาณที่สูง นอกจากนี้ในตัวอย่งน้ำและตะกอนดินจากบ่อกักเก็บน้ำกับนิคมอุตสาหกรรมพบโลหะหนักในปริมาณที่สูงเกินมาตรฐาน โลหะหนักที่พบ ได้แก่ นิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว เหล็กและโครเมียม ซึ่งแสดงถึงการปนเปื้อนและสะสมมาเป็นระยะเวลาานาน (Greenpeace, 2555)

การบำบัดโลหะหนักในดินปนเปื้อนทำได้หลายวิธีได้แก่ การล้างดิน (Chemical washing), การดูดซับด้วยพืช (Phytoremediation) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การล้างดินเป็นการกำจัดโลหะหนักที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงสิ้นเปลืองเวลาในการบำบัด ส่วนการดูดซับด้วยพืชข้อดีคือมีกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากมีต้นทุนต่ำแต่การบำบัดด้วยวิธีนี้ใช้เวลานานเหมาะกับพื้นที่ที่ปนเปื้อนต่ำและทำให้สูญเสียพื้นที่เพาะปลูก (Liang, 2014) เนื่องจากการปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรมเป็นเรื่องที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วนทำให้มุ่งสนใจไปที่การลดผลกระทบโดยการใส่สารปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะหนักแทน เพื่อลดผลกระทบโดยการลดการเคลื่อนที่ (Immobilization) ของโลหะหนักในดินซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเลือกที่น่าสนใจทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ สามารถลดการดูดซับโลหะหนักของพืชและนำไปใช้
ได้กับขอบเขตพื้นที่ปนเปื้อนกว้าง วัสดุที่นำมาใช้ในการปรับปรุง ได้แก่ phosphate compound,
alkaline compound และ clay minerals เป็นต้น (Sun, 2015) clay minerals หรือแร่ดินเหนียว
เป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่มีอยู่ในดิน แบ่งออกได้หลายชนิดตามโครงสร้างทางแร่ ได้แก่ แร่ดินเหนียว
ซีโอไลต์ แร่ดินเหนียวซีฟิโอไลต์และแร่ดินเหนียวไดอะตอมไมต์ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย
โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินโดยการลดรูปฟอร์มโลหะที่สิ่งมีชีวิต
นำไปใช้ได้ (bioavailable) คือ รูปฟอร์มที่ละลายน้ำ (water soluble) รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้
(exchangeable) และรูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (bound to carbonate) เมื่อใส่ลงในดิน
สามารถเพิ่มสภาพความเป็นกรดต่างของดินและไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษเพิ่มให้แก่ดิน (Abad-Valle,
2016)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับคือ ซีโอไลต์ ซีฟิโอไลต์และไดอะตอมไมต์ซึ่ง
เป็นแร่ดินเหนียว (clay mineral) เพื่อนำมาปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะหนักสังกะสี ทองแดง
โครเมียมและนิกเกิล ในการนำมาเป็นทางเลือกเพื่อลดผลกระทบของพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการ
ปนเปื้อนและการแพร่กระจายของโลหะหนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงดินปนเปื้อนสังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr)
และนิกเกิล (Ni) ด้วยสารปรับปรุง 3 ตัวคือ ซีโอไลต์ ซีฟิโอไลต์และไดอะตอมไมต์
2. เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงดิน 2 ชนิดคือดินเหนียวและดินร่วนปนทรายที่ปนเปื้อนโลหะ
หนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวและดินร่วนปนทรายจากจังหวัดฉะเชิงเทรา
2. ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่างโดยวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ความชื้น ความ
หนาแน่น (bulk density) การกระจายตัวของอนุภาคดิน (soil texture) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ
(organic matter : OM) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ปริมาณ
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) ปริมาณ
โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available K) และปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน (สังกะสี
ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล)
3. ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ความสามารถ
ในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด ปริมาณธาตุองค์ประกอบ ขนาด
พื้นที่ผิวจำเพาะของสารปรับปรุงดินและจุดที่ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (point of zero charge)
4. ทำการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนโดยผสมโลหะหนักที่ความเข้มข้นดังนี้ สังกะสี 200 มก./กก.
ทองแดง 350 มก./กก. โครเมียม 700 มก./กก.และนิกเกิล 250 มก./กก. ลงในดิน บ่มดิน
สังเคราะห์เป็นเวลา 30 วัน
5. ทดสอบประสิทธิภาพการปรับปรุงดินโดยผสมซีโอไลต์ ซีฟิโอไลต์และไดอะตอมไมต์อัตราส่วน
0%, 2.5%, 5% และ 7.5% (w/w) ลงในดินทำการบ่มดิน
6. ทำการศึกษาที่ระยะเวลา 30 และ 60 หลังการเติมสารปรับปรุงดิน โดยทำการควบคุมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารความลับของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดินเหนียว (clay) มีสภาพความจุความชื้น (field capacity) 32%
 - ดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีสภาพความจุความชื้น (field capacity) 24%
7. ศึกษาประสิทธิภาพสารปรับปรุงดินในการดูดซับโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction) แบ่งโลหะออกเป็น 6 รูปฟอร์มคือ รูปฟอร์มที่ละลายน้ำ (water soluble) สกัดด้วย deionized water รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable) สกัดด้วย MgCl รูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (bound to carbonate) สกัดด้วย NaOAc รูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (bound to Fe and Mn oxide) สกัดด้วย $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ รูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (bound to organic matter) สกัดด้วย $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OAc}$ และรูปฟอร์มที่เหลือ (residual) สกัดด้วย $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
 8. ประเมินผลการปรับปรุงดินด้วยค่าดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นทางเลือกในการลดผลกระทบของพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของโลหะหนัก
2. เป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อพัฒนาการปรับปรุงรวมทั้งการนำไปใช้ในพื้นที่จริง
3. เป็นแนวทางในการแก้ปัญหการปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นและจัดการพื้นที่เกษตรกรรมที่กำลังมีการเพาะปลูกได้อย่างรวดเร็วพร้อมทั้งเกิดประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดิน

2.1.1 นิยามและความหมายของดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ดิน (soil) คือ วัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติรวมกันขึ้นเป็นชั้น จากส่วนผสมของแร่ธาตุต่างๆที่สลายตัวเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยกับอินทรีย์วัตถุที่เปื่อยผุพังอยู่รวมกันเป็นชั้นบางๆที่หุ้มผิวโลก เมื่อมีอากาศและน้ำในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยค้ำจุนพร้อมทั้งช่วยในการยังชีพและการเจริญเติบโตของพืช โดยทั่วไปแล้วดินมีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งประมาณ 50% โดยปริมาตร (อินทรีย์วัตถุ 45% โดยปริมาตรและอินทรีย์วัตถุ 5% โดยปริมาตร) และส่วนประกอบที่เป็นช่องว่างและน้ำ 50% โดยปริมาตร (อากาศ 25% โดยปริมาตรและน้ำ 25% โดยปริมาตร)

2.1.2 สมบัติทางกายภาพของดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

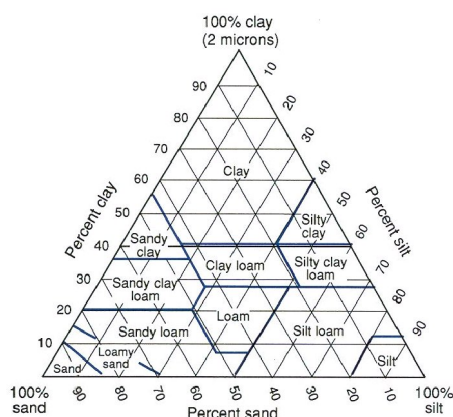
สมบัติทางกายภาพของดิน หมายถึง สมบัติของดินที่สามารถประเมินได้จากลักษณะภายนอกครอบคลุมถึงพฤติกรรมที่ดินแสดงออก เช่น การดูดซับน้ำ การซึมผ่าน การเกาะกันเองของอนุภาคและการเกาะติดกับสารอื่น เป็นต้น

1. ประเภทเนื้อดิน (textural class)

การกำหนดประเภทของเนื้อดินชนิดต่างๆก็ตาม แบ่งโดยใช้ความเด่นชัดของสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดหลักแต่ละกลุ่มที่ดินนั้นแสดงออกมา นิยมจัดกลุ่มประเภทเนื้อดินเป็น 3 กลุ่ม คือ ดินเนื้อหยาบหรือดินทราย (sandy soil) เป็นดินที่ประกอบด้วยอนุภาคดินในกลุ่มอนุภาคทรายมากกว่าอนุภาคซิลต์และอนุภาคดินเหนียว ประเภทเนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ทราย (sand) และทรายร่วน (loamy sand)

ดินร่วน (loamy soils) ดินที่ประกอบด้วยอนุภาคดินทั้ง 3 กลุ่มคือ อนุภาคทราย อนุภาคซิลต์และอนุภาคดินเหนียวในระดับที่ไม่แตกต่างกันหรือแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ร่วนปนทราย (sandy loam) ร่วน (loam) ร่วนปนซิลต์ (silt loam) ซิลต์ (silt) ร่วนเหนียว (clay loam) ร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และร่วนเหนียวปนซิลต์ (silt clay loam)

ดินเนื้อละเอียดหรือดินเหนียว (clay) ดินที่แสดงสมบัติของอนุภาคดินในกลุ่มดินเหนียวชัดกว่ากลุ่มอื่น ประเภทเนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ เหนียวปนทราย (sandy clay) เหนียวปนซิลต์ (silt clay) และเหนียว (clay) เกณฑ์ในการจัดกลุ่มแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไตอะแกรมสามเหลี่ยมแจกแจงประเภทเนื้อดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

2. ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับอินทรีย์วัตถุ

โดยปกติพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเนื้อดินละเอียดขึ้น (ปริมาณอนุภาคในกลุ่มดินเหนียวในดินมากขึ้น) เหตุผลเนื่องจากความอุดมและความจุในการดูดซับน้ำของดินมีสูงขึ้นเมื่อเนื้อดินละเอียดขึ้น ดังนั้นภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันดินเนื้อละเอียดจะมีโอกาสที่จะส่งผลกระทบต่อของสภาวะธรรมชาติที่ไม่เหมาะสมต่อการยังชีพของพืช (เช่น การขาดน้ำและธาตุอาหาร) ที่รุนแรงน้อยกว่าดินเนื้อหยาบ อีกประการหนึ่งคือ การแลกเปลี่ยนก๊าซและการระบายน้ำของดินเนื้อหยาบโดยปกติจะดีกว่าดินเนื้อละเอียด ส่งผลให้อินทรีย์วัตถุในดินเนื้อหยาบสลายตัวเร็วกว่าในดินเนื้อละเอียด ดังนั้นอินทรีย์วัตถุจะสะสมในดินเนื้อละเอียดมากกว่าดินเนื้อหยาบ

3. ความหนาแน่นรวม ความพรุนและสัดส่วนของที่ว่างของดิน

ดินชนิดต่างๆมีความพรุนทั้งหมดที่แตกต่างกัน เพราะลักษณะการจัดเรียงและการเชื่อมยึดทั้งระหว่างอนุภาคดินและระหว่างเม็ดดินเป็นสมบัติเฉพาะตัวของดินแต่ละชนิด เนื่องจากอินทรีย์วัตถุเป็นสารที่เบาและสามารถก่อให้เกิดเม็ดดินได้ดีทั้งความพรุนทั้งหมดและสัดส่วนของที่ว่างของดิน จึงมักสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมของดินกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจะเป็นไปในทางกลับกัน เมื่อเนื้อดินละเอียด (อนุภาคดินมีขนาดเล็ก) ความพรุนทั้งหมดและสัดส่วนของที่ว่างของดินจะมากขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นรวมของดินเนื้อละเอียดจึงมักต่ำกว่าดินเนื้อหยาบ ถ้าเปรียบเทียบความหนาแน่นรวม ความพรุนทั้งหมดและสัดส่วนของที่ว่างของดินที่ระดับความลึกต่างๆของหน้าตัดดินเดียวกัน พบว่าความหนาแน่นรวมจะมากขึ้นและความพรุนทั้งหมดกับสัดส่วนของที่ว่างจะน้อยลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เพราะอินทรีย์วัตถุในดินส่วนมากสะสมอยู่ที่ส่วนบนเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ดินที่อยู่ลึกต้องรับน้ำหนักดินที่อยู่เหนือขึ้นไปจึงเป็นผลให้ดินมีแนวโน้มจะอัดตัวมากขึ้นตามความลึกเพิ่มขึ้น

4. การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับที่สำคัญที่อนุภาคดินแสดงออกได้แก่การดูดซับน้ำและการดูดซับไอออนที่เป็นอาหารพืช สิ่งที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมหรือกำหนดปริมาณการดูดซับทั้งสองประเภทในดินได้แก่ อนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ เพราะอนุภาคทั้งสองประเภทนี้โดยปกติละเอียดมากจึงมีเนื้อที่ผิวจำเพาะที่สูงมาก นอกจากนี้ประจุไฟฟ้าของอนุภาคเหล่านี้ยังไม่สมดุลอีกด้วย คือ โดยทั่วไปมักจะแสดงความเป็นประจุลบ (-) มากกว่าความเป็นประจุบวก (+) ความมีประจุไฟฟ้าที่ไม่สมดุลนี้

เป็นเหตุให้อุณหภูมิดินเหนียวและอนุภาคอินทรีย์วัตถุแสดงการดูดซับไอออนและโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อประจุของโมเลกุลและไอออนเป็นบวก

2.1.3 สมบัติทางเคมีของดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1. ดินกรด

ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 7 ดินที่ไม่เหมาะสมต่อการปลูกพืชคือดินที่มีความเป็นกรดจัดมากหรือดินที่มี pH ต่ำกว่า 5 ลงไป ซึ่งถ้าดินมีค่า pH ต่ำไปกว่านี้ก็ยังทำให้ดินมีความเป็นกรดรุนแรงมากขึ้นตามลำดับ ระดับความรุนแรงของความเป็นกรดเป็นต่างของดินแสดงดังตารางที่ 2.2 ผลเสียต่อการเติบโตของพืชในดินที่เป็นกรดมากเกินไปที่สำคัญ ได้แก่

1) ความเป็นพิษของธาตุต่างๆในดิน ดินที่มีความเป็นกรดมากเกินไปอาจมีปัญหาเกี่ยวกับความเป็นพิษของธาตุต่างๆทั้งที่จำเป็นและไม่จำเป็นต่อพืช เช่น เหล็กและแมงกานีสที่จะละลายออกมาได้ในปริมาณมากจนเกิดเป็นพิษกับพืชได้ถ้าดินมีความเป็นกรดมากเกินไป

2) ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในดิน ระดับสภาพกรดและสภาพเบสในดินมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารพืช ธาตุอาหารพืชที่จำเป็นจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ดีในดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลาง (pH 6.1-7.3) ถ้าดินมี pH ที่สูงหรือต่ำความเป็นประโยชน์ต่อพืชจะลดลงหรืออาจเป็นพิษต่อพืชได้

3) กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน จุลินทรีย์มีบทบาทต่อการแปรสภาพของอินทรีย์วัตถุในดิน ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในดิน การตรึงก๊าซไนโตรเจนของพืช เป็นต้น จุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในดินที่มี pH ช่วง 6-8 ถ้าดินมีความเป็นกรดมากคือมี pH ต่ำกว่า 6 จะทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินลดลง

ตารางที่ 2.1 ระดับสภาพกรดและต่างของดิน

ระดับ pH ของดิน	ระดับสภาพกรดและสภาพเบส
<3.5	กรดรุนแรงมากที่สุด
3.5-4.5	กรดรุนแรงมาก
4.6-5.0	กรดจัดมาก
5.1-5.5	กรดจัด
5.6-6.0	กรดปานกลาง
6.1-6.5	กรดเล็กน้อย
6.6-7.3	เป็นกลาง
7.4-7.8	เบสเล็กน้อย
7.9-8.4	เบสปานกลาง
8.5-9.0	เบสจัด
>9.0	เบสจัดมาก

ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

2. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (cation exchange capacity)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณไอออนประจุบวกของดินทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ ซึ่งดินแต่ละชนิดจะมีค่า CEC มากน้อยขึ้นกับปัจจัยต่างๆที่สำคัญได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารคอลลอยด์ต่างๆในดิน เช่น ฮิวมัส และแร่ดินเหนียว (clay minerals) ดินที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง หรือ CEC สูง หมายถึง ดินที่มีความสามารถในการยึดเหนี่ยวธาตุไอออนประจุบวกได้มาก รวมทั้งธาตุอาหารพืชต่างๆในรูปไอออน ดินที่มี CEC สูงจะสามารถยึดธาตุอาหารต่างๆได้ดีกว่าดินที่มี CEC ต่ำ ดินที่มี CEC สูงส่วนใหญ่เป็นดินเนื้อละเอียดหรือดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินสูงและยังเป็นดินที่มีสมบัติความจุบัฟเฟอร์ (buffering capacity : BC) สูงด้วย หมายถึงความต้านทานของดินต่อการเปลี่ยนแปลงระดับปฏิกิริยา ดินโดยเฉพาะระดับสภาพกรดและสภาพเบสของดิน ซึ่งโดยทั่วไปดินที่มี CEC สูงจะมีค่า BC สูงด้วย ทำให้ดินมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลง pH ของดินสูง (ปิยะ, 2553) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตามการจำแนกเนื้อดินแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกตามการจำแนกเนื้อดิน

การจำแนกเนื้อดิน	CEC (มิลลิกรัมสมมูล/ดิน 100 กรัม)
ทราย (sand)	3-5
ทรายร่วน (loamy sand)	5-8
ร่วนปนทราย (sandy loam)	8-12
ซิลท์ (silt)	10-15
ร่วน (loam)	13-18
ร่วนปนซิลท์ (silt loam)	15-20
ร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam)	14-29
ร่วนเหนียว (clay loam)	16-28
ร่วนเหนียวปนซิลท์ (silt clay loam)	18-30
เหนียวปนทราย (sandy clay)	15-30
เหนียวปนซิลท์ (silt clay)	22-32
เหนียว (clay)	30-40
organic soils	55-200

ที่มา : ดวงกมล (2556)

2.2 คอลลอยด์ในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

Colloidal state หรือ colloidal system นั้นหมายถึงความถึงสภาพหรือระบบที่มีอยู่สองภาค (phase) ด้วยกันคือ disperse phase เป็นส่วนที่ประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กมากและแขวนลอยอย่างถาวรอยู่ในอีกภาคหนึ่งซึ่งเรียกว่า dispersion medium ได้แก่ส่วนที่เป็นของแข็ง ของเหลวหรือ ก๊าซก็ได้ทั้งนั้น ยกเว้นก๊าซจะไม่แขวนลอยในก๊าซเท่านั้น นอกนั้นจะเป็นของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลวหรือของเหลวแขวนลอยอยู่ในของเหลวก็ได้ สิ่งในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นจำเป็นต้องปรับแก้เนื้อหาการแก้ไข ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอลลอยด์แทบทั้งสิ้น สำหรับดินถือว่าอยู่ในระบบคอลลอยด์ก็เพราะดินมีส่วนของแร่ต่างๆและอินทรีย์วัตถุที่มีขนาดเล็กมาก สามารถแขวนลอยอยู่ได้ในน้ำและอากาศในดิน อนุภาคของดินที่เป็น disperse phase นี้จะเป็นที่ตั้งของการเกิดขึ้นของปฏิกิริยาต่างๆทั้งทางเคมีและฟิสิกส์ของดิน ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับสารคอลลอยด์ในดินจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งเพื่อจะได้ทราบถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดิน การแก้ไขและปรับปรุงให้เหมาะกับพืชที่ปลูกในดินนั้นๆ

2.2.1 ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ขนาดของอนุภาคที่เป็นของแข็งที่จะแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างถาวรนั้นจะต้องมีขนาดเล็กมาก ส่วนใหญ่ถือว่าอนุภาคคอลลอยด์ดินนั้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนลงมา

2.2.2 ชนิดของสารคอลลอยด์ในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

สารคอลลอยด์ในดิน แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- คอลลอยด์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic colloid) ซึ่งมีชนิดที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ ซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม (hydrated oxide of Fe & Al)
- คอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic colloid) ได้แก่ ฮิวมัส (humus)

2.2.2.1 สารคอลลอยด์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ก. สารคอลลอยด์ที่เป็นซิลิเกตเคลย์ (Alumino silicate minerals, Silicate clay)

สารคอลลอยด์ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ

1. รูปร่างและขนาด รูปร่างของอนุภาคซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) นั้น มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซึ่งประกอบด้วยผลึกของแร่ที่มีโครงสร้างในลักษณะแบนบาง ประกบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก สำหรับขนาดของอนุภาคนั้นจะมีขนาดแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดและองค์ประกอบทางแร่ (mineralogical organization) ส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดตั้งแต่ 0.01 - 5.0 ไมครอน

2. พื้นผิว เนื่องจากอนุภาคของซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) มีลักษณะเป็นแผ่นแบนและบาง จึงทำให้มีพื้นที่ผิวภายนอกต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (specific surface) มีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นเหตุให้มีปฏิกิริยาต่างๆทั้งทางเคมีและฟิสิกส์เกิดขึ้นได้มาก

3. ความเหนียวและการอ่อนตัว (cohesion and plasticity) ซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) แต่ละชนิดจะมีความเหนียวและการอ่อนตัวแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของเคลย์แต่ละชนิด เคลย์ที่มีความเหนียวและการอ่อนตัวสูง (cohesion and plasticity) จะเป็นพวกที่มีพื้นที่ผิวภายนอกมาก จึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ที่ผิวได้มาก การเกาะยึดระหว่างอนุภาคของดินก็จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย ความเหนียว (cohesion) หมายถึง ความสามารถเกาะยึดกันได้ระหว่างอนุภาคของเคลย์ การที่เคลย์ชนิดหนึ่งมีความเหนียว (cohesion) สูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวให้น้ำเกาะยึดอยู่มาก จึงทำให้อนุภาคของเคลย์นั้นเกาะยึดกันได้ดี ดังนั้นดินเหนียวที่มีความเหนียว (cohesion) สูงจะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ การไถพรวนดินทำได้ลำบากเมื่อดินนั้นเปียกถ้ามีความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่ม บีบแบนให้เป็นรูปร่างต่างๆและคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ คุณสมบัตินี้เรียกว่าการอ่อนตัว (plasticity) ส่วนดินเหนียวที่มีความเหนียว (cohesion) ต่ำส่วนใหญ่จะเป็นเคลย์ที่มีพื้นที่ผิวให้น้ำเกาะยึดน้อย ดังนั้นจึงมีผลทำให้การเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของเคลย์ไม่เหนียวถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่มากก็ตาม

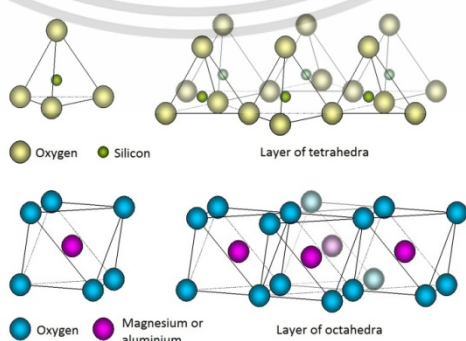
4. การขยายตัว (swelling) และการหดตัว (shrinking) การที่เคลย์แต่ละชนิดจะขยายตัวได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างของเคลย์ โดยเฉพาะเคลย์บางชนิดแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันเป็น clay micelle นั้นจะมีช่องหรือหลืบระหว่างแผ่นผลึกค่อนข้างกว้างและเกาะยึดกันไม่เหนียวแน่นนัก โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย จึงมีผลทำให้ดินพวกนี้เกิดการพองตัวเมื่อเปียกน้ำ แต่ถ้าทำให้แห้ง เช่น นำเข้าเตาอบ น้ำที่เข้าไปอยู่ในระหว่างหลืบจะระเหยออกมา เมื่อน้ำออกมาหมดก็จะทำให้หลืบของเคลย์เกิดการยุบตัวลงมาจึงทำให้ดินนั้นเกิดการหดตัว

5. ประจุลบ (electronegative charge) และการดูดยึดประจุบวก (adsorption of cations) อนุภาคของเคลย์จะมีประจุลบอยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่ออยู่ในสภาพธรรมชาติก็จะมีการดูดยึดประจุบวกไว้เป็นจำนวนมากในสัดส่วนที่เท่ากับประจุลบที่มีอยู่ จึงทำให้เกิดสภาพที่เรียกว่า ionic double layer ขึ้น คือสภาพที่มีประจุ 2 ชั้น ชั้นในได้แก่ประจุลบของเคลย์ ชั้นนอกได้แก่ประจุบวกที่ถูกดูดยึดไว้ (adsorbed cation) อนุภาคของเคลย์เมื่ออยู่ในสภาพแขวนลอย (suspension) จะมีน้ำและประจุบวกห้อมล้อมอยู่เต็มไปหมดซึ่งเราเรียกเคลย์ที่อยู่ในสภาพเช่นนี้ว่า clay micelle ประจุบวกที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวของเคลย์นี้เป็นการดูดยึดอย่างหลวมๆซึ่งสามารถที่จะถูกไล่ที่โดยประจุบวก (cation) ชนิดอื่นได้ ดังนั้นประจุบวก (cation) ที่ถูกดูดยึดไว้จึงมักจะถูกเรียกว่าเป็น exchangeable cation ดินโดยทั่วไปจะมีประจุบวก (cation) ถูกดูดยึดไว้ที่ผิวมากน้อยต่างกัน ส่วนใหญ่ของประจุที่ถูกดูดยึดไว้จะมีปริมาณมากน้อยต่างกันด้วยซึ่งสามารถเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ และ Na^+

โครงสร้างของซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) หน่วยรากฐานโครงสร้างนั้น ประกอบขึ้นด้วย

- Silica tetrahedral unit เป็นหน่วยโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอมอัดตัวกันโดยมีซิลิกาอยู่ตรงกลางจึงเกิดรูปทรงสี่เหลี่ยมขึ้น ดังนั้นจึงเรียกว่า tetrahedral unit ซึ่งถ้ามีหลายๆหน่วยมาต่อกันเข้าก็จะเกิดเป็นแผ่นที่เรียกว่าแผ่นซิลิกา (silica sheet) หรือ แผ่นของซิลิกาเตตระฮีดรอล (silica tetrahedral sheet) แสดงดังรูปที่ 2.2

- Alumina octahedral unit เป็นหน่วยโครงสร้างที่ประกอบด้วยอลูมินัม 1 อะตอมล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอมอัดตัวกันแน่นโดยมีอลูมินัมอยู่ตรงกลางเกิดเป็นรูปทรงที่มี 8 ด้านขึ้นซึ่งเรียกว่า Alumina octahedral unit ถ้ามีหลายๆหน่วยมาต่อกันเข้าก็จะเกิดเป็นแผ่นที่เรียกว่า แผ่นอลูมินา (Alumina sheet) หรือ แผ่นอลูมินาออกตะฮีดรอล (Alumina octahedral sheet) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินา (Brigatti *et al.*, 2006)

ข. สารคอลลอยด์ชนิดอื่นนอกจากซิลิเกตเคลย์ (silicate clay)

สำหรับไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม (hydrous oxide of Fe & Al) จะมีขนาดตั้งแต่ระดับสารคอลลอยด์ขึ้นไปจนถึงขนาดเท่าก้อนกรวดหรือใหญ่กว่า สำหรับพวกที่มีขนาดเล็กในระดับสารคอลลอยด์นั้น จะสังเกตได้จากสีที่เคลือบอยู่ตามผิวดินพวก Latosol และ Reddish Brown ซึ่งจะมีคอลลอยด์ไฮดรอกไซด์ของเหล็กอยู่เป็นจำนวนมากและทำให้เกิดสีน้ำตาลแดงหรือเหลืองปนน้ำตาล ซึ่งเมื่อเวลาเปื้อนเสื้อผ้าแล้วจะซักไม่ค่อยออก เนื่องจาก micelle ของเคลย์พวกนี้จะแทรกเข้าไปในเนื้อผ้าทำให้ล้างหรือซักออกยาก คอลลอยด์ไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม (hydrous oxide of Fe & Al) นี้จะมีพื้นที่ผิวดำ โดยมากจะมีเฉพาะพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) เท่านั้น ไม่มีหีบ (internal layer) เหมือนพวกซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) ดังนั้นคุณสมบัติในการดูดซับประจุบวก (cation) การขยายตัว (swelling) และการหดตัว (shrinking) จะต่ำมาก สมบัติเกี่ยวกับความเหนียวและการอ่อนตัว (cohesion and plasticity) ก็ต่ำ ดังนั้นดินที่มีอายุมาก ๆ อย่างพวก Latosol และ Reddish Brown เวลาเปียกน้ำจึงไม่ค่อยเหนียวและลื่นเหมือนดินเหนียวทั่วไป ทั้งที่มีปริมาณของเคลย์เท่ากัน นอกจากนั้นเมื่อเปียกแล้วยังแห้งเร็วกว่าเคลย์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นถนนทั่วไปจึงนิยมปูพื้นด้วยไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม (hydrous oxide of Fe & Al) เป็นส่วนใหญ่เพราะเมื่อฝนตกถนนจะไม่แฉะและลื่นเหมือนปูด้วยดินชนิดอื่น

2.2.2.2 สารคอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

สารคอลลอยด์ที่เป็นอินทรีย์วัตถุนั้นได้แก่พวกฮิวมัส มีสีดำเกิดจากซากพืชและสัตว์ที่เน่าเปื่อยลงจนถึงที่สุด ความสามารถในการดูดซับน้ำสูงมีประจุลบมาก ประจุลบส่วนใหญ่เกิดจาก carboxyl group (-COOH) โดยที่ H^+ จะ ionize ออกมาเมื่อมี pH ระหว่าง 3-8 ถ้า pH สูงกว่านั้นก็จะมีประจุลบสูงขึ้นไปอีก เนื่องจากการ ionization ของ H^+ จาก phenolic group ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณประจุลบของสารคอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์จะสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อ pH สูงขึ้น

2.2.3 ที่มาของประจุลบซิลิเกตเคลย์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) จะมีประจุลบอยู่และสามารถดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกได้ สาเหตุที่ซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) มีประจุลบได้เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการคือ

1. จากบริเวณขอบของผลึก (exposed crystal edges)

เป็นประจุลบที่เกิดขึ้นได้สองประการคือ จากบริเวณของขอบผลึกที่แตกหักออกไป ทำให้ออกซิเจน (O) ซึ่งแต่เดิมเคยเกาะยึดอยู่กับ Si และ Al ในแผ่นซิลิกาและอลูมินา (silica & alumina sheets) ตามลำดับ เมื่อไม่มี Si และ Al จับเนื่องจากการที่ขอบของผลึกแตกหักออกไป จึงทำให้ออกซิเจนยังมี electronegative charge ตกค้างอยู่ ส่วนอีกด้านหนึ่งของออกซิเจนก็ยังคงจับอยู่กับ Si และ Al อยู่เมื่อออกซิเจนตามบริเวณขอบผลึกอยู่ในสภาพนี้หลายๆเข้า electronegative charge ก็จะมีมากพอที่จะดูดซับประจุบวกได้

ประการที่สองประจุลบจะเกิดขึ้นได้จากการ ionization ของไฮโดรเจน (H) ซึ่งเกาะอยู่กับออกซิเจนบนผิวของเคลย์ตรงส่วนที่เป็นแผ่นอลูมินา (Alumina sheet) จะเกิดขึ้นโดยเฉพาะกับ เคลย์พวก 1:1 type ไฮโดรเจน (H) ที่เกาะอยู่กับออกซิเจนดังกล่าว ไม่ได้ยึดเกาะกันเหนียวแน่นเหมือนกับ hydroxyl group ไฮโดรเจนจะหลุดออกมาได้บ้าง เมื่อออกมาแล้วก็จะทำให้ออกซิเจนที่ผิวของเคลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดนั้นๆมี electronegative charge ตกค้างอยู่ เมื่อมีจุดที่ไฮโดรเจนหลุดออกมามากขึ้น electronegative charge ที่ตกค้างอยู่นั้นก็จะสูงพอที่จะดึงดูดประจุบวกอื่นๆได้ ประจุลบของ c เคลย์พวก 1:1 ได้มาจากขบวนการเหล่านี้ทั้งสิ้น ส่วนพวก 2:1 จะได้ประจุลบจากขบวนการนี้เพียงบางส่วนส่วนใหญ่ได้มาจาก isomorphous substitution

2. จากขบวนการ isomorphous substitution

ขบวนการนี้เกิดขึ้นในธรรมชาติโดยที่อะตอมของธาตุหนึ่งเข้าไปแทนที่อะตอมที่มีอยู่เดิมในโครงสร้างของแร่ ซึ่งอะตอมที่เข้ามาแทนที่จะมีขนาดใกล้เคียงหรือเท่ากันแต่ประจุหรือ valence ไม่เท่ากันก็ได้ ถ้าประจุบวกที่มี valence ต่ำเข้าไปแทนที่อีกประจุบวกหนึ่งที่มีอยู่เดิมภายในโครงสร้างของแร่ชนิดหนึ่งซึ่งมี valence สูงกว่า ก็จะมีผลทำให้มีประจุลบตกค้างอยู่ในโครงสร้าง ขบวนการ ionic substitution เกิดขึ้นอย่างแพร่หลายในซิลิเกตเคลย์ (silicate clay) พวก 2:1 ยกตัวอย่างเช่น ใน montmorillonite จะมี Mg^{2+} โดยเฉลี่ย 0.66 อะตอมเข้าไปแทนที่ Al^{3+} จำนวนเท่ากับในแผ่น อลูมินา (Alumina sheet) เนื่องจาก Mg อะตอมมี valence ต่ำกว่า Al อะตอม ประจุลบก็จะ ตกค้างเท่ากับ -0.66 เมื่อมีจุดที่มีการไล่ที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆประจุลบก็จะสูงพอที่จะดึงดูดไอออนบวกได้

2.3 ธาตุพิษในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ธาตุพิษ (toxic elements) โดยทั่วไปมักจะหมายถึง ธาตุโลหะหนักซึ่งเป็นสารมลพิษที่สำคัญ ในดิน ธาตุเหล่านี้เป็นสารมลพิษได้เนื่องจากการนำมาใช้ประโยชน์ในรูปสารประกอบและเครื่องมือ เครื่องใช้ต่างๆแล้วมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม สำหรับธาตุโลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป ซึ่งเป็นธาตุในตารางธาตุที่มี atomic number ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบ 4-7

2.3.1 แหล่งที่มา

โลหะหนักสามารถแพร่กระจายเข้าสู่ดินได้จากการปลดปล่อยจากแหล่งต้นกำเนิด โดยแหล่งที่มาของโลหะหนักมีหลายแหล่ง คือ จากการใช้สารเคมีในภาคเกษตรกรรม (เช่น ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง เป็นต้น) การทำเหมืองแร่ และไอเสียรถยนต์ แหล่งที่มาของโลหะหนักที่สำคัญอีกแหล่งคือ ของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมทำให้เกิดการแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและเกิดการสะสมในดิน เมื่อพื้นที่นั้นมีการทำการเพาะปลูกทำให้โลหะหนักแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (food chain) โลหะหนัก เมื่อมีการสะสมในร่างกายมนุษย์สามารถก่อให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ในที่สุด (ดวงกมล, 2556)

2.3.2 เกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศไทย (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

การกำหนดมาตรฐานโลหะหนักในดินเกษตรกรรม โดยวิเคราะห์จากปริมาณโลหะหนักในดิน ตัวอย่างจำนวน 318 ตัวอย่างจากบริเวณต่างๆทั่วประเทศและนำมาวิเคราะห์ร่วมกับค่ามาตรฐานของ โลหะหนักในดินกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป เพื่อนำมาพิจารณาและใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับดิน เกษตรกรรมของประเทศไทย โดยมีเกณฑ์พื้นฐานแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าสูงสุดต่ำสุดและระดับเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักในดินประเทศไทย

โลหะหนัก	ค่าต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าสูงสุด (มก./กก.)	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน (มก./กก.)
สารหนู	0.08	124	30
แคดเมียม	0.01	0.29	0.15
โคบอลต์	0.10	113	20
โครเมียม	0.14	295	80
ทองแดง	0.16	350	45
ปรอท	0.01	0.27	0.1
นิกเกิล	0.10	270	45
ตะกั่ว	0.10	550	55
สังกะสี	0.10	140	70

หมายเหตุ : ดินจำนวน 318 ตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณต่างๆทั่วประเทศ
ที่มา : กรมวิชาการเกษตร (2548)

2.3.3 โลหะหนักที่ศึกษา

2.3.3.1 สังกะสี (Zn) (ชัยวัฒน์, 2530)

1. ธรรมชาติของสังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุโลหะในหมู่ IIB ของตารางธาตุ มีเลขมวล 30 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 จุดหลอมเหลว 419 องศาเซลเซียส จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส มีเลขออกซิเดชันคือ 2+ รูปร่างของแข็งมีสีเทาไม่เป็นเงาแต่เมื่อขัดใหม่ๆจะมีสีอมฟ้า แข็งเปราะไม่สามารถดัดให้โค้งงอตามรูปร่างที่ต้องการได้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เปลือกโลกมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบโดยเฉลี่ย 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แหล่งที่มาของสังกะสีในดินส่วนมากมาจากแร่ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) สังกะสีส่วนใหญ่กระจายในรูปหินอัคนี โดยค่าเฉลี่ยของสังกะสีในหินประเภทกรด 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในหินประเภทต่าง พบว่าปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นอย่างมากในตะกอนดินเหนียวและดินเนื้อละเอียด ต่างๆ (80-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ขณะที่หินทรายและถ่านหินมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย (10-30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) นอกจากนี้อาจพบว่าสังกะสีเข้าไปแทน Mg^{+2} ในแร่ดินเหนียว ระหว่างการผุพังสลายตัวของหินและแร่จะปลดปล่อยสังกะสีออกมาในรูป Zn^{+2} ซึ่งพืชสามารถใช้ประโยชน์ได้และพบมากที่สุดในดิน แต่อาจพบสังกะสีในรูปอื่นๆได้ เช่น $ZnCl^+$, $ZnOH^+$, $ZnHCO_3^+$, ZnO_2^- และ ZnO เป็นต้น ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดการเคลื่อนย้ายของสังกะสีจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยทั่วไปโลหะหนักที่สกัดในดิน ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักที่ถูกยึดอยู่กับผิวอนุภาคของแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุจะละลายออกมาอยู่ในสารละลายดินเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เมื่อพีเอชของดินลดลง 1 หน่วย ในสภาพพีเอชสูงสังกะสีจะอยู่ร่วมกับสารอินทรีย์มากขึ้น นอกจากนี้สภาพการละลายได้ของสังกะสียังเป็นปฏิกิริยาผันกลับกับปริมาณแคลเซียม ฟอสฟอรัส กำมะถันและแร่ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมในดิน เนื่องจากสังกะสีจะถูกตรึงโดยสารเหล่านี้และเกิดการตกตะกอนทำให้พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้

2. สังกะสีและการใช้ประโยชน์

ในทางอุตสาหกรรมโลหะสังกะสีใช้ในการเคลือบเหล็กป้องกันการเกิดสนิม ทำเป็นทองเหลือง (โลหะผสมของสังกะสีกับทองแดง) และแผ่นสังกะสีใช้หลังคา ใช้สังกะสีในรูปซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทำสีขาวและสีเทาในอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมชุบโลหะ การทำบรอนซ์ ภาชนะโลหะเคลือบน้ำยารักษาคุณภาพไม้ ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น โลชั่นบำรุงผิว แชมพูสระผมกันรังแค ยารักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อโรค ทางเภสัชกรใช้เป็นสารคลุกเคลือบป้องกันเชื้อรา เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์

3. ประโยชน์และความเป็นพิษของสังกะสี

สังกะสีจัดเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตต้องการในปริมาณที่น้อย มีความสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ โปรตีนและการแสดงออกของหน่วยพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแบ่งตัวของเซลล์และซ่อมแซมบาดแผลโดยเฉพาะในเซลล์ผิวหนัง ภาวะขาดสังกะสีก่อให้เกิดความผิดปกติของการเจริญเติบโต ระบบภูมิคุ้มกันการทำงานของอวัยวะสืบพันธุ์และระบบประสาทที่ควบคุมพฤติกรรมต่างๆ ซึ่งประเทศไทยได้รับการจัดให้มีความเสี่ยงต่อภาวะขาดสังกะสีในระดับปานกลางและจากการกำหนดปริมาณสารอาหารอ้างอิงที่ควรได้รับสำหรับคนไทยของกรมอนามัย (2546) พบว่าปริมาณสังกะสีที่ควรได้รับประจำวันสำหรับวัยรุ่นเพศชายและหญิงคือ 9 และ 7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในวัยผู้ใหญ่ชายและหญิงคือ 13 และ 17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามการได้รับสังกะสีในปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็นต่อร่างกายส่งผลให้เกิดภาวะเป็นพิษได้ ซึ่งปริมาณสูงสุดของสังกะสีที่ได้รับในแต่ละวันโดยไม่พบอาการเป็นพิษของสังกะสีสำหรับผู้ใหญ่กำหนดไว้ไม่เกิน 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ภาวะเป็นพิษเรื้อรังของสังกะสีเกิดขึ้นจากการได้รับสังกะสีในปริมาณน้อยๆทางระบบหายใจ ส่งผลให้เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดศีรษะอ่อนเพลีย ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อและข้อต่อ กรณีได้รับสังกะสีโดยการบริโภคอาหารและดื่มน้ำที่เจือปนเป็นเวลานานจะเกิดการระคายเคืองที่หลอดลมและกระเพาะอาหารทางเดินอาหารตีตัน หากได้รับปริมาณมากจนเกิดภาวะเป็นพิษจะส่งผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของทองแดงและเหล็ก ทำให้ร่างกายเกิดอาการขาดธาตุทองแดงและเหล็ก การได้รับสังกะสีในปริมาณที่สูงกว่า 36 กรัมต่อวัน ส่งผลให้เกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลันเนื้อเยื่อหลอดลมและกระเพาะอาหารถูกทำลาย เกิดอาการอักเสบและปวดอย่างรุนแรง อาเจียน ปากไหม้ มีอาการไอและหอบ ซึ่พจรเต้นเร็ว ความดันเลือดลด ท้องร่วง ปวดบวม น้ำ ทำลายเนื้อเยื่อของไตและตับอ่อน ถ้าเข้าตาจะเกิดการระคายเคือง ตาแดง ปวดตาและทำลายเนื้อเยื่อตา หากโดนผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคืองเป็นผื่นแดง

2.3.3.2 ทองแดง (Cu) (ดวงกมล, 2556)

1. คุณลักษณะของทองแดง

มนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล แร่ทองแดงที่พบตามธรรมชาติมีมากมายหลายชนิดซึ่งที่มีความสำคัญในการผลิตโลหะทองแดงส่วนมากจะเป็นแร่ประเภทซัลไฟด์ มีสองชนิดคือแร่ทองแดงคาลโคไซต์ (chalcocite) (Cu_2S) มี Cu ประมาณ 79.8% และแร่ทองแดงคาลโคไพไรต์ (chalcopyrite) (CuFeS_2) มี Cu ประมาณ 34.5% นอกจากแร่ซัลไฟด์แล้วยังมีแร่ทองแดงออกไซด์ (Cu_2O) แต่ปริมาณที่พบน้อย แร่ทองแดงอีกชนิดหนึ่งคือแร่ทองแดงคาร์บอเนต (CuCO_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกกันทั่วไปว่า Malachite มีสีเขียว ในประเทศไทยพบแร่ทองที่จังหวัดเลย หนองคาย ขอนแก่น นครราชสีมา ตาก อุตรดิตถ์ แพร่ น่าน ลำปาง ลำพูน เพชรบูรณ์ ลพบุรี ฉะเชิงเทราและกาญจนบุรี

2. ประโยชน์ของทองแดง

โลหะทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.95% ขึ้นไป จะมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดีมากจึงถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ทำท่อในอุปกรณ์ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ ทำอุปกรณ์เกี่ยวกับรถยนต์ อาวุธ เหริยญูษาปณ์และตราต่างๆ ใช้เป็นส่วนประกอบของโลหะหลายชนิดเช่น

- 1) โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิลมีความเหนียวทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยเฉพาะในน้ำทะเลจึงใช้ทำท่อในระบบกลั่น อุปกรณ์ภายในเรือ
- 2) โลหะผสมระหว่างทองแดง นิกเกิลและสังกะสี หรือเรียกว่าเงินนิกเกิลหรือเงินเยอรมัน ใช้ทำเครื่องใช้ต่างๆเช่น ซ้อน ส้อม เครื่องมือแพทย์
- 3) ทองบรอนซ์หรือบรอนซ์ หรือทองสำริด โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก ถ้ามีดีบุกผสมอยู่ร้อยละ 0.8-10 โดยมวลและมีการเติมฟอสฟอรัสเล็กน้อยเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีความแข็งแรงกว่าทองแดงเมื่อเย็นตัวมีความแข็งแรงมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีและไม่ถูกกัดกร่อน
- 4) ทองเหลืองโลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลักมีสังกะสีผสมอยู่ร้อยละ 20-45 โดยมวล ทองเหลืองจะมีความแข็งและจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมของสังกะสีเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการตีแผ่ให้เป็นแผ่นขึ้นรูปง่าย ทองเหลืองจึงถูกนำมาใช้ในการทำท่อ ล้วนปิด-เปิดและตัวเชื่อม

3. ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดงในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชคือ Cu^{2+} , Cu^{1+} ทองแดงเป็นพิษอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืช ปริมาณทองแดงที่เหมาะสมในดินทั่วไปคือ 3-5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในดินที่มีทองแดงมากกว่า 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะเป็นพิษต่อพืชส่วนใหญ่ ระดับที่พืชต้องการคือ 5-20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ระดับความเป็นพิษในใบพืชทั่วไปมีค่ามากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามพืชแต่ละชนิดทนทานต่อพิษทองแดงได้แตกต่างกันและถ้าได้รับน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมถือว่าอยู่ในระดับที่ขาดธาตุอาหาร ในกรณีที่มีมนุษย์มีการสะสมทองแดงในปริมาณสูงจะทำให้เกิดความเป็นพิษได้เช่น เกิดอาการอาเจียน เหน็บชาหรือสลักได้

2.3.3.3 โครเมียม (Cr) (siamchemi, 2559)

1. คุณลักษณะของโครเมียม

โครเมียมเป็นโลหะสีขาวเงินเป็นมันวาวและแข็งมาก ในธรรมชาติไม่พบธาตุโครเมียมในรูปธาตุอิสระแต่จะพบในรูปของแร่ต่างๆที่พบมากคือ แร่โครไลต์ ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) สารประกอบหรือไอออนต่างๆของธาตุโครเมียมมีสี เช่น K_2CrO_4 หรือ CrO_4^{2-} มีสีเหลือง $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ หรือ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ มีสีส้ม $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ มีสีม่วงแดง เป็นต้น

2. แหล่งที่มาของโครเมียม

โครเมียมเป็นธาตุที่พบตามธรรมชาติในดิน หิน พืช สัตว์ ฝุ่นจากปล่องภูเขาไฟ ในร่างกายคนเราจะมีโครเมียมปริมาณน้อยและเป็นสารอาหารที่จำเป็นเพื่อสุขภาพที่สมบูรณ์ การใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมนั้นส่วนใหญ่ใช้ทาและชุบเหล็กและอัลลอยด์ อิฐในเตาเผา สารประกอบของโครเมียมใช้เป็นสีย้อมและในอุตสาหกรรมพอกหนังก็รักษาเนื้อไม้

3. ความเป็นพิษของโครเมียม

โลหะโครเมียมที่มีความเป็นพิษจะอยู่ในรูปโครเมียม +6, Cr⁶⁺ เมื่อเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดพิษ ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียนถ้าสัมผัสนานจะเกิดแผลพุพองทำให้ระบบทางเดินหายใจของคนมีปัญหาและอาจทำให้เกิดมะเร็งปอดได้

2.3.3.4 นิกเกิล (Ni)

1. คุณลักษณะของนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมันวาวสีเงินจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับเหล็กมีความแข็งแต่ตีเป็นแผ่นได้ในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันเกิดเป็นแร่มิลเลอร์ไรต์ (millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหนูจะเกิดเป็นแร่นิกโกไลต์ (niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารหนูและกำมะถันจะเป็นก้อนนิกเกิลกลานซ์ (nickel glance) (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2559)

2. ประโยชน์ของนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชันและต้านทานการกัดกร่อนสูง มีความเหนียวและอ่อนตัวมากสามารถขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว โลหะนิกเกิลส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม นอกจากนี้ยังใช้ในงานที่ต้องทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก ซึ่งตัวอย่างการนำโลหะนิกเกิลไปใช้ประโยชน์มีดังนี้

- 1) ใช้ทำมาตรน้ำ ประตูน้ำ ท่อสำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อน และวัสดุรองในอุตสาหกรรมเคมี และการกลั่นน้ำมัน
- 2) ใช้ทำโลหะผสมชนิดพิเศษ (Superalloy) ซึ่งต้านทานความเค้นและทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงสำหรับอุตสาหกรรมอากาศยาน โดยใช้เป็นวัสดุในการผลิตอุปกรณ์รักษาระดับความดันอากาศขึ้นส่วนต่างๆ และเครื่องยนต์ของเครื่องบินไอพ่น
- 3) ใช้เคลือบผิวอุปกรณ์ระดับยนต์ต่างๆ รวมถึงเครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น เตาไฟฟ้า หม้อหุงข้าว เตาปิ้งขนมปัง เครื่องเป่าผม ซ้อนส้อม จาน ถาด และอุปกรณ์การทำอาหาร เป็นต้น
- 4) ใช้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หลอดสุญญากาศ หลอดโทรทัศน์ และใช้ทำขั้วแอโนด แคโทด กริด และลวดยึดในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยคุณสมบัติการยึดติ่ง การต้านแรง และคุณลักษณะการปล่อยอิเล็กตรอน
- 5) จากคุณสมบัติที่สามารถดูดติดแม่เหล็กของนิกเกิลจึงใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น เครื่องแปลงกำลังสำหรับพลังงานอัลตราโซนิก อุปกรณ์การสำรวจใต้น้ำในอุตสาหกรรมการเดินเรือ อุปกรณ์ทำความสะอาดชิ้นงานก่อนเคลือบผิวในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ
- 6) ใช้ทำสปริงแบนในระบบถ่ายทอดโทรศัพท์ ปลั๊กไฟซึ่งทนการกัดกร่อน จอแม่เหล็ก แกนเหนียวนาฬิกาในคลื่นเสียงวิทยุ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในมอเตอร์ไซค์ รถยนต์ และมอเตอร์กระแสตรงขนาดใหญ่ นิกเกิลผงที่อัดเป็นแท่งใช้ในแบตเตอรี่ที่มีสารละลายเป็นต่างซึ่งใช้ในเครื่องบิน
- 7) ในการก่อสร้างมีการใช้นิกเกิลในรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อทำอุปกรณ์ประดับอาคาร เนื่องจากมีความต้านทานการกัดกร่อน แข็งแรง และให้ความสวยงาม (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2559)

3. ความเป็นพิษของนิกเกิล

นิกเกิลอาจถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังและจากทางเดินอาหาร ภาวะพิษของนิกเกิล เกิดจากการรับสัมผัสทางการหายใจและจากอาชีพเป็นหลัก โดยความสามารถในการถูกดูดซึมขึ้นกับความสามารถในการละลายในน้ำของสารประกอบนิกเกิล สารที่ละลายน้ำได้ดี ได้แก่ นิกเกิลคาร์บอเนล เป็นสารประกอบที่ถูกดูดซึมได้ดีกว่าสารประกอบที่ละลายในน้ำได้ไม่ดี เช่น นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิลซัลไฟด์ นิกเกิลถูกกำจัดจากร่างกายทางปัสสาวะการสัมผัสนิกเกิลคาร์บอเนลทางการหายใจจะทำให้เกิดอาการไข้ ไอ เจ็บหน้าอก หายใจลำบาก ปวดศีรษะ หลังจากนั้น 12-36 ชั่วโมงอาจเกิดภาวะปอดอักเสบเฉียบพลัน ซึ่งอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตจากภาวะการหายใจล้มเหลวการฟื้นตัวจากภาวะปอดอักเสบนี้ใช้เวลาหลายสัปดาห์ถึงหลายเดือน ซึ่งผู้ป่วยจะยังคงมีอาการอ่อนเพลียและเหนื่อยง่ายในระยะยาว การสัมผัสนิกเกิลที่ผิวหนังอาจทำให้เกิดภาวะผิวหนังอักเสบเป็นผื่นสัมผัส (contact dermatitis) หรือเป็นผื่นแพ้ในส่วนอื่นๆของร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาภูมิแพ้ ผู้ป่วยที่แพ้จะเกิดผื่นได้แม้สัมผัสนิกเกิลเพียงเล็กน้อย ผู้ที่ดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนนิกเกิลอาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดมวนท้อง และท้องเสีย มีรายงานอุบัติการณ์ของมะเร็งในโพรงจมูกและที่ปอดเพิ่มขึ้นในกลุ่มคนงานที่รับสัมผัสนิกเกิล (thaieditorial, 2553)

2.3.4 รูปแบบของโลหะหนักในดิน (สาวิตรี, 2553)

การสะสมของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมมีด้วยกันหลายรูปแบบ ตั้งแต่รูปแบบที่สามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายและเข้าไปสะสมอยู่ในตะกอนหรือในสิ่งมีชีวิต ไปจนถึงรูปแบบที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะที่แข็งแรงและถูกปลดปล่อยออกมาได้ยาก สามารถแบ่งรูปแบบการสะสมของโลหะในสิ่งมีชีวิตเรียงลำดับจากง่ายไปยากได้ดังนี้

- โลหะที่อยู่รูปของไอออน รูปสารประกอบอนินทรีย์หรือสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำเป็นรูปแบบที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตที่สุด
- โลหะที่อยู่ในรูปไอออนที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ร่วมกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และอนินทรีย์ จะเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ง่าย
- โลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนหรือพิกเก็ตกับสารอินทรีย์ เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้น้อย
- สารประกอบที่ตกตะกอนไม่ละลายและสารประกอบการตกตะกอนร่วมของโลหะบนพื้นผิวของของแข็งนั้น จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น
- โลหะที่อยู่ในรูปของแข็งในองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต โลหะในรูปแบบนี้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีจึงจะอยู่ในรูปที่นำเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้
- โลหะที่อยู่ในรูปผลึกแร่ทั้งแร่ปฐมภูมิและแร่ทุติยภูมิ จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ก็ต่อเมื่อมีการผุพังของแร่ธาตุด้วยกระบวนการต่างๆ

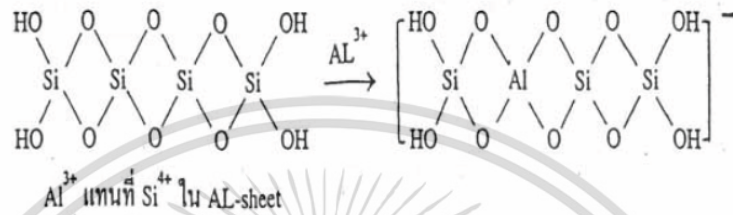
รูปแบบของโลหะมีความสำคัญต่อการพิจารณาความเป็นพิษของโลหะหนัก ทำให้การศึกษาเพื่อแยกรูปแบบต่างๆของโลหะออกจากกันจึงมีความจำเป็นเพื่อประเมินรูปแบบของโลหะที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailability)

2.3.4.1 โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ (สาวิตรี, 2553)

ในธรรมชาติโลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โลหะที่ดูดซับบนแร่ดินเหนียวและโลหะในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะ

- โลหะที่ดูดซับบนแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียวอยู่ในสภาพผลึกซิลิเกต ประกอบไปด้วยแผ่นอลูมินาและซิลิเกต พบว่า silicate clay จะเป็นบริเวณที่มีการดูดยึดแคตไอออนไว้ เนื่องจากเกิดการแตกหักบริเวณขอบผลึกของซิลิกาและอลูมินาทำให้เกิดประจุลบขึ้น หรืออาจจะเกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนที่เกาะติดกับออกซิเจนที่ผิว clay แสดงคุณสมบัติเป็นประจุลบดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากโลหะมีประจุเป็นบวกทำให้เกิดการดูดยึดกับแร่ดินเหนียว ถ้าหากแร่ดินเหนียวแสดงคุณสมบัติเป็นประจุลบออกมามากก็จะมีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะไว้ในปริมาณสูง



รูปที่ 2.3 การดูดซับโลหะของแร่ดินเหนียว (สาวิตรี, 2553)

- รูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะ

ในธรรมชาติพบว่าไฮดรอกไซด์ของโลหะมีคุณสมบัติเป็นตัวควบคุมพีเอช (pH) ของดิน สามารถดูดซับแคตไอออนและแอนไอออนในดินได้ พบมากที่สุดคือ ไฮดรอกไซด์ของอลูมินัม ซึ่งในธรรมชาติอลูมินัมจะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ไฮดรอกไซด์อยู่ในรูปโพลิเมอร์หรือโมโนเมอร์ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างแน่นอน ประจุลบบนพื้นผิวทำให้สารประกอบเหล่านี้ถูกดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของคอลลอยด์ดินเหนียวได้ ส่วนปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเหล็กก็เช่นเดียวกันกับอลูมินัม โดยในช่วงค่าพีเอช (pH) ที่แตกต่างกันก็จะเกิดสารประกอบของเหล็กและอลูมินัมที่ต่างกัน

2.3.4.2 โลหะหนักที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (สาวิตรี, 2553)

ในธรรมชาติสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมากและมีอยู่ด้วยกันหลากหลายชนิด แต่ที่พบปริมาณมากที่สุดคือ สารประกอบฮิวมัสได้มาจากซากพืชซากสัตว์ที่เกิดการเน่าเปื่อยย่อยสลายตามธรรมชาติ สารประกอบดังกล่าวมีความเสถียรมากที่สุดเป็นตัวช่วยยึดเกาะโลหะเนื่องจากสามารถเกิดพันธะกับโลหะได้

2.3.4.3 รูปคั่งค้างกับของแข็งและรวมอยู่ในผลึกของแร่ธาตุต่างๆ (สาวิตรี, 2553)

รูปแบบดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจากการผุพังสลายตัวของแร่ต่างๆในดิน เช่น Muscovite, Pyroxenes, Amphibole และ Feldspars ซึ่งเป็นแร่ปฐมภูมิเมื่อแปรสภาพจะกลายเป็นแร่ทุติยภูมิ การแปรสภาพแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ

- กระบวนการ Alteration เป็นกระบวนการที่แร่ปฐมภูมิบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์หรือทางเคมีเพียงเล็กน้อย ทำให้โครงสร้างเดิมของแร่ยุบและเรียงตัวกันใหม่เกิดเป็นแร่ซิลิเกตระหว่างการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีอะตอมของธาตุบางธาตุในโครงสร้างเดิมถูกทำปฏิกิริยาและหลุดออกไปจากโครงสร้างแล้วมีอะตอมธาตุอื่นเข้ามาแทนที่

- กระบวนการ Recrystallization เป็นกระบวนการที่แร่ปฐมภูมิมักมีการผุพังทางเคมีอย่างรุนแรง

พวกธาตุต่างๆจะหลุดออกมาจากโครงสร้างและถูกพัดมาอยู่ที่ใดที่หนึ่ง ในที่สุดเกิดการรวมตัวกันจนเป็นผลึกใหม่ของแร่ซิลิเกต การแพร่กระจายของแร่ซิลิเกตภายในดินชนิดต่างๆจะมีสัดส่วนของแร่ซิลิเกตแต่ละชนิดแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดหินและแร่ต้นกำเนิด ดินฟ้าอากาศ อายุของหินและภูมิประเทศ

2.3.5 การสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction)

การสกัดลำดับขั้น เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในดิน เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากและสามารถจำแนกรูปแบบของโลหะหนักที่เกิดขึ้น สามารถใช้ในการประมาณการความเป็นพิษของโลหะหนักที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการสกัดตามวิธีของ Tessier *et al.* (1979) แบ่งโลหะหนักออกเป็น 5 ส่วน

- ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable)

โลหะหนักในส่วนนี้อยู่ในรูปไอออน สามารถหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เป็นรูปแบบโลหะหนักที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที สารที่ใช้ในการสกัดในส่วนนี้จะมีความรุนแรงน้อยที่สุด

- ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (bound to carbonate)

โลหะหนักในส่วนนี้จะไปจับกับคาร์บอเนตในดิน ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อค่า pH เมื่อ pH เกิดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบคาร์บอเนตจะถูกชะออกมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้

- ส่วนที่ตรึงกับออกไซด์ (bound to Fe and Mn oxide)

รูปแบบของโลหะที่เกิดสารประกอบกับสารประกอบของออกไซด์ในดินได้แก่ เหล็กออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ โลหะหนักในส่วนนี้จะหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากกว่า ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable) และ ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (bound to carbonate)

- ส่วนที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (bound to organic matter)

โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารประกอบกับสารอินทรีย์ในดินนั้น โลหะจะถูกสารอินทรีย์ดูดซับโลหะไว้และค่อยๆถูกปล่อยออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น เกิดฝนกรดที่มีค่า pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4

- ส่วนที่เหลือ (residual)

โลหะในส่วนนี้เป็นส่วนที่หลุดออกมาได้ยากมากที่สุด เป็นโลหะที่อยู่ในรูปคงค้างกับของแข็ง โดยในการทดลองต้องใช้กรดเข้มข้นคือ HNO_3 และ HCl ในการสกัดโลหะออกจากดิน

2.3.6 ทฤษฎี hard soft acids bases (Pearson, 1963)

ทฤษฎี hard soft acids bases เป็นทฤษฎีที่มีประโยชน์สามารถทำนายความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจากสมบัติ hard-soft ของไอออนนั้นๆ Pearson (1963) ได้นำเสนอหลักการนี้โดยกำหนดและแบ่งประเภทของไอออนตามสมบัติดังนี้ ถ้าไอออนที่เป็นกรดหรือเบสมีขนาดของไอออนที่ใหญ่ มีประจุบวกหรือลบต่ำและสามารถถูกทำให้เกิดขั้วได้ง่าย (polarizability) จะมีสมบัติเป็น soft acid หรือ soft base แต่ถ้าไอออนที่เป็นกรดหรือเบสมีขนาดของไอออนเล็ก มีประจุบวกหรือลบสูงและสามารถถูกทำให้เกิดขั้วได้ยากไอออนจะมีสมบัติเป็น hard acid หรือ hard base การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะเสถียรมากที่สุดเมื่อไอออนของกรดและเบสที่เกิดพันธะกันเป็นแบบ soft acid + soft base หรือ hard acid + hard base แต่ถ้าหากไอออนของกรดและเบสเป็นแบบ soft acid + hard base หรือ hard acid + soft base สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียร Pearson (1963) ได้กำหนดและแบ่งกลุ่มของ acids และ bases ตามคุณสมบัติ hard-soft ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.4 การแบ่งกลุ่มตามสมบัติการเป็น hard-soft acids ของไอออน

hard acids	borderline acids	soft acids
H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , Be^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Sc^{3+} , La^{3+} , Lu^{3+} , Th^{4+} , U^{4+} , UO_2^{2+} , Pu^{4+} , Ti^{4+} , Zr^{4+} , VO^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{6+} , WO^{4+} , Mn^{2+} , Mn^{7+} , Fe^{3+} , Co^{3+} , BF_3 , $B(OR)_3$, Al^{3+} , $Al(CH_3)_3$, $AlCl_3$, AlH_3 , Ga^{3+} , In^{3+} , CO_2 , RCO^+ , Si^{4+} , CH_3Sn^{3+} , $(CH_3)_2Sn^{2+}$, N^{3+} , RPO_2^+ , $ROPO_2^+$, As^{3+} , SO_3 , RSO_2^+ , $ROPO_2^+$, As^{3+} , SO_3 , RSO_2^+ , $ROSO_2^+$, Cl^{3+} , Cl^{7+} , I^{5+} , I^{7+} HX (hydrogen-bonding molecules)	Fe^{2+} , CO^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Rh^{3+} , Ir^{3+} , Ru^{3+} , Os^{2+} , $B(CH_3)_3$, GaH_3 , R_3C^+ , $C_6H_5^+$, Sn^{2+} , Pb^{2+} , NO^+ , Sb^{3+} , SO_2	$Co(CN)_5^{3-}$, Pd^{2+} , Pt^{2+} , Pt^{4+} , Cu^+ , Ag^+ , Au^+ , Cd^{2+} , Hg^+ , Hg^{2+} , CH_3Hg^+ , BH_3 , $Ga(CH_3)_3$, $GaCl_3$, $GaBr_3$, GaI_3 , Tl^+ , $Tl(CH_3)_3$, CH_2 , HO^+ , RO^+ , RS^+ , RSe^+ , Br_2 , Br^+ , I_2 , I^+ , Cl , Br , I , N , $RO\cdot$, $RO_2\cdot$, M^0 (metal atoms)

ที่มา : Chemogenesis (2018)

ตารางที่ 2.5 การแบ่งกลุ่มตามสมบัติการเป็น hard-soft bases ของไอออน

hard bases	borderline bases	soft bases
NH_3 , RNH_2 , N_2H_4 , H_2O , OH^- , O^{2-} , ROH , RO^- , R_2O , CH_3COO^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , ClO_4^- , F^- , Cl^-	$C_6H_5NH_2$, C_5H_5N , Br^- , N_3^- , N_2 , NO_2^- , SO_3^{2-}	H^- , H_2S , SH^- , S^{2-} , R^- , C_2H_4 , C_6H_6 , CN^- , RNC , CO , I^- , SCN^- , PR_3 , $P(OR)_3$, AsR_3 , R_2S , RSH , RS^- , $S_2O_3^{2-}$

ที่มา : Chemogenesis (2018)

2.4 สารปรับปรุงดิน

สารปรับปรุงบำรุงดิน (soil amendments) หมายถึง สารใดๆก็ได้ที่เมื่อใส่ลงในดินแล้วสามารถช่วยปรับปรุงดินให้มีสภาพเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชให้ดีขึ้น ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงทางด้านกายภาพ เคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดินหรือสภาพทางชีวภาพในดินโดยยกเว้นปุ๋ยเคมี

2.4.1 ประเภทของสารปรับปรุงดิน

2.4.1.1 ประเภทตามองค์ประกอบของตัวสาร (ปิยะ, 2553)

1. สารอนินทรีย์

สารปรับปรุงดินประเภทนี้ได้แก่สารปรับปรุงดินในรูปของสารอนินทรีย์ (สารที่ไม่มีคาร์บอน ยกเว้น CO , CO_2 และ CO_3^{2-}) ที่ได้จากธรรมชาติโดยตรงหรือมีการนำมาปรุงแต่งโดยใช้ความร้อน เช่น

สารปรับปรุงดินในรูปหินและแร่ต่างๆเช่น หินโดโลไมต์ (dolomite) ยิปซัม (gypsum) แร่ซีโอไลต์ที่ได้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้โปรดแจ้งคืนแก่ผู้จัดทำ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากธรรมชาติ (natural zeolite) แคลไซต์ เคลย์ (calcined clay) และรวมถึงสารเคมีที่มีการสังเคราะห์ขึ้น เช่น สารซีโอไลต์สังเคราะห์ (synthetic zeolite) เป็นต้น

2. สารอินทรีย์

สารปรับปรุงดินในรูปสารอินทรีย์มีมากมายหลายชนิดทั้งประเภทสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ได้จากการแปรสภาพโดยการหมักหรือจากผลพลอยได้ทางการเกษตร ผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร รวมทั้งสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี ตัวอย่างของสารปรับปรุงดินในรูปสารอินทรีย์ชนิดต่างๆที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดินได้แก่ ปุ๋ย สารฮิวมัส กรดฮิวมิก เป็นต้น

3. สารอนินทรีย์ผสมสารอินทรีย์

สารปรับปรุงดินบางชนิดผลิตขึ้นโดยการผสมวัสดุปรับปรุงดินในรูปสารอนินทรีย์กับสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มคุณค่าของสารอินทรีย์หรือเพื่อการใช้ประโยชน์ในลักษณะผสมผสาน เช่น สารปรับปรุงดินในรูปสารทีซี (TC) ที่มีองค์ประกอบที่สำคัญประกอบด้วยสารดูดน้ำพอลิเมอร์ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์และสารเร่งการเติมโตพืช เป็นต้น

2.4.1.2 ประเภทตามลักษณะการใช้ประโยชน์ (ปิยะ, 2553)

สารชนิดต่างๆที่มีคุณค่าในการปรับปรุงสมบัติของดินให้ดีขึ้นอาจจำแนกประเภทออกได้ตามลักษณะการใช้ประโยชน์เพื่อปรับปรุงสมบัติของดินที่มีปัญหาเช่น ปัญหาทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดิน หรือมีปัญหาหลายด้านในลักษณะผสมผสานโดยหลักการอย่างกว้างๆดังกล่าวอาจจำแนกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ 4 ประเภทคือ

1. ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน

สารที่ใช้ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินโดยทั่วไปคือ สารที่ใช้เพื่อปรับสภาพการเคลื่อนที่ของน้ำและการถ่ายเทอากาศของดินที่มีโครงสร้างไม่เหมาะสม การเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินและการป้องกันหรือลดการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (surface crust) เมื่อดินเปียกแล้วแห้ง ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียดินและน้ำโดยกระบวนการกร่อนดิน (soil erosion) สารปรับปรุงประเภทนี้ที่สำคัญๆมีทั้งในรูปสารอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่างๆผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมในภาคเกษตร เช่น เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง ขุยมะพร้าว และนอกภาคการเกษตร เช่น ฟอสโฟอิมพ์ซัม ฯลฯ สารอนินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น หินและแร่บางชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ ยิปซัม เป็นต้น

2. ปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน

สารที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินเป็นหลักที่สามารถจำแนกออกได้ค่อนข้างชัดเจนได้แก่ หินปูนโดโลไมต์และวัสดุปูนโลม์ชนิดต่างๆ เช่น หินปูน ปูนขาว ปูนมาร์ลและเปลือกหอยบด เป็นต้นเพื่อแก้ความเป็นกรดของดิน สารปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ เช่น กำมะถันผงที่ใช้เพื่อแก้ความเป็นด่างของดินบางประเภท การใช้ยิปซัมเพื่อลดระดับความเค็มของดินเกลือ การใช้สารอินทรีย์สกัดบางชนิด เช่น สารฮิวมัสชนิดต่างๆ แร่บางชนิด เช่น แร่ฟอสฟอรัส ซีโอไลต์ ฯลฯ เพื่อเพิ่มความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ของดินบางชนิดที่มีความจุน้อยเกินไปพร้อมทั้งยังเพิ่มความจุบัฟเฟอร์ (buffering capacity) ของดินให้สูงขึ้น

3. ปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดิน

สารหลายชนิดที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ในขณะเดียวกันอาจมีสมบัติช่วยปรับปรุงสภาพทางชีวภาพและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชไปพร้อมๆกัน เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดฮิวมิกหรือสารประกอบอนุพันธ์ของกรดฮิวมิกชนิดต่างๆ สำหรับคุณค่าของกลุ่มสารปรับปรุงดินประเภทนี้ต่อการปรับปรุงกิจกรรมที่เป็นประโยชน์ของจุลินทรีย์ในดินหรือต่อการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชในดิน จะมีมากหรือน้อยขึ้นกับสมบัติของสารผสมชนิดนั้นๆว่าเมื่อใช้แล้วจะมีผลต่อการปรับปรุงสภาพความเหมาะสมของสิ่งแวดล้อมในดินมากน้อยเพียงไร เช่น pH ของดิน การถ่ายเทอากาศ เป็นต้น

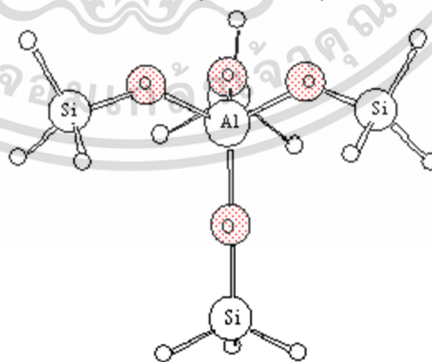
4. ปรับปรุงสมบัติของดินแบบผสมผสาน

สารปรับปรุงหลายชนิดสามารถนำมาปรับปรุงสภาพของดินได้ทั้งทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ การใช้สารปรับปรุงดินบางประเภทในรูปของสารอินทรีย์ เช่น ในรูปปุ๋ยอินทรีย์ สารอินทรีย์ในรูปผลพลอยได้ชนิดต่างๆอาจเกิดผลดีพร้อมๆกันในการเพิ่มระดับ CEC ของดินที่มีค่า CEC ต่ำ และในขณะเดียวกันก็ปรับปรุงสภาพทางกายภาพของดินโดยการเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินที่มีความจุในการอุ้มน้ำต่ำ เช่น ดินทรายที่มีเนื้อหยาบ

2.4.2 สารปรับปรุงดินที่ศึกษา

2.4.2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite) (ธีรวัฒน์, 2550)

ซีโอไลต์ (zeolite) คือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกาหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกาหรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็งเป็นรูปพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิกอน(หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์ (ธีรวัฒน์, 2550)

ซีโอไลต์อาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุ มีการทำเป็นเหมือนซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลกหรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมีเพื่อประโยชน์ทางการค้า ซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเฉพาะเจาะจง รวมทั้งอาจมีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลต์ ซีโอไลต์มีมากกว่า 600 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างนี้มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้หน้าซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป ลักษณะเด่นของซีโอไลต์คือโครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการโดยโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลต์ก็จะสามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านออกมาและโมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอดีกับโพรงซีโอไลต์ก็จะถูกกักไว้ภายในโพรง

ชนิดของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ที่พบตามธรรมชาติ (natural or mineral zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (synthetic zeolite) ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่ต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นมีถึงประมาณ 100 ชนิด ซีโอไลต์มี 2 ชนิด ดังนี้

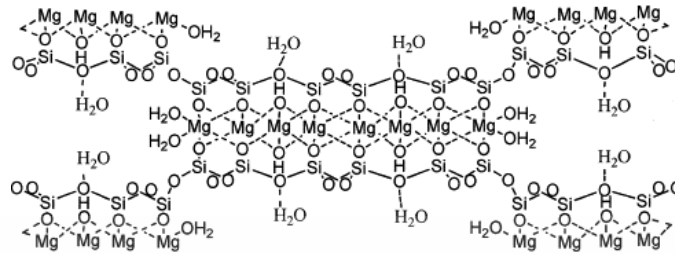
1. ซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติ (natural or mineral zeolite) ประกอบด้วย hydrated alumino silicates ของ alkaline และ alkaline-earth metals ซึ่งซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีน้ำหนักเบา เป็นแร่ที่มีความนุ่ม มีสีน้ำตาล น้ำตาลเหลืองหรือสีเขียวจาง มีลักษณะคล้ายขอล็ก ซีโอไลต์ธรรมชาติที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ clinoptilolite , chabazite และ mordenite บางอุตสาหกรรมอาจจะใช้ phillipsite ในสภาพธรรมชาติพบแร่ซีโอไลต์ประมาณ 50 ชนิด แต่ที่พบบ่อยและมีปริมาณค่อนข้างสูงในดินมีเพียง 9 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ Clinoptilolite, Analcime, Chabazite, Heulandite, Mordenite, Phillipsite, Natrolite, Stilpite และ Gesmondine แร่ทั้ง 9 ชนิด ในกลุ่มนี้ Clinoptilolite และ Mordenite เท่านั้นที่พบมากในดินทั่วไป

2. ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (gelatin) จนถึงรูปที่เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (sandlike) ได้แก่ Zeolite A, Zeolite Y, Zeolite F, Zeolite M เป็นต้น

2.4.2.2 ซีพิโอไลต์ (Sepiolite) (อัญชลี, 2534)

แร่ซีพิโอไลต์ (sepiolite) อาจจัดอยู่เป็นพวกโครงสร้างเป็นชั้นชนิด 2:1 ได้แต่แตกต่างจากแร่ดินเหนียวซิลิเกตอื่นๆตรงที่กลุ่มของ tetrahedral ของแต่ละแผ่นไม่ได้เข้าไปในทิศทางเดียวกันคือมีทั้งชี้ขึ้นและชี้ลง การที่สลับกันแบบนี้ทำให้แผ่น tetrahedral ถูกแบ่งเป็นแถบที่มีความกว้างต่างกัน แร่ดินเหนียวซีพิโอไลต์เป็น Mg-silicate ที่มีอะตอม Mg เป็นส่วนน้อยอาจเป็นเพราะแร่เหล่านี้อยู่ระหว่างชนิด dioctahedral และ trioctahedral จึงทำให้มีลักษณะเป็นเส้น ซึ่งเป็นผลมาจากแถบหลายๆแถบขนานตามยาวกับแกนและประกอบด้วย ribbon ที่มีโครงสร้างประเภท 2:1 สลับกัน ribbon มีตำแหน่งใน octahedral 8 ตำแหน่ง โครงสร้างของแร่คล้ายกับโครงสร้างลูกโซ่ของไพรอกซีน 3 เส้นมาต่อกัน ถึงแม้ว่าแผ่น tetrahedral จะเรียงต่อกันแต่ยอดในแต่ละแถบชี้ไปยังด้านตรงข้ามจึงทำให้มีโครงสร้างดังนี้ 1) ตำแหน่งใน tetrahedral มีอะตอมซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ 2) ตำแหน่งใน octahedral

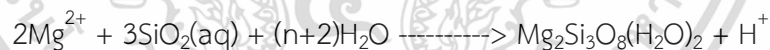
ที่ 2.5 แร่ซีพีโอไลต์มีช่องซึ่งมี cross section ขนาด $3.8 \times 9.4 \text{ \AA}$ ในช่องเป็นไอออนบวกและโมเลกุลของน้ำ เครื่องหนึ่งของน้ำจะติดอยู่กับแผ่น octahedral เพื่อทำให้ประจุสมดุล ส่วนน้ำที่เหลือจะมีตำแหน่งแน่นอนในช่อง สูตรโครงสร้างของซีพีโอไลต์ตามทฤษฎีของแร้ คือ $(\text{OH}_2)_4(\text{OH})_6\text{Mg}_9\text{Si}_{12}\text{O}_{30} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีพีโอไลต์ (Yu et al., 2011)

การเกิดและการแพร่กระจายของแร้

แหล่งแร้เศรษฐกิจของซีพีโอไลต์มีทั่วโลก โดยเกิดกับแร้ที่มีการตกตะกอนทางเคมี เช่น หินพวกคาร์บอนेट โอปอล เซิร์ตและพวกฟอสเฟต พบว่าเกิดมากในยุค Miocene เช่นที่จอร์เจีย แหลมฟลอริดา ภาคใต้ของอเมริกา ออฟริกาใต้ รัสเซีย ออสเตรเลีย แร้ซีพีโอไลต์พบมากที่สุดในตะกอนทับถมโดยน้ำทะเล ในดินแร่ซีพีโอไลต์หาได้ยากจะเกิดในสภาพที่เป็นต่างและต้องมีเกลือต่างๆและซิลิกอนอิสระ พบ aluminous sepiolite ในดิน solonchak ที่มีการระบายนํ้าเสียของออสเตรเลียซึ่งเกิดมาจากหินมาร์ล การเกิดซีพีโอไลต์ในดิน แร้ชนิดนี้จะตกผลึกทางเคมีในตะกอนที่เป็นต่างและมีปริมาณซิลิกอนและแมกนีเซียมมากพอสมควร ซึ่งแร้ชนิดนี้จะคงทนในสภาพแวดล้อมแบบนี้เท่านั้นและง่ายต่อการสลายตัวในสภาพแวดล้อมที่มีการชะล้าง การสังเคราะห์แร่ซีพีโอไลต์ที่อุณหภูมิห้องทำได้ง่ายโดยการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปในซิลิกาอสัณฐาน แล้วทำให้อิ่มตัวด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน การตกตะกอนของซีพีโอไลต์มีดังนี้



การเกิดซีพีโอไลต์กระตุ้นด้วยการมีซิลิกาเป็นจำนวนมาก สภาพแวดล้อมมีความเป็นต่างสูงและถ้ามีอลูมิเนียมอยู่ด้วยจะไม่เกิด เนื่องจากแมกนีเซียมจะเข้าร่วมเป็นโครงสร้างของอลูมิโนซิลิเกตสรุปการเกิดและคงอยู่ของซีพีโอไลต์ขึ้นอยู่กับ pH สูง (8-10) มี Si^{4+} และ Mg^{2+} มาก Al^{3+} น้อยหรือไม่มีเลย

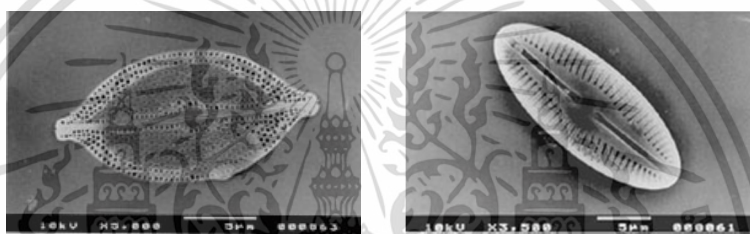
สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

ซีพีโอไลต์มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ประมาณ $20-45 \text{ cmol.kg}^{-1}$ สลายตัวได้ง่ายในตัวกลางที่เป็นกรด เมื่อปรับปรุงแร่ซีพีโอไลต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) มากเกินไป ได้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ $\text{Mg} > \text{Fe} > \text{Al}$ เนื่องจากเส้นใยเป็นแบบเปิดแร่เหล่านี้จึงมีพื้นที่ผิวภายนอกมาก พื้นที่ผิวของซีพีโอไลต์มีค่า $392 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ลักษณะเส้นใยของซีพีโอไลต์ยังทำให้ดินจับเป็นก้อนมีความพรุนสูง

2.4.2.2 ไดอะตอมไมต์ (Diatomite) (ธีรวัฒน์, 2550)

ไดอะตอมไมต์ (diatomite) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ดินเบา (diatomaceous earth) โครงสร้างของไดอะตอมไมต์ส่วนใหญ่เป็นซิลิกาอสัญฐาน (amorphous silica) มีสูตรโมเลกุลอยู่ในรูป $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งมีสมบัติเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ละลายได้ในต่างแก่ละลายได้ดีในกรดกัดแก้ว (hydrofluoric acid) แต่ไม่ละลายในกรดอื่น ไดอะตอมไมต์มีน้ำปนอยู่เล็กน้อยประมาณ 2-10 % และมีสารอื่นๆเจือปน สมบัติทางกายภาพที่เด่นชัดของไดอะตอมไมต์ คือน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีสีขาวนวลถึงน้ำตาลอ่อน

ไดอะตอมไมต์มีผนังเป็นฝาซิลิกาประกบกัน บางชนิดว่ายน้ำได้บางชนิดอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป มีขนาดตั้งแต่ 2-2,000 ไมครอน พบในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เมื่อไดอะตอมตายลง เปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกเป็นตะกอนสะสมกันจำนวนมากศาลบนพื้นทะเลหรือพื้นทะเลสาบแล้วในที่สุดกลายเป็นไดอะตอมไมต์ ซึ่งมีลักษณะต่าง ๆ กันตามแต่ชนิดของไดอะตอม ลักษณะของไดอะตอม แสดงดังรูปที่ 2.6

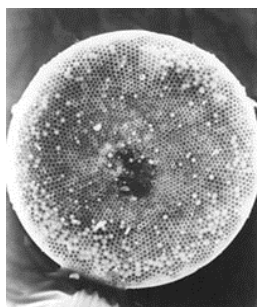


รูปที่ 2.6 ลักษณะของไดอะตอม (ธีรวัฒน์, 2550)

ไดอะตอมไมต์ เรียกได้อีกอย่างว่า เรดิโอลาเรียนเอิร์ธ (Radiolarian Earth) ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยโอปอของไดอะตอมและเรดิโอลาเรียน มีสีขาวหรือสีครีมเป็นส่วนใหญ่แต่ก็อาจพบสีเหลืองอ่อน สีแดงหรือสีน้ำตาล ไดอะตอมไมต์ เป็นซากดึกดำบรรพ์ขนาดเล็กซึ่งซากขนาดเล็กที่เป็นสัตว์นี้ส่วนมากจะเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว มีเปลือกแข็งห่อหุ้มจึงสามารถคงสภาพของซากอยู่ในชั้นหินได้ เช่น พวกเรดิโอลาเรีย พวกไดอะตอมที่เป็นสาหร่ายเซลล์เดียวและมีเปลือกหุ้มที่เป็นซิลิกา เปลือกเหล่านี้เมื่อทับถมกันมากๆเป็นเวลานานก็แข็งตัวอัดกันแน่นมากเป็นหิน ชั้นของไดอะตอมไมต์ที่ทับถมยึดกันแน่นอยู่ใต้ชั้นกรวดทรายบริเวณเหมืองบ้านพอน จังหวัดลำปางแสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่อนำไดอะตอมไปถ่ายภาพขยาย 350 เท่า ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 ชั้นของไดอะตอมไมต์ (ธีรวัฒน์, 2550)



รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายขยายผ่านกล้อง Scanning Electron Microscope (ธีรวัฒน์, 2550)

แหล่งดินเบาหรือโดอะตอมไมต์ในประเทศไทยจำกัดอยู่ในจังหวัดลำปางเท่านั้น โดยจะพบเป็นแหล่งเล็กใหญ่กระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างในลำปาง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตอำเภอเมืองลำปาง อำเภอแม่ทะ และอำเภอเกาะคา นอกจากนี้ยังสามารถพบได้บ้าง จากกาสำรวจของกองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณีบริเวณแอ่งลำปางสามารถประเมินปริมาณสำรองของดินเบาได้ทั้งหมดประมาณ 245 ล้านตัน

2.5 การดูดซับ

หลักการดูดซับ (ลลิตา, 2554)

การดูดซับจะเกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดที่บริเวณพื้นผิวสัมผัส (interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและแก๊ส ของแข็งและแก๊ส ของแข็งและของเหลว ของเหลวและของเหลว สารที่ผิวเกิดการดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) สามารถแบ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

- การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

เป็นการดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนๆและเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น แวนเดอร์วาลส์หรือพันธะไฮโดรเจน โดยพบว่าแรงนี้ไม่มีพลังงานไฮโดรเจน พบว่าแรงนี้ไม่มีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยสามารถกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวของวัสดุดูดซับได้ง่าย และอาจเกิดการดูดซับเชิงซ้อนหลายๆชั้นได้ (multilayer) โดยการดูดซับชนิดนี้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิปกติและจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีที่ไม่เลกุลเคลื่อนที่มาสัมผัสบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มความดันจะทำให้ความสามารถของการดูดซับลดลง เนื่องจากตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ (desorption) ซึ่งเป็นการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

- การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับเกิดพันธะเคมีกับตัวดูดซับ เช่น การใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกัน ซึ่งจะส่งผลให้ตัวถูกดูดซับเดิมเกิดการเปลี่ยนแปลง คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม จากนั้นจะมีการจัดเรียงอะตอมเป็นสารประกอบใหม่โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรง จึงทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากวัสดุดูดซับทำได้ยากหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและการดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (exchange)
เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุตรงข้ามกันหรืออาจเกิดจากการแทนที่ของประจุที่ผิวของวัสดุดูดซับกับไอออนของตัวถูกดูดซับ
- การดูดซับแบบเจาะจง (specific adsorption)
เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ตัวดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับชนิดนั้นๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (ปริญทร, 2551)

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะสามารถดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผลมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด
2. ขนาดและลักษณะของสารดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถของตัวถูกละลายลดลงเพราะในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี นอกจากนี้ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ คือ ถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นอัตราควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ คือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง
3. พิเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดซับด้วย โดยทั่วไปไฮโดรเจนไอออนก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ดี
4. อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับเนื่องจากอัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบ exothermic
5. เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเวลาที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาที่สัมผัสเลยจากช่วงนี้ไปแล้วก็ จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย
6. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมากทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความปั่นป่วนในถังการดูดซับ คือ ความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจึงจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วีรภัทร์ และคณะ (2557) ศึกษาการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินนาด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน ตัวอย่างดินเป็นดินที่ปนเปื้อนจำนวน 3 ตัวอย่างในพื้นที่เกษตรกรรมบริเวณใกล้เคียงแหล่งกังหันน้ำบ้านพะเต๊ะ ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และดินที่ไม่ปนเปื้อนในพื้นที่เกษตรกรรมจำนวน 4 ตัวอย่าง ตำบลไทรใหญ่ อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี เพื่อประเมินความเสี่ยงของโลหะหนักที่จะเคลื่อนย้ายไปสู่สิ่งมีชีวิตด้วยวิธีการประเมินค่า bioavailable index (BI) พบว่าดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวมีสภาพเป็นกลาง มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในระดับต่ำถึงปานกลาง ค่า CEC ที่ได้จัดว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์สูง ผลจากการสกัดลำดับชั้นพบว่าความเข้มข้นของ Ba และ Mn ค่อนข้างสูงทั้งในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนอีกทั้งในดินที่ปนเปื้อนที่จุดเก็บ c พบ Zn สูงถึง 2,001.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินกว่าระดับที่มีความเสี่ยงทางด้านระบบนิเวศที่กำหนดโดย Department of Environmental and Conservation (2010) (200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) นอกจากนี้ยังพบว่า Ba ส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ Cr อยู่ในส่วนที่ถูกตรึงอยู่กับสารอินทรีย์และส่วนที่เหลือ Cu และ Pb อยู่ในรูปฟอร์มที่เหลือ Zn อยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงอยู่กับเหล็กและแมงกานีสและรูปฟอร์มที่เหลือ สำหรับการประเมินค่า bioavailable index พบว่า Ba และ Mn มีความเสี่ยงสูงมากที่จะเคลื่อนย้ายไปสู่สิ่งมีชีวิต แต่ Co Cr Cu Pb และ Zn มีความเสี่ยงต่ำ

สมพร และศวพร (2556) ศึกษาปริมาณการดูดและการสะสมสังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง ปรอท สารหนูและนิกเกิลในผัก 4 ชนิด ทำการปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักจริงพบว่า กระเพราะเป็นพืชที่ดูดซับโลหะหนักทุกประเภทในปริมาณที่ต่ำไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภค จากการศึกษาแนวทางในการลดการสะสมโลหะหนักจากดินไปสู่พืชโดยการศึกษาสารปรับปรุงดิน 4 ตัว คือ ปุ๋ยหมักร่วมกับเหล็กออกไซด์ หินฟอสเฟต ข้าวเปลือกและซีโอไลต์ พบว่าการใช้ปุ๋ยหมักร่วมกับเหล็กออกไซด์สามารถลดการสะสมแคดเมียมในผักกาดขาว ผักกาดเขียวได้ถึงร้อยละ 100 และ 32.4 ตามลำดับ หินฟอสเฟตสามารถลดการสะสมแคดเมียมในผักกาดเขียว ผักคะน้าได้ถึงร้อยละ 90.9 และ 45.2 ตามลำดับและสามารถลดตะกั่วในผักกาดขาวได้ร้อยละ 67.88

Ling *et al.* (2014) ศึกษาประสิทธิภาพของการปรับปรุงพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วย sepiolite และ palygorskite โดยทำการศึกษาในพื้นที่ดินเหนียวพร้อมทั้งทำการปลูกข้าวเพื่อตรวจสอบการสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าว 2 สายพันธุ์ คือ Zhonglianyou 950 (ZLY-950) และ Fengyou 9 (FY-9) ผลของประสิทธิภาพการปรับปรุงพบว่าทั้ง sepiolite และ palygorskite ทำให้ pH ในดินเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมลดลงจากการสกัดด้วย HCl, TCLP, CaCl_2 และ NH_4OAc ในเมล็ดข้าวพบว่าข้าวสายพันธุ์ FY-9 ที่ปรับปรุงด้วย sepiolite มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมอยู่ในช่วง 0.181-0.345 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ในอาหารมาตรฐาน Codex การกระจายของแคดเมียมในดินจากการศึกษาด้วยการสกัดแบบลำดับชั้น (sequential extraction) พบว่าทั้ง sepiolite และ palygorskite มีปริมาณของแคดเมียมในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง แต่มีการเพิ่มขึ้นของรูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอนเนตและรูปฟอร์มที่เหลือ โดยในดินที่ปลูกข้าวสายพันธุ์ FY-9 พบว่ารูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนลดลงอยู่ในช่วง 0.98-1.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสำหรับ sepiolite และ 1.05-1.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสำหรับ palygorskite ในส่วนของรูปฟอร์มที่เหลือมีปริมาณเท่ากับ 0.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสำหรับ sepiolite และ 0.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสำหรับ palygorskite เมื่อเทียบกับชุดควบคุมซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sun *et al.* (2015) ศึกษาประสิทธิภาพของ bentonite ในการปรับปรุงพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนแคดเมียมและตะกั่ว ศึกษาการดูดซับโลหะหนักของต้นข้าว การกระจายของโลหะหนักในดิน (metal fraction) ความเข้มข้นของโลหะหนักและกิจกรรมของเอนไซม์ในดิน (enzyme activity) ผลของการปรับปรุงพบว่า bentonite ทำให้เพิ่มกิจกรรมของ superoxide dismutase (SOD) ในราก peroxidase (POD) ในใบและ soluble protein (SP) ในราก ในส่วนของ malondialdehyde (MDA) มีการลดลงในใบ 74.1% ในราก 62.1% การกระจายตัวของโลหะหนักในดินพบว่าในส่วน exchangeable fraction แคดเมียมลดลง 11.1-42.5% ตะกั่วลดลง 20.3-49.3% ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจากส่วนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (available form) ไปยังส่วนที่ไม่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (unavailable form) คือ รูปฟอร์มที่ละลาย พบว่ามีการแคดเมียมมีปริมาณเพิ่มขึ้น 3-54.3% ตะกั่ว 6.7-10% bentonite ยังสามารถยับยั้งการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมและตะกั่วจากดินไปสู่ส่วนเหนือพื้นดิน (aerial part) พบว่าแคดเมียมลดลง 17.4-44.3% ตะกั่วลดลง 3.7-7.8% ในส่วนเหนือพื้นดิน (aerial part) ในส่วนกิจกรรมของเอนไซม์พบว่า catalase มีปริมาณลดลงแต่มีการเพิ่มขึ้นของ invertase และ urease รวมถึงยังมีการเพิ่มขึ้นของ bacteria, fungi และ actinomycete ในดิน บ่งบอกถึงคุณภาพดินจากการปรับปรุงด้วย bentonite การศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดการดูดซับโลหะหนัก (bioavailability) ในดินเหนียว

Li *et al.* (2009) ทำการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนตะกั่ว (0 125 500 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูดินด้วย zeolite (0 5 10 และ 20 กรัมต่อกิโลกรัม) โดยศึกษาการดูดซับโลหะหนักของผักกาดก้านขาว ความเข้มข้นโลหะหนักและการกระจายของโลหะหนักในดิน ผลการปรับปรุงดินพบว่า zeolite เพิ่ม pH, ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (OM) การกระจายของตะกั่ว (metal fraction) ในดินพบว่ามีการลดลงของรูปฟอร์มที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (available form) คือ รูปฟอร์มที่ละลายน้ำและรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ เปลี่ยนแปลงไปยังส่วนที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ (unavailable form) โดยพบว่ามีเพิ่มขึ้นของรูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุในดินและรูปฟอร์มที่ละลาย จากการศึกษาพบว่าปริมาณ zeolite ที่เหมาะสมคือ 10 และ 20 กรัมต่อกิโลกรัมบนความเข้มข้นของตะกั่วที่มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม zeolite สามารถยับยั้งการดูดซับตะกั่วของผักกาดก้านขาวโดยสามารถลดความเข้มข้นตะกั่วในส่วนที่กินได้ (edible part) ของพืชได้ถึง 30% ในดินปนเปื้อน 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเพิ่มความปลอดภัยในการบริโภคและลดความเสี่ยงในห่วงโซ่อาหาร (food chain)

Ye *et al.* (2015) ทำการศึกษาประสิทธิภาพ diatomite ในการลดการเคลื่อนที่ของตะกั่ว ทองแดงและแคดเมียม โดยทำการผสมสารปรับปรุงดินที่อัตราส่วนต่างๆคือ 2.5% และ 5% เป็นเวลา 90 วัน จึงนำมาทดสอบประสิทธิภาพโดยการสกัดด้วย 0.01 M CaCl₂ พบว่า diatomite มีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินโดยที่อัตราส่วน 5% ของ diatomite สามารถลดได้ 43.5% 26.3% และ 12.7% ในความเข้มข้นของตะกั่ว ทองแดงและแคดเมียมตามลำดับ นอกจากการลดลงของความเข้มข้นโลหะหนักที่สกัดออกมาได้จากการปรับปรุงดินด้วย diatomite และในส่วนของเอนไซม์ในดิน คือ urease, acid phosphatase และ dehydrogenase มีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุง งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า diatomite มีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินที่มีการปนเปื้อน ตะกั่ว ทองแดงและแคดเมียมในพื้นที่ปนเปื้อนและปรับปรุงให้มีการฟื้นฟูที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhang *et al.* (2011) ศึกษาการฟื้นฟูดินปนเปื้อนทองแดง (Cu) ด้วยแร่ดินเหนียว 2 ชนิด คือ attapulgite และ montmorillonite จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับทองแดง ของแร่ดินเหนียวพบว่าค่าสูงสุดในการดูดซับของ attapulgite 1,501 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ montmorillonite 3,741 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากการบ่มดินด้วย attapulgite และ montmorillonite แบ่งเป็น 4 อัตราส่วนคือ 1% 2% 4% และ 8% เป็นเวลา 30 และ 60 วัน พบว่า pH ของดินมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าที่อัตราส่วน 8% ของ montmorillonite ที่ระยะเวลา 30 วัน สามารถลดทองแดงส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ 24.7% เมื่อเปรียบเทียบกับดินชุดควบคุม (control) นอกจากนี้ที่อัตรา ส่วน 2% ของ montmorillonite สามารถลดอัตราการตายของไส้เดือนได้ถึง 60% งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า montmorillonite มีศักยภาพในการลดทองแดงในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ดีกว่า attapulgite

Zhang and Pu (2011) ศึกษาสารปรับปรุงดิน 4 ชนิด คือ agricultural limestone (AL), rock phosphate (RP), palygorskite (PG) และ calcium magnesium phosphate (CMP) ที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักคือ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดงและสังกะสี ศึกษาในดิน 2 ชนิดคือ ดินกลาง (calcareous soil) และดินกรด (acidic soil) ทำการผสมสารปรับปรุงที่อัตราส่วน 2% และ 5% ทำการบ่มดินเป็นเวลา 12 เดือน หลังจากนั้นนำมาสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction) และการทดสอบความเข้มข้นของโลหะหนักในการชะล้างจากคอลัมน์ เพื่อประเมินความสามารถในการตรึงโลหะหนักในดิน จากผลการศึกษาพบว่าสารปรับปรุงดินสามารถลดความเข้มข้นของโลหะหนักรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) ในดินได้ตามลำดับดังนี้ CMP และ PG > AL > RP งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า palygorskite (PG) และ calcium magnesium phosphate (CMP) มีประสิทธิภาพเหนือกว่า agricultural limestone (AL) และ rock phosphate (RP) ในการตรึงโลหะหนักในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailability) ในดินทั้ง 2 ชนิด rock phosphate (RP) มีประสิทธิภาพในดินที่เป็นกรดเนื่องจากฟอสฟอรัสละลายได้ดีกว่าในดินที่มี pH เป็นกลาง

Venegas *et al.* (2015) ศึกษาความสามารถความทนทานของวัสดุ 8 ตัว คือ ปุ๋ยหมักจากมูลฝอยอินทรีย์ (MOW) จากมูลฝอยเทศบาล (MSW) และจากเศษอาหาร (DOM) มูลฝอยสะอาด (GW) แกลบจากมะกอก (OWH) กากจากมะกอก (OP) ไบโอดีจากเปลือกไม้ (BF) และไบโอดีจากลำต้นอู่น (BS) เพื่อนำมาปรับปรุงฟื้นฟูแก้ไขดินปนเปื้อนโลหะหนัก (ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม นิกเกิล และโครเมียม) ทำการศึกษาหาความสามารถในการสะเทินกรด (acid neutralization capacity : ANC) ของวัสดุปรับปรุง พบว่า MOW และ GW แสดงค่าความสามารถในการสะเทินกรดที่สูงที่สุดคือ 4,280 และ 7,100 meq.kg⁻¹ ตามลำดับ จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ (sorption isotherms) ของวัสดุปรับปรุง โดยการใส่สมการแลงเมียร์และฟรอนดลิชในการเปรียบเทียบ MOW, BS, GW และ BF แสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (K_d) ที่สูงมาก ผลของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า GW, BF, MOW และ BS เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม สามารถเพิ่ม pH ในดินและมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก

Tica *et al.* (2011) ทำการศึกษาความสามารถของสารปรับปรุงดิน 2 ชนิด เพื่อลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก (ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม) ในดิน การลดผลกระทบพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักในดินด้วยวิธีการทำให้เสถียรและลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักด้วยการใช้สารปรับปรุงดิน เป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลการปรับปรุงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

apatite และ zeolite เพื่อลดตะกั่ว สังกะสี ทองแดงและแคดเมียมที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailability) ที่ปนเปื้อนในดิน ทำการผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆคือ 1% 2.5% และ 5% บ่มดินเป็นเวลา 1 เดือน นำมาสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction) และการสกัดขั้นตอนเดียว (single step) ด้วย DTPA, CaCl_2 , EDTA และ NH_4OAc เพื่อดูการกระจายตัวของโลหะหนัก รวมถึงตรวจสอบศักยภาพความเป็นพิษที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailability) พบว่าเมื่อทำการผสม สารปรับปรุงลงไปที่อัตราส่วน 5% สามารถลดความเข้มข้นของโลหะหนัก (ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม) ได้มากกว่าที่อัตราส่วน 1% และ 2.5% จากการประเมินผลของการผสมที่อัตรา ส่วน 5% พบว่า apatite และ zeolite ช่วยเพิ่ม pH ในดินและลดโลหะหนักในรูปฟอรัมที่สิ่งมีชีวิตนำไป ใช้ได้ (bioavailability) คือ สามารถลดความเข้มข้นของโลหะหนักในรูปที่ละลายน้ำได้ (water soluble) แลกรูปฟอรัมที่เปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รวมทั้งยังมีการเพิ่มขึ้นของโลหะหนักในรูปฟอรัมที่เหลือ (residual) นอกจากนี้การลดลงของโลหะหนักยังส่งผลต่ออัตราการหายใจ (glucose-induced soil respiration) และกิจกรรมของเอนไซม์ในดิน (dehydrogenase, acid-alkaline phosphatase, β -Glucosidase) ที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
3. โซเดียมอะซิเตต (NaOAc) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
4. กรดแอสติก (CH_3COOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
5. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4 และ 7 AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
6. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
7. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
8. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Fluka, Switzerland
9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
10. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
11. แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
12. แอมโมเนียมออกซาเลต $[(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
13. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
14. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
15. ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) AR Grade บริษัท Fisher chemical, USA
16. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
17. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
18. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
19. กรดบอริก (H_3BO_3) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
20. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate; KHP) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
21. ฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
22. โบรโมกรีน (Bromocresol green) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
23. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) AR Grade บริษัท Fisher chemicals, USA
24. แอมโมเนียมโมลิบเดต $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
25. แอนติโมนีโพแทสเซียมตาร์เตรต ($\text{KSbO}_4 \cdot \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
26. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
27. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
28. ไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
29. คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

30. นิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
31. ซิงค์ซัลเฟต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
32. ซีโอไลต์ AR Grade บริษัท Sigma-Aldrich, Spain
33. ซีพีโอไลต์ AR Grade บริษัท Sigma-Aldrich, Spain
34. ไดอะตอมไมต์ AR Grade บริษัท Sigma-Aldrich, Spain

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) รุ่น Genesys 10S บริษัท Thermo Scientific UV-Vis, USA
2. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น Analyst 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer Precisely, USA
3. เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence spectrophotometer) รุ่น SRS 3400 บริษัท Siemens, Germany
4. เครื่องเขย่า (Orbital Shaker Gallenkamp) ยี่ห้อ Gallenkamp, England
5. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) รุ่น C860 บริษัท Consort, Belgium
6. เครื่องชั่งละเอียดแบบ 4 ตำแหน่ง (Digital balance) รุ่น AUX 220 บริษัท Shimadzu, Japan
7. ตู้อบแบบอากาศร้อน รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific, USA
8. เตาทำความร้อน (hot plate)
9. ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM No.1.152H อ่านสเกลในหน่วยกรัมต่อลิตร
10. ตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
11. กระดาษกรอง Whatman No.42
12. ครกบดดิน
13. ขวดพลาสติกใสสารตัวอย่าง
14. เทอร์โมมิเตอร์
15. เดซิเคเตอร์
16. กระบอกเก็บตัวอย่างดิน (Core)
17. แท่งคนแบบ plunger
18. หลอดเซนตริฟิว

3.2 การเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดิน 2 ชนิดจากจังหวัดฉะเชิงเทรา ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่ม (random sampling) โดยสุ่มตัวอย่างดินจากหลายๆจุด ทำการเก็บจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เซนติเมตร จากผิวดิน นำตัวอย่างมาผสมกันเพื่อใช้เป็นตัวแทนของดินตัวอย่าง (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ตัวอย่างดินเหนียว (กลุ่มชุดดินที่ 2) จากตำบลหมอนทอง อำเภอบางน้ำเปรี้ยว (latitude : 13°51'49.687"N longitude : 100°59'20.548"E) และตัวอย่างดินร่วนปนทราย (กลุ่มชุดดินที่ 17) จากตำบลแปลงยาว อำเภอแปลงยาว (latitude : 13°35'42.104"N longitude : 100°15'46.681"E) ทำการจัดเก็บดินลงในกระสอบแล้วนำกลับห้องปฏิบัติการ เก็บตัวอย่างดินวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2559

3.3 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดินและสารปรับปรุงดิน

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดิน

นำตัวอย่างดินมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร (10 เมช) อบที่อุณหภูมิ 105 °c เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บไว้ในเคซิเคเตอร์เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดิน 2 ชนิด ดังตารางที่ 3.1 ทุกการทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดิน

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
ความเป็นกรดด่าง (ดิน : น้ำ อัตราส่วน 1 : 1)	pH meter
ความชื้น	Gravimetric method
ความหนาแน่น	Core method
การกระจายตัวของอนุภาคดิน	Hydrometer method
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	Walkley Black titration method
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Ammonium saturation method
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl method
ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	Bray (II) method
ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์	Atommic Absorption Spectrophotometer (AAS)
ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด	EPA 3050B method

หมายเหตุ: วิธีการวิเคราะห์โดยละเอียดอธิบายในภาคผนวก ก

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน

แร่ดินเหนียวซีโอโลต์ ซีพีโอโลต์และไดอะตอมไมต์ที่ใช้ในศึกษา ทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คือ ความชื้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ปริมาณโลหะ

น้ำหนักทั้งหมด ปริมาณธาตุองค์ประกอบ พื้นที่ผิวจำเพาะของสารปรับปรุงดินและจุดที่ประจุนุญเป็นศูนย์ (point of zero charge) วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
ความชื้น*	Gravimetric method
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก*	Ammonium saturation method
ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด*	EPA 3050B
ปริมาณธาตุองค์ประกอบ	X-ray Fluorescence (XRF)
พื้นที่ผิวทั้งหมด ปริมาตรและรูพรุน	Brunauer Emmett Teller (BET) / Gas Adsorption Analyser
จุดที่ประจุนุญเป็นศูนย์	Solid addition method

หมายเหตุ: * วิธีการวิเคราะห์โดยละเอียดอธิบายในภาคผนวก ก

การวิเคราะห์หาจุดที่พื้นผิวสารปรับปรุงดินมีประจุนุญเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) (Srivastava *et al.*, 2017)

1. น้ำปราศจากไอออนนำมาปรับความเป็นกรดต่างด้วย 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH ให้สารละลายมี pH อยู่ในช่วง 1-12 (pH_{เริ่มต้น})
2. ชั่งตัวอย่างสารปรับปรุงดินจำนวน 0.15 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ลงในหลอดเซนตริฟิว เติมน้ำปราศจากไอออนที่ทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างแล้วปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่อัตรา 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH_{สุดท้าย})
4. วิเคราะห์ผลโดยการนำค่า pH_{เริ่มต้น} และ pH_{สุดท้าย} ไปพลอตกราฟเพื่อหาจุดที่มีพื้นผิวสารปรับปรุงดินมีประจุนุญเป็นศูนย์ (pH_{pzc})
5. ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

3.4 การสังเคราะห์ดินปนเปื้อนโลหะหนัก

1. เก็บตัวอย่างดินเหนียวและดินร่วนปนทรายจากจังหวัดฉะเชิงเทราจากผิวดินถึงระดับความลึก 30 เซนติเมตร
2. ทำการคัดแยกเศษใบไม้และกิ่งไม้ออกจากดินตัวอย่าง จากนั้นนำดินตัวอย่างมาผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 10 วัน
3. ดินแห้งจำนวน 7 กิโลกรัมต่อดินหนึ่งชนิด ทำการเติมสารละลายโลหะหนักให้ได้ความเข้มข้นดังนี้ สังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดง 350 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โครเมียม 700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและนิกเกิล 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
4. นำดินสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดบรรจุเก็บในกะละมังพลาสติกบ่มไว้เป็นเวลา 30 วัน เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองเป็นความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในตัวอย่างดินจำนวน 318 ตัวอย่าง ที่พบในประเทศไทย (กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การผสมสารปรับปรุงดิน

นำดินสังเคราะห์ที่ได้จากข้อ 3.4 มาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงหรือตัวควบคุม (control) จะไม่ผสมสารปรับปรุงดินลงไป ส่วนที่ 2 เป็นดินที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดิน 3 ชนิด คือ ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ (รูปที่ 3.1) รวมถึงปริมาณของสารปรับปรุงที่เหมาะสม ทำการใส่สารปรับปรุงดินโดย

1. ผสมซีโอไลต์ลงในดินโดยแบ่งเป็น 3 อัตราคือ 2.5% 5% และ 7.5% (w/w)
2. ผสมซีพีโอไลต์ลงในดินโดยแบ่งเป็น 3 อัตราคือ 2.5% 5% และ 7.5% (w/w)
3. ผสมไดอะตอมไมต์ลงในดินโดยแบ่งเป็น 3 อัตราคือ 2.5% 5% และ 7.5% (w/w)
4. การผสมดินต้องมีสภาพความจุความชื้น (field capacity) 100% โดยทำการเติมน้ำปราศจากไอออนลงไปและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

5. ทำการบ่มในภาชนะพลาสติกเพื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินแต่ละชนิด ทำการศึกษาที่ระยะเวลาการบ่ม 30 และ 60 วัน โดยทำการควบคุมสภาพความจุความชื้นของดิน

- ดินเหนียว (clay) มีสภาพความจุความชื้น (field capacity) 32%
- ดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีสภาพความจุความชื้น (field capacity) 24%

ค่าความชื้นที่ควบคุมในการทดลองเป็นค่าความชื้นของดินชนิดต่างๆ (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2559)



รูปที่ 3.1 สารปรับปรุงดิน (ก) ซีโอไลต์ (ข) ซีพีโอไลต์ และ (ค) ไดอะตอมไมต์

3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดิน

3.6.1 การหาปริมาณโลหะหนักโดยการสกัดลำดับขั้น (sequential extraction)

นำตัวอย่างดินที่ได้จากข้อ 3.5 จำนวน 1 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง มาทำการสกัดแบบลำดับขั้นตามวิธีของ Tessier *et al.* (1979) จะได้รูปฟอร์มโลหะ 6 รูปฟอร์มตามลำดับของการสกัดแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งวิธีการสกัดโลหะแต่ละรูปฟอร์มจะมีวิธีการสกัดที่แตกต่างกันดังนี้

1. รูปฟอร์มที่ละลายน้ำ (water soluble) สกัดด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่อัตรา 220 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการเก็บสารละลายที่ได้เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักและนำตัวอย่างดินไปทำการสกัดต่อในส่วนที่ 2
2. รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable) สกัดด้วย 1 M $MgCl_2$ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่อัตรา 220 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บสารละลายที่ได้และทำการสกัดต่อในส่วนที่ 3

3. รูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (bound to carbonate) สกัดด้วย 1 M NaOAc ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่อัตรา 220 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 ชั่วโมง สารละลายที่ได้มาทำการปรับ pH เท่ากับ 5 ด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น นำตัวอย่างดินไปทำการสกัดต่อในส่วนที่ 4
4. รูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (bound to Fe and Mn oxide) สกัดด้วย 0.04 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ใน 25% (v/v) HOAc ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่อัตรา 220 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บสารละลายและนำตัวอย่างดินไปทำการสกัดต่อในส่วนที่ 5
5. รูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (bound to organic matter) สกัดด้วย 0.02 M HNO_3 ปริมาตร 7.5 มิลลิลิตรและ 30% H_2O_2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เติม 30% H_2O_2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส สกัดต่ออีก 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นและนำมาสกัดต่อด้วย 3.2 M NH_4OAc ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร 30 นาที เก็บสารละลายที่ได้และนำไปสกัดต่อในส่วนที่ 6
6. รูปฟอร์มที่เหลือ (residual) ทำการสกัดดินด้วย Conc. HNO_3 ปริมาตร 4.6 มิลลิลิตร และ Conc. HCl ปริมาตร 14 มิลลิลิตร สกัดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บสารละลาย
7. การแยกตัวอย่างดินออกจากสารละลายในการสกัดแต่ละรูปฟอร์ม จะแยกโดยนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที
8. ในการสกัดส่วนที่ 2-6 หลังจากปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 30 นาที ต้องทำการล้างดินด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 15 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่อัตรา 220 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำดินไปสกัดต่อในส่วนถัดไป
9. นำสารละลายที่ได้จากการสกัดและการล้างดินแต่ละรูปฟอร์มมารวมกันและทำการปรับปริมาตรสารละลายให้มีปริมาตรเท่ากับ 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
10. ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.7.1 การประเมินค่า bioavailable index (BI)

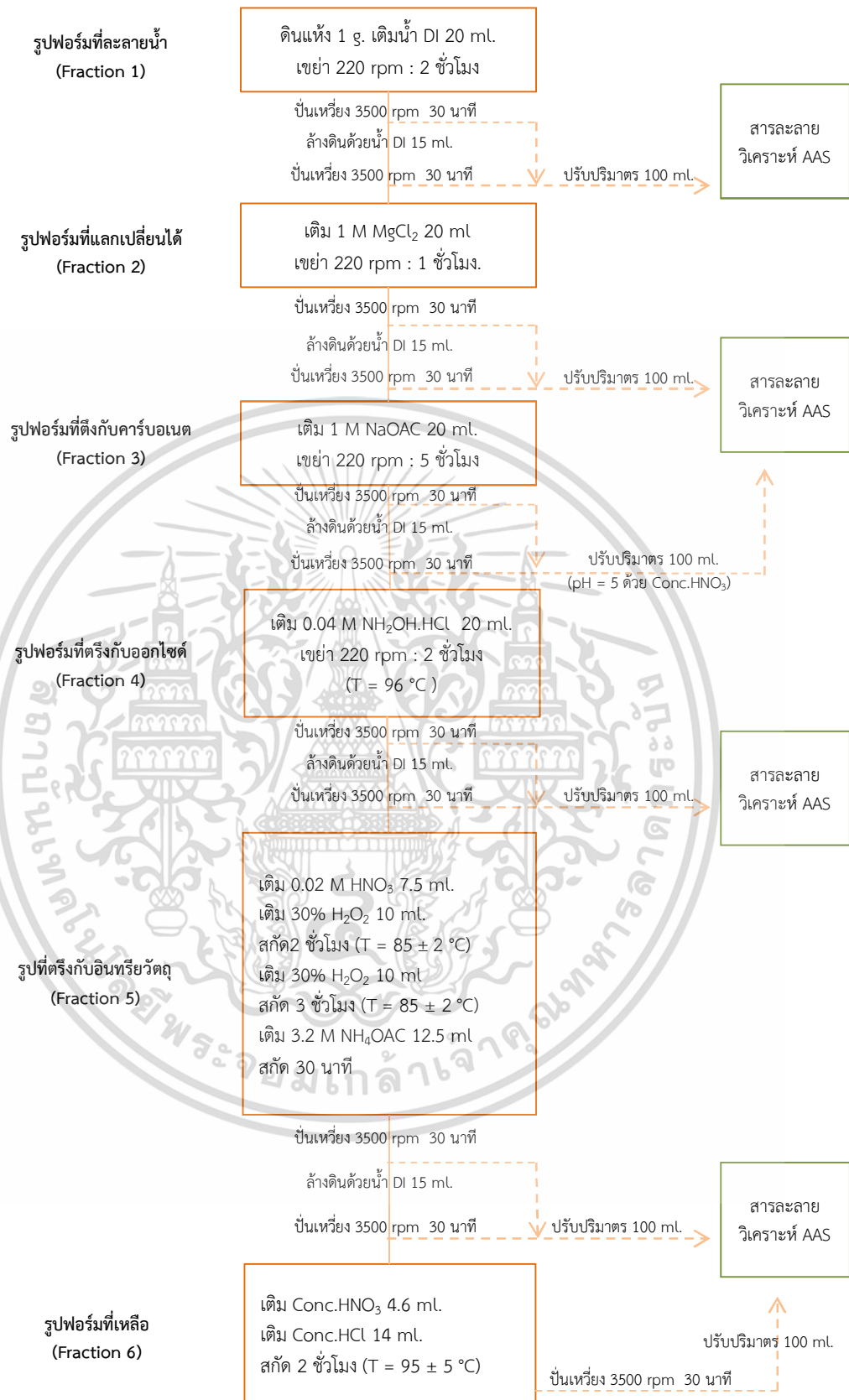
bioavailable index คือ ดัชนีบ่งชี้ส่วนของโลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายออกมาจากดินได้ เป็นส่วนที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailable) คือ F1 : ส่วนที่ละลายน้ำ, F2 : ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ และ F3 : ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต ที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น ค่า BI สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Brit Salbu *et al.*, 1998)

$$\text{BI} = \frac{\text{F1} + \text{F2} + \text{F3}}{\text{F1} + \text{F2} + \text{F3} + \text{F4} + \text{F5} + \text{F6}} \times 100$$

3.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลแบบ one-way (ANOVA) โดยใช้โปรแกรม SPSS version 23 ทดสอบความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบภายในชุดทดลอง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปรับปรุงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติเบื้องต้นของดินและสารปรับปรุงดิน

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของดิน

ดินตัวอย่างจากจังหวัดฉะเชิงเทราใช้เป็นตัวแทนของดินในพื้นที่นั้นๆ โดยตัวอย่างดินเหนียว จากตำบลหมอนทอง อำเภอบางน้ำเปรี้ยว และตัวอย่างดินร่วนปนทรายจากตำบลแปลงยาว อำเภอแปลงยาว ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีดิน ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของดินเหนียวและดินร่วนปนทราย

สมบัติเบื้องต้นของดิน	ตัวอย่างดิน		หน่วย
	ดินเหนียว	ดินร่วนปนทราย	
ความเป็นกรดต่าง (pH)	4.41 ± 0.07	4.80 ± 0.08	-
ความชื้น	37.82 ± 1.10	6.20 ± 0.32	%
ความหนาแน่น	1.3715 ± 0.02	1.5257 ± 0.04	g/cm ³
การกระจายตัว % clay	59.83	29.47	%
% sand	22.69	51.05	
% silt	17.48	19.48	
ลักษณะเนื้อดิน	ดินเหนียว clay	ดินร่วนเหนียวปนทราย sandy clay loam	-
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)	2.63 ± 0.14	2.21 ± 0.11	%
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	21.15 ± 1.56	5.97 ± 0.23	cmol/kg
ปริมาณไนโตรเจน	0.0063 ± 0.003	0.0048 ± 0	%
ปริมาณฟอสฟอรัส	2.90 ± 0.51	3.18 ± 0.15	mg/kg
ปริมาณโพแทสเซียม	36.70 ± 1.39	29.54 ± 2.63	mg/kg
ปริมาณสังกะสีทั้งหมด (Zn)	58.05 ± 5.83	20.21 ± 1.35	mg/kg
ปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu)	21.53 ± 0.76	12.24 ± 0.16	
ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (Cr)	45.44 ± 4.58	12.77 ± 0.52	
ปริมาณนิกเกิลทั้งหมด (Ni)	41.30 ± 3.34	15.88 ± 1.05	

ดินเหนียว (ตำบลหมอนทอง อำเภอบางน้ำเปรี้ยว) มีสัดส่วนของกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียว (clay) 59.83% กลุ่มขนาดอนุภาคทราย (sand) 22.69% และกลุ่มขนาดอนุภาคทรายแป้ง (silt) 17.48% เมื่อเทียบกับไดอะแกรมสามเหลี่ยมเพื่อตรวจสอบประเภทของเนื้อดิน เป็นดินเหนียว (clay) ซึ่งอยู่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียด (fine – textured soils) สภาพความเป็นกรดต่างของดินอยู่ในระดับที่เป็นกรดรุนแรงมาก (extremely acid) เนื่องจากดินเริ่มต้นมีสภาพความเป็นกรดต่างของดินเท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.41 มีสภาพความจุความชื้น (field capacity) ณ พื้นที่เก็บตัวอย่างเท่ากับ 37.82% ซึ่งดินประเภทเนื้อละเอียดจะมีสภาพความจุความชื้นสภาวะต่างๆอยู่ในช่วง 38-53% ความหนาแน่นรวมของดิน (soil bulk density) เท่ากับ 1.3715 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ (organic matter) ในดินอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง คือ 2.63% ซึ่งปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีอิทธิพลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดิน โดยดินเหนียวมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับสูงคือ 21.16 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) ฮิวมัสหรืออินทรีย์วัตถุมีบทบาทสำคัญต่อการยึดเกาะของอนุภาคดิน ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน เนื่องจากการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) ที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอกซิล (-COOH) และไฮดรอกซิล (-OH) ส่งผลทำให้ดินมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ด้วยเหตุนี้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจึงมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารและยังรวมถึงความสามารถในการดูดซับโลหะเอาไว้ (Sabah and Ouki, 2017) ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในดินเบื้องต้นมีปริมาณ เท่ากับ 58.05, 21.53, 45.44 และ 41.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะในดินประเทศไทย (ตารางที่ 2.4) และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) พบว่าปริมาณของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในดินเหนียวอยู่ในระดับเกณฑ์พื้นฐานและมาตรฐานดังกล่าว จากผลเบื้องต้นทั้งหมดของดินเหนียว (clay) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของกลุ่มชุดดินในประเทศไทยกลุ่มชุดดินที่ 2 คือ ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ชุดดินอยุธยา ชุดดินบางเขน ชุดดินมหาโพธิ์และชุดดินท่าขวาง พบว่ามีความสอดคล้องกัน (สำนักสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน, 2559)

ดินร่วนปนทราย (ตำบลแปลงยาว อำเภอแปลงยาว) จากการหาลักษณะเพื่อระบุประเภทของเนื้อดิน ดินตัวอย่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อปานกลาง (medium-textured soils) และมีสัดส่วนของกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียว (clay), ทราย (sand) และทรายแป้ง (silt) เท่ากับ 29.47%, 51.05% และ 19.48% ตามลำดับ จากการเก็บตัวอย่างดิน ณ พื้นที่ ดินมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.5257 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สภาพความจุความชื้นดิน (field capacity) 6.2% บ่งบอกว่าดินมีระดับความชื้นต่ำ ซึ่งดินเนื้อปานกลางสภาพความจุความชื้นจะอยู่ในช่วง 27-35% ดินร่วนปนทรายมีสภาพความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.8 ดินแสดงความเป็นกรดในระดับที่ดินเป็นกรดจัดมาก (very strongly acid) ในขณะที่ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter) อยู่ในระดับปานกลาง คือ 2.21% ปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดินร่วนปนทรายน้อยกว่าดินเหนียว ซึ่งสัมพันธ์กับการมีสัดส่วนของกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียว (clay) ที่น้อยกว่า นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินร่วนปนทราย (sandy) อยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ ดินมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 5.97 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) ดินร่วนปนทรายมีปริมาณโลหะสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นเท่ากับ 20.21, 12.24, 12.77 และ 15.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโลหะหนักในดินร่วนปนทรายอยู่ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะในดินประเทศไทย (ตารางที่ 2.4) และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรกรรมเช่นเดียวกับดินเหนียว (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) จากข้อมูลกลุ่มชุดดิน 62 กลุ่มในประเทศไทย ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของดินร่วนปนทราย ตำบลแปลงยาว อำเภอแปลงยาว มีความสอดคล้องกันกับกลุ่มชุดดินที่ 17 คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดดินบุณทริก ชุดดินสายบุรี ชุดดินเขมราฐ ชุดดินโคกเคียน ชุดดินหล่มเก่า ชุดดินสุโขทัย ชุดดินปากคม ชุดดินร้อยเอ็ด ชุดดินเรณู ชุดดินสงขลาและชุดดินวิสัย (สำนักสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน, 2559)

4.1.2 สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน

สารปรับปรุงดินประเภทแร่ดินเหนียว (clay minerals) 3 ชนิด คือ ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และ ไดอะตอมไมต์ ก่อนการปรับปรุงดินปนเปื้อนสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุง ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2-4.4

ตารางที่ 4.2 สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน

สมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน	ชนิดของสารปรับปรุงดิน			หน่วย
	ซีโอไลต์	ซีพีโอไลต์	ไดอะตอมไมต์	
ความชื้น	1.21 ± 0.15	7.27 ± 0.15	0.08±0.02	%
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	11.98 ± 0.22	7.09 ± 0.01	4.72 ± 0.01	cmol/kg
ปริมาณสังกะสีทั้งหมด (Zn)	64.50 ± 4.80	31.69 ± 7.05	11.12 ± 0.96	mg/kg
ปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu)	9.08 ± 0.45	8.73 ± 0.43	3.25 ± 0.40	
ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (Cr)	13.55 ± 0.61	14.69 ± 0.46	12.60 ± 0.43	
ปริมาณนิกเกิลทั้งหมด (Ni)	19.05 ± 2.20	10.69 ± 1.77	4.57 ± 0.11	

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารปรับปรุงดิน

ชนิดของสารปรับปรุงดิน	ธาตุองค์ประกอบ (%)								
	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	Cl	WO ₃	CuO
ซีโอไลต์	60.7	1.07	29.9	3.53	3.16	0.87	0.213	0.249	0.186
	58.2	32.3	0.608	0.379	0.387	5.18	2.77	0.116	-
ไดอะตอมไมต์	82.9	0.533	9.67	3.46	0.401	0.192	2.27	0.164	0.217

โดยพื้นฐานของโครงสร้างแร่ดินเหนียวทุกชนิดมี Si⁴⁺ เป็นองค์ประกอบหลัก แต่จะแตกต่างกันตามโครงสร้างและองค์ประกอบอื่นๆของแร่แต่ละชนิด ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของพื้นผิวที่แตกต่างกัน แร่ดินเหนียวมีประจุลบจำนวนมากอยู่บนพื้นผิวซึ่งเกิดจากการแตกหักของพันธะหมู่ซิลิโชน (Si-O-Si) และเกิดการฟอร์มตัวของหมู่ซิลานอล (Si-O-H) การแทนที่ของ Si⁴⁺ ด้วย Al³⁺ เป็นกระบวนการ isomorphic substitution ภายในโครงสร้างแร่ เป็นอีกหนึ่งที่มาของประจุลบของโครงสร้างแร่ การเกิดการแทนที่ของ Si⁴⁺ ด้วย Al³⁺ ที่มากจะส่งผลต่อความแข็งแรงของประจุลบที่พื้นผิวและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกภายนอกของแร่ จากผลเนื่องจากการมีอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ที่ต่ำและการเกิดประจุลบที่พื้นผิวของซีโอไลต์ส่งผลทำให้ซีโอไลต์มีเอกลักษณ์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่สูง (Barczyk *et al.*, 2014) ในขณะที่ไดอะตอมไมต์เป็นแร่ที่เกิดจากการสะสมของเปลือกซิลิกาของไดอะตอมทำให้ไดอะตอมไมต์มี SiO_2 (82.9%) เป็นธาตุองค์ประกอบหลักและมีปริมาณขององค์ประกอบอื่นๆเพียงเล็กน้อย ประจุลบของไดอะตอมไมต์จึงมาจากหมู่ซิลานอล (SiO-H) ที่อยู่บนพื้นผิว (Caliskan *et al.*, 2011) เนื่องจากซีฟิโอล์ดเป็นแร่แมกนีเซียมซิลิเกตจึงมี SiO_2 (58.2%) และ MgO (32.3%) เป็นองค์ประกอบหลัก ลักษณะของโครงสร้างเป็นแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ซึ่งประกอบด้วยออกตะฮีดรอล 1 แผ่น (octahedral sheet) และเตตระฮีดรอล 2 แผ่น (tetrahedral sheet) ถึงแม้ซีฟิโอล์ดจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่น้อยแต่เนื่องจากการมีลักษณะพิเศษของโครงสร้างจึงส่งผลทำให้มีขนาดของพื้นที่ผิวที่มาก (Yang *et al.*, 2015) ดังผลการวิเคราะห์ที่แสดงขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมด (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) และขนาดรูพรุน (pore size) ของสารปรับปรุงดิน (ตารางที่ 4.4) จะเห็นว่าซีฟิโอล์ดมีขนาดของพื้นที่ผิวทั้งหมด ($169.20 \text{ m}^2/\text{g}$) มากกว่าซีโอไลต์ ($33.51 \text{ m}^2/\text{g}$) และไดอะตอมไมต์ ($25.71 \text{ m}^2/\text{g}$) ตามลำดับ ซึ่งความสำคัญของขนาดพื้นที่ผิวของแร่หรือสารปรับปรุงดิน เนื่องจากเป็นพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ การมีขนาดของพื้นที่ผิวและรูพรุนที่มากจะช่วยสนับสนุนส่งเสริมต่อความสามารถในการดูดซับที่ดี ขนาดของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถใช้ทำนายความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพในการจับกับโลหะของสารปรับปรุง นอกจากนี้ชนิดของโลหะก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญส่งผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับของสารปรับปรุงดิน (Chen *et al.*, 2016)

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนสารปรับปรุงดิน

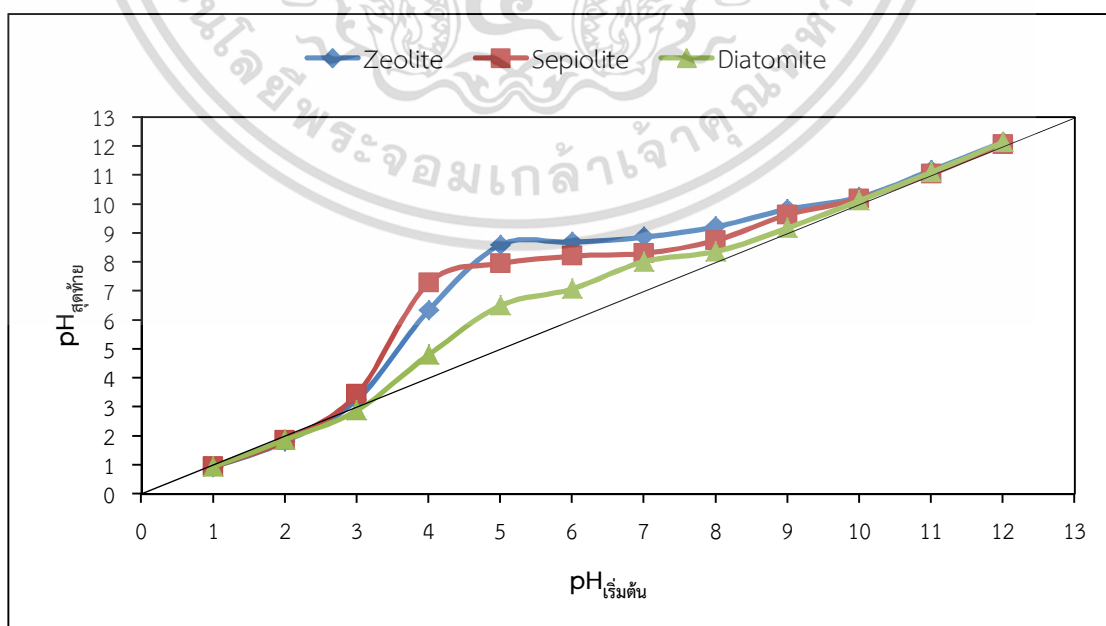
ชนิดของสารปรับปรุงดิน	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cc/g)	ขนาดรูพรุน (nm)
ซีโอไลต์	33.51	0.0448	8.202
ซีฟิโอล์ด	169.20	0.5002	11.830
ไดอะตอมไมต์	25.71	0.0300	5.562

การเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นกรดต่าง (pH) ของตัวกลางเป็นปัจจัยที่สำคัญทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับหรือสารปรับปรุงดิน โดยประจุที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของสารปรับปรุงดินสามารถเป็นไปได้ทั้งประจุบวกและประจุลบขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดต่าง เมื่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นกรดต่างมาถึงจุดที่พื้นผิวของสารปรับปรุงดินมีจำนวนของประจุบวกและประจุลบเท่ากันประจรรวมทั้งสองจะเท่ากับศูนย์ เรียกจุดนี้ว่า “จุดที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})” เมื่อตัวกลางมีสภาพความเป็นกรดต่างที่มากกว่าจุดที่ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของสารปรับปรุงดินชนิดนั้นๆ หมู่ซิลานอล (SiO-H) บนพื้นผิวของสารปรับปรุงดินจะมีประจุเป็นลบดังสมการที่ 4.1 และเมื่อสภาพความเป็นกรดต่างของตัวกลางน้อยกว่าจุดที่ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ประจุบนพื้นผิวของสารปรับปรุงดินจะมีประจุเป็นบวกดังสมการ 4.2 (Caliskan *et al.*, 2011)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สภาพความเป็นกรดต่างที่ทำให้พื้นผิวของซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์ มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นกรดต่างเริ่มต้นและสุดท้าย แสดงดังรูปที่ 4.1 จุดที่พื้นผิวของซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) เท่ากับ 2.80, 2.60 และ 3.20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแม้จะเป็นสารปรับปรุงที่เป็นแร่ดินเหนียว เหมือนกันแต่มีจุดที่ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ไม่เท่ากัน จากผลที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อเติมสารปรับปรุงดินซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์เพื่อปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะ บนพื้นผิวของซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์จะมีประจุเป็นลบ (SiO^-) เนื่องจากดินเหนียว ($pH = 4.41$) และดินร่วนปนทราย ($pH = 4.80$) ที่เป็นตัวกลางมีสภาพความเป็นกรดต่างมากกว่าจุดที่สารปรับปรุงดิน ทั้ง 3 ชนิด มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) หรือ pH มากกว่า pH_{pzc} ของสารปรับปรุงดินนั่นเอง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์จุดที่ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (zeta potential) ที่พื้นผิวของสารปรับปรุง ซึ่งค่าศักย์ซีต้าสามารถเป็นตัวบ่งบอกถึงชนิดของประจุ (บวกหรือลบ) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอนุภาคได้ดี ซีโอไลต์มีค่าศักย์ซีต้าที่พื้นผิว เท่ากับ -20.79 ± 0.83 mV ซีพิโอไลต์ เท่ากับ -23.41 ± 0.52 mV และค่าศักย์ซีต้าที่พื้นผิวของไดอะตอมไมต์ เท่ากับ -19.77 ± 0.51 mV จากผลการวิเคราะห์จุดที่ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) และค่าศักย์ซีต้าของซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของสารปรับปรุงดินสามารถเกิดได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดูดซับไอออนลบและกระบวนการดูดซับไอออนบวก เนื่องจากบนพื้นผิวของซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์จะมีประจุเป็นบวกเมื่อสภาพความเป็นกรดต่างของตัวกลางมีการลดลงต่ำกว่า 2.8, 2.60 และ 3.20 ตามลำดับ จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับไอออนต่างๆที่มีประจุเป็นลบได้ดี (เทียนชัย, 2539) แต่เมื่อสภาพความเป็นกรดต่างของตัวกลางมากกว่า 2.8, 2.60 และ 3.20 บนพื้นผิวของซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์จะมีประจุลบเกิดขึ้น จึงทำให้สามารถเกิดการดูดซับกับประจุบวกของไอออนต่างๆรวมถึงประจุบวกของโลหะ (Sabah and Ouki, 2017)



รูปที่ 4.1 จุดที่พื้นผิวของซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) จาก

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความเป็นกรดต่างของดินหลังการปรับปรุง

ดินปนเปื้อนทองแดง สังกะสี โครเมียมและนิกเกิล นำมาปรับปรุงด้วยการเติมสารปรับปรุงดิน คือ ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และโดอะตอมไมต์ ทำการศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงดินและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นกรดต่าง (pH) ของดินที่ระยะเวลา 30 และ 60 วันของการปรับปรุง การปนเปื้อนโลหะในดินส่งผลต่อสภาพความเป็นกรดต่างของดิน โดยที่ดินมีสภาพความเป็นกรดที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนในดินทั้ง 2 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพความเป็นกรดต่างของดินเบื้องต้น (ตารางที่ 4.1) ดินเหนียวมีสภาพความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.41 และดินร่วนปนทรายมีสภาพความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.80 ต่อมาเมื่อดินมีการปนเปื้อนโลหะหนักในดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายมีสภาพความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.29 และ 4.62 ตามลำดับ สาเหตุของความเป็นกรดที่สูงขึ้นในดินเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เพิ่มขึ้นและถูกดูดซับอยู่ในดินดังสมการที่ 4.3 (สุพจน์, 2537) การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดต่างที่เกิดขึ้นในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 30 และ 60 วันของการปรับปรุงดิน ผลแสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6



สภาพความเป็นกรดต่างของดินเหนียวที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดิน (ตารางที่ 4.5) ดินเหนียวปนเปื้อนที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างต่ำที่สุด เท่ากับ 4.29 ในขณะที่ดินเหนียวปนเปื้อนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และโดอะตอมไมต์ที่อัตราส่วน 2.5%, 5% และ 7.5% สภาพความเป็นกรดต่างของดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) การปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์อัตราส่วน 7.5% (CS7.5) ทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างสูงที่สุด เมื่อเวลาการปรับปรุงเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุง สภาพความเป็นกรดต่างของดินเหนียวปนเปื้อนที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) ดินยังคงมีสภาพความเป็นกรดต่างต่ำที่สุด เท่ากับ 4.16 การปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์ทำให้สภาพความเป็นกรดต่างของดินเหนียวเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) อยู่ในช่วง 4.46-5.04 รองลงมาคือการปรับปรุงดินด้วยซีโอไลต์ทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 4.26-4.61 และเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดคือการปรับปรุงดินด้วยโดอะตอมไมต์สภาพความเป็นกรดต่างของดินอยู่ในช่วง 4.22-4.31

ที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทรายปนเปื้อน (ตารางที่ 4.6) การปรับปรุงดินทุกการปรับปรุงช่วยให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินควบคุม (control) การปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์อัตราส่วน 7.5% (SS7.5) ช่วยให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเช่นเดียวกับผลในดินเหนียว การปรับปรุงดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 60 วัน การเติมซีพีโอไลต์ช่วยทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นมากที่สุดจากสภาพความเป็นกรดต่างในดินควบคุม (control) ดินที่ปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์มีสภาพความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 5.12-5.73 รองลงมาคือ ดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีโอไลต์และโดอะตอมไมต์ พบว่าดินมีสภาพความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 4.63-5.28 และ 4.65-4.80 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ความเป็นกรดต่างของดินเหนียวหลังการเติมสารปรับปรุงดิน

ชนิดของสารปรับปรุงดิน	อัตราส่วน (%)	pH ดินเหนียว		
		สัญลักษณ์	30 วัน	60 วัน
ควบคุม (control)	0	C	4.29 ^s ± 0.023	4.16 ^s ± 0.015
ซีโอไลต์ (Z)	2.5	CZ 2.5	4.55 ^e ± 0.000	4.26 ^{ef} ± 0.031
	5	CZ 5	4.51 ^e ± 0.035	4.42 ^d ± 0.029
	7.5	CZ 7.5	4.71 ^c ± 0.006	4.61 ^c ± 0.025
ซีพีโอไลต์ (S)	2.5	CS 2.5	4.67 ^d ± 0.046	4.46 ^d ± 0.038
	5	CS 5	4.81 ^b ± 0.006	4.74 ^b ± 0.036
	7.5	CS 7.5	5.04 ^a ± 0.023	5.04 ^a ± 0.032
ไดอะตอมไมต์ (D)	2.5	CD 2.5	4.36 ^f ± 0.023	4.22 ^f ± 0.038
	5	CD 5	4.37 ^f ± 0.031	4.28 ^e ± 0.030
	7.5	CD 7.5	4.37 ^f ± 0.015	4.31 ^e ± 0.012

หมายเหตุ : a,b,c,d,e,f,g หมายถึง ค่าแสดงความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ตัวอักษรเหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.6 ความเป็นกรดต่างของดินร่วนปนทรายหลังการเติมสารปรับปรุงดิน

ชนิดของสารปรับปรุงดิน	อัตราส่วน (%)	pH ดินร่วนปนทราย		
		สัญลักษณ์	30 วัน	60 วัน
ควบคุม (control)	0	S	4.62 ^s ± 0.030	4.31 ^h ± 0.015
ซีโอไลต์ (Z)	2.5	SZ 2.5	4.96 ^e ± 0.035	4.63 ^s ± 0.017
	5	SZ 5	5.22 ^d ± 0.035	4.97 ^e ± 0.038
	7.5	SZ 7.5	5.52 ^c ± 0.080	5.28 ^c ± 0.031
ซีพีโอไลต์ (S)	2.5	SS 2.5	5.48 ^c ± 0.015	5.12 ^d ± 0.031
	5	SS 5	5.74 ^b ± 0.025	5.39 ^b ± 0.026
	7.5	SS 7.5	6.07 ^a ± 0.025	5.73 ^a ± 0.062
ไดอะตอมไมต์ (D)	2.5	SD 2.5	4.82 ^f ± 0.067	4.65 ^s ± 0.012
	5	SD 5	5.16 ^d ± 0.012	4.68 ^s ± 0.015
	7.5	SD 7.5	5.17 ^d ± 0.006	4.80 ^f ± 0.015

หมายเหตุ : a,b,c,d,e,f,g หมายถึง ค่าแสดงความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ตัวอักษรเหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าดินเหนียวและดินร่วนปนทรายปนเปื้อนเมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยการเติมสารปรับปรุงดิน คือ ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ สารปรับปรุงดินช่วยฟื้นฟูทำให้ระดับความเป็นกรดของดินที่เกิดจากการปนเปื้อนโลหะส่งผลทำให้ดินมีระดับความเป็นกรดที่ลดลง เนื่องจากคุณสมบัติของสารปรับปรุงดินที่ช่วยทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่ในดินลดลง การลดลงของไฮโดรเจนไอออน (H^+) สามารถเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ หนึ่งเนื่องจากการมีประจุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลบบนพื้นผิวของสารปรับปรุงดิน (SiO^- หรือ AlO^-) สามารถดูดซับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่ในดินเอาไว้ (Tahervand and Jalali, 2017) และอีกรูปแบบหนึ่งคือ การแลกเปลี่ยนแทนที่ระหว่างไฮโดรเจนไอออน (H^+) และธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในโครงสร้างของสารปรับปรุง (ตารางที่ 4.3) ได้แก่ Na^+ , Mg^{2+} และ Ca^{2+} ซึ่งเป็นกลุ่มของแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ ขนาดของไอออนมีขนาดใหญ่สามารถถูกแทนที่ได้ง่ายส่งผลทำให้หลุดออกมาจากโครงสร้างของสารปรับปรุงและตกค้างอยู่ในดินและดูดซับอยู่ที่พื้นผิวดิน (Sprynskyy, 2009 ; Sabah and Ouki, 2017) ความสามารถในการแทนที่ของแคตไอออนสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ H^+ , Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ดังนั้นในการปรับปรุงดินด้วยการเติม ซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ทุกๆการปรับปรุงช่วยฟื้นฟูทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นจากการที่ไฮโดรเจนไอออน (H^+) นั้นถูกดูดซับเอาไว้ แต่สารปรับปรุงดินแต่ละชนิดทำให้ดินมีการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดที่ต่างกัน เนื่องมาจากขนาดของพื้นที่ผิวที่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อประจุลบที่พื้นผิวและจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าไดอะตอมไมต์นอกจากจะมีขนาดพื้นที่ผิวที่น้อยที่สุดแล้วยังมีปริมาณของธาตุองค์ประกอบที่เป็นแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (Na^+ , Mg^{2+} และ Ca^{2+}) (ตารางที่ 4.3) น้อยกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณของแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ที่อยู่ในซีโอไลต์และซีพิโอไลต์ จึงส่งผลทำให้ดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยไดอะตอมไมต์มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นกรดต่างเพียงเล็กน้อย

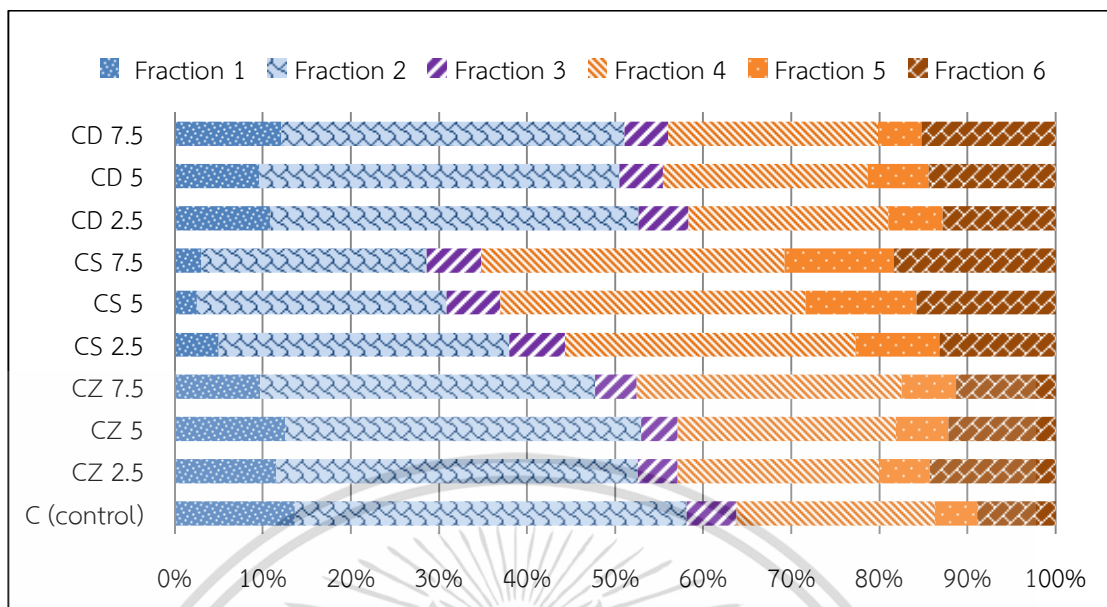
4.3 การสกัดแบบลำดับขั้น

เพื่อความเข้าใจถึงลักษณะการเคลื่อนที่ (mobility) และการเปลี่ยนแปลง (transformation) ที่เกิดขึ้นของโลหะในดิน (สังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล) การศึกษารูปฟอร์มโลหะที่ถูกปล่อยออกมาจากดินด้วยการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction) จะได้รูปฟอร์มของโลหะในดิน 6 รูปฟอร์ม คือ รูปฟอร์มที่ละลายน้ำ (F1), รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2), รูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอนเนต (F3), รูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4), รูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) และรูปฟอร์มที่เหลือ (F6) ซึ่งรูปฟอร์มโลหะทั้ง 6 รูปฟอร์มเป็นรูปฟอร์มที่เรียงลำดับจากรูปฟอร์มที่เคลื่อนที่ได้ง่าย (F1-3) มีความเสี่ยงสูงที่จะแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailable) ไปสู่รูปฟอร์มที่เคลื่อนที่ไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก (F4-6) สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (nonbioavailable) การศึกษารูปฟอร์มของโลหะที่เกิดขึ้นในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายของงานวิจัยนี้เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมระหว่างโลหะและดิน นำไปสู่การประเมินประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะด้วยซีโอไลต์ ซีพิโอไลต์และไดอะตอมไมต์ เพื่อลดศักยภาพความเป็นพิษที่จะแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต ซึ่งประเมินผลจากรูปฟอร์มของโลหะแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

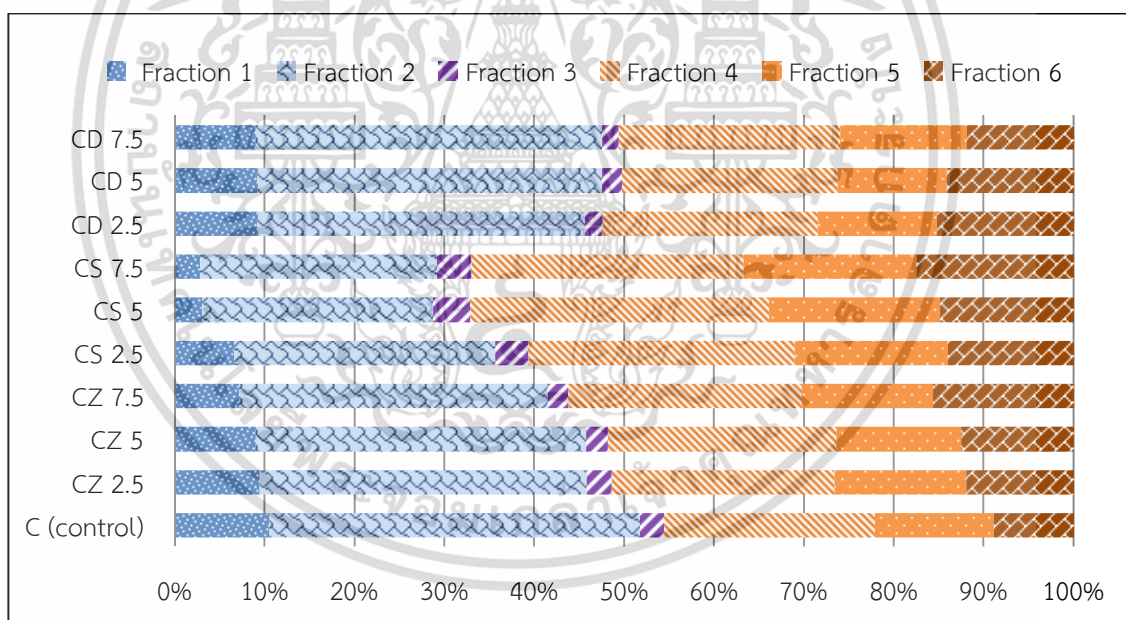
4.3.1 สังกะสี

1. ดินเหนียว

ผลการสกัดแบบลำดับขั้นรูปฟอร์มสังกะสีในดินเหนียวที่ระยะเวลา 30 วันของการปรับปรุงดินแสดงดังรูปที่ 4.2 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีในดินปนเปื้อนที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) พบมากที่สุดคือ รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) เท่ากับ 44.47% รองลงมาคือ รูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) 22.49%, รูปฟอร์มที่ละลายน้ำ (F1) 13.59%, รูปฟอร์มที่เกลือ (F6) 8.93%, รูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) 5.73% และรูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) 4.79% ตามลำดับจากสัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงปริมาณของสังกะสีในดินเหนียวส่วนใหญ่เกิดการดูดซับกับไอออนของธาตุต่างๆในดินได้แก่ Cl^- , PO_4^{3-} , S^{2-} และ SO_4^{2-} เป็นต้น (Pendias and Mukherjee, 2007) การเกิดสารประกอบกับธาตุดังกล่าวส่งผลทำให้รูปฟอร์มสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) มีสัดส่วนมากที่สุดและยังเป็นรูปฟอร์มโลหะที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ จึงทำให้สังกะสีในดินเหนียวมีความเสี่ยงที่จะแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมและเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่าย ในขณะที่ดินเหนียวปนเปื้อนที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ทั้ง 3 อัตราส่วน (2.5%, 5% และ 7.5%) สามารถลดสัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) ทุกๆการปรับปรุงเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) ผลการศึกษาที่ได้ให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Tica. *et al.* (2011) คือ การปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะด้วยแร่ดินเหนียวมีประสิทธิภาพในการลดความเป็นพิษ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะไปสู่สิ่งมีชีวิตได้ เนื่องจากซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์มีประจุลบของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจึงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับกับประจุบวกของสังกะสี (Ye *et al.*, 2015) และประจุบวกต่างๆที่มีอยู่ในดินได้ดี สามารถเกิดเป็นโครงสร้างระหว่างโลหะและอนุภาคต่างๆในดิน (Tica *et al.*, 2011) จึงส่งผลทำให้สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) รูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) และรูปฟอร์มที่เกลือ (F6) มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อดินได้รับการปรับปรุง เมื่อระยะเวลาผ่านไปรูปฟอร์มของสังกะสีในดินเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.3 ปริมาณของสังกะสีในดินส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) มากที่สุด (25.73%-41.27%) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปฟอร์มสังกะสีในดินเหนียวที่ระยะเวลา 30 วันจะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลา 60 วัน ดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) มีสัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) ลดลง เนื่องจากในดินจะมีองค์ประกอบของอนุภาคดินเหนียว (%clay) และอินทรีย์วัตถุ ซึ่งทั้ง 2 องค์ประกอบมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการดูดซับต่างๆที่เกิดขึ้นในดิน เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในดิน (Covelo *et al.*, 2008) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ในดินเหนียวที่แม้ไม่ได้รับการปรับปรุงแต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ดินเกิดการดูดซับสังกะสีได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้รูปฟอร์มสังกะสีที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) ในดินควบคุม (control) มีสัดส่วนที่ลดลง แต่การปรับปรุงดินด้วยสารปรับปรุงดิน ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ทำให้สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6) มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุง (control) เนื่องจากโครงสร้างของแร่ดินเหนียวเมื่อเกิดพันธะกับโลหะแล้วจะมีความเสถียรและเป็นไปได้อย่างยากที่จะถูกปล่อยออกมาปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม การหลุดออกของโลหะจากโครงสร้างแร่ดินเหนียวจึงไม่ถือว่าเป็นรูปฟอร์มโลหะที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (Mazhari *et al.*, 2017) ดังนั้นการปรับปรุงดินเหนียวด้วยซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์สามารถลดการเคลื่อนที่และความเสี่ยงของสังกะสีในดินที่จะแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมและเข้าสู่สิ่งมีชีวิต



รูปที่ 4.2 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับชั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

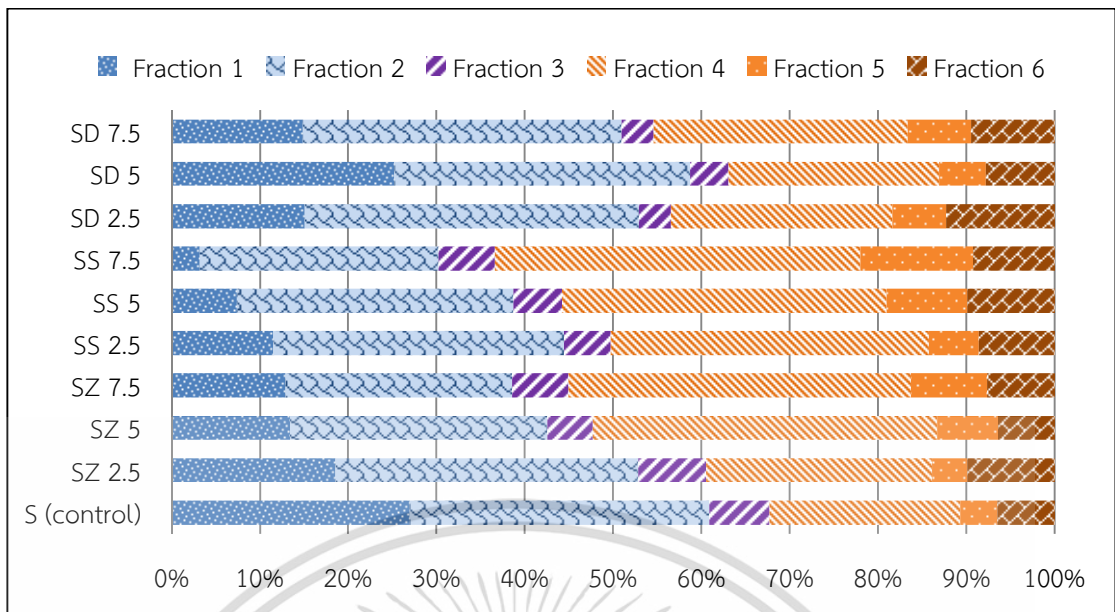


รูปที่ 4.3 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับชั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

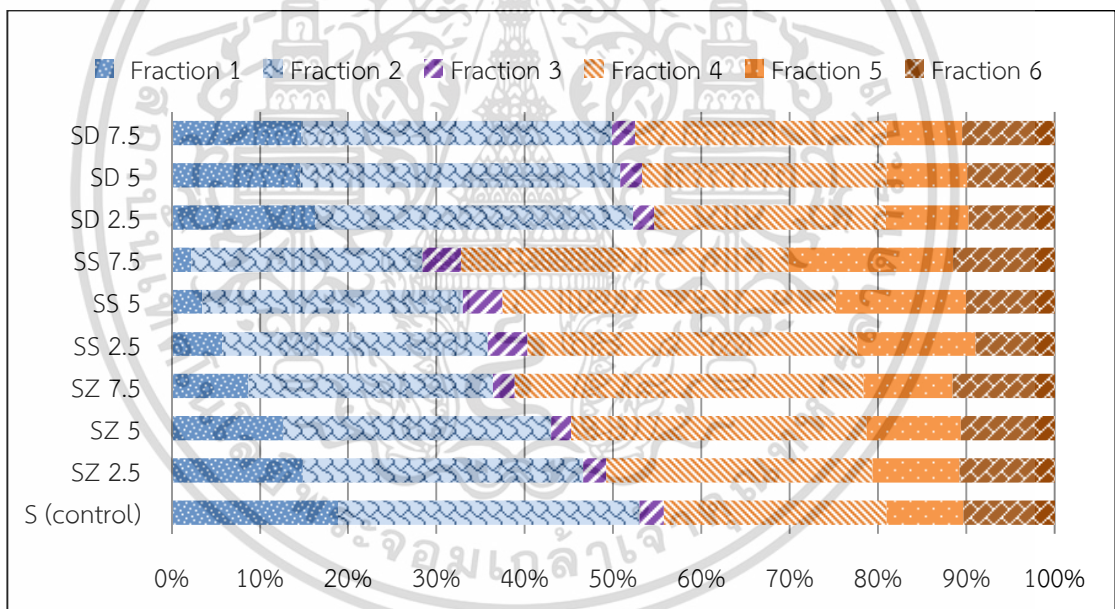
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ดินร่วนปนทราย

สัดส่วนรูปร่างของรูปร่างของสารประกอบในดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินแสดงดังรูปที่ 4.4 จากรูปฟอร์มของรูปร่างของสารประกอบทั้งหมด 6 รูปร่างของรูปร่างของสารประกอบในดินร่วนปนทรายยังคงเกิดการดูดซับกับไอออนของธาตุต่างๆในดิน (Cl^- , PO_4^{3-} , S^{2-} และ SO_4^{2-}) ส่งผลต่อสัดส่วนรูปร่างของสารประกอบที่แลกเปลี่ยนได้ (F2)(25.72%-33.95%) มีมากเช่นเดียวกับผลของรูปร่างของสารประกอบในดินเหนียว (รูปที่ 4.2-4.3) การปรับปรุงดินปนเปื้อนสามารถลดรูปร่างของสารประกอบที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) มากที่สุดคือการปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์ รองลงมาคือ ซีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของสารประกอบในดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินแสดงดังรูปที่ 4.5 เนื่องจากโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบกับออกไซด์ในดินสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ โลหะที่เกิดการดูดซับกับออกไซด์ที่มีอยู่ในดินและโลหะที่ดูดซับบนแร่ดินเหนียวที่มีออกไซด์เป็นส่วนประกอบ (สารวัตร, 2553) เมื่อวิเคราะห์จากผลปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารปรับปรุงดินทั้ง 3 ชนิด (ตารางที่ 4.3) พบว่าซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์แสดงผลของการมีออกไซด์เป็นธาตุองค์ประกอบในโครงสร้าง จึงส่งผลต่อรูปร่างของสารประกอบที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) จากงานวิจัยของ Sabah and Ouki. (2017) ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างซีพีโอไลต์และสสารฮิวมิกที่ละลายน้ำได้ (ส่วนประกอบหลักของอินทรีย์วัตถุ) สามารถแบ่งสสารฮิวมิกออกเป็น 2 ส่วน คือ กรดฮิวมิก (ละลายที่สภาวะเบส) และกรดฟุลวิก (ละลายที่สภาวะกรดและเบส) มีประจุลบของหมู่ฟังก์ชัน ($-\text{COOH}$ และ $-\text{OH}$) จึงทำให้สามารถเกิดการดูดซับกับประจุบวกของโลหะ การเกิดพันธะและดูดซับยึดเกาะกับอนุภาคของซีพีโอไลต์สามารถเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ ผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ซิลานอล (Si-OH) ที่พื้นผิวของซีพีโอไลต์และหมู่ฟังก์ชันของสสารฮิวมิก ($-\text{COOH}$ และ $-\text{OH}$) และอีกรูปแบบคือ การดูดซับยึดเกาะโดยมีแคตไอออน (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}) เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างซีพีโอไลต์และสสารฮิวมิกในดิน จากผลความสัมพันธ์ระหว่างแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดินดังที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาผลรูปร่างของสารประกอบที่ละลายน้ำ (F1) และรูปร่างของสารประกอบที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) พบว่าเมื่อดินที่ได้รับการปรับปรุงทำให้รูปร่างของสารประกอบที่ละลายน้ำได้ (F1) มีสัดส่วนที่ลดลง ในขณะที่รูปร่างของสารประกอบที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ผลเนื่องมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารปรับปรุงดิน (ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์) และสสารฮิวมิกในดิน ผลจากการยึดเกาะเกิดเป็นโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันในดินมีส่วนช่วยทำให้ความสามารถในการละลายของสสารฮิวมิกในดินลดลง ดังนั้นการปรับปรุงดินปนเปื้อนด้วย ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ทำให้รูปร่างของสารประกอบในดินที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) เปลี่ยนแปลงไปสู่รูปร่างที่มีความเสถียรและเป็นรูปร่างที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6)



รูปที่ 4.4 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย



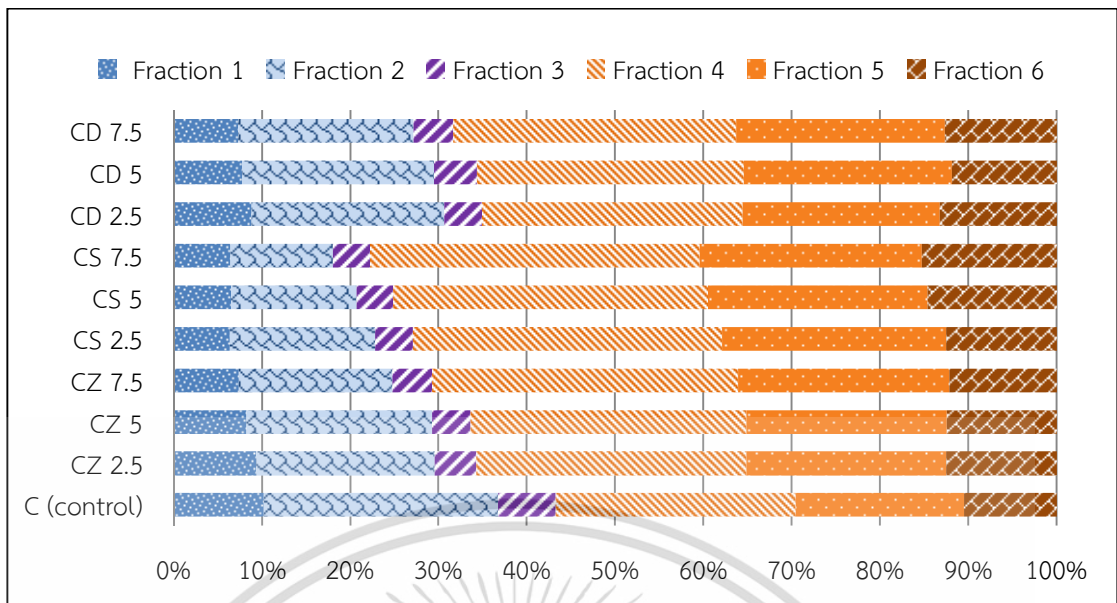
รูปที่ 4.5 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

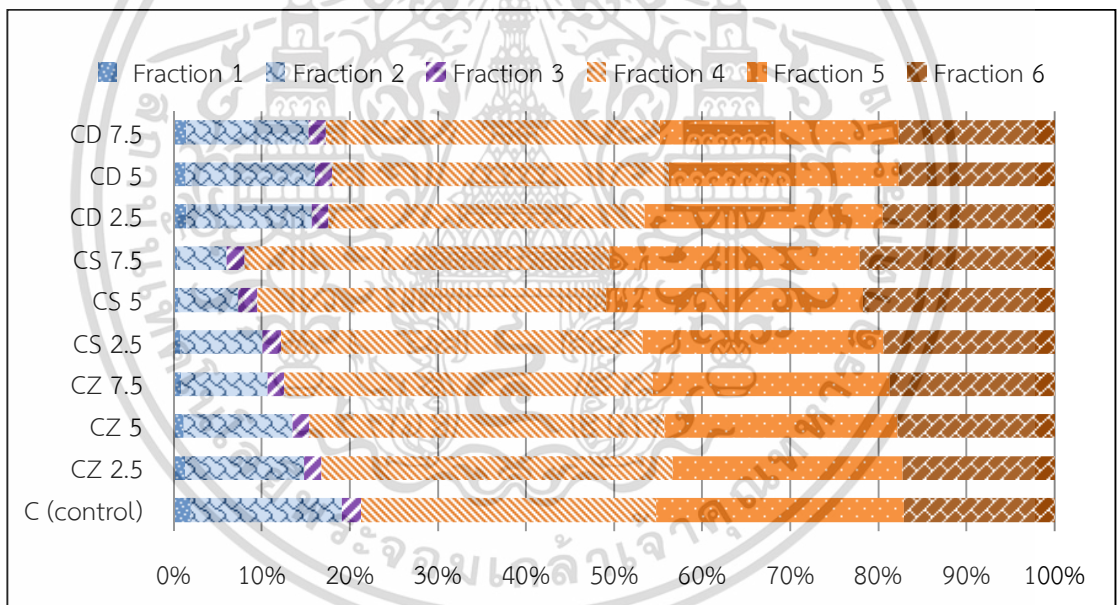
4.3.2 ทองแดง

1. ดินเหนียว

จากรูปที่ 4.6 แสดงสัดส่วนรูปฟอร์มทองแดง 6 รูปฟอร์มที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว ที่อัตราส่วน 7.5% ของสารปรับปรุงดินสามารถลดรูปฟอร์มทองแดงที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) ได้มากกว่าการปรับปรุงที่อัตราส่วน 2.5% และ 5% เมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) จากผลที่เกิดขึ้นการปรับปรุงดินช่วยทำให้รูปฟอร์มทองแดงที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) มีสัดส่วนที่ลดลง และเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปฟอร์มที่มีความเสถียรมากขึ้น ทองแดงมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปฟอร์มตรึงกับออกไซด์ (F4)(27.22%-37.31%) มากที่สุด รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5)(19.06%-25.39%) การเปลี่ยนแปลงของรูปฟอร์มทองแดงที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรูปฟอร์มสังกะสีในดินเหนียว (รูปที่ 4.2-4.3) เนื่องจากคุณสมบัติของประจุลบบนพื้นผิวและการมีออกไซด์เป็นองค์ประกอบ จึงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับโลหะและการยึดเกาะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุในดินเชื่อมต่อเป็นโครงสร้างกับองค์ประกอบต่างๆของดิน ดังนั้นการปรับปรุงดินด้วยการเติม ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และโดอะตอมไมต์ ลงไปในดิน สารปรับปรุงดินทั้ง 3 ชนิดช่วยทำให้ดินมีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโลหะเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการปรับปรุงดินเพิ่มขึ้นพบว่าดินมีการดูดซับทองแดงที่มากขึ้นดังรูปที่ 4.7 ทองแดงยังคงมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปฟอร์มทองแดงที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) ไปสู่รูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6) ที่ชัดเจนมากกว่าสังกะสี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทองแดงมีความสามารถในการดูดซับกับองค์ประกอบต่างๆในดินที่มีความเสถียรได้มากกว่าสังกะสี งานวิจัยจำนวนมากมักจะอภิปรายผลของทองแดงในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) ทำให้การปรับปรุงจำนวนมากจึงมีการเลือกใช้วัสดุปรับปรุงดินที่เป็นสารอินทรีย์ เพื่อต้องการลดการเคลื่อนที่ของทองแดงในดินซึ่งผลที่ได้กลับตรงกันข้าม การใช้สารปรับปรุงดินที่เป็นสารอินทรีย์ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของทองแดงในดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายได้เป็นองค์ประกอบ ส่งผลทำให้เมื่อทองแดงเกิดการดูดซับกับสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายทองแดงรูปฟอร์มที่ละลายน้ำจึงมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น (Abad-Valle *et al.*, 2016) แต่ผลของงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยสารปรับปรุงที่เป็นแร่ดินเหนียวมีประสิทธิภาพในการลดรูปฟอร์มทองแดงที่ละลายน้ำ (F1) และทำให้รูปฟอร์มทองแดงที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) มีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 สัดส่วนรูปร่างช่องว่างจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว



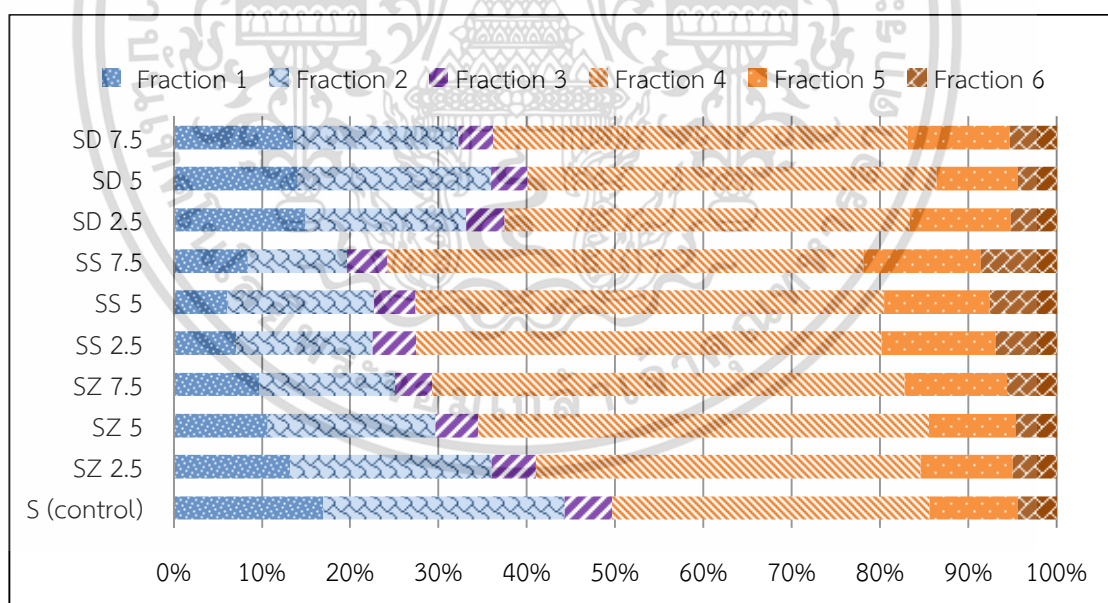
รูปที่ 4.7 สัดส่วนรูปร่างช่องว่างจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

2. ดินร่วนปนทราย

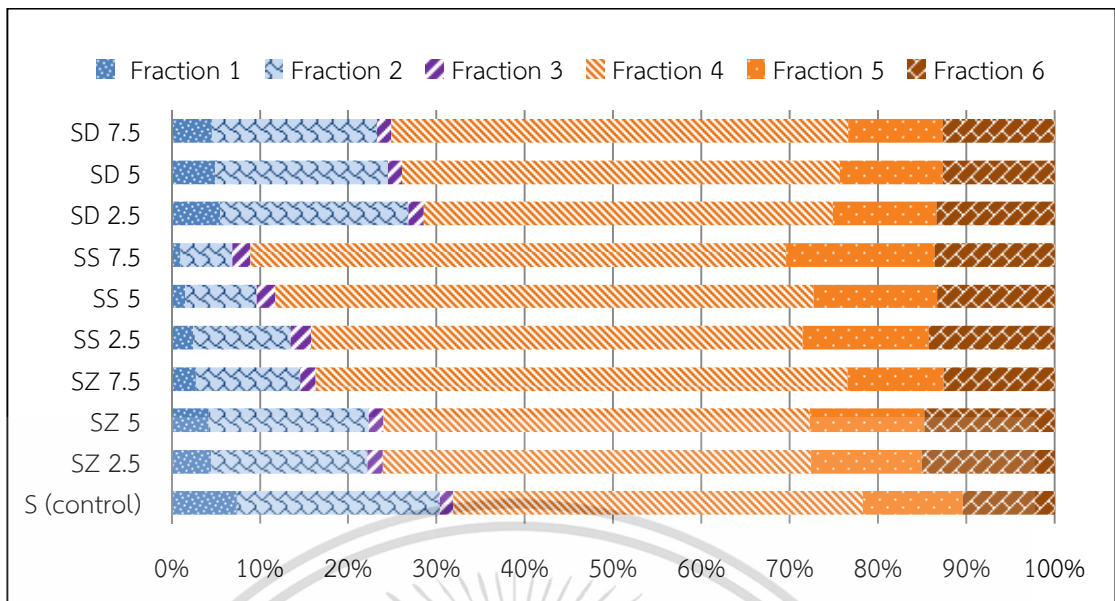
ดินร่วนปนทรายปนเปื้อนที่ระยะเวลา 30 และ 60 วัน จากผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างช่องว่างที่เกิดขึ้นยืนยันผลของการเติมสารปรับปรุงดิน (ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และโดอะตอมไมต์) ช่วยทำให้ดินมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) รูปร่างช่องว่างที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) จึงมีสัดส่วนที่ลดลงและเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปร่างที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปร่างช่องว่างในดินเหนียว (รูปที่ 4.6-4.7) ช่องว่างในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วนปนทรายมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปฟอร์มที่ตรงกับออกไซด์ (F4) มากกว่ารูปฟอร์มที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) ในดินอย่างชัดเจน จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของดินเหนียวและดินร่วนปนทราย (ตารางที่ 4.1) จะเห็นได้ว่าเนื่องจากดินร่วนปนทรายมีปริมาณของกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียว (%clay) และอินทรีย์วัตถุในดินที่น้อยกว่าทำให้โลหะที่จะเกิดการดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดินร่วนปนทรายจึงมีส่วนที่น้อยกว่าในดินเหนียว ดังนั้นจึงส่งผลต่อความแตกต่างของรูปฟอร์มที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) ในดินร่วนปนทรายที่น้อยกว่าดินเหนียว จากผลความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ว่าความแตกต่างกันขององค์ประกอบในดินแต่ละชนิดเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มโลหะที่เกิดขึ้น (Asensio *et al.*, 2013) ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของทองแดงในดินร่วนปนทรายจะเป็นรูปฟอร์มที่ตรงกับออกไซด์ (F4) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสังกะสีในดินร่วนปนทรายทองแดงยังคงเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปฟอร์มที่มีความเสถียรได้ดีกว่าสังกะสีเช่นเดียวกับผลทองแดงและสังกะสีในดินเหนียว จากผลการศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวและดินร่วนปนทรายปนเปื้อนที่ระยะเวลา 30 และ 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบรูปฟอร์มสังกะสีและรูปฟอร์มทองแดงที่เกิดขึ้นในดินพบว่าทองแดงสามารถดูดซับและยึดเกาะอยู่กับอนุภาคของดินได้ดีกว่าสังกะสี เนื่องจากจากรูปฟอร์มทองแดงที่เกิดขึ้นในดินที่ระยะเวลา 30 และ 60 วัน ทองแดงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากจากรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) ไปสู่รูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6) จากผลการศึกษาที่ได้สามารถสรุปได้ว่านอกจากคุณสมบัติองค์ประกอบของดินที่แตกต่างกัน (%clay และ OM) ชนิดของโลหะที่ปนเปื้อนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ การเคลื่อนที่ การแพร่กระจายและการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มต่างๆของโลหะที่เกิดขึ้นในดิน



รูปที่ 4.8 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย



รูปที่ 4.9 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

4.3.3 โครเมียม

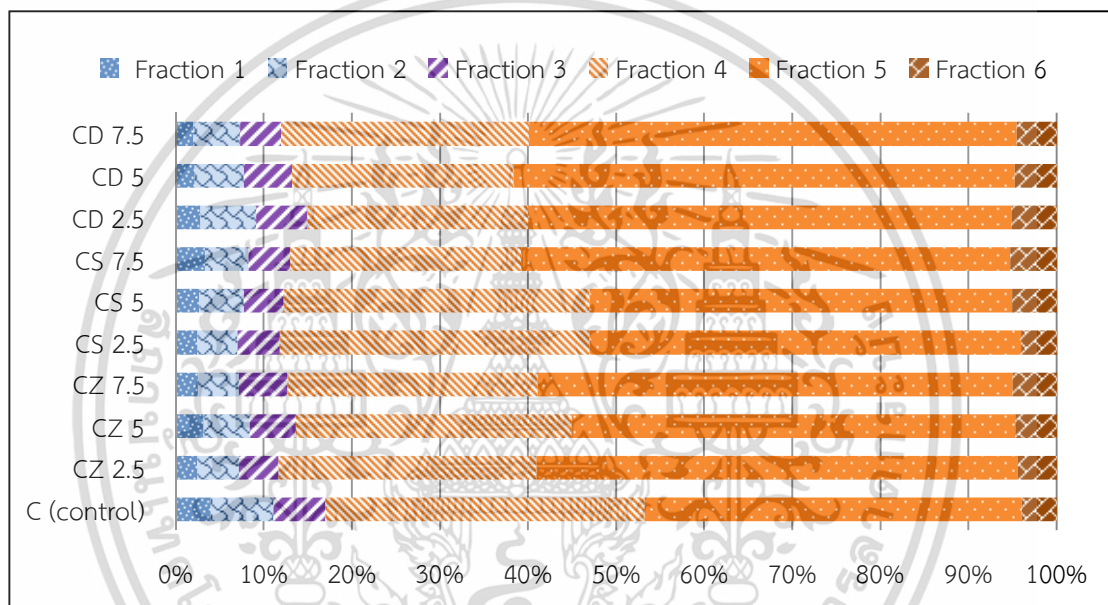
1. ดินเหนียว

รูปฟอร์มโครเมียมในดินเหนียวปนเปื้อนที่ระยะเวลา 30 วันของการปรับปรุงดินแสดงดังรูปที่ 4.10 โครเมียมในดินเหนียวอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ (F5)(42.85%-56.93%) มากที่สุด รองลงมาคือ รูปฟอร์มที่ตรงกับออกไซด์ (F4)(25.07%-36.25%) โครเมียมทั้ง 2 รูปฟอร์มเมื่อรวมกันคิดเป็นประมาณ 70% ของปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินที่มีความเสถียร ความสามารถในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก ในขณะที่รูปฟอร์มโครเมียมที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) มีสัดส่วนที่น้อยมาก โดยทั่วไปโครเมียมที่พบตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) ซึ่งไตรวาเลนต์โครเมียมจะมีความเสถียรและมีความเสี่ยงของการเคลื่อนที่รวมถึงความเป็นพิษที่น้อยกว่าเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปของโครเมียมที่เกิดขึ้นคือ ความเป็นกรดต่างของดิน เนื่องจากเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถถูกรีดิวซ์ไปอยู่ในรูปไตรวาเลนต์โครเมียมได้ โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดต่างของดินลดลง โดยมีอินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียมแสดงดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 (พงค์ภัทร, 2549)

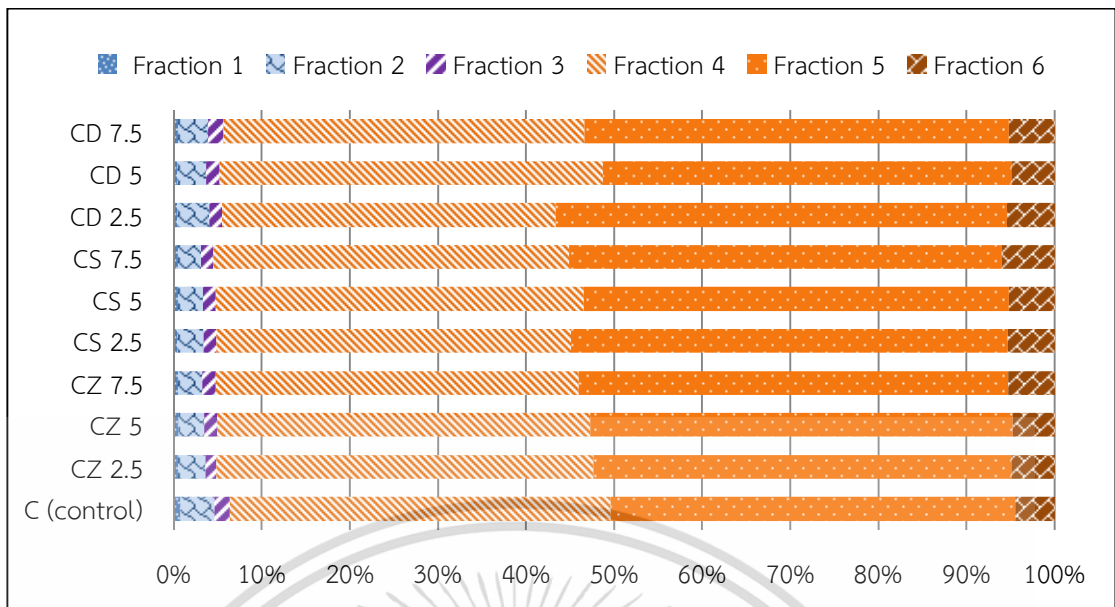


ไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) สามารถเกิดการดูดซับที่รวดเร็วกับออกไซด์ในดิน เกิดพันธะที่แข็งแรงและมีความเสถียรมากกว่าโลหะตัวอื่น (ทองแดง สังกะสีและนิกเกิล) โดยเฉพาะเมื่อเกิดพันธะกับเหล็กออกไซด์ในดิน (Covelo *et al.*, 2008) ดังผลที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงดินการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงของรูปฟอร์มโครเมียมในดินเหนียวแสดงดังรูปที่ 4.11 โครเมียมรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6) มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่รูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) มีสัดส่วนที่ลดลงจากที่ระยะเวลา 30 วันของการปรับปรุง (รูปที่ 4.10) โครเมียมในดินเหนียวยังคงมีสัดส่วนรูปฟอร์มที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ (F5)(45.93%-51.20%) มากที่สุด รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ตรงกับออกไซด์ (F4)(37.91%-43.51%) เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) และดินที่ได้รับการปรับปรุง จะเห็นได้ว่ารูปฟอร์มโครเมียมเป็นไปในทิศทางเดียวกันสัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (F1-3) มีน้อยกว่า 10% ของปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดิน จากการศึกษารูปฟอร์มโครเมียมที่เกิดขึ้นในดินเหนียวที่ระยะเวลา 30 และ 60 วันของการปรับปรุงดิน โครเมียมสามารถดูดซับกับออกไซด์ อินทรีย์วัตถุรวมถึงองค์ประกอบต่างๆในดินที่ดีมากและมีความเสถียร ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับผลรูปฟอร์มทองแดงและสังกะสีในดิน



รูปที่ 4.10 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

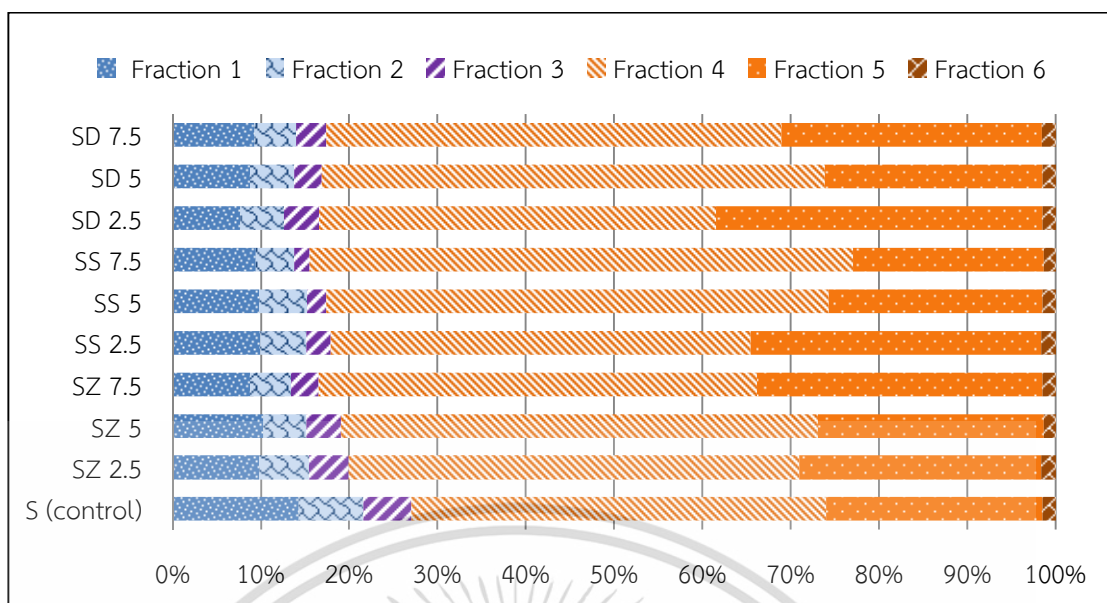


รูปที่ 4.11 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

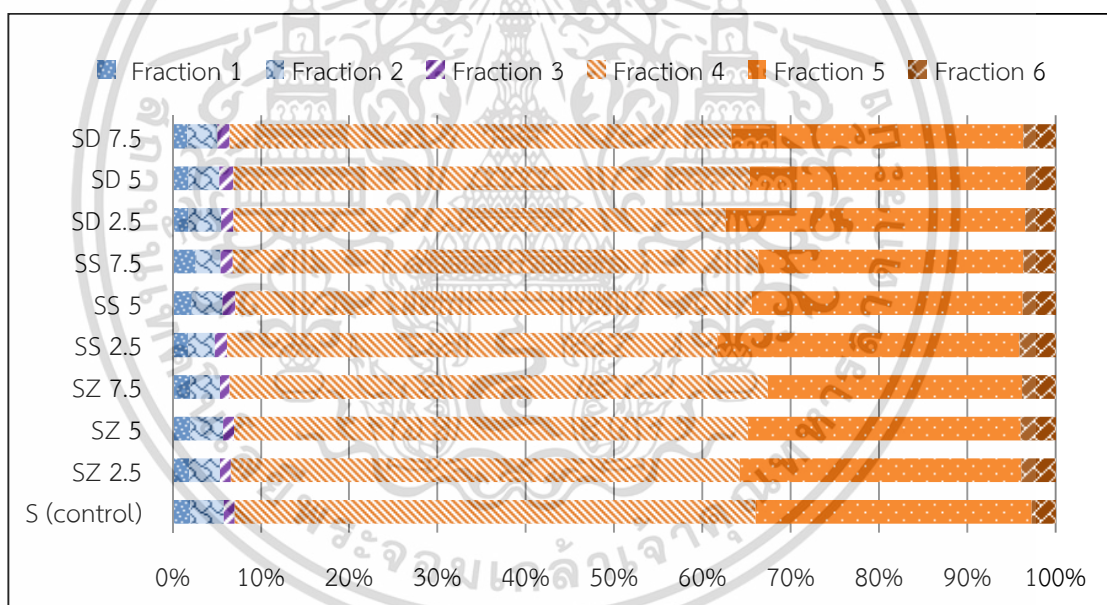
2. ดินร่วนปนทราย

รูปที่ 4.12 แสดงสัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมในดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดิน รูปฟอร์มโครเมียมที่ตรงกับออกไซด์ (F4) ในดินมีสัดส่วนที่มากที่สุด (44.95%-57.03%) รองลงมาคือ รูปฟอร์มโครเมียมที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ (F5)(21.62%-36.97%) ผลเนื่องมาจากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่แตกต่างกันระหว่างดินเหนียวและดินร่วนปนทราย ซึ่งในดินร่วนปนทรายมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่น้อยกว่าในดินเหนียว (ตารางที่ 4.1) จึงส่งผลต่อสัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) ในดิน 2 ชนิดแตกต่างกัน ดินร่วนปนทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) รูปฟอร์มโครเมียมที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) มีสัดส่วนที่น้อยมาก ในขณะที่ดินที่ได้รับการปรับปรุงทุกๆการปรับปรุงแสดงผลรูปฟอร์มโครเมียมที่แตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดิน การเปลี่ยนแปลงของรูปฟอร์มโครเมียมในดินร่วนปนทรายแสดงดังรูปที่ 4.13 ทั้งดินร่วนปนทรายที่ไม่ได้ปรับปรุงและดินที่ปรับปรุงทุกๆการปรับปรุงมีสัดส่วนโครเมียมรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) น้อยกว่า 10% ของปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินเช่นเดียวกับผลโครเมียมในดินเหนียว โครเมียมในดินร่วนปนทรายยังคงอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรงกับออกไซด์ (F4)(55.58%-60.97%) มากที่สุด รองลงมาคือรูปฟอร์มโครเมียมที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ (F5)(28.79%-34.22%) จากผลการศึกษารูปฟอร์มโครเมียมที่เกิดขึ้น โครเมียมแสดงความสามารถของการเกิดการดูดซับกับออกไซด์และอินทรีย์วัตถุในดินได้ดีและมีความเสถียรมากกว่าทองแดง สังกะสีและนิกเกิล ซึ่งความแตกต่างของการดูดซับโลหะในดินที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายโดยใช้หลักการ hard soft acid bases ของ Pearson (1963) จากตารางที่ 2.4 และ 2.5 แสดงสมบัติการเป็น hard-soft ของไอออน จะเห็นได้ว่าเนื่องจากโครเมียม (Cr^{3+}) เป็นโลหะที่มีสมบัติเป็น hard acid สูงกว่าทองแดง (Cu^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) (Pearson, 1963) จึงส่งผลทำให้โครเมียมสามารถเกิดพันธะกับออกไซด์ (O^{2-}) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ที่มีสมบัติเป็น hard bases ได้ดีและมีความเสถียรของพันธะมากกว่าตามหลักการ hard soft acid bases (Ye et al., 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย



รูปที่ 4.13 สัดส่วนรูปฟอร์มโครเมียมจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

4.3.4 นิกเกิล

1. ดินเหนียว

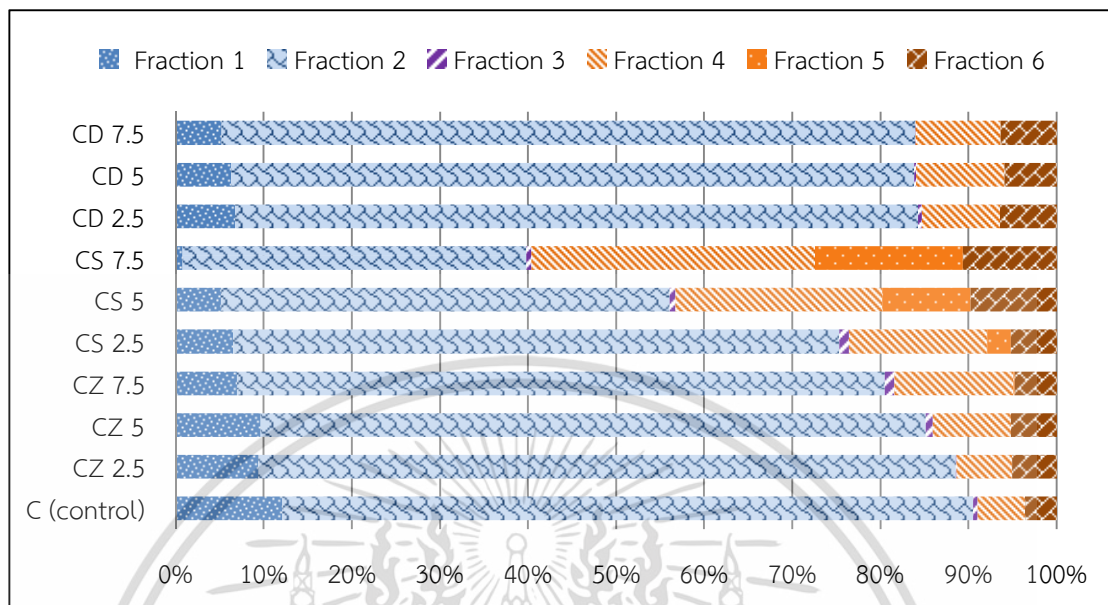
จากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลาการปรับปรุงดิน 30 วัน สัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลในดินเหนียวแสดงดังรูปที่ 4.14 นิกเกิลแสดงความสัมพันธ์อย่างชัดเจนในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบกับไอออนของธาตุ (Cl^- , PO_4^{3-} , S^{2-} และ SO_4^{2-}) ที่มีอยู่ในดินได้ดี ส่งผลทำให้นิกเกิลส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) (39.01%-79.24%) ในขณะที่รูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น มิใช่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

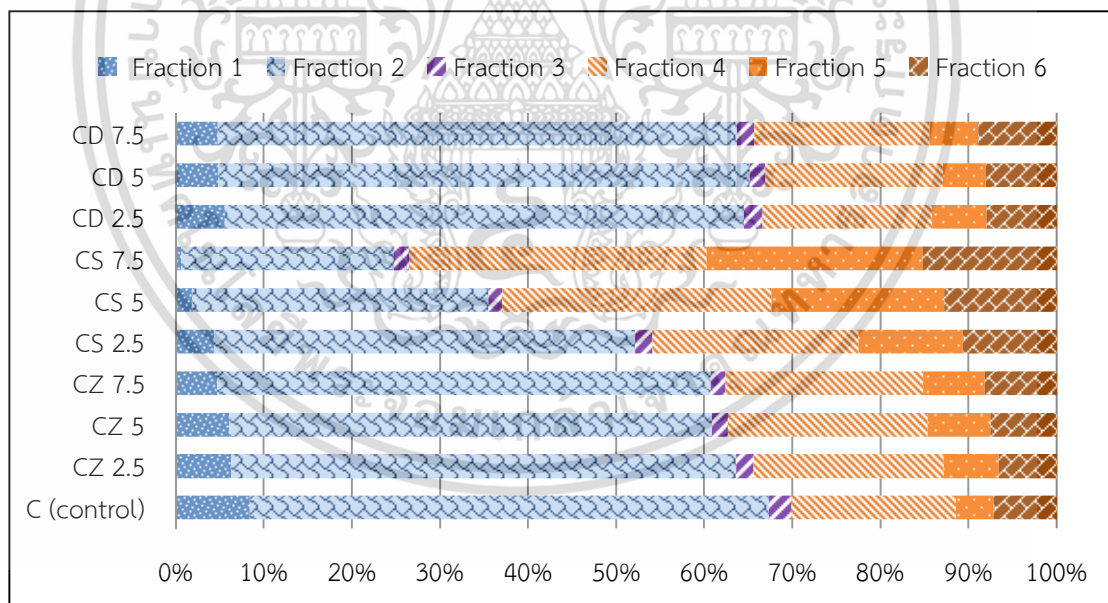
(F5) ให้ผลที่ตรงข้าม เนื่องจากนิกเกิลในดินเหนียวไม่มีการดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดินยกเว้นดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์ (2.69%-16.83%) และเมื่อรูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นสัดส่วนรูปฟอร์มที่ละลายน้ำ (F1) จะลดลง เนื่องมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวของซีพีโอไลต์และสสารฮิวมิกในดิน เมื่อระยะเวลาของการปรับปรุงดินเพิ่มขึ้น (60 วัน) การเปลี่ยนแปลงของรูปฟอร์มนิกเกิลในดินเหนียวแสดงดังรูปที่ 4.15 นิกเกิลในดินเหนียวยังคงมีสัดส่วนรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2)(24.11%-60.29%) มากที่สุด การปรับปรุงดินเหนียวปนเปื้อนด้วยสารปรับปรุงดินซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ สามารถลดรูปฟอร์มนิกเกิลที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) เปลี่ยนแปลงไปสู่รูปฟอร์มที่มีความเสถียรและเป็นรูปฟอร์มนิกเกิลที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6) รูปฟอร์มที่มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ รูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4)(19.22%-33.82%) เมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุง (18.65%) เนื่องจากการมีออกไซด์เป็นธาตุองค์ประกอบของสารปรับปรุงดิน (ตารางที่ 4.3) เมื่อเกิดการดูดซับก็จะเป็นการดูดซับกับออกไซด์บนพื้นผิวของสารปรับปรุงดิน จากผลรูปฟอร์มที่เกิดขึ้นนิกเกิลมีสัดส่วนของรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) และรูปฟอร์มที่ตรึงกับอินทรีย์วัตถุ (F5) น้อยมากเมื่อเทียบกับรูปฟอร์มของสังกะสี ทองแดงและโครเมียมในดินเหนียว (รูปที่ 4.3, 4.7 และ 4.11) ในขณะที่นิกเกิลมีสัดส่วนของรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) มากที่สุด จากผลรูปฟอร์มนิกเกิลที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะตัวอื่นๆ บ่งบอกได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปฟอร์มและความเสี่ยงในการเคลื่อนที่แพร่กระจายของโลหะในดินไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบกายของดินอย่างเดียวเท่านั้น ชนิดของโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในดินเป็นปัจจัยที่ส่งผลและมีอิทธิพลต่อรูปฟอร์มโลหะตัวอื่นๆ ที่มีอยู่ในดิน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Sheikhhosseini *et al.* (2013) ได้ทำการทดลองการดูดซับโลหะแบบรวม (multi sorption) และแบบเดี่ยว (single sorption) โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อต้องการศึกษาความสามารถในการแข่งขันของทองแดง สังกะสี แคดเมียมและนิกเกิลที่ดูดซับบนแร่ดินเหนียว (palygorskite และ sepiolite) ผลการทดลองการดูดซับโลหะแบบรวม (multi sorption) ค่า q_m หรือปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (mg/kg) ที่ได้จากการสมการ Langmuir เป็นลำดับเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ทองแดง ($q_m = 2,356$ mg/kg) สังกะสี ($q_m = 1,320$ mg/kg) แคดเมียม ($q_m = 697.1$ mg/kg) และนิกเกิล ($q_m = 480.6$ mg/kg) ตามลำดับจากการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณของนิกเกิลที่ถูกดูดซับบนแร่ดินเหนียวมีปริมาณน้อยที่สุด แต่เมื่อทำการทดลองการดูดซับนิกเกิลแบบเดี่ยว (single sorption) ปริมาณของนิกเกิลที่ถูกดูดซับ (q_m) เท่ากับ 2,410 mg/kg จะเห็นได้ว่า ค่า q_m ของนิกเกิลที่ได้จากการสมการมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการดูดซับโลหะแบบรวม (multi sorption) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของโลหะตัวอื่นๆ ส่งผลทำให้นิกเกิลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวแร่ดินเหนียวมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการดูดซับแบบเดี่ยว โดยปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับเป็นลำดับเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ทองแดง สังกะสี แคดเมียมและนิกเกิลตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่ามีความสอดคล้องกับผลรูปฟอร์มนิกเกิลที่เกิดขึ้นในดิน เนื่องจากการมีอยู่ของโครเมียมและทองแดงที่สามารถดูดซับกับดินและองค์ประกอบต่างๆในดินได้ดีทำให้รูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) และอินทรีย์วัตถุ (F5) มีสัดส่วนที่มาก ส่งผลทำให้นิกเกิลที่ถูกดูดซับใน 2 รูปฟอร์มนี้ (F4 และ F5) มีปริมาณน้อย นิกเกิลเป็นโลหะที่มีไอออนขนาดเล็ก ($r = 0.069$ nm) เมื่อไม่ถูกดูดซับทำให้นิกเกิลในดินอยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายและยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่ภายในโครงสร้างของซีพีโอไลต์ที่มีขนาดและปริมาตรรูพรุนที่มาก (ตารางที่ 4.4) ทำให้ผลของนิกเกิลในดินเหนียวปนเปื้อนที่ปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์มีสัดส่วนรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) แตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) และดินที่ปรับปรุงด้วยซีโอไลต์และโดอะตอมไมต์



รูปที่ 4.14 สัดส่วนรูปฟอร์มนิกลเกิดจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

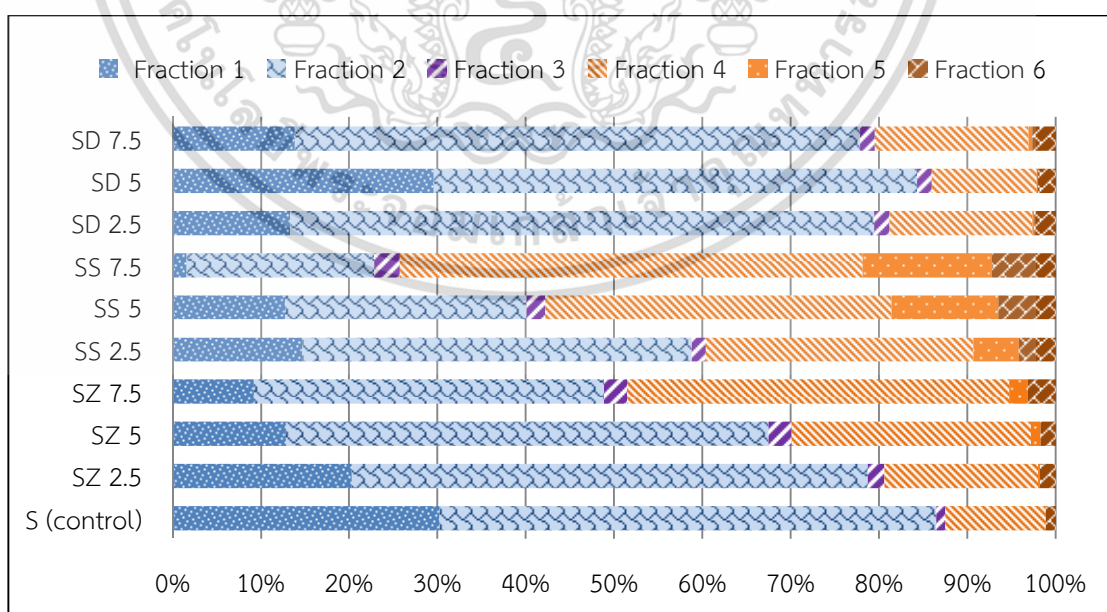


รูปที่ 4.15 สัดส่วนรูปฟอร์มนิกลเกิดจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

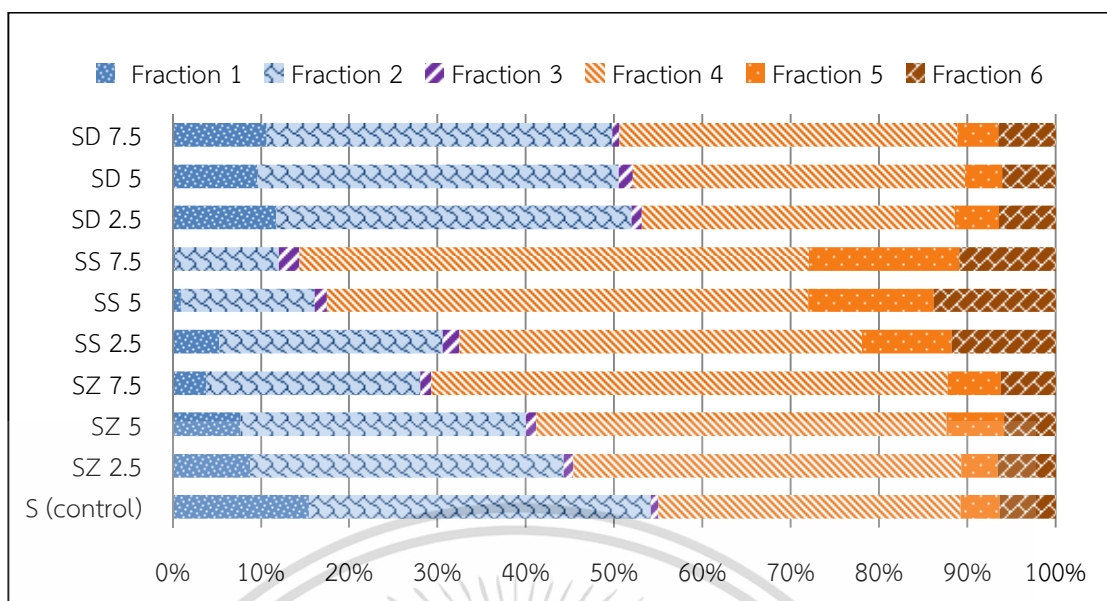
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ดินร่วนปนทราย

รูปฟอร์มนิกเกิลในดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินแสดงดังรูปที่ 4.16 นิกเกิลในดินร่วนปนทรายมีความเสี่ยงที่จะเคลื่อนที่และแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมที่สูงเนื่องจากนิกเกิลในดินส่วนใหญ่เป็นรูปฟอร์มนิกเกิลที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) สัดส่วนมากที่สุดคือ รูปฟอร์มนิกเกิลที่แลกเปลี่ยนได้ (F2)(21.25%-66.16%) เช่นเดียวกับผลรูปฟอร์มนิกเกิลในดินเหนียว การปรับปรุงดินด้วยการเติมซีฟีโอไลต์สามารถลดรูปฟอร์มนิกเกิลที่แลกเปลี่ยนได้ (F2)(21.25%-44.06%) มากที่สุด และเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปฟอร์มที่มีความเสถียรมากขึ้นนั่นคือ รูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) ในดินปนเปื้อนที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) มีสัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) อยู่เพียง 11.36% แต่เมื่อดินร่วนปนทรายที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีฟีโอไลต์ ซีฟีโอไลต์และไดอะตอมไมต์มีสัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) เท่ากับ 17.41%-43.25%, 30.36%-52.37% และ 11.87%-17.44% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีฟีโอไลต์สามารถเพิ่มรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) ได้มากที่สุด รองลงมาคือ การปรับปรุงดินด้วยซีฟีโอไลต์ ในขณะที่การปรับปรุงด้วยไดอะตอมไมต์สัดส่วนของรูปฟอร์มนิกเกิลที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) มีการลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.17) นิกเกิลเกิดการดูดซับกับองค์ประกอบต่างๆในดินที่ดีขึ้น โดยเฉพาะรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) ในดินควบคุม (control) มีสัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) เท่ากับ 34.26% ในดินที่ปรับปรุงด้วยซีฟีโอไลต์มีสัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) เพิ่มขึ้นมากที่สุด เท่ากับ 45.59%-57.73% รองลงมาคือ การปรับปรุงดินด้วยซีฟีโอไลต์มีสัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) เท่ากับ 43.92%-58.50% และการปรับปรุงดินด้วยไดอะตอมไมต์มีสัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) เท่ากับ 35.47%-38.31%



รูปที่ 4.16 สัดส่วนรูปฟอร์มนิกเกิลจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย



รูปที่ 4.17 สัดส่วนรูปฟอร์มนิเกิลจากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

รูปฟอร์ม (Fraction) ของโลหะที่เกิดขึ้นในดินมาจากลักษณะของการดูดซับ การเกิดพันธะและการเข้าร่วมระหว่างโลหะกับอนุภาคและองค์ประกอบต่างๆของดิน ดังนั้นความแตกต่างกันขององค์ประกอบต่างๆที่มีอยู่ในดินแต่ละชนิด (ดินเหนียวและดินร่วนปนทราย) จึงส่งผลต่อรูปฟอร์มของโลหะที่เกิดขึ้นแตกต่างกันออกไป (Mazhari *et al.*, 2017) นอกจากนี้ชนิดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มที่เกิดขึ้นในดิน โดยทั่วไปการปนเปื้อนโลหะในดินจะพบโลหะมากกว่าหนึ่งชนิด ซึ่งการมีอยู่ของโลหะตัวอื่นๆจะส่งผลต่อพฤติกรรมและความสามารถในการดูดซับกับองค์ประกอบต่างๆในดินที่แตกต่างกันของโลหะแต่ละชนิด ดังผลรูปฟอร์มสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิเกิลที่เกิดขึ้นในดินเหนียวและดินร่วนปนทราย (รูปที่ 4.2-4.17) ความแตกต่างของการดูดซับโลหะที่เกิดขึ้นพบว่ามีความสัมพันธ์กับสมบัติของธาตุโลหะ คือ รัศมีไอออน hard soft acid bases (HSAB) และค่าคงที่ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (K_h) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโลหะแต่ละตัวที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกัน (Sheikhhosseini *et al.*, 2013) จากงานวิจัยของ Tahervand and Jalali (2017) ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะ (แคดเมียม ทองแดง นิเกิลและสังกะสี) ของดินที่ปรับปรุงด้วยเบนโทไนท์ ซีโอไลต์และหินปูน ผลศึกษาพบว่าทองแดงมีปริมาณของการถูกดูดซับมากที่สุดรองลงมาคือ สังกะสี แคดเมียมและนิเกิลตามลำดับ ($Cu > Zn > Cd \geq Ni$) ซึ่งลำดับของการดูดซับโลหะที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับลำดับค่าคงที่ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis constant) หรือค่า K_h ของโลหะ ($Cu = 10^{-7.7}$, $Zn = 10^{-9.0}$, $Cd = 10^{-10.1}$, $Ni = 10^{-9.9}$) ดังที่กล่าวมาเมื่อวิเคราะห์ผลของรูปฟอร์มสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิเกิลที่เกิดขึ้นในดินเหนียวและดินร่วนปนทราย (รูปที่ 4.2-4.17) โครเมียมในดินประมาณ 80% ของปริมาณโครเมียมทั้งหมด เป็นรูปฟอร์มที่มีความเสถียรเคลื่อนที่ไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลของโลหะตัวอื่นๆจะเห็นว่าโครเมียมมีการดูดซับและเกิดพันธะกับองค์ประกอบต่างๆในดินได้ดีที่สุดรองลงมาคือ ทองแดง สังกะสีและนิเกิลตามลำดับ โลหะทั้ง 4 ตัวเป็นโลหะทรานซิชันกลุ่ม d คือ กลุ่มที่มีอิเล็กตรอนบรรจุไม่เต็มในอยู่ในระดับพลังงานย่อย d (d-orbital) โดยที่มีรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยดังนี้ โครเมียม ($Cr^{3+} = [Ar] 3d^3$) ทองแดง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Cu²⁺) = [Ar] 3d⁹, สังกะสี (Zn²⁺) = [Ar] 3d¹⁰ และนิกเกิล (Ni²⁺) = [Ar] 3d⁸ ดังที่ได้อภิปรายผลของรูปฟอร์มโคออร์ดิเนชันที่เกิดขึ้นในดิน ตามหลักการ hard soft acid bases (HSAB) เมื่อไอออนที่มีสมบัติ hard acid และ hard bases เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน พันธะที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรเนื่องจากคุณสมบัติของไอออนกรดและเบส เมื่อเปรียบเทียบกับโคออร์ดิเนชันเป็นไอออนโลหะมีสมบัติความเป็น hard acid ที่สูงกว่าทองแดง สังกะสีและนิกเกิล ส่งผลทำให้เมื่อเกิดการดูดซับกับออกไซด์และอินทรีย์วัตถุในดินที่มีสมบัติของไอออนเป็น hard bases นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าคงที่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโคออร์ดิเนชัน ($K_h = 10^{-3.96}$), ทองแดง ($K_h = 10^{-7.7}$), สังกะสี ($K_h = 10^{-9.2}$) และนิกเกิล ($K_h = 10^{-9.9}$) (Pohlmeier, 2004) จะเห็นได้ว่าลำดับของค่าคงที่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโลหะ (K_h) มีความสอดคล้องและสัมพันธ์กับลำดับความชอบของการดูดซับโลหะหนักที่เกิดขึ้นในดิน

4.4 การประเมินค่าดัชนีทางชีวภาพ

การกำหนดรูปฟอร์มโลหะในดินช่วยให้เข้าใจถึงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและองค์ประกอบต่างๆในดิน เพื่อนำไปสู่เป้าหมายของการฟื้นฟูดินปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีการลดความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะในดิน ดังนั้นประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะด้วยสารปรับปรุงดินซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ จึงประเมินผลโดยใช้ค่าดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index : BI) เป็นตัวชี้วัดความเสี่ยงที่โลหะจะเข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิต ผลการประเมินค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสี ทองแดง โคออร์ดิเนชันและนิกเกิลในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายที่การปรับปรุงดินต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.7 – 4.10

4.4.1 ดัชนีทางชีวภาพในดินเหนียว

จากผลดัชนีทางชีวภาพ (BI) (ตารางที่ 4.7-4.8) จะเห็นได้ว่าโคออร์ดิเนชันมีความเสี่ยงและความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง สังกะสีและนิกเกิลตามลำดับ (Cr < Cu < Zn < Ni) ผลมีความสอดคล้องกับลำดับของการดูดซับโลหะจากผลการสกัดแบบลำดับขั้น เนื่องจากโคออร์ดิเนชันสามารถดูดซับกับออกไซด์และอินทรีย์วัตถุในดินได้ดีและมีความเสถียรมากกว่าโลหะตัวอื่น ส่งผลทำให้ค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของโคออร์ดิเนชันต่ำที่สุด ค่าดัชนีทางชีวภาพของโคออร์ดิเนชันที่ระยะเวลา 30 วัน น้อยกว่า 17% ของปริมาณโคออร์ดิเนชันทั้งหมดในดินและลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงดินโคออร์ดิเนชันน้อยกว่า 7% ของปริมาณโคออร์ดิเนชันทั้งหมดในดินที่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิต ถึงแม้ว่าปริมาณโคออร์ดิเนชันทั้งหมดในดินจะมีปริมาณสูงที่สุด (700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่กลับมีความเสี่ยงและความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด จากผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mazhari *et al.* (2017) ที่ศึกษาพฤติกรรมของโลหะในดินเพื่อนำไปสู่การป้องกันสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ ดินตัวอย่าง 11 ตัวอย่างที่ศึกษามีแหล่งกำเนิดทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกันและมีปริมาณของโคออร์ดิเนชันและนิกเกิลในดินที่สูง ในขณะที่โคออร์ดิเนชันมีค่าดัชนีทางชีวภาพที่ต่ำ (0.5%-3.4%) แต่นิกเกิลกลับมีค่าดัชนีทางชีวภาพที่สูงกว่า (11.77%-14%) เนื่องมาจากโคออร์ดิเนชันมีการยึดเกาะเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรกับแร่ออกไซด์ในดิน เช่น แร่โครไมต์และเหล็กออกไซด์ ในขณะที่นิกเกิลที่ยึดเกาะกับแร่โอลิวินและทัลก์มีความเสถียรของพันธะที่น้อยกว่า จากความไม่เสถียรของพันธะที่ดูดซับจึงส่งผลทำให้นิกเกิลมีความสามารถในการเคลื่อนที่มากกว่าโคออร์ดิเนชัน ($BI_{Ni} > BI_{Cr}$) เช่นเดียวกับผลของงานวิจัยนี้เนื่องจากความเสถียรของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครเมียมที่ดูดซับกับองค์ประกอบในดิน (ออกไซด์และอินทรีย์วัตถุ) จึงทำให้โครเมียมมีค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ที่ต่ำแม้ในดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) และการปรับปรุงดินทุกๆ การปรับปรุงพบว่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ดินสามารถดูดซับโครเมียมเอาไว้ได้ดีนิกเกิลกลับให้ผลตรงกันข้าม 91.01% ของปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในดินที่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิต อย่างไรก็ตามเมื่อดินได้รับการปรับปรุงด้วยสารปรับปรุงดิน คือ ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์ และไดอะตอมไมต์พบว่าค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของโลหะทุกๆตัวลดน้อยลงเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) ผลที่แสดงจะเห็นได้ว่าสารปรับปรุงดินทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินที่แตกต่างกัน จากผลค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยไดอะตอมไมต์มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินเมื่อเทียบกับผลของซีโอไลต์และซีพีโอไลต์ ผลการปรับปรุงดินด้วยไดอะตอมไมต์ที่อัตราส่วนต่างๆ (2.5%, 5% และ 7.5%) พบว่าค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของทุกๆโลหะให้ผลที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากสภาพความเป็นกรดต่ำที่ต่ำส่งผลทำให้ในดินจะมีปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (H^+) อยู่มาก ซึ่งจะเข้าไปเคลือบคลุมที่พื้นผิวของสารปรับปรุงส่งผลทำให้เกิดการแข่งขันระหว่างไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไอออนโลหะ (สังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล) บนพื้นผิวของไดอะตอมไมต์ที่มีจำกัด การแข่งขันจะลดลงเมื่อสภาพความเป็นกรดต่ำของดินเพิ่มขึ้น (ปริมาณ H^+ ลดลง) และจะทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะของไดอะตอมไมต์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากมีพื้นที่ในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Tahervand and Jalali, 2017) ผลการปรับปรุงดินด้วยซีโอไลต์สามารถลดค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้มากกว่าไดอะตอมไมต์ ที่ระยะเวลา 30 วันของการปรับปรุงดินเหนียวค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของการปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ทั้ง 3 อัตราส่วน (2.5%, 5% และ 7.5%) ให้ผลที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงด้วยซีโอไลต์อัตราส่วน 7.5% (CZ7.5) สามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะได้มากกว่าการปรับปรุงที่อัตราส่วน 2.5% และ 5% การปรับปรุงด้วยซีโอไลต์ที่อัตราส่วน 7.5% (CZ7.5) ค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ลดลง 10.65%, 8.74%, 1.64% และ 7.47% ตามลำดับเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) จากค่าดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 30 และ 60 วันของดินที่ปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์ พบว่าโลหะทุกๆตัวมีความเสี่ยงของความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุด ที่อัตราส่วน 5% และ 7.5% ของการปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์ให้ผลดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสี ทองแดงและโครเมียมน้อยที่สุดและแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของนิกเกิลน้อยที่สุดคือ การปรับปรุงด้วยซีพีโอไลต์อัตราส่วน 7.5% (CS7.5) เมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) ที่ระยะเวลา 30 วันของการปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์ค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสีมีการลดลง 19.53%-29.31%, ทองแดงลดลง 16.20%-21.08%, โครเมียมลดลง 4-4.73% และนิกเกิลลดลง 14.6-50.57% เมื่อระยะเวลาการปรับปรุงดินเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์ค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสีลดลง 15.06%-21.37%, ทองแดงลดลง 9.07%-13.25%, โครเมียมลดลง 1.57%-1.91% และนิกเกิลลดลง 15.74%-43.38% จากผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของดัชนีทางชีวภาพ (BI) แสดงผลการปรับปรุงดินเหนียวปนเปื้อนด้วยซีพีโอไลต์อัตราส่วน 5% และ 7.5% มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตได้ดีที่สุด ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการปรับปรุงดินเนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึบ คือ พื้นที่ผิว (specific surface area) คุณสมบัติบนพื้นผิว (surface properties) และลักษณะทางโครงสร้าง (structural) ของสารปรับปรุง (Ye *et al.*, 2015) คุณสมบัติของขนาดพื้นที่ผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน (SiO^- หรือ AlO^-) และประจุที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของสารปรับปรุง จากผลคุณสมบัติเบื้องต้นของสารปรับปรุงดินที่ทำการวิเคราะห์ ถึงแม้คุณสมบัติบนพื้นผิวของซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์จะมีประจุเป็นลบ ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$) แต่เนื่องจากการมีขนาดของพื้นที่ผิวที่มากของซีพีโอไลต์จึงส่งผลต่อปริมาณของประจุลบบนพื้นผิวที่สูงตามไปด้วย โดยที่ประจุลบบนพื้นผิวที่เกิดขึ้นสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้าบนพื้นผิวของสารปรับปรุงที่แสดงผลของการมีประจุลบที่แตกต่างกัน โดยที่ซีพีโอไลต์มีค่าศักย์ซีต้าบนพื้นผิว เท่ากับ -23.41 mV ในขณะที่ค่าศักย์ซีต้าบนพื้นผิวของซีโอไลต์และไดอะตอมไมต์แสดงผลของการมีประจุลบที่น้อยกว่าคือ -20.79 mV และ -19.77 mV ตามลำดับ ดังนั้นเนื่องจากคุณสมบัติของพื้นที่ผิวที่มากและประจุลบที่สูง จึงส่งผลทำให้การปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์มีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโลหะที่สูง (Barczyk *et al.*, 2014) นอกจากนี้ด้วยลักษณะทางโครงสร้างของแร่ประเภท 2:1 ที่มีช่องว่างระหว่างชั้น (layer) นอกจากจะเป็นตัวดูดซับที่ดีแล้วยังสามารถยับยั้งการหลุดออกของโลหะที่ดูดซับภายในโครงสร้างได้อีกด้วย (Sheikhhosseini *et al.*, 2013)

ตารางที่ 4.7 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

การปรับปรุงดิน	ดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index : BI)			
	สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	นิกเกิล
C (control)	63.96 ^a ± 3.32	43.30 ^a ± 2.32	16.97 ^a ± 0.86	91.01 ^a ± 0.94
CZ 2.5	57.03 ^{bc} ± 3.22	34.33 ^b ± 4.80	11.66 ^c ± 1.91	88.61 ^{ab} ± 1.33
CZ 5	57.04 ^{bc} ± 0.89	33.63 ^b ± 2.31	13.57 ^{bc} ± 0.79	85.91 ^{bc} ± 0.51
CZ 7.5	52.41 ^c ± 1.53	29.26 ^{bc} ± 1.32	12.68 ^c ± 0.23	81.55 ^d ± 0.70
CS 2.5	44.43 ^d ± 4.18	27.10 ^{cd} ± 5.98	11.86 ^c ± 2.12	76.41 ^e ± 3.68
CS 5	36.81 ^e ± 3.95	24.85 ^{de} ± 3.68	12.24 ^c ± 1.24	56.62 ^f ± 3.62
CS 7.5	34.65 ^e ± 2.18	22.22 ^e ± 1.61	12.97 ^{bc} ± 1.12	40.44 ^g ± 2.06
CD 2.5	58.34 ^b ± 1.67	34.94 ^b ± 3.48	14.88 ^b ± 0.70	84.69 ^{cd} ± 0.46
CD 5	55.42 ^{bc} ± 2.91	34.40 ^b ± 4.89	13.16 ^{bc} ± 0.38	84.05 ^{cd} ± 0.38
CD 7.5	55.65 ^{bc} ± 4.55	31.64 ^{bc} ± 0.99	11.94 ^c ± 0.45	83.99 ^{cd} ± 1.15

หมายเหตุ : a,b,c,d,e,f,g หมายถึง ค่าแสดงความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) ตัวอักษรเหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.8 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

การปรับปรุงดิน	ดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index : BI)			
	สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	นิกเกิล
C (control)	54.39 ^a ± 1.24	21.26 ^a ± 1.58	6.37 ^a ± 0.66	69.86 ^a ± 1.26
CZ 2.5	48.73 ^b ± 1.95	16.77 ^{bc} ± 0.73	4.80 ^{cd} ± 0.28	65.63 ^b ± 1.07
CZ 5	48.19 ^b ± 0.34	15.35 ^c ± 1.81	4.85 ^{cd} ± 0.64	62.67 ^c ± 0.97
CZ 7.5	43.74 ^c ± 2.15	12.52 ^d ± 1.33	4.73 ^{cd} ± 0.16	62.39 ^c ± 1.91
CS 2.5	39.33 ^d ± 3.24	12.19 ^d ± 0.35	4.80 ^{cd} ± 0.12	54.12 ^d ± 1.09
CS 5	32.89 ^e ± 1.00	9.44 ^e ± 0.56	4.73 ^{cd} ± 0.26	37.04 ^e ± 0.61
CS 7.5	33.02 ^e ± 2.40	8.01 ^e ± 0.76	4.46 ^{cd} ± 0.25	26.48 ^f ± 0.68
CD 2.5	47.56 ^b ± 1.53	17.50 ^b ± 0.80	5.44 ^{bc} ± 0.38	66.62 ^b ± 0.38
CD 5	49.76 ^b ± 1.92	18.01 ^b ± 0.56	5.22 ^{bc} ± 0.51	66.95 ^b ± 2.53
CD 7.5	49.35 ^b ± 3.03	17.25 ^b ± 0.80	5.59 ^b ± 0.31	65.68 ^b ± 0.42

หมายเหตุ : a,b,c,d,e,f,g หมายถึง ค่าแสดงความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ตัวอักษรเหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

4.4.2 ดัชนีทางชีวภาพในดินร่วนปนทราย

ผลการประเมินดัชนีทางชีวภาพ (BI) ในดินร่วนปนทราย (ตารางที่ 4.9-4.10) เช่นเดียวกับผลของดินเหนียว โครเมียมมีความเสี่ยงและความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุด รองลงมา คือ ทองแดง สังกะสีและนิกเกิล ตามลำดับ เริ่มต้นในดินร่วนปนทรายที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) มีค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของโลหะทุกๆตัวสูงที่สุด บ่งบอกถึงการปนเปื้อนโลหะในดินที่ไม่ได้ปรับปรุงจะมีความเสี่ยงสูงที่โลหะจะเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะนิกเกิลและสังกะสี แต่เมื่อดินที่ได้รับการปรับปรุงส่งผลทำให้ค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของโลหะลดลง ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงดินมีประสิทธิภาพสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินได้ โดยที่ความแตกต่างกันของสารปรับปรุงดิน (ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์) ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินที่แตกต่างกัน จากผลค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของโลหะในดินที่ปรับปรุงดินด้วยไดอะตอมไมต์ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการปรับปรุงในดินเหนียว ไดอะตอมไมต์มีประสิทธิภาพและความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผลของการปรับปรุงด้วยซีโอไลต์และซีพีโอไลต์ การปรับปรุงด้วยการเติมไดอะตอมไมต์ที่อัตราส่วนต่างๆ (2.5%, 5% และ 7.5%) ให้ผลดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของโลหะที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยผลดัชนีทางชีวภาพ (BI) ที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงดินด้วยไดอะตอมไมต์อัตราส่วน 2.5% (SD2.5) พบว่าโลหะทุกๆตัวมีความสามารถในการเคลื่อนที่ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) เมื่อเปรียบเทียบกับผลสภาพความเป็นกรดต่างของดินร่วนปนทรายหลังการปรับปรุงดินด้วยไดอะตอมไมต์ที่อัตราส่วน 2.5% (ตารางที่ 4.6) ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในดินส่งผลต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโลหะของสารปรับปรุงดิน เมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) ที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงดินร่วนปน

ทรายด้วยไดอะตอมไมต์อัตราส่วน 7.5% (SD7.5) ดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ลดลง 3.24%, 7.09%, 0.61% และ 4.42% ตามลำดับ ผลการปรับปรุงดินด้วยการเติมซีโอไลต์ที่อัตราส่วน 2.5%, 5% และ 7.5% พบว่าการเคลื่อนที่ของโลหะในดินลดลงเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) ที่อัตราส่วน 7.5% ของการปรับปรุงดินด้วยซีโอไลต์ (SZ7.5) มีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะมากกว่าการปรับปรุงที่อัตราส่วน 2.5% และ 5% ที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงดินร่วนปนทรายเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) การปรับปรุงด้วยซีโอไลต์อัตราส่วน 7.5% (SZ7.5) ดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ลดลง 16.88%, 15.68%, 0.6% และ 25.73% ตามลำดับ จากผลดัชนีทางชีวภาพ (BI) ที่ระยะเวลา 30 และ 60 วันของดินร่วนปนทรายที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีโอไลต์จะเห็นได้ว่าโลหะต่างๆ (สังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล) มีความเสี่ยงและความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุด (BI ต่ำสุด) โดยที่ระยะเวลา 60 วันของการปรับปรุงดินด้วยซีโอไลต์อัตราส่วน 7.5% (SZ7.5) ดัชนีทางชีวภาพ (BI) ของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลเมื่อเทียบกับดินควบคุม (control) มีการลดลง 22.99%, 23.1%, 0.25% และ 40.68% ตามลำดับ จากผลที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าสารปรับปรุงดิน ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์มีประสิทธิภาพและความสามารถในการปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ จากคุณสมบัติที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการดูดซับคือ ขนาดพื้นที่ผิว (surface area) คุณสมบัติบนพื้นผิว (surface properties) และลักษณะทางโครงสร้างของสารปรับปรุง (structural) การมีขนาดของพื้นที่ผิวที่มากของซีโอไลต์จึงส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับไอออนบวกของโลหะ (สังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล) เอาไว้ที่พื้นผิวได้มากกว่าซีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ นอกจากนี้รูปร่างทางแร่ของซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นเส้น (fibrous minerals) โครงสร้างเป็นเส้นตรงขนานตามแนวยาว (Sheikhhosseini *et al.*, 2013) ที่นอกจากจะทำให้มีพื้นที่ผิวที่มากกว่ารูปร่างแบบทรงกลมของซีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ลักษณะของรูปร่างที่เป็นเส้นยังช่วยส่งเสริมต่อการเข้าไปแทรกเกิดเป็นโครงสร้างกับอนุภาคของดินได้ดีและมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่น้อยกว่ารูปร่างแบบทรงกลม (สุพจน์, 2537) จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ด้วยสารปรับปรุงดินประเภทแร่ดินเหนียว ซีพีโอไลต์มีประสิทธิภาพและศักยภาพในการลดปริมาณโลหะที่สามารถเคลื่อนที่แพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมและเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ดีกว่าการปรับปรุงดินด้วยซีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

การปรับปรุงดิน	ดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index : BI)			
	สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	นิกเกิล
S (control)	67.70 ^a ± 4.00	49.70 ^a ± 2.99	27.01 ^a ± 1.51	87.51 ^a ± 1.39
SZ 2.5	60.76 ^{bc} ± 2.37	41.26 ^b ± 4.10	20.08 ^b ± 3.59	80.71 ^b ± 3.49
SZ 5	47.54 ^{ef} ± 4.39	34.80 ^c ± 3.63	19.34 ^b ± 3.69	70.63 ^{bc} ± 10.78
SZ 7.5	44.93 ^f ± 5.30	29.29 ^{cd} ± 1.37	16.47 ^b ± 1.51	51.24 ^{de} ± 8.79
SS 2.5	49.61 ^e ± 3.12	27.52 ^{de} ± 4.30	17.89 ^b ± 0.91	60.28 ^{cd} ± 6.26
SS 5	44.30 ^f ± 3.83	27.38 ^{de} ± 2.72	17.36 ^b ± 1.26	42.04 ^{de} ± 10.23
SS 7.5	36.57 ^g ± 4.11	24.17 ^e ± 1.65	15.54 ^b ± 2.27	25.85 ^f ± 6.04
SD 2.5	56.97 ^{cd} ± 5.72	37.39 ^{bc} ± 2.86	16.62 ^b ± 1.50	81.15 ^b ± 1.49
SD 5	62.81 ^b ± 4.86	40.04 ^b ± 3.25	16.91 ^b ± 3.40	85.55 ^{ab} ± 3.14
SD 7.5	54.50 ^d ± 5.06	36.17 ^{bc} ± 3.19	17.39 ^b ± 1.59	79.49 ^b ± 1.64

หมายเหตุ : a,b,c,d,e,f,g หมายถึง ค่าแสดงความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ตัวอักษรเหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.10 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

การปรับปรุงดิน	ดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index : BI)			
	สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	นิกเกิล
S (control)	55.70 ^a ± 1.44	31.94 ^a ± 2.61	6.99 ^a ± 0.34	54.98 ^a ± 2.40
SZ 2.5	49.22 ^{bc} ± 1.64	23.89 ^c ± 0.32	6.52 ^{ab} ± 0.25	45.37 ^c ± 0.97
SZ 5	45.22 ^c ± 1.07	23.95 ^c ± 1.72	6.88 ^a ± 0.14	41.16 ^d ± 1.20
SZ 7.5	38.82 ^d ± 0.01	16.26 ^d ± 2.01	6.39 ^{ab} ± 0.19	29.25 ^f ± 1.10
SS 2.5	40.38 ^d ± 5.04	15.82 ^d ± 1.25	6.09 ^b ± 0.07	32.44 ^e ± 1.47
SS 5	37.56 ^d ± 3.10	11.71 ^e ± 0.59	7.08 ^a ± 0.94	17.45 ^g ± 0.39
SS 7.5	32.71 ^e ± 5.50	8.84 ^e ± 1.82	6.74 ^{ab} ± 0.10	14.30 ^h ± 2.63
SD 2.5	54.67 ^a ± 1.71	28.58 ^{ab} ± 2.95	6.89 ^a ± 0.51	53.13 ^{ab} ± 1.69
SD 5	53.23 ^b ± 0.86	26.09 ^{bc} ± 3.43	6.81 ^{ab} ± 0.26	52.07 ^b ± 1.51
SD 7.5	52.46 ^b ± 1.30	24.85 ^c ± 2.31	6.38 ^{ab} ± 0.02	50.56 ^b ± 0.90

หมายเหตุ : a,b,c,d,e,f,g หมายถึง ค่าแสดงความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ตัวอักษรเหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

4.4.3 การประเมินผลระยะเวลาการปรับปรุงดิน

จากการประเมินผลประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินปนเปื้อนโลหะด้วยการเติมสารปรับปรุงดิน ซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ โดยใช้ค่าดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index : BI) ของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพ ความสามารถของสารปรับปรุงและอัตราส่วนการปรับปรุงดินที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อลดการเคลื่อนที่ของโลหะที่จะเข้าสู่พืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์อื่นใดนอกเหนือจากนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสิ่งมีชีวิตได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด หลังจากนั้นนำมาประเมินผลของระยะเวลาที่เหมาะสมโดยการเปรียบเทียบกับระหว่างค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ที่ระยะเวลา 30 วันและ 60 วันของการปรับปรุงดิน ผลการปรับปรุงดินเหนียวปนเปื้อนด้วยซีพีโอไลต์ที่อัตราส่วน 5% (CS5) สามารถลดการเคลื่อนที่ของสังกะสี ทองแดง และโครเมียมในดินได้ดีที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์ ที่อัตราส่วน 7.5% (CS7.5) สามารถลดการเคลื่อนที่ของนิกเกิลในดินได้ดีที่สุดและยังช่วยทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด ดังนั้นซีพีโอไลต์ที่อัตราส่วน 5% และ 7.5% จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงเพื่อฟื้นฟูดินเหนียวที่กำลังมีการปนเปื้อนโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อนำมาประเมินผลความแตกต่างของระยะเวลาในการปรับปรุงดินเหนียว (ตารางที่ 4.11) พบว่าการปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์ที่อัตราส่วน 5% และ 7.5% ที่ระยะเวลา 30 และ 60 วันของการปรับปรุงดิน การเคลื่อนที่ของสังกะสีในดินเหนียวลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในดิน พบว่าเมื่อระยะเวลาการปรับปรุงดินเพิ่มขึ้น (60 วัน) ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีการลดลงและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลการปรับปรุงดินที่ระยะเวลา 30 วัน

การปรับปรุงดินร่วนปนทรายที่มีการปนเปื้อนสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล การปรับปรุงด้วยการเติมซีพีโอไลต์ที่อัตราส่วน 7.5% (SS7.5) มีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับมากที่สุด จึงทำให้การเคลื่อนที่ของสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในดินลดลงมากที่สุด นอกจากนี้ผลการปรับปรุงดินด้วยซีพีโอไลต์ที่อัตราส่วน 7.5% (SS7.5) ยังช่วยฟื้นฟูดินทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อนำมาประเมินผลความแตกต่างของระยะเวลาในการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (ตารางที่ 4.12) เช่นเดียวกับผลของดินเหนียว คือ การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการปรับปรุงดินความสามารถในการเคลื่อนที่ของสังกะสีในดินหรือค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) ที่ระยะเวลา 30 และ 60 วันให้ผลที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในดินร่วนปนทราย การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการปรับปรุงดิน (60 วัน) ช่วยทำให้ค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) หรือความเสี่ยงและความสามารถในการเคลื่อนที่ของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในดินร่วนปนทรายลดลงและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผลที่ระยะเวลา 30 วันของการปรับปรุงดิน

ตารางที่ 4.11 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินเหนียว

ชนิดของสารปรับปรุงดิน	อัตราส่วน	โลหะหนัก	ระยะเวลาการปรับปรุงดิน	
			30 วัน	60 วัน
ซีพีโอไลต์	5%	สังกะสี	✓	
		ทองแดง		✓
		โครเมียม		✓
		นิกเกิล		✓
ซีพีโอไลต์	7.5%	สังกะสี	✓	
		ทองแดง		✓
		โครเมียม		✓
		นิกเกิล		✓

ตารางที่ 4.12 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

ชนิดของสารปรับปรุงดิน	อัตราส่วน	โลหะหนัก	ระยะเวลาการปรับปรุงดิน	
			30 วัน	60 วัน
ซีพีโอไลต์	7.5%	สังกะสี	✓	
		ทองแดง		✓
		โครเมียม		✓
		นิกเกิล		✓

4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

จากการประเมินผลดัชนีทางชีวภาพ (bioavailable index : BI) ในการปรับปรุงดินปนเปื้อนสังกะสี ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในดินเหนียวและดินร่วนปนทราย การปรับปรุงด้วยแร่ดินเหนียวซีพีโอไลต์ที่อัตราส่วน 5% และ 7.5% สามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินเหนียวได้ดีที่สุด และการปรับปรุงดินร่วนปนทรายด้วยแร่ดินเหนียวซีพีโอไลต์ที่อัตราส่วน 7.5% มีประสิทธิภาพสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะได้มากที่สุด จึงเลือกมาเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายของการปรับปรุงดินเหนียวและดินร่วนปนทรายขนาดพื้นที่ 1 ไร่ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ กรณีผลการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับดินร่วนปนทรายเมื่อนำไปใช้ในพื้นที่จริงราคานี้ อาจจะมีการลดลงจากผลการศึกษาที่ได้ เนื่องจากพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาน้ำหนักเนื้อดินร่วนปนทราย (กิโลกรัม) ต่อพื้นที่ 1 ไร่ คือ ความหนาแน่นของดินเบื้องต้น ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ด้วยวิธี core method ซึ่งเป็นวิธีการชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของดิน เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างดินร่วนปนทรายมีสัดส่วนของน้ำหนักหินมาเกี่ยวข้อง จึงส่งผลต่อการประเมินผลความหนาแน่นของดินที่มาก ทำให้น้ำหนักของเนื้อดินร่วนปนทรายต่อพื้นที่ 1 ไร่มีปริมาณที่มากกว่าผลของการมีน้ำหนักของหินร่วมด้วย ดังนั้นปริมาณของซีพีโอไลต์ที่นำมาใช้และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปรับปรุงดินร่วนปนทรายขนาดพื้นที่ 1 ไร่ จึงสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับดินเหนียว

อัตราส่วนสารปรับปรุงดิน	ปริมาณสารปรับปรุงดินต่อ 1 ไร่ (กิโลกรัม)	ราคาสารปรับปรุงดินต่อ 1 กิโลกรัม (บาท)	ราคาสารปรับปรุงดินต่อ 1 ไร่ (บาท)
ซีพีโอไลต์ 5%	10,222.39	3.2	32,711.65
ซีพีโอไลต์ 7.5%	15,333.59	3.2	49,067.48

หมายเหตุ : วิธีการคำนวณอย่างละเอียดอธิบายในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับดินร่วนปนทราย

อัตราส่วนสาร ปรับปรุงดิน	ปริมาณสารปรับปรุง ดินต่อ 1 ไร่ (กิโลกรัม)	ราคาสารปรับปรุงดินต่อ 1 กิโลกรัม (บาท)	ราคาสารปรับปรุงดินต่อ 1 ไร่ (บาท)
ซีพีโอไลต์ 7.5%	25,663.7	3.2	82,123.78

หมายเหตุ : วิธีการคำนวณอย่างละเอียดอธิบายในภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของดินเหนียวและดินร่วนปนทราย ดินทั้ง 2 ชนิดมีสภาพความเป็นกรดต่างที่ต่ำเช่นเดียวกัน (ดินกรด) แต่มีความแตกต่างกันของกลุ่มอนุภาคดินเหนียว (%clay) และปริมาณของอินทรีย์วัตถุ (OM) ที่สูงในดินเหนียว จึงส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเหนียวอยู่ในระดับที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลของดินร่วนปนทราย ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับของดิน

5.1.2 สารปรับปรุงดินที่ทำการศึกษาคือ แร่ดินเหนียวซีโอไลต์, ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันของธาตุองค์ประกอบและคุณสมบัติที่พื้นผิวของแร่ที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่สูงเนื่องจากมี Si^{4+} และ Al^{3+} เป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่โครงสร้างแร่ประเภท 2:1 ส่งผลให้ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนมากที่สุด

5.1.3 ความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์, ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ เกิดจากประจุลบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว การเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นกรดต่างของดินที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุลบของสารปรับปรุง เนื่องจากสภาพความเป็นกรดต่างของดินสูงกว่าจุดที่พื้นผิวของซีโอไลต์, ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) หรือ $pH_{ดิน}$ มากกว่า pH_{pzc}

5.1.4 ผลการปรับปรุงดินเหนียวและดินร่วนปนทรายปนเปื้อนโลหะ (สังกะสี ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล) ด้วยการเติมซีโอไลต์ ซีพีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ (อัตราส่วน 2.5%, 5% และ 7.5%) สามารถลดรูปฟอร์มของโลหะที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (F1-3) เปลี่ยนแปลงไปสู่รูปฟอร์มของโลหะที่มีความเสถียรมากขึ้นและสิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (F4-6)

5.1.5 โลหะมีการดูดซับกับองค์ประกอบในดินที่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณของนิกเกิลและสังกะสีในดินส่วนใหญ่มักจะดูดซับกับไอออนของธาตุต่างๆในดิน (Cl^- , PO_4^{3-} , S^{2-} และ SO_4^{2-}) ส่งผลทำให้นิกเกิลและสังกะสีมีสัดส่วนรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด (F2) ในขณะที่ทองแดงและโครเมียมแสดงผลของการดูดซับกับองค์ประกอบของออกไซด์และอินทรีย์วัตถุในดินได้ดีและมีความเสถียร

5.1.6 จากผลรูปฟอร์มโลหะที่เกิดขึ้นในดินร่วมกับการประเมินผลโดยใช้ค่าดัชนีทางชีวภาพ (BI) โครเมียมมีความเสี่ยงของความสามารถในการเคลื่อนที่ แพร่กระจายเข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุด โลหะลำดับถัดมาโดยเรียงลำดับจากความเสี่ยงน้อยไปความเสี่ยงมาก คือ ทองแดง สังกะสีและนิกเกิลตามลำดับ

5.1.7 เนื่องจากซีโอไลต์มีขนาดของพื้นที่ผิวมาก ($169.20 \text{ m}^2/\text{g}$) ซึ่งส่งผลต่อปริมาณของประจุลบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว (-23.41 mV) ที่สูงกว่าซีโอไลต์และไดอะตอมไมต์ ซีโอไลต์จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะ ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะในดินที่จะแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมลดลง รวมถึงความเสี่ยงเนื่องจากความเป็นพิษของโลหะที่จะเข้าสู่พืชและสิ่งมีชีวิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพ ทางเคมีและองค์ประกอบต่างๆในดิน ส่งผลต่อลักษณะการดูดซับรูปฟอร์มโลหะที่แตกต่างกัน การนำไปใช้เพื่อปรับปรุงดินควรมีการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินในพื้นที่นั้นๆ เพื่อการจัดการที่เหมาะสม

5.2.2 การปรับปรุงดินปนเปื้อนที่มีสภาพความเป็นกรดต่างที่ต่ำมาก (ดินกรด) ควรใช้สารปรับปรุงดินที่ช่วยลดความเป็นกรดให้แก่ดินได้มีส่วนร่วมด้วย เช่น ปูนขาว เพื่อช่วยให้สารปรับปรุงดินมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนจริง เพื่อการจัดการที่ดีและสามารถนำไปใช้ได้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

5.2.4 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นของดินในพื้นที่ที่ต้องการการปรับปรุง ควรคำนึงถึงปริมาณเนื้อดินที่เป็นข้อมูลจริงไม่มีสัดส่วนของหินหรืออาจจะเพิ่มจำนวนจุดเก็บตัวอย่างหลายๆจุด เพื่อให้ได้ข้อมูลของดินที่แท้จริงและนำมาวิเคราะห์ปริมาณการใช้สารปรับปรุงดินได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ



เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2561. **มาตรฐานคุณภาพดิน**. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://lc.dpim.go.th/kb/1079>
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. **คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี**. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาที่ดิน.
- กรมวิชาการเกษตร. 2548. **คู่มือการเก็บตัวอย่างดินและน้ำ**. กรุงเทพฯ : ควิกปรินท์ ออฟเซ็ท
- กรมวิชาการเกษตร. 2548. **เอกสารวิชาการ ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน ประเทศไทย**. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2530. **สารานุกรมธาตุ**. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- ชลธิศศักดิ์ ชาวปากน้ำ. จงกล บุญงามและสิรินทิพย์ พลละเจริญ. 2555. “โลหะหนักในแม่น้ำบางปะกง.” หน้า 1-29. ใน **เอกสารวิชาการสำนักวิจัยกรมประมงน้ำจืด ฉบับที่ 1**. กรุงเทพฯ : กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ดวงกมล คำสอน. 2556. “การดึงดูดโลหะหนักของทานตะวันปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิลและโครเมียม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เทียนชัย สุวรรณเวช. 2539. **เคมีของดิน**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. 2550. **รายงานการวิจัยการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปอชโกลานธรรมชาติในงานสี โอโพลีเมอร์มอร์ตาร์**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปรินทร เต็มญารศิลป์. 2551. “การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและไม้หมากู.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอินทรีย์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปิยะ ดวงพัตรา. 2553. **สารปรับปรุงดิน**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พงศ์ภัทร ศรีขจร. 2549. **การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม (VI) ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ลลิตา แสงอาทิตย์. 2554. “การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วีรภัทร์ ทองอนันต์. กัณษริย์ ศรีพงศ์พันธุ์. เทพวิฑูรย์ ทองศรีและธนิต ผิวนิม. 2557. “การวิเคราะห์โลหะหนักในดินนาด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับส่วน.” หน้า 402-409. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52**. กรุงเทพฯ : สำนักกองทุนสนับสนุนงานวิจัย
- ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเมืองแร่. 2559. **นิกเกิล**. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://lc.dpim.go.th/kb/1079>
- สมพร เรืองศรีและศวพร ศุภผล. 2556. “แนวทางการลดการสะสมโลหะหนักในพื้นที่ผลิตผักชุมชนเมืองสระบุรี.” หน้า 175-182. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51**. กรุงเทพฯ สำนักกองทุนสนับสนุนงานวิจัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สาวิตรี ภาพภักดี. 2553. “การศึกษาารูปแบบของเหล็กและทองแดงในปุ๋ยหมักด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สำนักสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน. 2559. **กลุ่มชุดดิน 62 กลุ่ม.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.ldd.go.th/thaisoils_museum/62_soilgroup/main_62soilgroup.htm
- สุธีลา ตูลยเสถียร. โภศล วงศ์สุวรรณค์และสถิต วงศ์สุวรรณค์. 2544. **มลพิษสิ่งแวดล้อม.** กรุงเทพฯ : รวมสาสน์
- สุพจน์ โตตระกูล. 2537. **แร่วิทยาและเคมีดินเบื้องต้น.** เชียงใหม่ : ม.ป.ท.
- อัญชลี สุทธิประการ. 2534. **แร่ในดิน.** เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาลัยเกษตรศาสตร์.
- Abad-Valle, P. Alvarez-Ayuso, E. A. Murciegob, E. and Pellitero, E. 2016. “Assessment of the use of sepiolite amendment to restore heavy metal polluted mine soil.” *Geoderma*. 280: 57–66.
- Alvarez-Silva, M. Uribe-Salas, A. Mirnezami, M. and Finch, J.A. 2010. “The point of zero charge of phyllosilicate minerals using the Mular-Roberts titration technique.” *Minerals Engineering*. 23 : 383-389.
- Asensio, V. Vega, F.A. Ram Singh, B. and Covelo, E.F. 2013. “Effects of tree vegetation and waste amendments on the fractionation of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in polluted mine soils.” *Science of the Total Environment*. 443 : 446-453.
- ATSDR. 2017. **The Priority List of Hazardous Substances.** [Online]. Available : <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/>
- Barczyk, K. Mozga, W. and Krol, M. 2014. “Studies of anions sorption on natural zeolites.” *Sepectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 133 : 876-882.
- Brigatti, M.F. Galan, E. and Theng, B.K.G. 2006. “Chapter 2 Structures and Mineralogy of Clay Minerals.” *Developments in Clay Science*. 1 : 19-86
- Caliskan, N. Alkan, S. Sogut, E.G. and Alacabey, I. 2011. “Adsorption of Zinc(II) on diatomite and manganese-oxide-modified diatomite : A kinetic and equilibrium study .” *Journal of Hazardous Materials*. 193 : 27-36.
- Chemogenesis. 2018. **The Hard Soft (Lewis) Acid Base Principle.** [Online]. Available : https://www.meta-synthesis.com/webbook/43_hsab/HSAB.html.
- Chen, Y.M. Gao, J.B. Yuan, Y.Q. Ma, J. and Yu, S. 2016. “Relationship between heavy metal contents and clay mineral properties in surface sediments: Implications for metal pollution assessment.” *Continental Shelf Research*. 124 : 125-133.
- Covelo, E.F. Vega, F.A. and Andrade, M.L. 2008. “Sorption and desorption of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn by a Fibric Histosol and its organo-mineral fraction.” *Journal of Hazardous Materials*. 159 : 342-347.
- Greenpeace. 2552. **ผลการศึกษาเบื้องต้นกรณีการปนเปื้อนสารพิษในแหล่งน้ำใต้ดินรอบบ่อฝังกลบขยะอันตราย.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.greenpeace.org/seasia/th/testing/reports/hazardous-dump-site-better-world-green/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Greenpeace. 25525 . **ตรวจพบโลหะหนักอันตรายปนเปื้อนในพื้นที่ล็กอบทิ้งกากอุตสาหกรรม.** [Online].
เข้าถึงได้จาก : <http://www.greenpeace.org/seasia/th/press/releases/Illegal-Waste-Dumping/>
- Li, H. Shi, W.Y. Shao, H. and Shao, M. 2009. "The remediation of the read-polluted garden soil by natural zeolite." *Journal of Hazardous Materials*. 169 : 106-111.
- Liang, X. Han, J. Xu, Y. Sun, Y. Wang, L. Tan, X. 2014. "In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite." *Geoderma*. 235-236 : 9-18.
- Mazhari, S.A. Attar, R.S. Haghighi, F. 2017. "Heavy metals contraction and availability of different soil in Sabzevar area, NE of Iran." *Journal of African Earth Science*. 134 : 106-112.
- Pearson, R.G. 1963. "Hard and Soft Acid and Bases." *Journal of the American chemical society*. 85(22) : 3533-3539.
- Pendias, A.K. and Mukherjee, A.B. 2007. **Trac Elements from Soil to Human.** Bayreuth : Agata Oelschlager.
- Pohlmeier, A. 2004. "Metal Speciation, Chelation and Complexing Ligands in Plants." 28-46. in Prasad, M.N.V. **Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems.** New Delhi : Springer Nature.
- Sabah, E. Ouki, S. 2017. "Sepiolite and sepiolite-bound acid interactions in alkaline media and the mechanism of the formation of sepiolite-humic acid complexes." *International Journal of Mineral Processing*. 162 : 69-80.
- Salbu, B. Krekling, T. and Oughton, D.H. 1998. "Characterisation of radioactive particles in the enviroment." *Analyst*. 123 : 843-849.
- Siamchemi. 2559. **โครเมียม ประโยชน์และพิษโครเมียม.** [Online].
เข้าถึงได้จาก : <http://www.siamchemi.com/โครเมียม/>.
- Sheikhhosseini, A. Shirvani, M. and Shariatmadari. 2013. "Competitive sorption of nickel, cadmium, zinc and copper on palygorskite and sepiolite silicate clay minerals." *Geoderma*. 192 : 249-253.
- Sprynsky, M. 2009. "Solid-liquid-solid extraction of heavy metals (Cr, Cu, Cd, Ni and Pb) in aqueous systems of zeolite-sewage sludge." *Journal of Hazardous Materials*. 161 : 1377-1383.
- Sun, Y. Li, Y. Xu, Y. Liang, X. and Wang, L. 2015. "In situ stabilization remediation of cadmium and lead co-contaminated paddy soil using bentonite." *Applied Clay Science*. 105-106 : 200-206.
- Tahervand, A. and Jalali, M. 2017. "Sorption and desorption of potentially toxic metals (Cd, Cu, Ni and Zn) by soil amended with bentonite, calcite and zeolite as a function of pH." *Journal of Geochemical Exploration*. 181 : 148-159
- Tessier, A. Campbell, P.G. and Bisson, M. 1979. "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals." *Analytical Chemistry*. 51(7): 844-851.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Thaieditorial. 2560. **ความเป็นพิษของนิกเกิลและอาการที่เกิดจากพิษนิกเกิล.** [Online].
เข้าถึงได้จาก: <http://www.thaieditorial.com>
- Tica, D. Udovic, M. and Lestan, D. 2011. "Immobilization of potentially toxic metals using different soil amendments." *Chemosphere*. 85 : 577-583.
- Venegas, A. Rigol, A. and Vidal, M. 2015. "Viability of organic wastes and biochars as amendments for the remediation of heavy metal-contaminated soils." *Chemosphere*. 119 : 190-198
- Yang, S. Ding, C. Cheng, W. Jin, Z. and Sun, Y. 2015. "Effect of microbes on Ni (II) diffusion onto sepiolite." *Journal of Molecular Liquids*. 204 : 170-175.
- Ye, X. Kang, S. Wang, H. Li, H. and Zhang, Y. 2015. "Modified natural diatomite and its enhanced immobilization of lead, copper and cadmium in simulated soils." *Journal of Hazardous Materials*. 289 : 210-218.
- Yu, Y. Qi, S. Zhan, J. Wu, Z. Yang, X. and Wu, D. 2011. "Polyimide/sepiolite nanocomposite films : Preparation, morphology and properties." *Materials Research Bulletin*. 46(10) : 1593-1599.
- Zhang, G. Lin, Y. and Wang, M. 2011. "Remediation of copper polluted red soils with clay materials." *Journal of Environmental Sciences*. 23(3) : 461-467.
- Zhang, M. and Pu, J. 2011. "Mineral materials as feasible amendments to stabilize heavy metals in polluted soils." *Journal of Environmental Science*. 23(4) : 607-615.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ดินและสารปรับปรุงดิน

ก.1 การเก็บตัวอย่างดินและการเตรียมตัวอย่าง (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

1. กำหนดจุดเก็บตัวอย่างดิน 15 จุดกระจายให้ทั่วแปลง
2. ถางหญ้า กวาดเศษพืชหรือวัสดุที่อยู่บนผิวดินออก ใช้เสียมขุดดินตามจุดที่กำหนดไว้
3. ดินที่เก็บนำมาผสมรวมกันเพื่อเป็นตัวแทนของดินแปลงนั้น
4. เมื่อดินมาถึงห้องปฏิบัติการนำดินออกมาผึ่งโดยเกลี่ยดินในถาด ผึ่งลมจนแห้ง
5. นำดินมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
6. บรรจุดินลงในกล่องพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์

ก.2 การวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 10 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นลงไป 10 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันหลายๆครั้งและตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที
3. นำสารละลายดินไปวัด pH ของดินด้วย pH meter ก่อนวัดต้องทำการปรับเทียบเครื่องโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน

ก.3 การวิเคราะห์ความชื้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินก่อนทำการอบ บันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องชั่ง
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 12-15 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักดินคงที่
3. ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักที่สูญหายไป

การคำนวณ

$$\text{ความชื้น \%} = \frac{(\text{น้ำหนักดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ})}{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ}} \times 100$$

ก.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของดินโดยวิธี core method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ชั่งน้ำหนักกระบอกเก็บตัวอย่าง (core) พร้อมทั้งวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของกระบอก
2. ใช้กระบอกโลหะเจาะลงไปดินตามความลึกที่ต้องการ ปาดหน้าดินให้เรียบให้พอดีกับปากกระบอก
3. ชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นรวมของดิน (D)} = \frac{(W_s + W_a) - W_s}{V_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wa	=	น้ำหนักกระบอกเก็บตัวอย่าง (core)
Ws	=	น้ำหนักดินตัวอย่าง
Vs	=	ปริมาตรภายในของกระบอก

ก.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคดินโดยวิธี Hydrometer method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ชั่งตัวอย่างดินใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร 2 ใบ ใบละ 50 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง (ถ้าเป็นดินเนื้อหยาบใช้ดิน 100 กรัม)
2. เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน
3. เติมสารละลาย 30% H₂O₂ ลงไปช้าๆ ครั้งละ 5-10 มิลลิลิตร เติมจนดินมีสีจางและไม่เกิดฟองแก๊ส
4. ยกขึ้นตั้งบน Hot plate เพื่อไล่ H₂O₂ ที่เหลือออกจนหมด
5. นำตัวอย่างในบีกเกอร์ที่ 1 ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนแห้ง นำไปชั่งหาน้ำหนักของดินที่ไล่อินทรีย์วัตถุออกหมดแล้ว
6. บีกเกอร์ใบที่ 2 เติมสารละลายคัลคอน 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันแล้วถ่ายลงใน Bouyoucos jar
7. หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงใน Bouyoucos jar เติมน้ำกลั่นให้ถึงขีด 1,130 มิลลิลิตร (ถ้าตัวอย่างดิน 100 กรัม เติมน้ำถึงขีด 1,205 มิลลิลิตร) ยกไฮโดรมิเตอร์ออก
8. เติมสารละลายคัลคอน 100 มิลลิลิตร ลงใน Bouyoucos jar อีกใบเพื่อปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์ เติมน้ำกลั่น 100-200 มิลลิลิตร หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงใน Bouyoucos jar เติมน้ำกลั่นให้ถึงขีด 1,130 มิลลิลิตร (ถ้าตัวอย่างดิน 100 กรัม เติมน้ำถึงขีด 1,205 มิลลิลิตร) ยกไฮโดรมิเตอร์ออก
9. กวนสารแขวนลอย 20-25 ครั้ง หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงใน Bouyoucos jar เมื่อถึงเวลา 40 วินาที บันทึกค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์และอุณหภูมิที่วัดได้
10. เมื่อเวลา 2 ชั่วโมง บันทึกค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์และอุณหภูมิที่วัดได้
11. ค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์ของสารแขวนลอยดินต้องหักค่าที่อ่านได้จากสารละลายคัลคอน

การคำนวณ

$$\% \text{ (silt + clay)} = \frac{Rs_{40} \times 100}{\text{น้ำหนักดิน}}$$

$$\% \text{ clay} = \frac{Rs_{2 \text{ hr.}} \times 100}{\text{น้ำหนักดิน}}$$

$$\% \text{ sand} = 100 - (\% \text{ sand} + \% \text{ clay})$$

$$\% \text{ silt} = \% \text{ (silt + clay)} - \% \text{ clay}$$

$$R_s = R's + 0.36 (T - L)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rs	=	จำนวนกรัมที่ถูกต้องของอนุภาคดินต่อลิตร
R's	=	จำนวนกรัมของอนุภาคดินที่วัดโดยตรงจากไฮโดรมิเตอร์
L	=	อุณหภูมิบนก้านไฮโดรมิเตอร์

ก.6 การวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุในดินโดยวิธี Walkley and Black method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ 1 N 10 มิลลิลิตร
3. เติม H_2SO_4 เข้มข้น 20 มิลลิลิตร โดยใช้ Dispenser พยายามให้กรดไหลลงข้างๆขวดชะล้างตัวอย่างลงไปอยู่ในขวดให้หมด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดดินเกาะติดอยู่ตามข้างขวด เขย่าเบาๆให้ตัวอย่างเข้ากันดีเป็นเวลาประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. หยดอินดิเคเตอร์ออร์โทไฟแนทโรลีน 5 หยด
6. ไตเตรทด้วยสารละลาย FAS 0.5 N จนกระทั่งสีของสารละลายดินเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง
7. ทำ Blank โดยเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนี่ 6

การคำนวณ

$$\% \text{ อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, O.M.)} = \frac{10 \times (B-S) \times 100 \times 100 \times 3 \times 100 \times N}{B \times 77 \times 58 \times 1000 \times W}$$

B	=	ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Blank (มิลลิลิตร)
S	=	ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
W	=	น้ำหนักดินที่ใช้ (กรัม)
N	=	ความเข้มข้นของ $K_2Cr_2O_7$

ก.7 การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยวิธี Ammonium saturation method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 1 N pH 7.0 NH_4OAc 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ค้างคืน
2. นำมากรองโดยใช้กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ใช้กระดาษกรอง Whatman No. 42 จำนวน 1 แผ่น ล้างตัวอย่างดินด้วย 1 N NH_4OAc pH 7 จนกระทั่งไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ (ทดสอบโดยนำสารละลายที่ล้างดินแล้วมา 10 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองหยด 1 N NH_4Cl , 10% $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$ และ 50% NH_4OH อย่างละ 2-3 หยด ต้มให้เดือดถ้ามีแคลเซียมอยู่จะมีตะกอนหรือสารละลายสีขุ่น)
3. ล้างตัวอย่างดินในกรวยบุชเนอร์ ในข้อ 2 ต่อด้วย 1 N NH_4Cl pH 7 อีก 5 ครั้งๆละประมาณ 20 มิลลิลิตร
4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วย 0.25 N NH_4Cl pH 7 ประมาณ 20 มล. 1 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ล้างด้วย 95% ethyl alcohol ประมาณ 150-200 มิลลิลิตร (ซึ่งทดสอบโดยหยดสารละลาย 0.1 N AgNO₃ 1 - 2 หยด ลงในสารละลายที่กรองรับมาจาก buchner funnel ถ้ามีตะกอนสีขาวเกิดขึ้นแสดงว่ายังล้างไม่หมด ต้องล้างตัวอย่างดินด้วย 95% ethyl alcohol ต่อไปอีก แล้วทดสอบคลอไรด์ใหม่ดังที่กล่าวมาแล้วจนไม่มีตะกอนสีขาวนั้นแสดงว่าล้างหมดแล้ว)
6. ทิ้งสารละลายดินที่ได้จากข้อ 5 ล้างตัวอย่างดินที่ยังอยู่ในกรวยบุชเนอร์ ในข้อ 5 ด้วย 10% acidified NaCl แต่ครั้งที่ล้างให้ใส่สารละลาย NaCl ให้ท่วมตัวอย่างดินจนกระทั่งได้สารละลายที่กรองได้ (leachate) ประมาณ 300-350 มล.
7. เก็บสารละลายดินที่กรองได้ใส่ในขวดกลั่น
8. นำขวดกลั่นไปกลั่น โดยเติม 40% NaOH ลงไปในขวดกลั่น 25 มิลลิลิตร โดยมี 3% H₃BO₃ ประมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดชมพูขนาด 500 มิลลิลิตรรองรับสารละลายที่กลั่นออกมาได้ และหยดอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยด
9. นำสารละลายที่กลั่นได้ในขวดชมพูที่รองรับไปไตเตรทกับ 0.1 N HCl จุดยุติคือสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง บันทึกปริมาตรที่ใช้ไตเตรทแล้วนำมาคำนวณค่า CEC
10. นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % ที่ใช้ล้างดินมากลั่นเป็น Blank โดยทำเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

การคำนวณ

$$CEC \text{ (cmol/kg)} = \frac{(T - B) \times N \times 100}{W}$$

- T = ปริมาตร HCl ที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)
 B = ปริมาตรกรดเกลือที่ใช้ไตเตรทกับ Blank (มิลลิลิตร)
 N = ความเข้มข้นของกรดเกลือมีหน่วยเป็นนอร์มัลลิตี (normality)
 W = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

ก.8 การวิเคราะห์ไนโตรเจนในดินทั้งหมดโดยวิธี Kjeldahl (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ตัวอย่างดิน 0.5-2.0 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ใน Micro Kjeldahl tube
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยาประมาณ 1 กรัมและเติม H₂SO₄ เข้มข้น 15 มิลลิลิตร
3. นำไปย่อยด้วยเตาย่อย (Digestion System) ในระยะแรกๆ ใช้ไฟอ่อนๆแล้วเพิ่มไฟให้แรงขึ้น
4. Digest จนสีของของเหลวใน Kjeldahl flask เริ่มใส ย่อยต่อไปอีก 20-30 นาที จึงยกออกจากเตาแล้วปล่อยให้เย็น
5. รินน้ำกลั่นประมาณ 10 มิลลิลิตรลงไปรอบๆ ก้นหลอดของ Micro Kjeldahl flask เขย่าของผสมให้เข้ากัน ปล่อยให้เย็นอีกครั้งแล้วเทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันปล่อยให้เย็นจนดินตกตะกอน เพื่อนำของเหลวใสข้างบนไปกลั่น
6. เตรียม Blank ตามวิธีข้อ 2 -5 โดยไม่มีตัวอย่างดิน
7. เปิดเครื่องกลั่นและล้างเครื่องกลั่น 1 ครั้ง ด้วยการกลั่นน้ำกลั่น
8. นำตัวอย่างในข้อ 5 มาเข้าเครื่องกลั่น เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และ 40% NaOH 25 มิลลิลิตร กลั่นประมาณ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เติมนกรดบอริก 4% 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร หยดอินดิเคเตอร์ ผสมประมาณ 6-7 หยด สารละลายมีสีม่วงแดงนำไปรองรับการกลั่นจากข้อ 8 สารละลายนี้ จะเปลี่ยนสีจากสีม่วงแดงเป็นสีเขียว
10. ไทเทรตสารละลายที่ได้จากการกลั่นในข้อ 9 กับ 0.1 N HCl จนสีของสารละลายเปลี่ยนจาก สีเขียวเป็นสีม่วงแดง
11. กลั่น Blank และไทเทรต เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

การคำนวณ

$$\% \text{ T-N} = \frac{1.4 \times (Y-B)}{A}$$

- A = น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม)
 B = มิลลิลิตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง blank
 Y = มิลลิลิตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง
 X = ความเข้มข้นของ HCl
 1.4 = น้ำหนักสมมูลของไนโตรเจน

ก.9 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยวิธี Bray II (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ตัวอย่างดิน 1 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ในขวดแก้วก้นแบน (Erlenmeyer flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำยาสกัด Bray II 10 มิลลิลิตร เขย่า 1 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 42
3. ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ในข้อ 2. อัตราส่วน 1 ส่วนต่อ working solution 16 ส่วน (เท่ากับ 17 เท่า โดยใช้ Auto-dilutor) ลงในหลอดแก้ว ทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง นำไปอ่านค่าความเข้มข้นด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร
4. ทำ blank และชุดของสารละลายมาตรฐาน (standard set) เช่นเดียวกับข้อ 3.

การคำนวณ

$$\text{ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (P)} = \frac{B \times \text{DF}(\text{sample}) \times R}{A \times \text{DF}(\text{standard})} \quad \text{มก./กก.}$$

$$\text{ดังนั้น ถ้าไม่มีการทำเจือจาง (P)} = \frac{B \times R}{A} \quad \text{มก./กก.}$$

- A = น้ำหนักของตัวอย่างดิน (กรัม)
 B = น้ำยาสกัด (มิลลิลิตร)
 R = ค่าที่อ่านได้ เมื่อวัดค่าเทียบกับ standard set
 DF = อัตราส่วนการเจือจาง (dilution factor)

ก.10 การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ชั่งดิน 2.5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ในขวดชมพู (Erlenmeyer flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติม 1 N NH_4OAc pH 7.0 25 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที
3. กรองดินผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 42 และเก็บสารละลายที่กรองได้
4. วิเคราะห์ปริมาณ K ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

การคำนวณ

โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน, = $10 K \times df$ มก./กก.

K = ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Df = dilution factor

ก.11 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน (USEPA 3050B, 1996)

1. ตัวอย่างดินแห้ง 1 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง เติม Conc. HNO_3 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร รีฟลักซ์เป็นเวลา 15 นาที
2. เติม HNO_3 เข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร สกัดเป็นเวลา 30 นาที สังเกตควันสีน้ำตาลส้มถ้ามี ต้องทำขั้นตอนนี้อีกจนกว่าจะไม่มีควันสีน้ำตาลส้ม
3. จากนั้นทำการสกัดต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 95 ± 5 องศาเซลเซียส
4. เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 2 มิลลิลิตร และ 30% H_2O_2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร สกัดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 95 ± 5 องศาเซลเซียส
5. เติม HCl เข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร สกัดที่อุณหภูมิ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้มากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (กระดาษกรอง Whatman No.42)
7. สารละลายที่ได้จากการสกัดไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
8. ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ดินและสารปรับปรุงดิน

ตารางที่ ข-1 ความเป็นกรดต่างของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	ความเป็นกรดต่าง			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	4.49	4.38	4.35	4.41	0.07
ดินร่วนปนทราย	4.89	4.78	4.84	4.80	0.08

ตารางที่ ข-2 ความชื้นของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	ความชื้น (%)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	36.99	36.99	38.89	37.20	1.10
ดินร่วนปนทราย	6.38	6.38	5.82	6.20	0.32

ตารางที่ ข-3 ความหนาแน่นของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	ความหนาแน่น (g/cm ³)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	1.3680	1.3925	1.3540	1.3715	0.02
ดินร่วนปนทราย	1.5417	1.5511	1.4844	1.5257	0.04

ตารางที่ ข-4 ขนาดอนุภาคดินของดินตัวอย่าง

ตัวอย่างดิน	%Clay	%Sand	%Silt	ลักษณะเนื้อดิน
ดินเหนียว	59.83	22.69	17.48	Clay
ดินร่วนปนทราย	29.47	51.05	19.48	Sandy Clay Loam

ตารางที่ ข-5 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	อินทรีย์วัตถุ (%)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	2.47	2.65	2.75	2.63	0.14
ดินร่วนปนทราย	2.19	2.33	2.12	2.21	0.11

ตารางที่ ข-6 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	CEC (cmol/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	22.48	21.54	19.43	21.15	1.56
ดินร่วนปนทราย	5.85	6.09	6.32	5.97	0.23

ตารางที่ ข-7 ปริมาณไนโตรเจนของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	ปริมาณไนโตรเจน (%)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	0.0047	0.0094	0.0047	0.0063	0.0027
ดินร่วนปนทราย	0.0048	0.0050	0.0045	0.0048	0.0003

ตารางที่ ข-8 ปริมาณฟอสฟอรัสของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	ปริมาณฟอสฟอรัส (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	2.36	3.39	2.94	2.90	0.51
ดินร่วนปนทราย	3.02	3.32	3.20	3.18	0.15

ตารางที่ ข-9 ปริมาณโพแทสเซียมของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่าง	ปริมาณโพแทสเซียม (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ดินเหนียว	36.54	38.17	35.40	36.70	1.39
ดินร่วนปนทราย	29.23	32.41	29.00	29.54	2.63

ตารางที่ ข-10 ปริมาณโลหะทั้งหมดของดินเหนียว

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้น (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
สังกะสี	53.5413	64.6380	55.9769	58.05	5.83
ทองแดง	20.6616	21.8775	22.0515	21.53	0.76
โครเมียม	44.5018	41.4089	50.4177	45.44	4.58
นิกเกิล	39.2371	45.1472	39.5131	41.30	3.34

ตารางที่ ข-11 ปริมาณโลหะทั้งหมดของดินร่วนปนทราย

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้น (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
สังกะสี	20.8685	21.1037	18.6489	20.21	1.35
ทองแดง	12.2230	12.0876	12.3996	12.24	0.16
โครเมียม	13.2167	12.8802	12.2012	12.77	0.52
นิกเกิล	16.3967	14.6636	16.5658	15.88	1.05

ตารางที่ ข-12 ความชื้นของสารปรับปรุงดิน

ชนิดสารปรับปรุงดิน	ความชื้น (%)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ซีโอไลต์	1.3068	1.2937	1.0344	1.21	0.15
ซีพีโอไลต์	7.4472	7.2086	7.1658	7.27	0.15
ไดอะตอมไมต์	0.0596	0.0787	0.0992	0.08	0.02

ตารางที่ ข-13 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของสารปรับปรุงดิน

ชนิดสารปรับปรุงดิน	CEC (cmol/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ซีโอไลต์	11.7598	12.1956	11.9771	11.98	0.22
ซีพีโอไลต์	7.0857	7.1008	7.2451	7.14	0.09
ไดอะตอมไมต์	4.7256	4.7253	4.7128	4.72	0.01

ตารางที่ ข-14 ปริมาณโลหะทั้งหมดของซีโอไลต์

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้น (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
สังกะสี	69.9732	61.0459	62.4721	64.50	4.80
ทองแดง	9.0448	8.6490	9.5446	9.08	0.45
โครเมียม	13.4181	13.0232	14.2175	13.55	0.61
นิกเกิล	21.0715	16.7015	19.3876	19.05	2.20

ตารางที่ ข-15 ปริมาณโลหะทั้งหมดของซีพีโอไลต์

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้น (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
สังกะสี	24.7245	31.5351	38.8205	31.69	7.05
ทองแดง	8.4401	8.5284	9.2335	8.73	0.43
โครเมียม	15.0928	14.1809	14.7935	14.69	0.46
นิกเกิล	9.4330	9.9167	12.7085	10.69	1.77

ตารางที่ ข-16 ปริมาณโลหะทั้งหมดของไดอะตอมไมต์

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้น (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
สังกะสี	10.4322	12.2133	10.7111	11.12	0.96
ทองแดง	2.7819	3.4753	3.4895	3.25	0.40
โครเมียม	12.1212	12.7098	12.9611	12.60	0.43
นิกเกิล	4.4709	4.5676	4.6859	4.57	0.11

ตารางที่ ข-17 ค่าศักย์ซีต้าที่ผิวของสารปรับปรุงดิน

ชนิดสารปรับปรุงดิน	ศักย์ซีต้า (mV)			เฉลี่ย	SD.
	1	2	3		
ซีโอไลต์	-21.34	-19.83	-21.20	-20.79	0.83
ซีพีโอไลต์	-23.41	-22.89	-23.93	-23.41	0.52
ไดอะตอมไมต์	-19.28	-20.30	-19.73	-19.77	0.51

ตารางที่ ข-18 จุดที่พื้นผิวของซีโอไลต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

พีเอชเริ่มต้น ($pH_{เริ่มต้น}$)	พีเอชสุดท้าย ($pH_{สุดท้าย}$)			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
1	0.91	0.98	0.86	0.92	0.06
2	1.99	1.62	1.82	1.81	0.19
3	3.17	3.31	3.26	3.25	0.07
4	6.41	6.11	6.49	6.34	0.20
5	8.61	8.62	8.55	8.59	0.04
6	8.74	8.52	8.81	8.69	0.15
7	8.88	8.90	8.82	8.87	0.04
8	9.20	9.14	9.33	9.22	0.10
9	9.82	9.76	9.91	9.83	0.08
10	10.06	10.34	10.32	10.24	0.16
11	11.15	11.10	11.24	11.16	0.07
12	12.08	12.07	12.29	12.15	0.12

ตารางที่ ข-19 จุดที่พื้นผิวของซีโพลิตมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

พีเอชเริ่มต้น ($pH_{เริ่มต้น}$)	พีเอชสุดท้าย ($pH_{สุดท้าย}$)			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
1	1.01	0.89	0.90	0.93	0.07
2	1.72	1.86	1.94	1.84	0.11
3	3.39	3.43	3.51	3.44	0.06
4	7.36	7.29	7.18	7.28	0.09
5	7.87	7.94	8.05	7.95	0.09
6	8.22	8.25	8.16	8.21	0.05
7	8.31	8.34	8.26	8.30	0.04
8	8.75	8.68	8.82	8.75	0.07
9	9.50	9.68	9.72	9.63	0.12
10	10.18	10.11	10.26	10.18	0.08
11	11.11	11.06	10.98	11.05	0.07
12	12.10	12.09	12.00	12.06	0.06

ตารางที่ ข-20 จุดที่พื้นผิวของไดอะตอมไมต์มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

พีเอชเริ่มต้น ($pH_{เริ่มต้น}$)	พีเอชสุดท้าย ($pH_{สุดท้าย}$)			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
1	1.00	0.85	0.96	0.94	0.08
2	1.81	1.87	1.92	1.87	0.06
3	2.80	2.99	2.84	2.88	0.10
4	4.86	4.72	4.82	4.80	0.07
5	6.43	6.50	6.57	6.50	0.07
6	6.91	7.32	7.00	7.08	0.22
7	7.95	8.09	8.03	8.02	0.07
8	8.58	8.16	8.35	8.36	0.21
9	9.26	9.10	9.17	9.18	0.08
10	10.17	10.16	10.05	10.13	0.07
11	11.13	11.10	11.08	11.10	0.03
12	12.11	12.14	12.19	12.15	0.04

การคำนวณความคั่งทุนทางเศรษฐศาสตร์

1. ดินเหนียว

$$d = \frac{m}{v} \quad (v = 1 \text{ ม.} \times 1 \text{ ม.} \times 0.15 \text{ ม.}; d = 1.37 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร})$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } m &= 205,500 \text{ กรัม (205.5 กิโลกรัม)} \\ \text{ดินพื้นที่ 1 ไร่} &= 328,800 \text{ กิโลกรัม (น้ำหนักเปียก)} \end{aligned}$$

- ดินเหนียวมีสภาพความจุความชื้น (field capacity) 37.82%

$$\text{ดังนั้น } m = \frac{328,800 \times 62.18}{100} = 204,447.84 \text{ กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง)}$$

- ซีพีโอไลต์ อัตราส่วน 5 % (ราคา 3.2 บาท : กิโลกรัม)

ดิน	1	กิโลกรัม	ใส่สารปรับปรุง	0.05	กิโลกรัม
ดิน	204,447.84	กิโลกรัม	ใส่สารปรับปรุง	10,222.39	กิโลกรัม
ราคาสารปรับปรุง (พื้นที่ 1 ไร่)			เท่ากับ	32,711.65	บาท

- ซีพีโอไลต์ อัตราส่วน 7.5 % (ราคา 3.2 บาท : กิโลกรัม)

ดิน	1	กิโลกรัม	ใส่สารปรับปรุง	0.075	กิโลกรัม
ดิน	204,447.84	กิโลกรัม	ใส่สารปรับปรุง	15,333.49	กิโลกรัม
ราคาสารปรับปรุง (พื้นที่ 1 ไร่)			เท่ากับ	49,067.48	บาท

2. ดินร่วนปนทราย

$$d = \frac{m}{v} \quad (v = 1 \text{ ม.} \times 1 \text{ ม.} \times 0.15 \text{ ม.}; d = 1.52 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร})$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } m &= 228,000 \text{ กรัม (228 กิโลกรัม)} \\ \text{ดินพื้นที่ 1 ไร่} &= 364,800 \text{ กิโลกรัม (น้ำหนักเปียก)} \end{aligned}$$

- ดินร่วนปนทรายมีสภาพความจุความชื้น (field capacity) 6.20%

$$\text{ดังนั้น } m = \frac{364,800 \times 93.8}{100} = 342,182.4 \text{ กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง)}$$

- ซีพีโอไลต์ อัตราส่วน 7.5 % (ราคา 3.2 บาท : กิโลกรัม)

ดิน	1	กิโลกรัม	ใส่สารปรับปรุง	0.075	กิโลกรัม
ดิน	342,182.40	กิโลกรัม	ใส่สารปรับปรุง	25,663.7	กิโลกรัม
ราคาสารปรับปรุง (พื้นที่ 1 ไร่)			เท่ากับ	82,123.78	บาท

หมายเหตุ: ราคาซีพีโอไลต์จาก www.Alibaba.com นำเข้าจากประเทศจีน



ตารางที่ ค-1 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	20.9222	27.5561	5.81	93.7035	90.1839	3.19	13.9812	11.6207	2.25	45.5131	45.6106	2.47	7.6351	9.7046	2.64	13.9812	18.1122	7.75
2		29.9970			87.4913			9.4991			43.1957			8.7991			13.2987		
3		31.7492			89.3570			11.3818			48.1230			12.6797			27.0567		
4	CZ 2.5	33.8006	25.1561	7.50	88.9750	89.7940	9.88	12.0290	9.7909	2.06	50.1044	49.9965	0.17	10.8361	12.5507	1.49	26.2452	31.2711	8.79
5		21.2067			100.0597			9.3588			50.0796			13.2417			41.4178		
6		20.4611			80.3473			7.9848			49.8054			13.5742			26.1503		
7	CZ 5	30.2130	27.6842	2.34	82.7142	89.7091	9.05	8.6181	9.1224	0.93	55.1758	54.9512	0.32	14.1654	13.2926	2.29	25.9534	27.0230	4.07
8		27.2447			99.9304			8.5513			54.5888			15.0144			31.5203		
9		25.5949			86.4827			10.1980			55.0890			10.6979			23.5953		
10	CZ 7.5	17.1948	18.6911	2.43	75.8772	73.4309	3.49	9.3972	9.0956	0.52	60.8817	58.0382	2.69	9.8970	11.9605	1.79	18.2945	21.8219	3.13
11		21.4957			74.9850			9.3981			57.6885			12.9974			22.8954		
12		17.3826			69.4306			8.4915			55.5445			12.9870			24.2757		
13	CS 2.5	13.5878	10.2552	4.30	67.4393	68.9278	2.91	12.5887	13.0865	0.43	64.0424	68.8961	5.07	13.4879	19.8124	5.48	19.5824	27.5028	8.36
14		5.3968			67.0598			13.3920			74.1555			22.7863			26.6840		
15		11.7812			72.2843			13.2788			68.4904			23.1629			36.2420		
16	CS 5	10.9857	5.5615	4.81	71.6069	63.1593	7.46	14.6809	13.6582	1.23	76.9999	77.2538	0.47	29.7613	28.0154	4.88	33.2568	35.3463	1.98
17		3.8996			60.3940			13.9986			77.7922			22.4978			37.1963		
18		1.7993			57.4770			12.2951			76.9692			31.7873			35.5858		
19	CS 7.5	3.8907	6.4224	6.10	51.5762	55.4849	5.84	13.3679	13.2806	0.27	77.8132	74.5902	3.68	20.7502	26.9642	5.71	30.2275	39.6752	12.47
20		13.3773			62.1943			12.9779			70.5800			28.1521			53.8085		
21		1.9994			52.6842			13.4960			75.3774			31.9904			34.9895		
22	CD 2.5	17.1983	24.4991	6.54	103.4897	94.3935	8.65	13.5986	12.8504	2.57	56.2944	51.2070	4.84	13.2987	14.0826	0.70	30.3970	28.9642	3.78
23		29.8254			86.2843			14.9626			50.6733			14.6633			31.8204		
24		26.4735			93.4066			9.9900			46.6533			14.2857			24.6753		
25	CD 5	20.8812	19.9944	0.77	92.4168	85.6592	8.23	10.0909	10.4154	1.74	44.1603	48.6057	4.47	15.2862	14.5701	1.19	27.0756	30.1655	5.08
26		19.6039			88.0685			8.8566			48.5620			15.2254			36.0235		
27		19.4981			76.4924			12.2988			53.0947			13.1987			27.3973		
28	CD 7.5	37.9772	25.5871	10.76	96.4421	82.4606	12.11	10.6936	10.5280	3.05	48.7707	50.5434	2.34	12.4925	10.3285	2.06	32.0808	32.3511	3.80
29		20.1879			75.4547			13.4919			49.6702			8.3950			36.2782		
30		18.5963			75.4849			7.3985			53.1894			10.0980			28.6943		

ตารางที่ ค-2 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	22.1957	24.6398	3.04	109.9830	97.0903	11.41	5.2752	6.3107	1.80	57.2310	55.1322	1.83	33.3433	31.1929	2.28	18.2144	20.9017	3.02
2		23.6780			88.2991			8.3860			54.2620			28.8082			20.3236		
3		28.0457			92.9886			5.2710			53.9035			31.4272			24.1671		
4	CZ 2.5	22.5977	21.5513	0.95	94.4906	84.4754	8.68	7.5992	6.3544	1.57	56.7943	56.8739	1.19	38.1962	33.6169	4.02	25.2975	27.3956	2.14
5		20.7295			79.2306			4.5844			58.1025			31.9912			27.3072		
6		21.3268			79.7052			6.8796			55.7248			30.6634			29.5823		
7	CZ 5	19.4378	20.7157	2.26	86.4234	84.6768	1.53	6.4793	5.5629	0.80	59.4099	58.4951	1.78	33.2935	31.9132	1.25	28.7081	28.8925	2.75
8		19.3798			83.5818			5.1680			59.6303			31.6041			26.2373		
9		23.3294			84.0253			5.0415			56.4452			30.8422			31.7319		
10	CZ 7.5	16.5967	16.4178	1.95	77.6845	79.0586	3.54	3.8992	5.2279	1.40	62.6875	59.8121	2.75	34.6931	33.5362	2.88	33.6933	36.0653	2.33
11		18.2726			83.0754			6.6900			57.2142			30.2546			38.3425		
12		14.3842			76.4159			5.0944			59.5345			35.6608			36.1602		
13	CS 2.5	23.6088	15.5464	6.99	68.3464	68.9160	7.08	7.5389	8.7275	1.06	72.3143	70.0989	2.44	39.2818	40.3105	2.37	23.4104	33.2629	9.09
14		11.2797			76.2627			9.0836			67.4785			41.3256			41.3256		
15		11.7506			62.1390			9.5598			70.5039			35.0528			35.0528		
16	CS 5	5.0858	6.9091	1.74	61.5277	59.7739	1.96	8.2768	9.7019	1.29	73.6937	77.1746	4.61	43.1791	44.2523	1.97	32.4093	34.5875	1.98
17		8.5487			57.6541			10.0398			82.4056			46.5209			35.0895		
18		7.0929			60.1399			10.7892			75.4246			43.0569			36.2637		
19	CS 7.5	6.0811	6.4815	0.61	62.8053	61.6237	5.20	9.2713	9.1072	0.47	69.6840	70.7969	3.18	44.7612	45.0374	2.20	40.4745	40.8827	1.15
20		7.1813			66.1281			8.5777			68.3224			42.9882			39.9960		
21		6.1821			55.9378			9.4725			74.3843			47.3626			42.1777		
22	CD 2.5	19.3729	20.5281	1.45	82.3847	81.8685	5.27	4.1941	4.3841	0.19	53.8246	53.7433	0.13	27.4616	29.7579	2.10	38.4462	34.2220	4.62
23		22.1579			76.3549			4.3917			53.5982			30.2425			34.9336		
24		20.0536			86.8659			4.5667			53.8072			31.5695			29.2862		
25	CD 5	18.6897	20.5023	2.44	82.0161	86.4327	7.62	4.2748	4.9762	0.96	52.0927	53.9762	3.47	24.4557	27.2420	3.83	30.1223	31.7796	5.00
26		23.2720			82.0487			6.0666			57.9811			25.6589			37.3943		
27		19.5453			95.2333			4.5872			51.8548			31.6115			27.8221		
28	CD 7.5	21.5590	19.8819	1.46	74.3587	85.3656	10.13	2.7947	4.1969	1.64	57.7902	54.5845	2.87	32.5382	31.2057	1.28	26.2501	26.3107	0.86
29		18.8981			94.2906			3.7996			53.6946			31.0969			27.1973		
30		19.1885			87.4475			5.9964			52.2686			29.9820			25.4847		

ตารางที่ ค-3 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	61.4693	58.3278	7.14	81.5592	73.5126	8.01	9.1954	14.7161	6.71	43.3783	46.8446	4.99	10.0950	9.1232	1.20	9.9950	14.0163	4.26
2		63.3543			73.4311			12.7706			44.5974			7.7821			13.5688		
3		50.1599			65.5476			22.1823			52.5580			9.4924			18.4852		
4	SZ 2.5	28.0569	38.9378	9.45	73.5250	72.2499	3.97	9.9493	16.1429	5.51	44.5727	53.7718	8.06	8.8548	8.3821	0.54	11.3422	20.9030	11.16
5		43.6563			75.4246			20.4795			57.1429			8.4915			33.1668		
6		45.1000			67.8000			18.0000			59.6000			7.8000			18.2000		
7	SZ 5	40.6739	27.8187	11.53	61.5093	60.7850	0.64	8.3740	10.6219	5.13	85.2358	81.3546	3.46	8.5734	14.3183	8.02	11.8632	13.4172	2.67
8		18.3871			60.5576			6.9951			80.2438			23.4836			11.8917		
9		24.3951			60.2879			16.4967			78.5843			10.8978			16.4967		
10	SZ 7.5	33.9559	27.3066	8.38	56.1270	54.7534	2.05	18.1764	13.5895	6.16	75.4020	82.5661	6.21	13.2827	18.3887	8.33	17.3774	16.3195	0.92
11		30.0639			55.7331			6.5921			86.4962			13.8833			15.7811		
12		17.9000			52.4000			16.0000			85.8000			28.0000			15.8000		
13	SS 2.5	32.9407	23.2025	8.54	66.9794	66.5837	1.64	13.0765	10.7859	2.01	68.4767	72.8781	3.81	15.4722	11.5180	3.42	15.3723	17.3789	1.80
14		16.9728			67.9912			9.9840			74.9800			9.5847			18.8698		
15		19.6941			64.7806			9.2972			75.1774			9.4972			17.8946		
16	SS 5	14.2586	14.0398	3.05	59.1285	60.0883	0.84	9.0737	10.6144	1.51	75.0823	70.4676	9.81	21.9364	17.5316	3.82	14.9566	19.0670	4.50
17		16.9728			60.7029			10.6829			59.2053			15.4752			18.3706		
18		10.8880			60.4335			12.0867			77.1152			15.1833			23.8737		
19	SS 7.5	2.8922	6.0221	2.89	53.9543	51.3285	6.35	10.1725	12.0761	2.32	77.6902	78.6508	3.34	18.3505	24.2556	5.12	13.9623	17.5696	4.21
20		8.5768			55.9489			14.6604			75.8951			26.9273			16.5553		
21		6.5974			44.0824			11.3954			82.3671			27.4890			22.1911		
22	SD 2.5	26.1581	30.5161	3.79	82.4681	76.8817	5.44	8.5863	7.4614	1.05	48.5224	50.9356	2.11	18.8698	12.4560	6.34	46.6254	24.9405	18.79
23		33.0901			76.5770			6.4981			51.8844			6.1981			13.4960		
24		32.3000			71.6000			7.3000			52.4000			12.3000			14.7000		
25	SD 5	62.8236	48.6832	21.04	64.3170	64.7770	5.71	6.7702	8.4209	2.84	57.3477	46.1000	9.76	15.9299	10.2412	5.28	10.1553	15.1111	4.35
26		58.7237			70.7081			6.7912			39.8482			5.4929			18.2762		
27		24.5025			59.3059			11.7012			41.1041			9.3009			16.9017		
28	SD 7.5	31.0410	27.2392	5.62	70.4661	66.5345	6.06	7.2862	6.7266	0.55	50.7037	52.9833	2.24	11.0789	13.2215	1.98	11.5780	17.4859	5.16
29		20.7855			59.5583			6.1957			53.0629			14.9895			19.7861		
30		29.8910			69.5791			6.6980			55.1834			13.5959			21.0937		

ตารางที่ ค-4 ปริมาณสังกะสีจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	45.8000	42.5700	3.25	79.0000	77.3555	1.78	6.2000	6.1199	1.20	60.8000	57.1708	3.14	21.2000	19.7233	1.94	18.4000	23.4088	5.84
2		39.3017			77.6060			7.2818			55.3616			20.4489			29.8254		
3		42.6083			75.4604			4.8780			55.3509			17.5212			22.0010		
4	SZ 2.5	38.3540	32.1621	5.36	68.6177	68.8652	3.13	5.3935	5.6470	0.25	67.0196	65.3437	1.90	22.9724	21.4316	3.35	19.2769	23.3526	5.07
5		29.1079			65.8653			5.6626			63.2823			17.5839			21.7564		
6		29.0245			72.1125			5.8847			65.7291			23.7383			29.0245		
7	SZ 5	26.9461	26.6162	1.56	63.6727	64.4213	1.18	4.6906	4.7452	0.59	71.3573	71.0261	0.30	24.4511	22.4412	2.64	24.6507	22.6033	1.97
8		24.9153			65.7764			4.1858			70.9587			23.4204			20.7295		
9		27.9873			63.8150			5.3593			70.7622			19.4522			22.4295		
10	SZ 7.5	16.6037	17.1939	0.51	55.1800	55.1930	0.24	4.7723	4.9361	0.56	77.1525	78.6811	1.47	19.6858	20.1093	0.37	23.7622	23.0579	0.89
11		17.4863			55.4396			5.5638			80.0795			20.2683			23.3482		
12		17.4916			54.9593			4.4723			78.8114			20.3737			22.0632		
13	SS 2.5	15.6749	11.5142	3.92	47.4241	61.2244	11.97	9.3850	9.1170	0.46	83.2668	75.8619	10.51	33.7460	27.2534	5.89	18.6701	18.1691	2.11
14		10.9890			68.8312			8.5914			63.8362			25.7742			19.9800		
15		7.8787			67.4180			9.3747			80.4827			22.2400			15.8572		
16	SS 5	9.5818	6.6207	2.74	59.2874	56.8965	2.34	10.5799	8.7397	1.68	81.7447	72.7990	12.85	28.1465	28.4224	2.78	19.3632	19.4152	0.35
17		6.1030			56.7969			7.2842			58.0766			25.7899			19.7854		
18		4.1774			54.6051			8.3549			78.5757			31.3308			19.0969		
19	SS 7.5	3.4885	4.5944	1.16	49.3372	54.1264	8.26	8.0734	8.8879	2.12	81.7303	76.8856	6.84	40.6658	38.4762	1.96	30.2003	23.8266	5.52
20		4.4982			49.3802			7.2971			79.8681			37.8848			20.5918		
21		5.7965			63.6618			11.2932			69.0586			36.8779			20.6876		
22	SD 2.5	33.0768	35.1222	1.80	76.1467	77.9884	2.03	5.3962	5.3168	0.21	57.9594	56.8569	2.29	18.8868	20.2044	2.90	21.0852	21.1711	4.80
23		36.4833			77.6515			5.0837			54.2265			23.5247			26.0167		
24		35.8066			80.1671			5.4705			58.3847			18.2017			16.4114		
25	SD 5	35.3929	30.2708	4.89	74.8850	75.5523	0.68	4.2991	5.1607	0.77	58.7882	57.8051	1.14	18.5963	18.9799	0.88	19.8960	20.7121	3.14
26		29.7732			75.5320			5.3951			56.5491			19.9820			24.1782		
27		25.6461			76.2399			5.7878			58.0780			18.3614			18.0621		
28	SD 7.5	29.8582	30.5371	0.91	75.1947	73.1107	1.81	6.0915	5.3676	0.64	60.0160	59.3254	1.01	19.5726	17.7967	2.09	24.2660	21.7448	3.57
29		31.5738			72.2250			5.1307			59.7928			15.4909			17.6616		
30		30.1793			71.9124			4.8805			58.1673			18.3267			23.3068		

ตารางที่ ค-5 ปริมาณทองแดงจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	33.7134	34.5832	3.02	86.9608	89.9684	2.61	25.2851	22.1508	3.16	104.7100	92.4203	10.76	59.0977	64.7219	12.53	33.1185	35.6822	6.46
2		32.0968			91.2909			22.1978			84.6915			55.9944			30.8969		
3		37.9393			91.6534			18.9696			87.8594			79.0735			43.0312		
4	CZ 2.5	36.1865	33.5610	2.28	85.8932	72.8251	11.32	18.2921	17.1289	1.11	91.8580	110.1682	15.87	76.8466	81.6401	4.32	42.9466	45.1497	3.09
5		32.3576			66.4078			17.0251			119.9721			82.8355			48.6858		
6		32.1389			66.1743			16.0695			118.6745			85.2380			43.8167		
7	CZ 5	25.7553	28.2259	2.24	66.2704	72.1365	6.05	16.2457	15.1856	1.03	117.5830	107.1968	9.15	78.5537	78.1990	0.73	42.9916	42.6765	2.05
8		30.1283			78.3534			15.1139			100.3281			77.3591			44.5461		
9		28.7942			71.7856			14.1972			103.6793			78.6843			40.4919		
10	CZ 7.5	24.5926	24.5880	1.01	56.6830	58.4379	2.65	15.1954	15.1259	0.41	118.8643	116.2077	4.79	78.1765	80.2592	2.42	38.7884	40.8792	1.89
11		25.5949			61.4877			15.4969			110.6779			79.6841			41.3917		
12		23.5764			57.1429			14.6853			119.0809			82.9171			42.4575		
13	CS 2.5	24.9775	22.3771	2.25	79.1288	58.0078	18.32	15.4861	15.2509	0.21	106.6041	123.7072	17.16	87.9209	89.6393	4.04	37.6661	44.1190	7.41
14		21.0873			46.4721			15.1909			140.9155			86.7480			42.4745		
15		21.0663			48.4225			15.0759			123.6022			94.2492			52.2165		
16	CS 5	25.1673	23.0522	1.96	63.1179	50.6987	10.87	14.9805	14.8911	0.56	112.6536	127.3616	13.59	88.1854	88.6468	2.03	53.2308	52.1682	1.39
17		22.6977			46.0954			15.3985			129.9870			86.8913			50.5949		
18		21.2915			42.8828			14.2943			139.4442			90.8637			52.6789		
19	CS 7.5	22.9449	22.4669	0.49	47.3863	40.8037	5.70	14.7646	14.7121	0.81	132.6816	130.9411	2.05	86.8915	88.4714	1.64	48.7829	53.5241	4.18
20		21.9627			37.6360			13.8764			128.6812			88.3498			55.1063		
21		22.4933			37.3888			15.4954			131.4606			90.1729			56.6830		
22	CD 2.5	26.2974	30.6606	3.81	71.2929	76.0018	9.63	15.4985	15.0156	0.43	108.6891	102.7169	8.83	80.3920	77.9426	3.59	46.7953	46.0119	0.68
23		33.3167			87.0823			14.6633			92.5686			73.8155			45.6858		
24		32.3676			69.6304			14.8851			106.8931			79.6204			45.5544		
25	CD 5	27.0756	26.1488	0.82	87.7211	74.3280	11.60	17.2844	16.4343	0.80	87.3214	103.1895	13.75	75.1324	80.1030	4.83	35.2683	40.5506	4.58
26		25.8732			67.3699			16.3200			110.5583			84.7846			43.2879		
27		25.4975			67.8932			15.6984			111.6888			80.3920			43.0957		
28	CD 7.5	24.0855	24.2886	0.53	65.5607	66.8021	1.71	15.1909	15.0930	0.10	108.2351	107.6835	3.21	81.0514	79.3627	1.74	46.0724	42.4801	3.34
29		24.8851			68.7587			14.9910			104.2375			79.4523			39.4763		
30		23.8952			66.0868			15.0970			110.5779			77.5845			41.8916		

ตารางที่ ค-6 ปริมาณทองแดงจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	5.0761	6.4504	1.85	55.1408	58.8027	4.45	8.0621	7.6070	0.39	112.0733	114.7299	4.68	103.9116	96.5622	8.79	65.7908	58.6766	6.24
2		5.7222			57.5178			7.3994			111.9771			86.8193			56.1365		
3		8.5530			63.7494			7.3595			120.1392			98.9557			54.1024		
4	CZ 2.5	4.8995	4.3393	0.54	46.4954	45.5126	1.45	7.0993	6.8208	0.31	133.7866	134.8696	3.83	84.9915	88.2237	4.13	54.9945	58.3886	5.95
5		4.2854			43.8509			6.8766			139.1270			86.8049			54.9133		
6		3.8329			46.1916			6.4865			131.6953			92.8747			65.2580		
7	CZ 5	3.3892	3.8042	1.00	39.8724	42.6193	6.30	6.6786	6.5541	0.17	143.3413	138.8723	4.12	88.2177	91.0571	2.46	62.0016	61.6330	1.65
8		3.0809			38.1634			6.3606			138.0441			92.4270			59.8291		
9		4.9427			49.8221			6.6232			135.2313			92.5267			63.0684		
10	CZ 7.5	2.8994	2.8306	0.80	32.4935	33.4681	2.25	6.4987	6.3941	0.10	148.0704	143.1683	4.42	86.6827	92.1801	11.85	60.5879	63.9730	5.33
11		3.5946			36.0459			6.2906			139.4908			84.0739			61.2082		
12		1.9978			31.8649			6.3930			141.9439			105.7836			70.1229		
13	CS 2.5	2.1823	2.5220	0.31	33.2308	33.1112	0.40	7.4397	7.5977	0.23	146.1165	145.7828	2.34	97.8078	96.8355	9.74	64.2793	69.1151	4.67
14		2.5953			33.4398			7.4865			147.9337			86.6440			69.4749		
15		2.7883			32.6628			7.8670			143.2981			106.0546			73.5909		
16	CS 5	1.4958	1.5614	0.11	23.4344	24.4887	1.64	7.2796	7.7082	0.38	146.8887	141.8182	9.27	93.5381	104.2108	12.06	72.5967	77.9294	10.00
17		1.6899			23.6581			7.8529			131.1133			117.2962			89.4632		
18		1.4985			26.3736			7.9920			147.4525			101.7982			71.7283		
19	CS 7.5	1.7944	1.3960	0.35	17.2465	19.1784	2.53	6.6793	6.8803	0.53	139.4677	142.0601	4.64	97.2984	97.1877	3.98	75.1670	76.0157	1.81
20		1.1969			18.2525			6.4831			147.4167			93.1578			78.0969		
21		1.1965			22.0361			7.4783			139.2960			101.1068			74.7831		
22	CD 2.5	4.4937	4.9825	0.56	47.2339	50.3209	2.90	6.4909	6.6428	0.19	125.0250	127.1493	1.89	92.7701	95.7233	2.78	73.2974	69.0602	3.67
23		5.5894			52.9993			6.5875			128.6556			96.1174			66.7731		
24		4.8645			50.7297			6.8500			127.7673			98.2825			67.1101		
25	CD 5	4.3742	4.5117	0.41	49.3091	49.6986	0.43	6.3625	6.7024	0.67	125.2610	129.2178	7.74	81.5190	88.2575	7.82	55.2739	60.0197	4.26
26		4.9727			49.6271			6.2655			138.1402			86.4247			61.2631		
27		4.1883			50.1596			7.4791			124.2521			96.8289			63.5221		
28	CD 7.5	4.5913	4.6960	0.10	45.4137	46.1274	2.30	6.5875	6.6276	0.15	126.2601	126.4575	2.04	87.8331	90.2558	3.81	60.5849	58.9141	4.14
29		4.7995			48.6951			6.4994			128.5871			88.2912			54.1946		
30		4.6972			44.2734			6.7959			124.5253			94.6432			61.9628		

ตารางที่ ค-7 ปริมาณทองแดงจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	50.3748	56.6984	6.78	93.9530	91.8910	2.13	20.0900	17.8790	2.00	110.5447	120.8150	10.81	28.1859	33.6905	4.85	10.6947	14.6469	3.75
2		55.8715			89.6937			17.3601			132.0962			37.3142			18.1582		
3		63.8489			92.0264			16.1871			119.8042			35.5715			15.0879		
4	SZ 2.5	38.9016	41.5191	2.68	67.3565	72.3920	7.18	16.2173	15.7672	0.39	112.3271	137.8285	23.78	25.9676	33.1442	6.43	11.8396	15.7409	3.45
5		44.2557			80.6194			15.5844			141.7582			35.0649			16.9830		
6		41.4000			69.2000			15.5000			159.4000			38.4000			18.4000		
7	SZ 5	38.0819	33.0175	5.93	83.3416	58.8000	21.26	15.3524	15.0796	0.28	136.4769	158.4452	29.11	22.2311	30.7011	10.25	9.4706	14.2860	6.44
8		34.4759			46.2676			15.0894			147.3968			27.7806			11.7917		
9		26.4947			46.7906			14.7970			191.4617			42.0916			21.5957		
10	SZ 7.5	37.9507	32.5061	5.44	68.0116	51.4210	14.60	14.3813	14.0882	0.26	157.2955	179.3188	21.06	37.3514	38.9676	1.55	16.2788	18.9184	2.35
11		27.0675			40.5513			13.9832			199.2609			40.4515			19.6764		
12		32.5000			45.7000			13.9000			181.4000			39.1000			20.8000		
13	SS 2.5	25.7536	24.0363	1.60	64.4839	52.9978	9.96	18.1673	16.9454	1.06	164.1046	180.2490	13.98	40.9263	44.2467	2.95	20.3633	23.7714	2.99
14		23.7620			47.7236			16.3738			188.1989			45.2276			25.9585		
15		22.5932			46.7860			16.2951			188.4435			46.5860			24.9925		
16	SS 5	20.8396	20.4616	0.34	55.4392	55.9612	7.69	16.0534	15.9369	0.10	185.7613	179.2628	7.20	30.9104	40.5301	9.72	18.8453	25.6229	6.86
17		20.1677			63.8978			15.8746			171.5256			40.3355			25.4593		
18		20.3776			48.5466			15.8825			180.5014			50.3446			32.5642		
19	SS 7.5	28.3235	28.4461	1.38	43.3829	38.1577	4.53	15.5580	15.4368	0.11	190.7849	183.2491	10.51	33.7090	45.2515	10.12	23.5365	29.1795	4.91
20		27.1268			35.4044			15.3585			171.2377			49.4664			31.5149		
21		29.8880			35.6857			15.3938			187.7249			52.5790			32.4870		
22	SD 2.5	60.0040	53.7961	5.58	73.3826	65.5215	7.00	16.8730	15.7561	1.05	161.4417	165.6303	4.15	40.9345	41.3739	1.25	16.6733	18.8559	2.21
23		52.1843			59.9820			15.5953			169.7491			42.7872			18.7944		
24		49.2000			63.2000			14.8000			165.7000			40.4000			21.1000		
25	SD 5	47.1924	47.6118	0.46	86.3202	74.6406	15.16	14.4365	14.1400	0.40	155.6153	157.6091	2.36	24.2931	31.4473	9.00	11.4496	14.8750	4.43
26		47.5382			80.0959			13.6822			156.9959			41.5460			19.8742		
27		48.1048			57.5058			14.3014			160.2160			28.5029			13.3013		
28	SD 7.5	46.4118	45.5556	0.82	69.1686	63.1036	7.54	13.9735	13.2867	0.88	152.2108	158.8152	9.64	36.6304	38.7963	4.68	16.4687	18.0498	1.66
29		44.7687			54.6617			13.5905			169.8811			44.1691			19.7861		
30		45.4864			65.4804			12.2963			154.3537			35.5893			17.8946		

ตารางที่ ค-8 ปริมาณทองแดงจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	27.2000	25.2754	2.43	80.9000	78.8163	3.81	5.5000	5.3542	0.23	150.4000	159.0586	12.32	38.3000	38.9080	0.96	34.1000	35.7495	2.73
2		22.5436			74.4140			5.0873			173.1671			38.4040			38.9027		
3		26.0826			81.1349			5.4754			153.6088			40.0199			34.2459		
4	SZ 2.5	13.6836	14.3484	1.00	62.2253	57.4737	4.17	5.7930	5.7135	0.11	153.6157	157.4844	3.52	52.6368	40.7068	10.36	56.8318	48.9073	6.93
5		15.4977			54.4407			5.7620			158.3549			33.9758			44.0095		
6		13.8640			55.7550			5.5855			160.4827			35.5077			45.8807		
7	SZ 5	14.1717	13.5400	1.56	59.2814	58.7046	6.02	5.3892	5.4430	0.05	151.4970	156.3447	5.73	48.5030	42.1276	5.85	57.4850	47.9042	8.31
8		11.7600			52.4218			5.4814			154.8734			40.8611			43.5519		
9		14.6884			64.4105			5.4585			162.6638			37.0187			42.6757		
10	SZ 7.5	9.6441	8.7463	0.85	29.8270	38.0639	7.34	4.8717	5.5324	0.57	199.8409	193.7728	5.26	31.2189	34.8842	3.18	40.5647	40.5499	0.01
11		7.9483			40.4372			5.8619			191.0581			36.9598			40.5365		
12		8.6464			43.9276			5.8636			190.4194			36.4739			40.5486		
13	SS 2.5	9.7843	7.9202	2.01	31.3498	36.4679	4.56	8.6861	7.8860	0.75	192.9912	184.2055	9.38	54.2133	47.4175	6.01	49.4209	47.2179	2.79
14		8.1918			37.9620			7.1928			174.3257			45.2547			48.1518		
15		5.7844			40.0918			7.7790			185.2997			42.7845			44.0810		
16	SS 5	5.4896	4.9586	1.39	30.0429	27.1036	2.87	7.9848	7.2478	0.80	216.8879	204.2528	11.02	46.6114	46.8512	4.06	44.0164	44.7540	0.90
17		6.0045			24.3134			6.3983			199.2322			42.9176			44.4926		
18		3.3817			26.9544			7.3603			196.6382			51.0245			45.7529		
19	SS 7.5	2.3921	3.3960	1.18	17.4424	21.1395	5.93	7.1763	7.2563	0.31	217.5820	217.5881	0.78	62.0951	60.2451	2.29	49.3372	48.8295	0.53
20		3.0988			17.9928			6.9972			216.8133			57.6769			48.2807		
21		4.6972			27.9832			7.5954			218.3690			60.9634			48.8707		
22	SD 2.5	18.1873	18.7401	1.64	75.9468	73.1713	7.49	6.3955	5.9818	0.41	161.3870	158.6749	4.82	34.3759	40.4402	9.96	40.9713	45.8239	8.14
23		17.4442			64.6930			5.5821			153.1100			51.9338			55.2233		
24		20.5888			78.8741			5.9678			161.5278			35.0109			41.2771		
25	SD 5	22.1956	17.0180	4.75	76.9846	68.5303	7.34	6.0988	5.6273	0.64	172.1656	173.3808	1.41	32.8934	40.7499	10.51	41.0918	44.2182	2.71
26		15.9856			63.7426			4.8956			173.0443			36.6670			45.9586		
27		12.8730			64.8638			5.8876			174.9326			52.6894			45.6042		
28	SD 7.5	15.5782	15.2347	1.16	53.5251	62.7825	8.02	5.2926	5.3991	0.10	179.9481	173.6495	5.71	37.7472	36.0843	2.80	42.8400	42.4358	0.78
29		16.1815			67.1929			5.4267			172.1756			32.8564			41.5392		
30		13.9442			67.6295			5.4781			168.8247			37.6494			42.9283		

ตารางที่ ค-9 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	29.0530	29.4677	0.55	44.8190	52.6731	7.18	46.7030	43.8122	4.57	197.5211	269.6597	64.19	327.6153	318.7642	10.96	30.0446	29.4970	2.77
2		30.0970			54.2946			46.1954			290.9709			322.1678			26.4974		
3		29.2532			58.9058			38.5383			320.4872			306.5096			31.9489		
4	CZ 2.5	19.7833	18.1917	1.49	48.9114	36.3742	10.86	33.8006	34.2613	0.47	196.8387	224.1060	25.33	407.7940	417.2580	17.43	31.8123	33.8971	1.83
5		16.8260			29.7690			34.2493			246.9136			406.6109			35.2449		
6		17.9659			30.4422			34.7340			228.5657			437.3690			34.6342		
7	CZ 5	27.1421	23.1003	4.66	35.4631	39.2650	5.64	42.8925	38.4957	4.13	237.7415	233.1067	11.55	370.5795	374.3944	5.44	31.3026	34.6963	2.95
8		24.1623			45.7393			34.7022			241.6228			371.9797			36.1937		
9		17.9964			36.5927			37.8924			219.9560			380.6239			36.5927		
10	CZ 7.5	17.8946	17.5244	0.81	31.4906	33.1503	2.02	39.4882	38.9475	0.94	210.9367	200.5694	11.75	349.7951	381.7388	27.72	37.5887	35.1160	2.14
11		16.5967			35.3929			39.4921			202.9594			396.0208			33.8932		
12		18.0819			32.5674			37.8621			187.8122			399.4006			33.8661		
13	CS 2.5	22.6796	19.7127	2.85	45.1594	37.9611	6.25	41.6625	39.5927	1.84	298.7311	290.6969	12.06	328.9040	404.5441	65.52	27.7750	33.6312	5.19
14		16.9898			33.9796			38.9766			276.8339			443.7338			35.4787		
15		19.4688			34.7444			38.1390			296.5256			440.9944			37.6398		
16	CS 5	24.2685	22.2193	1.80	52.9312	42.6375	8.92	38.9494	37.7436	1.10	307.6001	290.4871	16.41	384.5001	401.6972	18.78	42.3450	42.4077	2.54
17		21.4979			37.6962			37.4963			288.9711			398.8601			39.8960		
18		20.8916			37.2851			36.7853			274.8900			421.7313			44.9820		
19	CS 7.5	26.6361	25.1951	1.86	40.7023	38.0098	2.35	37.0112	35.7139	1.24	243.4158	201.0435	64.52	389.5650	424.9275	30.69	34.5172	40.4446	5.66
20		25.8560			36.3382			34.5413			126.7845			440.6509			41.0302		
21		23.0931			36.9889			35.5893			232.9301			444.5666			45.7863		
22	CD 2.5	21.5978	20.1424	2.22	43.6956	46.6722	7.46	42.1958	42.2837	2.33	198.9801	183.7782	23.39	396.3604	402.1204	13.16	37.3963	37.8547	0.79
23		21.2469			55.1621			40.0000			195.5112			392.8180			37.4065		
24		17.5824			41.1588			44.6553			156.8432			417.1828			38.7612		
25	CD 5	12.8884	15.3657	2.74	42.6616	39.8911	2.56	35.5680	38.5214	2.68	160.8552	179.3001	16.17	395.4441	406.1216	27.03	30.8722	34.1645	2.85
26		18.3103			37.6157			40.8001			191.0638			436.8594			35.7249		
27		14.8985			39.3961			39.1961			185.9814			386.0614			35.8964		
28	CD 7.5	15.6906	14.8264	0.78	38.9766	39.6481	1.24	35.2788	35.2170	0.81	229.8621	211.2358	23.46	369.5783	416.6718	48.80	33.9796	34.1507	0.21
29		14.1915			41.0754			34.3794			184.8891			467.0198			34.3794		
30		14.5971			38.8922			35.9928			218.9562			413.4173			34.0932		

ตารางที่ ค-10 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	5.6733	5.1598	0.45	25.5798	27.5209	3.73	12.1429	12.4683	0.49	309.4456	306.6828	8.48	321.1904	325.8589	6.88	32.6466	31.8441	1.84
2		4.9329			25.1579			12.2336			313.4373			333.7609			33.1492		
3		4.8732			31.8250			13.0283			297.1656			322.6256			29.7364		
4	CZ 2.5	2.9997	3.4758	0.56	23.8976	22.0192	1.63	8.7991	9.0019	0.29	307.8692	308.4021	6.28	320.7679	341.5598	24.42	35.0965	35.5307	3.04
5		4.0861			21.1282			8.8698			314.9292			335.4594			38.7682		
6		3.3415			21.0319			9.3366			302.4079			368.4521			32.7273		
7	CZ 5	3.6882	3.6408	0.24	19.6372	21.3079	3.84	9.9681	10.0621	0.38	318.2815	306.1978	14.56	367.4242	346.3029	19.69	28.5088	34.3046	7.90
8		3.3790			18.5848			9.7396			310.2763			328.4635			31.1071		
9		3.8553			25.7019			10.4784			290.0356			343.0210			43.2977		
10	CZ 7.5	3.1994	3.3634	0.86	18.4963	19.4815	0.85	10.0980	11.0560	0.87	306.7387	295.3925	21.85	324.0352	349.3007	29.47	29.7940	37.8621	7.71
11		4.2936			19.9700			11.2831			309.2361			342.1867			38.6420		
12		2.5971			19.9780			11.7870			270.2028			381.6802			45.1503		
13	CS 2.5	2.4799	2.6213	0.16	22.4184	22.4932	1.47	11.3084	11.0137	0.92	308.9971	303.1802	19.52	366.8287	373.2868	45.85	32.2389	40.1569	7.00
14		2.7950			21.0621			9.9820			319.1256			331.0042			42.7231		
15		2.5891			23.9992			11.7506			281.4180			422.0275			45.5089		
16	CS 5	3.2908	3.6874	0.45	21.1408	21.6632	0.64	11.5676	10.9972	0.54	293.8771	322.2138	24.83	351.4160	371.9059	23.46	40.9852	40.0399	2.43
17		4.1750			21.4712			10.9344			332.6044			366.7992			37.2763		
18		3.5964			22.3776			10.4895			340.1598			397.5025			41.8581		
19	CS 7.5	3.5889	3.5898	0.60	20.0379	19.6435	1.34	11.3648	10.8688	0.45	307.3472	308.9499	20.64	369.5544	375.4905	6.79	43.0665	45.9354	2.52
20		4.1891			18.1528			10.4728			330.3411			374.0275			47.7758		
21		2.9913			20.7399			10.7688			289.1614			382.8896			46.9638		
22	CD 2.5	3.0957	2.8235	0.25	23.1676	27.4671	3.89	10.3855	10.7956	0.60	296.8844	286.3560	10.71	326.6427	386.7654	56.02	31.4560	41.1783	8.43
23		2.5951			30.7416			11.4782			275.4766			396.1473			46.5116		
24		2.7797			28.4920			10.5232			286.7070			437.5062			45.5674		
25	CD 5	3.1812	2.9190	0.46	24.0581	24.9833	1.34	12.1284	12.1425	0.08	307.1876	336.2286	74.88	310.7665	358.2879	48.32	36.7830	38.2888	3.04
26		3.1825			24.3660			12.2327			421.2829			356.7379			36.3003		
27		2.3933			26.5257			12.0662			280.2154			407.3594			41.7830		
28	CD 7.5	3.7928	3.4634	0.75	26.5496	25.2106	1.49	12.4763	12.7224	0.22	302.0262	303.8393	10.14	343.0482	356.9261	32.50	32.2387	38.8687	8.44
29		2.5997			23.5976			12.7987			314.7685			333.6666			35.9964		
30		3.9976			25.4847			12.8923			294.7232			394.0636			48.3710		

ตารางที่ ค-11 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	114.3428	103.3461	9.56	42.7786	52.6356	9.60	44.4778	39.4543	4.36	371.8141	340.2381	68.37	133.8331	177.5587	55.73	9.4953	11.0856	1.70
2		98.6731			53.1777			37.2144			387.1096			158.5354			12.8704		
3		97.0224			61.9504			36.6707			261.7906			240.3078			10.8913		
4	SZ 2.5	73.4255	65.7531	7.92	35.7178	38.0909	6.32	33.9270	30.1001	3.64	336.2849	344.6521	21.43	114.2175	184.9677	61.56	9.3523	10.8805	1.63
5		66.2338			45.2547			26.6733			328.6713			214.3856			10.6893		
6		57.6000			33.3000			29.7000			369.0000			226.3000			12.6000		
7	SZ 5	76.6623	72.7989	5.12	38.4807	34.8838	3.24	29.5085	27.8942	3.21	370.8504	383.8278	33.34	97.2984	182.2085	94.20	7.6762	9.7892	2.98
8		74.7477			32.1775			29.9790			421.7048			165.7840			8.4941		
9		66.9866			33.9932			24.1952			358.9282			283.5433			13.1974		
10	SZ 7.5	67.2126	65.5096	5.46	44.9416	34.5346	9.26	24.3683	23.3143	1.85	360.5313	372.0321	18.19	257.5652	241.9602	13.81	10.4864	11.0578	0.74
11		69.9161			31.4622			21.1746			362.5649			237.0156			10.7871		
12		59.4000			27.2000			24.4000			393.0000			231.3000			11.9000		
13	SS 2.5	70.8724	73.1435	2.03	48.4129	38.2500	8.80	20.9623	20.5083	0.99	333.3999	350.5702	15.77	257.9357	243.0305	13.18	9.4829	11.8855	2.40
14		74.7804			33.0471			19.3690			364.4169			232.9273			14.2772		
15		73.7779			33.2900			21.1936			353.8938			238.2285			11.8964		
16	SS 5	73.5866	73.2630	0.47	39.1864	41.1562	8.06	16.6517	16.3361	0.49	467.6438	429.5122	33.09	118.5562	182.6940	56.74	6.5809	11.1816	4.03
17		73.4824			50.0200			15.7748			408.3466			203.1749			12.8794		
18		72.7200			34.2623			16.5818			412.5462			226.3510			14.0845		
19	SS 7.5	83.1754	78.5395	9.81	37.0998	36.4927	4.23	13.8626	14.1410	2.03	489.6779	515.3397	24.12	122.2699	180.8860	53.60	9.6739	11.3129	1.77
20		85.1700			40.3909			12.2669			537.5486			192.9790			11.0701		
21		67.2731			31.9872			16.2935			518.7925			227.4090			13.1947		
22	SD 2.5	57.9073	53.8303	4.50	44.2292	34.7068	8.25	28.7540	28.0820	1.47	359.4249	316.1144	43.76	257.4880	259.9726	27.47	8.9856	10.5608	1.39
23		54.5836			29.8910			26.3921			271.9184			233.8299			11.0967		
24		49.0000			30.0000			29.1000			317.0000			288.6000			11.6000		
25	SD 5	74.6714	62.9663	10.55	43.8072	36.3533	8.76	24.8905	22.3216	2.25	431.1031	412.5821	92.13	136.6985	178.5704	49.91	8.9606	10.6806	3.84
26		60.0220			38.5499			21.3722			312.5936			233.7961			15.0804		
27		54.2054			26.7027			20.7021			494.0494			165.2165			8.0008		
28	SD 7.5	73.9595	69.0640	4.79	41.8205	35.2962	5.67	25.8509	25.9418	1.21	399.2414	386.2902	24.75	189.8393	221.4999	27.95	8.3841	11.8568	3.01
29		68.8518			31.5779			24.7827			357.7496			242.7301			13.5905		
30		64.3807			32.4903			27.1918			401.8794			231.9304			13.5959		

ตารางที่ ค-12 ปริมาณโครเมียมจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	13.9000	13.9009	0.04	27.8000	26.5723	1.23	9.7000	8.7805	0.81	429.0000	415.8473	11.89	207.7000	220.2460	16.10	18.8000	19.4858	2.06
2		13.8653			25.3367			8.1796			412.6683			238.4040			17.8554		
3		13.9373			26.5804			8.4619			405.8736			214.6341			21.8019		
4	SZ 2.5	10.7871	11.3589	0.92	23.3720	22.0249	1.18	7.8905	7.6733	0.34	379.2449	363.4621	14.04	178.5857	200.7623	22.90	20.5753	24.6787	3.94
5		12.4180			21.5577			7.8482			352.3743			224.3195			25.0348		
6		10.8717			21.1450			7.2811			358.7672			199.3816			28.4261		
7	SZ 5	13.1737	12.3489	1.24	23.1537	23.3639	0.96	7.5848	7.7334	0.29	359.9800	367.7539	9.84	196.1078	195.1670	8.35	23.7525	25.0901	1.19
8		12.9559			22.5234			8.0726			364.4608			203.0098			26.0116		
9		10.9170			24.4145			7.5427			378.8210			186.3835			25.5062		
10	SZ 7.5	14.5158	12.6889	1.95	21.0777	21.8982	0.73	5.7666	7.0562	1.12	393.4182	397.2495	3.45	201.1334	187.5796	12.70	24.0604	25.1115	1.74
11		10.6309			22.1560			7.7496			400.0994			175.9563			27.1237		
12		12.9199			22.4607			7.6526			398.2310			185.6490			24.1503		
13	SS 2.5	11.8810	12.4783	0.88	22.5639	22.0601	1.69	9.1853	10.0167	2.08	394.0695	406.6350	24.19	244.0096	250.4087	32.78	26.2580	30.0814	4.32
14		13.4865			20.1798			12.3876			391.3087			285.9141			34.7652		
15		12.0674			23.4367			8.4771			434.5268			221.3025			29.2211		
16	SS 5	15.6702	14.7156	2.08	21.3594	24.1981	3.07	10.9791	9.8274	1.00	439.8643	404.7778	42.85	207.9050	212.0260	4.75	22.8566	25.7913	2.55
17		16.1433			27.4633			9.2529			357.0233			210.9460			27.4633		
18		12.3334			23.7716			9.2500			417.4458			217.2270			27.0539		
19	SS 7.5	20.1336	19.5714	0.57	21.6286	21.8689	0.23	11.0635	10.6844	0.96	482.1090	460.6876	26.22	217.5820	232.2816	17.82	24.6188	28.3958	6.14
20		19.5922			21.8912			11.3954			468.5126			252.0992			25.0900		
21		18.9886			22.0867			9.5942			431.4411			227.1637			35.4787		
22	SD 2.5	12.5912	11.5990	1.03	24.7827	24.0919	1.36	9.9930	9.1062	0.77	377.4358	364.5739	19.12	191.9656	221.4192	27.53	18.7868	22.7902	3.73
23		11.6627			22.5279			8.6722			342.6037			246.5112			23.4250		
24		10.5431			24.9652			8.6533			373.6821			225.7808			26.1587		
25	SD 5	12.5975	11.0894	1.95	20.0960	22.0089	1.70	11.4977	10.1231	1.20	390.6219	371.6424	17.78	185.5629	198.0159	10.97	18.9962	21.6752	2.68
26		11.7894			22.5797			9.2916			355.3802			202.2180			21.6805		
27		8.8813			23.3510			9.5799			368.9253			206.2668			24.3489		
28	SD 7.5	13.0817	10.9053	1.99	21.0705	22.3207	1.31	9.1871	9.2100	0.44	385.1608	378.0021	6.20	227.5814	220.0804	8.07	24.7653	24.2200	1.53
29		9.1761			23.6803			8.7815			374.6423			211.5442			22.4963		
30		10.4582			22.2112			9.6614			374.2032			221.1155			25.3984		

ตารางที่ ค-13 ปริมาณนิกเกิลจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	15.4685	29.6657	13.67	200.9916	192.8567	7.05	0.3966	1.1982	0.86	12.7913	13.2229	0.41	0.0000	0.0000	0	7.9326	8.9372	3.35
2		30.7969			188.4812			2.0998			13.5986			0.0000			6.1994		
3		42.7316			189.0974			1.0982			13.2788			0.0000			12.6797		
4	CZ 2.5	37.9759	22.0950	13.77	179.8390	188.2760	7.34	0.1988	0.1661	0.15	14.0173	15.0066	0.86	0.0000	0.0000	0	11.6314	12.0489	3.00
5		14.8347			191.7563			0.0000			15.4321			0.0000			15.2330		
6		13.4744			193.2329			0.2994			15.5704			0.0000			9.2824		
7	CZ 5	17.7316	23.1227	5.09	187.4195	182.1499	4.96	1.6840	1.8576	0.16	20.9014	21.4256	0.76	0.0000	0.0000	0	12.4814	12.5642	2.61
8		27.8413			181.4656			1.8892			21.0798			0.0000			15.2133		
9		23.7952			177.5645			1.9996			22.2955			0.0000			9.9980		
10	CZ 7.5	13.5959	15.5261	3.27	162.3513	164.7489	6.99	2.0994	2.4989	0.87	32.1903	30.2855	2.49	0.0000	0.4331	0.38	8.4975	10.6276	1.97
11		19.2961			159.2681			3.4993			31.1938			0.6999			10.9978		
12		13.6863			172.6274			1.8981			27.4725			0.5994			12.3876		
13	CS 2.5	27.0756	15.4849	10.05	160.9551	164.6602	8.72	1.8983	2.4977	1.22	34.9685	37.6610	2.34	0.0000	6.4266	5.65	10.5905	12.3861	3.37
14		10.1939			158.4050			3.8977			39.1765			10.5936			10.2938		
15		9.1853			174.6206			1.6973			38.8379			8.6861			16.2740		
16	CS 5	19.9740	12.8233	6.44	135.2242	127.9871	6.86	3.2957	1.6651	1.45	58.4240	58.9315	0.44	20.7730	25.2531	3.88	22.9701	24.6191	1.57
17		10.9989			121.5878			0.5000			59.1941			27.4973			24.7975		
18		7.4970			127.1491			1.1995			59.1763			27.4890			26.0896		
19	CS 7.5	2.4940	1.7104	0.70	89.5850	91.0995	2.46	1.5962	1.4978	0.10	79.4094	75.0882	3.82	27.8332	39.3147	9.97	19.1540	24.8333	4.99
20		1.4975			93.9403			1.3976			72.1773			44.3246			26.8543		
21		1.1397			89.7731			1.4996			73.6779			45.7863			28.4915		
22	CD 2.5	9.1991	16.9707	11.45	202.3798	196.9022	6.43	1.0999	1.0985	0.30	23.0977	22.5733	0.48	0.0000	0.0000	0.00	16.6983	16.3131	1.86
23		30.1247			189.8254			1.3965			22.1446			0.0000			17.9551		
24		11.5884			198.5015			0.7992			22.4775			0.0000			14.2857		
25	CD 5	18.3835	15.1705	2.91	183.1352	188.4595	4.62	0.1998	0.4993	0.36	25.2773	24.2539	1.10	0.0000	0.0000	0.00	13.1881	14.4713	1.15
26		14.4293			191.3623			0.3980			23.0869			0.0000			14.8273		
27		12.6987			190.8809			0.8999			24.3976			0.0000			15.3985		
28	CD 7.5	11.6930	12.1275	1.30	186.0883	185.7134	0.90	0.0000	0.0667	0.12	23.5858	22.7895	1.48	0.0000	0.0000	0.00	14.9910	14.9599	1.75
29		13.5918			184.6892			0.0000			21.0873			0.0000			13.1921		
30		11.0978			186.3627			0.2000			23.6953			0.0000			16.6967		

ตารางที่ ค-14 ปริมาณนิกเกิลจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	19.6078	20.0765	1.24	136.4586	141.1363	4.21	5.1757	6.2476	1.02	50.3633	44.4223	5.18	10.2518	10.3246	2.47	13.3373	17.0567	3.30
2		19.1397			144.6330			7.2021			42.0284			7.8927			19.6330		
3		21.4818			142.3173			6.3650			40.8752			12.8294			18.1999		
4	CZ 2.5	15.6984	13.9108	1.61	122.5877	126.8891	4.08	4.8995	4.4371	0.40	49.2951	47.7848	3.27	11.9988	13.7587	1.93	10.3990	14.5949	5.89
5		13.4543			127.3670			4.1858			50.0299			13.4543			12.0590		
6		12.5799			130.7125			4.2260			44.0295			15.8231			21.3268		
7	CZ 5	12.0614	13.4643	3.27	124.3022	122.7109	1.38	4.0869	4.1700	0.34	50.7376	50.6832	2.51	16.7464	16.0540	1.08	14.6531	16.8440	1.93
8		11.1310			122.0433			3.8760			53.1703			14.8082			17.5909		
9		17.2005			121.7873			4.5473			48.1416			16.6074			18.2879		
10	CZ 7.5	10.3979	9.8240	2.59	116.5767	118.9877	3.27	3.9992	3.5636	0.59	51.8896	47.6239	3.74	12.4975	14.7859	4.42	15.3969	17.3829	1.89
11		12.0819			122.7159			2.8957			44.9326			11.9820			19.1712		
12		6.9923			117.6706			3.7958			46.0493			19.8781			17.5807		
13	CS 2.5	9.2253	9.6878	1.11	108.3226	108.1285	4.57	4.2654	4.4457	0.47	56.1452	52.8470	3.10	23.2120	26.7767	5.38	21.0297	24.0271	3.29
14		8.8840			112.5973			4.0926			52.4057			24.1565			27.5504		
15		10.9540			103.4654			4.9791			49.9900			32.9616			23.5013		
16	CS 5	3.1911	4.1198	0.81	74.7906	74.9541	0.63	3.1911	3.4876	0.60	67.0124	68.1430	1.09	42.7802	43.6912	0.94	27.4232	28.5429	2.10
17		4.4732			75.6461			4.1750			69.1849			43.6382			27.2366		
18		4.6953			74.4256			3.0969			68.2318			44.6553			30.9690		
19	CS 7.5	1.3957	1.2962	0.85	49.7458	51.7851	1.77	4.1870	3.7890	1.15	72.5750	72.6253	1.46	49.9452	52.4831	2.41	33.1971	32.7727	0.40
20		0.3990			52.9623			2.4935			74.1073			52.7628			32.4157		
21		2.0939			52.6473			4.6864			71.1935			54.7413			32.7052		
22	CD 2.5	10.1857	12.3228	2.14	127.2219	130.6343	2.97	4.0943	4.6499	0.51	42.4406	42.5836	0.48	9.3869	13.8130	3.83	17.8750	17.6060	0.73
23		14.4725			132.0491			5.0903			43.1181			15.9697			18.1655		
24		12.3101			132.6318			4.7652			42.1920			16.0826			16.7775		
25	CD 5	9.8419	10.4837	0.70	129.5357	131.2139	1.65	3.2806	3.8164	1.01	40.7595	43.9938	2.81	6.8595	10.6875	4.38	14.5144	17.4533	2.71
26		11.2382			131.2780			3.1825			45.4500			9.7464			18.0010		
27		10.3710			132.8281			4.9860			45.7718			15.4567			19.8444		
28	CD 7.5	10.7795	10.2241	0.73	122.6669	127.2254	3.96	3.9924	4.2631	0.38	42.1200	42.8632	0.78	10.3803	11.9904	1.45	17.7662	19.2175	1.27
29		9.3991			129.1871			4.0996			42.7957			12.3988			20.0980		
30		10.4937			129.8221			4.6972			43.6738			13.1921			19.7881		

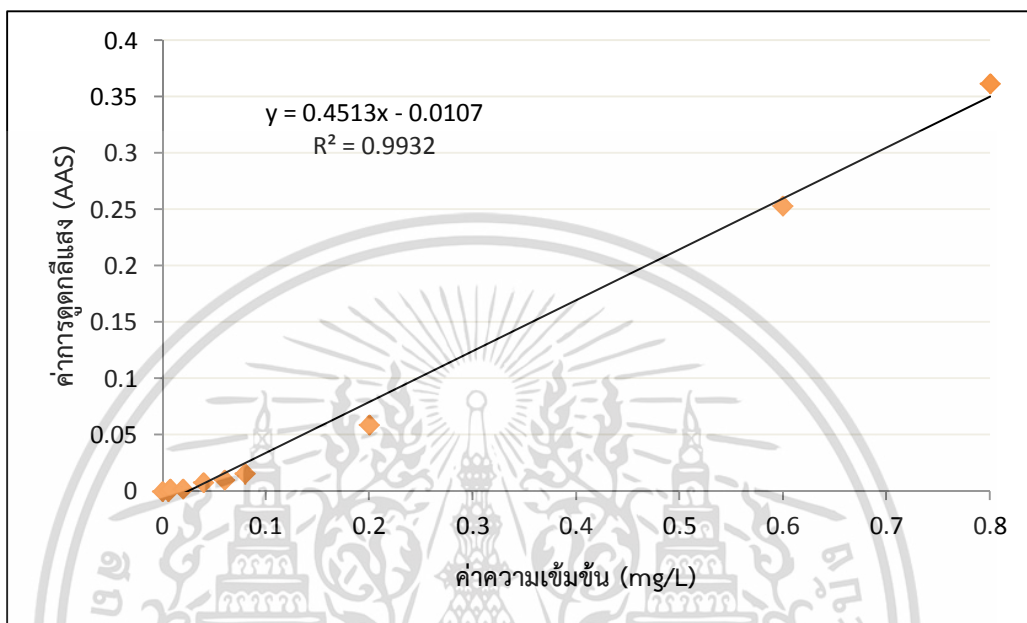
ตารางที่ ค-15 ปริมาณนิเกิลเกิดจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	65.9670	76.2060	9.09	145.6272	141.8311	3.29	3.0985	2.5306	0.51	27.3863	28.6311	1.91	0.0000	0.0000	0.00	0.1999	2.9283	2.60
2		79.3176			139.9781			2.0952			30.8291			0.0000			5.3876		
3		83.3333			139.8881			2.3981			27.6779			0.0000			3.1974		
4	SZ 2.5	32.6336	45.1943	10.92	135.0114	130.3586	8.54	3.4822	4.2260	0.71	31.0417	38.8344	7.93	0.0000	0.4000	0.69	2.2883	4.0613	1.60
5		50.5495			135.5644			4.2957			38.5614			0.0000			4.4955		
6		52.4000			120.5000			4.9000			46.9000			1.2000			5.4000		
7	SZ 5	42.9668	26.0172	14.73	108.6631	111.5536	2.70	4.8849	5.2600	0.36	32.9977	55.3805	20.79	0.0000	2.1329	3.69	1.4954	3.5311	4.32
8		16.2886			114.0202			5.5961			59.0587			0.0000			0.5996		
9		18.7962			111.9776			5.2989			74.0852			6.3987			8.4983		
10	SZ 7.5	31.5590	18.8814	10.98	94.1776	81.5275	11.70	5.5927	5.3624	0.68	76.9000	88.9264	11.89	1.7977	4.4307	2.51	3.8949	6.4624	2.55
11		12.2853			79.3048			4.5945			100.6792			4.6944			6.4922		
12		12.8000			71.1000			5.9000			89.2000			6.8000			9.0000		
13	SS 2.5	57.9956	33.5845	21.17	95.7277	100.8106	4.42	3.4937	3.6621	0.21	59.2933	69.4498	8.95	8.8840	11.7199	2.50	7.4865	9.5554	1.79
14		22.4641			102.9353			3.8938			76.1781			12.6797			10.6829		
15		20.2939			103.7689			3.5989			72.8781			13.5959			10.4969		
16	SS 5	26.2240	27.4118	25.73	60.8236	58.8558	1.71	4.0881	4.4586	0.48	75.5808	84.4494	16.76	25.3266	26.0856	3.46	11.1676	13.9422	2.49
17		53.7141			57.7077			4.2931			73.9816			23.0631			14.6765		
18		2.2975			58.0362			4.9945			103.7858			29.8671			15.9824		
19	SS 7.5	9.1752	3.1250	5.24	47.8707	42.4790	6.48	5.3855	5.8226	0.59	88.7603	104.6689	13.92	25.4313	29.3130	3.93	15.3585	14.4735	2.48
20		0.0000			44.2804			5.5849			114.5906			29.2211			11.6685		
21		0.1999			35.2859			6.4974			110.6557			33.2867			16.3934		
22	SD 2.5	25.0599	29.7501	4.07	155.8506	148.2021	7.39	4.5927	3.8305	0.66	35.6430	36.2107	0.86	0.0000	0.5999	0.60	3.0950	5.3977	2.07
23		31.8904			147.6557			3.3990			35.7893			1.1996			5.9982		
24		32.3000			141.1000			3.5000			37.2000			0.6000			7.1000		
25	SD 5	88.0127	60.2403	35.31	111.1111	111.4864	12.87	3.5842	3.3935	0.19	24.6914	24.1871	1.03	0.0000	0.3995	0.69	1.1947	4.0284	3.33
26		72.2061			124.5381			3.1958			24.8677			1.1984			7.6900		
27		20.5021			98.8099			3.4003			23.0023			0.0000			3.2003		
28	SD 7.5	30.0429	30.2376	0.49	144.9246	140.3952	4.53	3.6930	3.6299	0.70	37.4289	38.2301	0.74	0.0000	0.9660	1.67	4.0922	5.7950	2.00
29		29.8791			140.4017			2.8980			38.3731			2.8980			7.9944		
30		30.7908			135.8592			4.2987			38.8883			0.0000			5.2984		

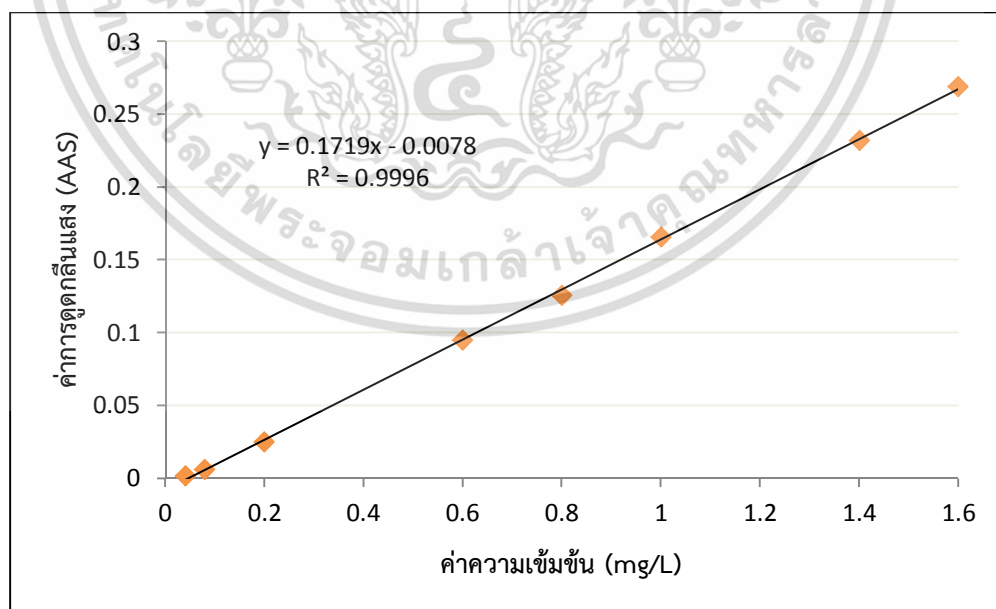
ตารางที่ ค-16 ปริมาณนิเกิลเกิดจากการสกัดลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย (mg/kg)

ลำดับ	ตัวอย่าง	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6		
		ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.	ปริมาณ	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	35.4000	33.8544	2.89	86.9000	85.1694	1.70	3.2000	1.8971	1.13	73.7000	75.3563	1.76	8.2000	9.6425	1.25	11.3000	14.0314	2.55
2		30.5237			83.4913			1.2968			77.2070			10.3741			16.3591		
3		35.6396			85.1170			1.1946			75.1618			10.3534			14.4350		
4	SZ 2.5	18.0783	17.4044	2.09	72.1135	71.1570	2.10	2.6968	2.2259	0.45	93.7875	87.9360	5.11	9.3887	8.3736	1.42	12.1854	13.1214	1.27
5		19.0741			68.7463			2.1856			84.3433			6.7554			12.6167		
6		15.0608			72.6112			1.7953			85.6772			8.9767			14.5621		
7	SZ 5	16.3673	15.4652	1.74	65.4691	65.6140	1.11	1.8962	2.3886	0.55	92.9142	94.1579	1.19	13.7725	13.2454	1.63	12.0758	11.8813	0.55
8		13.4543			64.5804			2.2922			95.2761			14.5505			11.2617		
9		16.5740			66.7924			2.9774			94.2834			11.4133			12.3065		
10	SZ 7.5	6.9596	7.3215	0.32	43.8457	47.1751	2.89	1.6902	2.3852	0.81	109.7634	113.6980	3.67	10.8371	11.7275	1.00	13.1239	12.0591	1.35
11		7.4516			48.9816			2.1858			117.0392			12.8167			12.5186		
12		7.5532			48.6981			3.2797			114.2914			11.5285			10.5347		
13	SS 2.5	12.4800	10.6821	2.17	43.0312	51.4077	7.40	6.3898	3.8264	2.31	93.5503	92.6315	8.69	21.7652	20.7317	2.90	23.1629	23.9249	1.17
14		11.2887			54.1459			1.8981			83.5165			22.9770			25.2747		
15		8.2777			57.0460			3.1914			100.8278			17.4529			23.3370		
16	SS 5	3.3936	1.6565	1.65	29.0448	29.3070	0.38	2.5951	2.7473	0.67	113.0851	105.3843	7.27	27.1484	27.4827	1.13	21.0600	26.6491	5.04
17		1.4765			29.1367			2.1656			98.6318			28.7430			28.0539		
18		0.0995			29.7394			3.4812			104.4360			26.5566			30.8335		
19	SS 7.5	0.0000	0.4664	0.81	20.5322	23.7687	4.72	4.9836	4.5931	0.39	122.9941	116.4274	8.49	33.3898	34.4185	3.18	21.4293	22.0020	4.92
20		0.0000			21.5914			4.5982			119.4522			37.9848			17.3930		
21		1.3992			29.1825			4.1975			106.8359			31.8809			27.1837		
22	SD 2.5	23.6834	24.5547	2.10	84.8406	84.6036	1.47	3.4976	2.4269	0.95	77.3459	74.5064	2.61	6.9951	10.4631	3.03	9.9930	13.4887	3.53
23		23.0263			83.0343			1.6946			73.9633			11.7624			17.0455		
24		26.9544			85.9359			2.0887			72.2101			12.6318			13.4275		
25	SD 5	25.4949	19.4157	5.38	82.2835	83.2765	2.41	4.1992	3.2304	0.85	78.0844	76.5189	1.45	7.3985	8.5572	1.10	10.7978	12.3530	1.42
26		17.4843			81.5266			2.8974			75.2323			9.5914			13.5878		
27		15.2679			86.0194			2.5946			76.2399			8.6818			12.6734		
28	SD 7.5	19.1732	22.0537	2.50	78.4901	81.0803	2.38	1.4979	1.7227	0.32	77.6912	79.4333	2.11	9.7863	9.5428	0.77	12.6822	13.5113	0.86
29		23.5816			83.1771			1.5787			78.8357			8.6828			14.4055		
30		23.4064			81.5737			2.0916			81.7729			10.1594			13.4462		

ตัวอย่างกราฟมาตรฐานสังกะสี ทองแดง



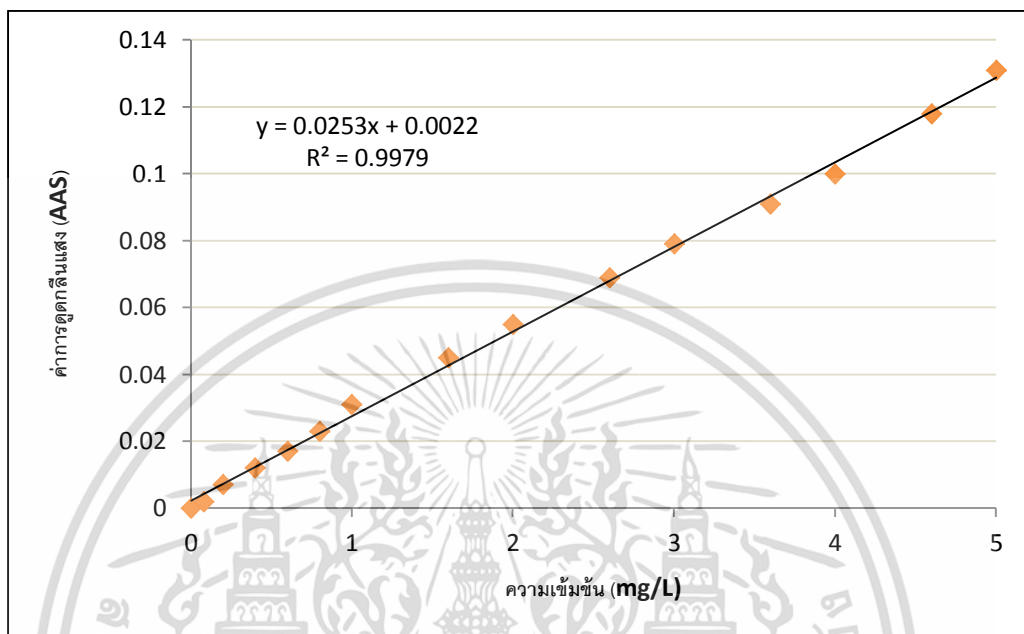
รูปที่ ค-1 กราฟมาตรฐานสังกะสี



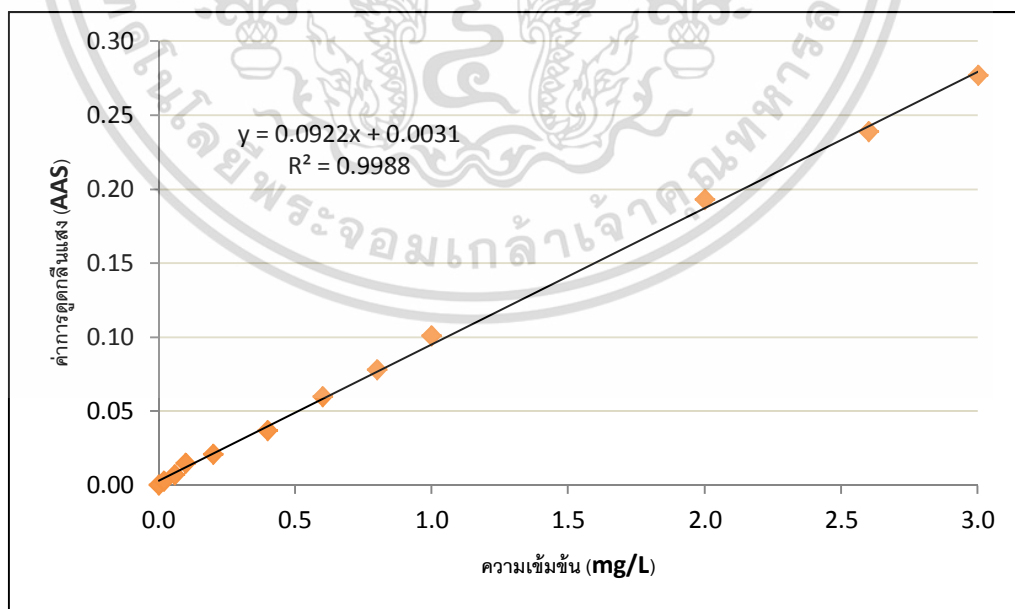
รูปที่ ค-2 กราฟมาตรฐานทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างกราฟมาตรฐานโครเมียมและนิกเกิล



รูปที่ ค-3 กราฟมาตรฐานโครเมียม



รูปที่ ค-3 กราฟมาตรฐานนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณปริมาณโลหะหนักในดิน

ตัวอย่าง : ปริมาณนิกเกิลในดินเหนียวที่ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือดินควบคุม (control) จากการสกัดแบบลำดับขั้นที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดิน

จากสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐานนิกเกิล (รูปที่ ค-3) $y = 0.0922x + 0.0031$

- รูปฟอร์มที่ 1 (Fraction1) : รูปฟอร์มที่ละลายน้ำ

เมื่อ y (ค่าการดูดกลืนแสงจาก AAS) = 0.023

จะได้ค่า x (ความเข้มข้นนิกเกิล) = 0.216 mg/L (ppm)

จากค่าความเข้มข้นของนิกเกิลทั้งหมด = 0.216 mg/L

ในสารละลาย 1000 ml มีนิกเกิลทั้งหมด = 0.216 mg/L

ถ้าสารละลาย 100 ml มีนิกเกิลทั้งหมด $\frac{0.216 \times 100 \times 1 (\text{เท่า})}{1000} = 0.0216 \text{ mg}$

น้ำหนักแห้งของตัวอย่างดิน 1.0055 g มีนิกเกิล 0.0216 mg

ถ้าดิน 1000 g (1 kg.) ปริมาณนิกเกิลทั้งหมด $\frac{0.0216 \times 1000}{1.0055} = 21.4818 \text{ mg/kg}$

- รูปฟอร์มที่ 2 (Fraction2) : รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้

เมื่อ y (ค่าการดูดกลืนแสงจาก AAS) = 0.135

จะได้ค่า x (ความเข้มข้นนิกเกิล) = 1.431 mg/L (ppm)

จากค่าความเข้มข้นของนิกเกิลทั้งหมด = 1.431 mg/L

ในสารละลาย 1000 ml มีนิกเกิลทั้งหมด = 1.431 mg/L

ถ้าสารละลาย 100 ml มีนิกเกิลทั้งหมด $\frac{1.431 \times 100 \times 1 (\text{เท่า})}{1000} = 0.1431 \text{ mg}$

น้ำหนักแห้งของตัวอย่างดิน 1.0055 g มีนิกเกิล 0.14305 mg

ถ้าดิน 1000 g (1 kg.) ปริมาณนิกเกิลทั้งหมด $\frac{0.1431 \times 1000}{1.0055} = 142.3173 \text{ mg/kg}$

- รูปฟอร์มที่ 3 (Fraction3) : รูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต

เมื่อ y (ค่าการดูดกลืนแสงจาก AAS) = 0.009

จะได้ค่า x (ความเข้มข้นนิกเกิล) = 0.064 mg/L (ppm)

จากค่าความเข้มข้นของนิกเกิลทั้งหมด = 0.064 mg/L

ในสารละลาย 1000 ml มีนิกเกิลทั้งหมด = 0.064 mg/L

ถ้าสารละลาย 100 ml มีนิกเกิลทั้งหมด $\frac{0.064 \times 100 \times 1 (\text{เท่า})}{1000} = 0.0064 \text{ mg}$

น้ำหนักแห้งของตัวอย่างดิน 1.0055 g มีนิกเกิล 0.0064 mg

ถ้าในดิน 1000 g (1 kg.) ปริมาณของนิกเกิลทั้งหมด $\frac{0.0064 \times 1000}{1.0055} = 6.3650 \text{ mg/kg}$

- รูปฟอร์มที่ 4 (Fraction4) : รูปฟอร์มที่ตรงกับออกไซด์

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } y \text{ (ค่าการดูดกลืนแสงจาก AAS)} &= 0.041 \\
 \text{จะได้ค่า } x \text{ (ความเข้มข้นนิกเกิล)} &= 0.411 \text{ mg/L (ppm)} \\
 \text{จากค่าความเข้มข้นของนิกเกิลทั้งหมด} &= 0.411 \text{ mg/L} \\
 \text{ในสารละลาย 1000 ml มีนิกเกิลทั้งหมด} &= 0.411 \text{ mg/L} \\
 \text{ถ้าสารละลาย 100 ml มีนิกเกิลทั้งหมด} &= \frac{0.411 \times 100 \times 1 (\text{เท่า})}{1000} = 0.0411 \text{ mg} \\
 \text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่างดิน 1.0055 g มีนิกเกิล} &= 0.0411 \text{ mg} \\
 \text{ถ้าในดิน 1000 g (1 kg.) ปริมาณของนิกเกิลทั้งหมด} &= \frac{0.0411 \times 1000}{1.0055} = 40.8752 \text{ mg/kg}
 \end{aligned}$$

- รูปฟอร์มที่ 5 (Fraction5) : รูปฟอร์มที่ตรงกับอินทรีย์วัตถุ

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } y \text{ (ค่าการดูดกลืนแสงจาก AAS)} &= 0.015 \\
 \text{จะได้ค่า } x \text{ (ความเข้มข้นนิกเกิล)} &= 0.129 \text{ mg/L (ppm)} \\
 \text{จากค่าความเข้มข้นของนิกเกิลทั้งหมด} &= 0.129 \text{ mg/L} \\
 \text{ในสารละลาย 1000 ml มีนิกเกิลทั้งหมด} &= 0.129 \text{ mg/L} \\
 \text{ถ้าสารละลาย 100 ml มีนิกเกิลทั้งหมด} &= \frac{0.129 \times 100 \times 1 (\text{เท่า})}{1000} = 0.0129 \text{ mg} \\
 \text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่างดิน 1.0055 g มีนิกเกิล} &= 0.0129 \text{ mg} \\
 \text{ถ้าในดิน 1000 g (1 kg.) ปริมาณของนิกเกิลทั้งหมด} &= \frac{0.0129 \times 1000}{1.0055} = 12.8294 \text{ mg/kg}
 \end{aligned}$$

- รูปฟอร์มที่ 6 (Fraction6) : รูปฟอร์มที่เหลือ

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } y \text{ (ค่าการดูดกลืนแสงจาก AAS)} &= 0.020 \\
 \text{จะได้ค่า } x \text{ (ความเข้มข้นนิกเกิล)} &= 0.183 \text{ mg/L (ppm)} \\
 \text{ความเข้มข้นนิกเกิล (ค่า } x) &= 0.183 \text{ mg/L (ppm)} \\
 \text{จากค่าความเข้มข้นของนิกเกิลทั้งหมด} &= 0.183 \text{ mg/L} \\
 \text{ในสารละลาย 1000 ml มีนิกเกิลทั้งหมด} &= 0.183 \text{ mg/L} \\
 \text{ถ้าสารละลาย 100 ml มีนิกเกิลทั้งหมด} &= \frac{0.183 \times 100 \times 1 (\text{เท่า})}{1000} = 0.0183 \text{ mg} \\
 \text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่างดิน 1.0055 g มีนิกเกิล} &= 0.0183 \text{ mg} \\
 \text{ถ้าในดิน 1000 g (1 kg.) ปริมาณของนิกเกิลทั้งหมด} &= \frac{0.0183 \times 1000}{1.0055} = 18.1999 \text{ mg/kg}
 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดัชนีทางชีวภาพ
(bioavailable index : BI)

ตารางที่ ง-1 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

ลำดับ	ตัวอย่าง	สังกะสี (30 วัน)			ทองแดง (30 วัน)			โครเมียม (30 วัน)			นิกเกิล (30 วัน)		
		BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	65.7042	63.96	3.32	42.5680	43.30	2.32	17.8430	16.97	0.86	91.2771	91.01	0.94
2		66.0426			45.9016			16.9544			91.7910		
3		60.1269			41.4369			16.1266			89.9730		
4	CZ 2.5	60.7255	57.03	3.22	39.8757	34.33	4.80	13.8706	11.66	1.91	89.4737	88.61	1.33
5		55.4992			31.5262			10.5045			87.0751		
6		54.8566			31.5877			10.6088			89.2811		
7	CZ 5	56.0530	57.04	0.89	31.1662	33.63	2.31	14.1585	13.57	0.79	86.1031	85.91	0.51
8		57.3048			35.7389			13.8658			85.3355		
9		57.7704			33.9947			12.6747			86.2961		
10	CZ 7.5	53.4969	52.41	1.53	29.0313	29.26	1.32	12.9328	12.68	0.23	81.3985	81.55	0.70
11		53.0827			30.6818			12.6294			80.9333		
12		50.6638			28.0717			12.4736			82.3067		
13	CS 2.5	49.0833	44.43	4.18	33.9960	27.10	5.98	14.3156	11.86	2.12	80.6534	76.41	3.68
14		40.9828			23.4494			10.6320			74.1728		
15		43.2181			23.8457			10.6456			74.4093		
16	CS 5	40.9933	36.81	3.95	28.8988	24.85	3.68	13.6550	12.24	1.24	60.8046	56.62	3.62
17		36.2836			23.9409			11.7283			54.4154		
18		33.1481			21.7091			11.3514			54.6441		
19	CS 7.5	34.8309	34.65	2.18	24.0756	22.22	1.61	13.5195	12.97	1.12	42.5657	40.44	2.06
20		36.7288			21.2594			13.7174			40.3159		
21		32.3837			21.3115			11.6821			38.4462		
22	CD 2.5	57.3197	58.34	1.67	32.4069	34.94	3.48	14.5211	14.88	0.70	84.2376	84.69	0.46
23		57.4301			38.9080			15.6855			84.6623		
24		60.2689			33.4956			14.4372			85.1553		
25	CD 5	58.7815	55.42	2.91	40.0485	34.40	4.89	13.4335	13.16	0.38	83.9850	84.05	0.38
26		53.8638			31.4661			12.7208			84.4680		
27		53.6139			31.6875			13.3286			83.7086		
28	CD 7.5	60.8550	55.65	4.55	30.8167	31.64	0.99	12.4344	11.94	0.45	83.6786	83.99	1.15
29		53.6346			32.7410			11.5533			85.2600		
30		52.4548			31.3544			11.8371			83.0323		

ตารางที่ ง-2 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินเหนียว

ลำดับ	ตัวอย่าง	สังกะสี (60 วัน)			ทองแดง (60 วัน)			โครเมียม (60 วัน)			นิกเกิล (60 วัน)		
		BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	C	55.8205	54.39	1.24	19.5053	21.26	1.58	6.1408	6.37	0.66	68.5569	69.86	1.26
2		53.7919			21.6970			5.8567			71.0829		
3		53.5639			22.5761			7.1114			69.9424		
4	CZ 2.5	50.8980	48.73	1.95	17.6046	16.77	0.73	5.1036	4.80	0.28	66.6356	65.63	1.07
5		47.1037			16.3798			4.7127			65.7479		
6		48.2002			16.3167			4.5721			64.5037		
7	CZ 5	48.0597	48.19	0.34	14.5386	15.35	1.81	4.4539	4.85	0.64	63.0990	62.67	0.97
8		47.9295			14.0882			4.5191			61.5625		
9		48.5690			17.4291			5.5885			63.3508		
10	CZ 7.5	42.8260	43.74	2.15	12.4222	12.52	1.33	4.5921	4.73	0.16	62.1442	62.39	1.91
11		46.1998			13.8889			4.8989			64.4092		
12		42.1978			11.2413			4.6982			60.6032		
13	CS 2.5	42.4281	39.33	3.24	12.2068	12.19	0.35	4.8647	4.80	0.12	54.8214	54.12	1.09
14		39.5910			12.5215			4.6566			54.6719		
15		35.9657			11.8271			4.8697			52.8660		
16	CS 5	33.4075	32.89	1.00	9.3299	9.44	0.56	4.9841	4.73	0.26	37.1689	37.04	0.61
17		31.7336			8.9472			4.7307			37.5720		
18		33.5193			10.0504			4.4687			36.3677		
19	CS 7.5	33.5329	33.02	2.40	7.6174	8.01	0.76	4.6349	4.46	0.25	26.2163	26.48	0.68
20		35.1155			7.5253			4.1804			25.9620		
21		30.3980			8.8786			4.5785			27.2519		
22	CD 2.5	46.9469	47.56	1.53	16.6667	17.50	0.80	5.2989	5.44	0.38	66.9976	66.62	0.38
23		46.4205			18.2708			5.8739			66.2451		
24		49.2976			17.5600			5.1498			66.6078		
25	CD 5	49.6008	49.76	1.92	18.6420	18.01	0.56	5.6717	5.22	0.51	69.6602	66.95	2.53
26		47.9247			17.5559			4.6577			66.5607		
27		51.7510			17.8469			5.3204			64.6368		
28	CD 7.5	45.8507	49.35	3.03	17.0835	17.25	0.80	5.9459	5.59	0.31	66.1701	65.68	0.42
29		51.0917			18.1214			5.3905			65.4587		
30		51.1111			16.5530			5.4359			65.4193		

ตารางที่ ง-3 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 30 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

ลำดับ	ตัวอย่าง	สังกะสี (30 วัน)			ทองแดง (30 วัน)			โครเมียม (30 วัน)			นิกเกิล (30 วัน)		
		BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	70.5746	67.70	4.00	52.3885	49.70	2.99	28.1272	27.01	1.51	88.6139	87.51	1.39
2		69.3981			46.4845			25.2903			85.9411		
3		63.1290			50.2334			27.6086			87.9626		
4	SZ 2.5	63.2619	60.76	2.37	44.9270	41.26	4.10	23.7294	20.08	3.59	83.6983	80.71	3.49
5		58.5499			42.0203			19.9682			81.5576		
6		60.4619			36.8390			16.5546			76.8699		
7	SZ 5	51.1296	47.54	4.39	44.8513	34.80	9.63	23.3130	19.34	3.69	81.9415	70.63	10.78
8		42.6376			33.8869			18.6801			69.4941		
9		48.8417			25.6627			16.0307			60.4620		
10	SZ 7.5	50.5126	44.93	5.30	36.3280	29.29	6.37	17.8436	16.47	1.51	61.3912	51.24	8.79
11		44.3008			23.9309			16.7212			46.2314		
12		39.9722			27.6245			14.8555			46.0986		
13	SS 2.5	53.2205	49.61	3.12	32.4761	27.52	4.30	18.9251	17.89	0.91	67.5096	60.28	6.26
14		47.8611			25.3019			17.2162			56.5009		
15		47.7597			24.7831			17.5154			56.8313		
16	SS 5	42.4103	44.30	3.83	28.1630	27.38	2.72	17.9208	17.36	1.26	44.8479	42.04	10.53
17		48.7067			29.6329			18.2377			50.8780		
18		41.7918			24.3546			15.9120			30.3903		
19	SS 7.5	37.8592	36.57	4.11	26.0262	24.17	1.65	17.7487	15.54	2.27	32.5195	25.85	6.04
20		39.8795			23.5952			15.6725			24.2836		
21		31.9773			22.8878			13.2069			20.7510		
22	SD 2.5	50.6908	56.97	5.72	40.6867	37.39	2.86	17.2955	16.62	1.50	82.7248	81.15	1.49
23		61.8743			35.5791			17.6620			80.9735		
24		58.3421			35.8916			14.9042			79.7565		
25	SD 5	61.6125	62.81	4.86	43.6033	40.04	3.25	19.9088	16.91	3.40	88.6760	85.55	3.14
26		68.1659			39.2837			17.6022			85.5556		
27		58.6609			37.2476			13.2154			82.4043		
28	SD 7.5	59.7260	54.50	5.06	38.6885	36.17	3.19	19.1627	17.39	1.59	81.1423	79.49	1.64
29		49.6275			32.5843			16.9370			77.8527		
30		54.1560			37.2283			16.0814			79.4610		

ตารางที่ ง-4 ดัชนีทางชีวภาพที่ระยะเวลา 60 วันหลังการปรับปรุงดินร่วนปนทราย

ลำดับ	ตัวอย่าง	สังกะสี (60 วัน)			ทองแดง (60 วัน)			โครเมียม (60 วัน)			นิกเกิล (60 วัน)		
		BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.	BI	ค่าเฉลี่ย	SD.
1	S	56.6119	55.70	1.44	33.7693	31.94	2.61	7.2712	6.99	0.34	57.3845	54.98	2.40
2		54.0365			28.9474			6.6147			52.5933		
3		56.4442			33.0897			7.0853			54.9574		
4	SZ 2.5	50.6985	49.22	1.64	23.6964	23.89	0.32	6.7772	6.52	0.25	44.6043	45.37	0.97
5		49.5112			24.2598			6.4989			46.4615		
6		47.4569			23.7182			6.2789			45.0301		
7	SZ 5	44.1721	45.22	1.07	23.4421	23.95	1.72	7.0400	6.88	0.14	41.3504	41.16	1.20
8		45.1827			22.5484			6.8367			39.8812		
9		46.3103			25.8652			6.7669			42.2535		
10	SZ 7.5	38.8301	38.82	0.01	14.0340	16.26	2.01	6.2669	6.39	0.19	28.1901	29.25	1.10
11		38.8206			16.8052			6.2973			29.1646		
12		38.8164			17.9323			6.6097			30.3907		
13	SS 2.5	34.8201	40.38	5.04	14.3804	15.82	1.25	6.1627	6.09	0.07	30.8919	32.44	1.47
14		44.6519			16.6148			6.0754			33.8184		
15		41.6585			16.4677			6.0328			32.6056		
16	SS 5	38.0679	37.56	3.10	12.3969	11.71	0.59	6.6806	7.08	0.94	17.8444	17.45	0.39
17		40.3737			11.3546			8.1537			17.4163		
18		34.2292			11.3848			6.4144			17.0744		
19	SS 7.5	28.5247	32.71	5.50	7.5868	8.84	1.82	6.7975	6.74	0.10	12.5490	14.30	2.63
20		30.6613			8.0057			6.6216			13.0283		
21		38.9398			10.9303			6.8035			17.3307		
22	SD 2.5	53.9257	54.67	1.71	29.8074	28.58	2.95	7.4528	6.86	0.51	54.2857	53.13	1.69
23		53.4645			25.2077			6.5399			51.1837		
24		56.6327			30.7157			6.5934			53.9179		
25	SD 5	54.0821	53.23	0.86	29.9573	26.09	3.43	6.9116	6.81	0.26	53.7686	52.07	1.51
26		52.3629			24.8679			7.0088			50.8728		
27		53.2577			23.4340			6.5194			51.5602		
28	SD 7.5	51.6953	52.46	1.30	22.2123	24.85	2.31	6.3655	6.38	0.02	49.7495	50.56	0.90
29		53.9589			26.4784			6.4027			51.5251		
30		51.7341			25.8733			6.3843			50.3985		

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวมินตรา ตุ่มทอง
วัน เดือน ปีเกิด	11 มิถุนายน 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 16 ซอยลาดปลาเค้า 13 ถนนลาดปลาเค้า แขวงจระเข้บัว เขตลาดพร้าว กรุงเทพฯ 10230
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 2.36 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2561 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 3.75 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	มินตรา ตุ่มทอง และชมพูนุท ไชยรักษ์. 2560. “การปรับปรุงดินปนเปื้อน สังกะสีด้วยการเติมซีพีโอไลต์และโคอะตอมไมต์.” หน้า 111-112 ใน การ ประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16. กรุงเทพฯ : สมาคม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้