รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ในการเป็นสารปรับปรุงดิน และดูดซับ-รูปทางเคมีของแคดเมียมในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบระบบโควตา

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ ชุมแสง มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

ประจำปีงบประมาณ 2560 งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัย อิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ในการเป็นสารปรับปรุงดิน และดูดซับ-รูปทางเคมีของแคดเมียมในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบระบบโควตา เป็นการศึกษาวิจัย 2 ส่วนคือการสำรวจบริบทและพฤติกรรมการใช้ปุ๋ยเคมี การปรับปรุงบำรุงดิน ในพฤติกรรมของเกษตรกรและการทดลองให้ห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาอิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่มีอิทธิพลในการปรับปรุงบำรุงดิน และประสิทธิภาพในการการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชและเปลี่ยนรูปทางเคมี/การแพร่กระจายของแคดเมียมในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบ ในความสำเร็จของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณแหล่งทุน จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2560 ผ่านงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่อำนวยความสะดวกสถานที่ทดลองและเครื่องมืออุปกรณ์ ตลอดจนเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง

ขอขอบคุณเกษตรกรผู้เพาะปลูกยาสูบ บ้านบางคลอง ตำบลปากแคว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นตำบลปากแคว กำนัน ผู้ใหญ่บ้าน ในพื้นที่ตำบลปากแคว ทุกท่าน

จันทร์เพ็ญ ชุมแสง
หัวหน้าโครงการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่ออังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 แคดเมียม	7
2.2 แหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม	8
2.3 การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม	10
2.4 ยิปซัม (Gypsum)	16
2.5 ยาสูบ (Tobacco)	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.1 สำรวจบริบทและพฤติกรรมการใช้ปุ๋ยเคมี การปรับปรุงบำรุงดิน ในพื้นที่ปลูกยาสูบ	33
3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของยิปซัมสังเคราะห์ จาก	34
โรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน	34
3.3 ศึกษาอิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ในการเป็น	34
สารปรับปรุงบำรุงดิน และประสิทธิภาพในการการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชและเปลี่ยน	
รูปทางเคมี/การแพร่กระจายของแคดเมียมในดินของพื้นที่ยาสูบ	
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	37

สารบัญ

		หน้า
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	38
	4.1 ระบบการเพาะปลูกยาสูบโควตา การใช้ปุ๋ยและผลผลิตยาสูบของเกษตรกร	38
	4.2 สมบัติของดินที่ปลูกยาสูบ	39
	4.3 การปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน	42
	4.4 การปนเปื้อนของแคดเมียมในปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยฟอสเฟต และพืช	45
	4.5 สมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง	46
	4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่แตกต่างกันตามช่วงเวลา หลังใส่ยิปซัมและแคดเมียมในดิน 3 ชนิด	48
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
	5.1 ผลการประเมินความสำเร็จของโครงการ	77
	5.2 ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง		81

UTTARADIT RAJABHAT UNIVERSITY

บทคัดย่อ

ในการประเมินสถานะธาตุอาหารพืชและปริมาณแคดเมียมในไร่ยาสูบในระบบเคมีเกษตร ต.ปากแคว อ.เมือง จ.สุโขทัย ซึ่งเป็นไร่ยาสูบในระบบโควตาแบบเคมีเกษตร ในการศึกษาสมบัติของดินและปริมาณโลหะหนักในรูปปริมาณทั้งหมดและสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ เก็บตัวอย่างดินจากแปลงยาสูบจำนวน 45 ตัวอย่าง ดำเนินการเก็บตัวอย่างก่อนการเพาะปลูกยาสูบ นอกจากนี้ได้เก็บข้อมูลเกี่ยวกับระบบการเพาะปลูกยาสูบแบบโควตา การใช้ปุ๋ยและผลผลิตยาสูบของเกษตรกร จากเกษตรกรและเจ้าหน้าที่โรงงานยาสูบ ผลการวิเคราะห์สมบัติของดิน พบว่าดินมีสภาพกรดรุนแรง (pH อยู่ในช่วง 3.83-5.45) ในขณะที่ปริมาณอินทรียวัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีปริมาณที่ต่ำ ในขณะที่ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมสูงและสูงกว่าช่วงที่เหมาะสม และพบว่าดินมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมด อยู่ในช่วง 3.27 – 5.08 mg kg^{-1} ซึ่งเป็นระดับที่เกินเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินประเทศไทย และสูงกว่าค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยอินทรีย์ พบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailability Cd) และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (total Cd) ค่อนข้างสูง

ผลจากการศึกษารูปทางเคมีและการแพร่กระจายของความเข้มข้นแคดเมียมในดินชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีการบ่มดินและการสกัดตามลำดับ โดยมีปัจจัยของการศึกษา 2 ปัจจัย คือ ชุดดินตัวแทน 3 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินทราย และความเข้มข้นของแคดเมียม 3 ระดับ (0, 5 และ 30 mg kg^{-1}) มีระยะเวลาบ่มดิน 7 ช่วง (1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน) พบว่าดินที่มีสภาพเป็นกรดทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินในดินมากกว่าดินที่มีสภาพเป็นด่าง ดังนี้ ดินทราย > ดินร่วน > ดินเหนียว จากผลการทดลองพบว่าดินที่มีค่า pH มากกว่า 6 และมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินสูงสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดี และเมื่อเรียงตามลำดับพบว่า เนื้อดินประเภทดินเหนียว ได้มากกว่าเนื้อดินประเภทดินร่วน และมากกว่าเนื้อดินทราย และจากผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการแพร่กระจายของแคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่แคดเมียมในรูปคาร์บอเนตและรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส แต่สัดส่วนการแพร่กระจายของแคดเมียมรูปของออร์แกนิกในดินจะน้อยที่สุด รูปทางเคมีและการแพร่กระจายของความเข้มข้นแคดเมียมในดินชนิดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมเข้าสู่ดินและระยะเวลาที่แคดเมียมตกค้างอยู่ในดินมีอิทธิพลต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้นแคดเมียมในดิน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กล่าวได้ว่าถ้าความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีมากจะส่งผลให้แคดเมียมรูปสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพมากขึ้นเช่นกัน

คำสำคัญ: ไร่ยาสูบ เคมีเกษตร ธาตุอาหารพืช แคดเมียม สมบัติของดิน

Abstract

The status of plant nutrients and cadmium of the soils in tobacco farms under agrochemicals System in Tambon Pak-khware, Muang districts, Sukhothai province.The tobacco farm in agrochemical quota system, was evaluated from soil properties and concentrations of heavy metals in chemical form total and bioavailability. Soil samples were collected at 45 sample plots tobacco samples before planting tobacco. In addition to collecting information about the cultivation of tobacco quotas and the use of fertilizers, yield of tobacco farmers, tobacco farmers and officials. The analysis of soil properties soil is strongly acidic (pH in the range 3.83 to 5.45). While the amount of organic matter, phosphorus and exchangeable potassium with low doses, Exchangeable Ca and Mg at optimal levels and above optimal range. Total cadmium in the range of 3.27 - 5.08 mg kg^{-1}, this was more than the basic criteria of the cadmium-contaminated in soil of Thailand. But higher than reference the European Economic Community (EEC) Maximum Permissible (MP), Consistent with the results analysis of fertilizer and organic fertilizers was found to be contaminated with bioavailability Cd and total Cd is quite high.

The absorption of cadmium was greater in clay soil, was greater than in loamy soil and sandy soil, respectively. The chemical and physical properties of soil had an effect on cadmium absorption. Cadmium could be found in the free form in the acidic soil solution. Sorption of cadmium could be found in the soil when pH was greater than 6. The solubility of cadmium in acidic soil depended on the presence of Fe and Mn oxides. Higher absorption of cadmium was found in soil which had higher cation-exchange capacity. Cadmium distribution was highest for exchangeable ion compared with the carbonated cadmium form which in turn was lower than the oxide of Fe and Mn form. In addition, cadmium distribution in the cation exchange form would be found the highest proportion. The lowest portion was found with the Fe and Mn forms. The proportion of cadmium distribution in the various chemical forms was dependent on the cadmium concentration in soil and the time interval of accumulation.

Keywords: Tobacco farms, Agrochemicals, Plant Nutrient Status, Cadmium, soil properties

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ทั่วโลกให้ความสำคัญต่อปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากแคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้านทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม มีปริมาณไม่น้อยกว่า 20% ของการผลิตทั้งหมดต่อปีทั่วโลก ด้านอุตสาหกรรม แคดเมียมจำนวนมากมักถูกนำมาใช้ในการชุบโลหะผสมกับโลหะอื่นๆ เป็นส่วนประกอบรถยนต์ แบตเตอรี่ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสี ส่วนด้านการเกษตรกรรม แคดเมียมถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารกำจัดวัชพืช สารกำจัดเชื้อรา และปุ๋ยฟอสเฟต (Dunnick and Fowler, 1988) ปุ๋ยฟอสเฟตจะมีแคดเมียมปะปนอยู่ในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งของหินฟอสเฟต ตลอดจนการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตที่มีราคาถูกหรือปุ๋ยฟอสเฟตปลอมที่มีกระบวนการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานและไม่ได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพเพื่อรับรองมาตรฐานนั้น จะมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของแคดเมียมในระบบนิเวศดินได้สูง (Booth, 2005; Stephens and Calder, 2005) นอกจากนั้นการใช้ประโยชน์จากกากตะกอนน้ำเสียของชุมชนและอุตสาหกรรมมาทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์ เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชเป็นอีกเส้นทางหนึ่งที่จะทำให้แคดเมียมมีการปนเปื้อนในระบบนิเวศดินและสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น (Alloway, 1990; Naidu et al., 1997) เพราะโดยทั่วไปในกากตะกอนน้ำเสียจะมีแคดเมียมปนเปื้อนถึง 4.2 mg kg^{-1} (Liphadzi and Kirkham, 2006) นอกจากนั้นสภาพธรรมชาติทางธรณีวิทยาก็เป็นสาเหตุที่สำคัญของการปนเปื้อนแคดเมียม โดยเกิดจากกระบวนการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติในพื้นที่นั้นๆ

จังหวัดสุโขทัย เป็นแหล่งปลูกยาสูบที่สำคัญในเขตภาคเหนือตอนล่าง โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 40,000 ไร่ใน อ.ศรีสำโรง อ.เมือง และ อ.สวรรคโลก การปลูกยาสูบในพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะแบบเคมีเกษตร (agrochemicals) มาตั้งแต่สมัยบรรพบุรุษ ยาสูบเป็นพืชควบคุมภายใต้พระราชบัญญัติยาสูบควบคุมดูแลโดยกรมสรรพสามิต ใช้ใบเป็นผลผลิตในอุตสาหกรรมบุหรี่ มีเกษตรกรประมาณกว่า 10,000 ราย และที่สังกัดโรงงานยาสูบ 6,000 ราย ผลิตใบยาสูบให้โรงงานยาสูบและบริษัทส่งออกตามโควตาซึ่งบริษัทส่งออกมีความต้องการใบยาเบอร์เลย์ จากจังหวัดสุโขทัยเป็นอันดับหนึ่งของประเทศไทย โดยดำเนินการซื้อผ่านระบบโควตาผ่านโรงงานยาสูบ โดยการจัดสรรโควตา/แจ้งสภาวะการผลิตใบยา (ความต้องการใบยา) กำหนดราคารับซื้อ/ติดตามแนะนำส่งเสริมการผลิตใบยาทุกขั้นตอน การเพาะปลูกยาสูบ เกษตรกรผลิตตามโควตาของโรงงานยาสูบที่มีราคา

แน่นอน/ทราบราคาก่อน ผลตอบแทนต่อไร่ค่อนข้างดี/ราคาสูง (โควตาโรงงานยาสูบ) โดยเพาะปลูกในพื้นที่ดินเดิมติดต่อกันเป็นเวลานานมากกว่า 50 ปี เหตุผลที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงพื้นที่เพาะปลูกเพราะการถือครองที่ดินน้อย ยาสูบเป็นพืชที่มีข้อจำกัดในเรื่องของสมบัติดินที่เหมาะสม ต้องเป็นดินร่วนปนทรายดินร่วนและดินร่วนปนดินเหนียวและยาสูบเป็นพืชที่ต้องการน้ำน้อย ดังนั้นเกษตรกรจึงเน้นกรรมวิธีการเกษตรเป็นแบบเกษตรเคมี ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี และสารกำจัดศัตรูพืช (ผ่านระบบโควตาของโรงงานยาสูบ) แต่ปัจจุบันพบว่าใบยาสูบมีใบขนาดใหญ่และยาวแต่ไม่มีน้ำหนัก อาจเนื่องจากความเสื่อมโทรมของดินที่มีรูปแบบการเกษตรแบบเคมีเกษตร ขาดการปรับปรุงบำรุงดิน และการปลูกพืชเชิงเดี่ยวมายาวนาน อีกทั้งปริมาณน้ำฝนและฝนที่ตกนอกฤดูฝน ทำให้เกษตรกรส่วนใหญ่มีภาวะเป็นหนี้ ธกส. กองทุนหมู่บ้าน และหนี้นอกระบบสูง (จากการสัมภาษณ์) และจังหวัดสุโขทัยมีสถิติผู้ป่วยจากการได้รับสารเคมีทางการเกษตรสูงเป็นอันดับ 3 ของประเทศ สอดคล้องกับรายงานของกองอาชีวอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ปี พ.ศ. 2540 พบว่าจังหวัดสุโขทัยมีเกษตรกรที่อยู่ในกลุ่มเสี่ยงและไม่ปลอดภัยสูงสุด และเกษตรกรส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรชาวไร่ยาสูบ เป็นที่ทราบกันดีว่ายาสูบเป็นพืชที่ดูดซับแคดเมียมได้ดี และการทำการเกษตรที่เน้นเคมีเกษตรติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้ดินเปรี้ยวมีสภาพความเป็นกรดสูง และทำให้มีการปนเปื้อนของธาตุพิษ เช่น ตะกั่ว สารหนู และโดยเฉพาะแคดเมียม ที่ถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารกำจัดวัชพืชสารกำจัดเชื้อรา และปุ๋ยฟอสเฟต (Dunnick and Fowler, 1988) ปุ๋ยฟอสเฟตจะมีแคดเมียมปะปนอยู่ในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งของหินฟอสเฟตตลอดจนการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตที่มีราคาถูกหรือปุ๋ยฟอสเฟตปลอมที่มีกระบวนการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานและไม่ได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพเพื่อรับรองมาตรฐานนั้น จะมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของแคดเมียมในระบบนิเวศดินได้สูง (Booth, 2005; Stephens and Calder, 2005) นอกจากนั้นการใช้ประโยชน์จากกากตะกอนน้ำเสียของชุมชนและอุตสาหกรรมมาทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชเป็นอีกเส้นทางหนึ่งที่จะทำให้แคดเมียมมีการปนเปื้อนในระบบนิเวศดินและสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น (Alloway, 1990; Naidu et al., 1997)

“ยิปซัมสังเคราะห์” เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตนี้จะมีกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เพื่อป้องกันการเกิดมลพิษ ซึ่งจุดนี้ได้เกิดผลพลอยได้หลายอย่าง รวมถึง “ยิปซัมสังเคราะห์” ที่ผลิตได้กว่า 2 ล้านตันต่อปี“ยิปซัมสังเคราะห์” จะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ถึง 95% ซึ่งอุตสาหกรรมเกษตรในต่างประเทศ ได้มีการใช้ยิปซัมสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลายในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์และใช้เป็นสารปรับปรุงดิน สำหรับพืชเศรษฐกิจ ซึ่งทำให้ผลผลิตต่อไร่เพิ่มสูงขึ้น ความต้องการยิปซัมสังเคราะห์มีเพิ่มขึ้นทั่วโลก โดยในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา สหพันธรัฐเยอรมัน บราซิล และอัฟริกาใต้ ได้มีการประยุกต์นาเอา

เอฟจีดี ยิปซัม ไปใช้ในการเกษตรในรูปของปุ๋ยผสมโดยใช้ผสมกับแม่ปุ๋ยเพื่อเป็นสารปรับปรุงดิน เป็นแหล่งให้สารอาหารเสริมต่อพืชเพราะเป็นแหล่งสำคัญในการให้แคลเซียม และซัลเฟอร์ ตลอดจนใช้ทดแทนยิปซัมธรรมชาติและปูนไลม์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เอฟจีดี ยิปซัมสามารถแก้ปัญหาความเป็นพิษของอลูมิเนียมไอออน (Al_3^+) ในดิน ถ้ามีปริมาณอลูมิเนียมไอออน (Al_3^+) สูง รากพืชจะเจริญเติบโตไม่ดี การใช้เอฟจีดี ยิปซัมทำให้พืชมีระบบรากที่แพร่กระจายในดินมากขึ้น พืชสามารถใช้ธาตุอาหารและน้ำในดินได้มากขึ้น และยิปซัมยังช่วยให้ดินมีโครงสร้างแข็งแรงขึ้น ทำให้เกิดการพังทลายของดินลดลง ประเทศไทยมีการผลิตทรัพยากรแร่ยิปซัมธรรมชาติ (ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในภาคอุตสาหกรรม) ปีละมากกว่า 8 ล้านตัน โดยนำไปใช้ในประเทศราว 2.5 ล้านตันเท่านั้น จากสภาพปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ของสภาพความเป็นกรดจัดของดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบ อีกทั้งมีการตกค้างของสารพิษกลุ่มโลหะหนักที่เกิดจากการเกษตรแบบเคมีเกษตรภาคใต้ระบบโควตา มาอย่างยาวนาน และคงเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทางรัฐบาลสนับสนุนให้เกษตรกรในพื้นที่ทำการเพาะปลูกอย่างต่อเนื่องในอนาคต ที่ไม่สามารถหาทางหลีกเลี่ยงได้ การปรับปรุงสมบัติดินเป็นวิธีการหนึ่งในการช่วยลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมได้ ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน ได้แก่ ความเป็นกรดด่างของดิน (Soil pH) ค่าศักดิ์รีดอกซ์ และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (Organic matter: OM) ซึ่งสมบัติดินเหล่านี้เป็นปัจจัยความคุมการละลาย รูปทางเคมีและการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินไปสู่โซ่อาหารและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ การใช้ยิปซัมเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินหรือโลหะหนักอื่นๆได้ ซึ่งในประเทศไทยเองมีนักวิชาการหลายท่านได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากยิปซัมในกาบำบัดโลหะหนัก ดังเช่น การทดลองของยุทธ์ดนัย ยอดทองดี (2555) ที่ได้ทำการศึกษาการกักเก็บโลหะหนักในพืชที่ปลูกในดินที่ผสมเอฟจีดียิปซัม พบว่า ต้นคะน้ามีการดูดซึมโลหะหนักเข้าไปในปริมาณน้อยมาก ส่วนถั่วเขียวได้ศึกษาในเมล็ดถั่วเขียว พบปริมาณโลหะ ทองแดง และตะกั่ว ถูกเก็บสะสมไว้ในเมล็ดในปริมาณที่ไม่สูงมาก และพบในปริมาณที่ไม่เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้มีได้ในอาหาร ในขณะที่ตรวจไม่พบ แคดเมียม โครเมียม นิเกิล สารหนู และปรอท ในพืชทั้งสองชนิด

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจจะทำการวิจัยและหาทางแก้ไขปัญหาในพื้นที่อย่างต่อเนื่อง และร่วมกับเกษตรกรในพื้นที่ โรงงานยาสูบในจังหวัดสุโขทัย รวมถึงภาคส่วนของ อปต.ปากแคว ได้มีการจัดประชุมเสวนาแนวทางรอดและการแก้ไขปัญหาการเพาะปลูกยาสูบที่มีข้อกำหนดในเรื่องของยาสูบที่ปลอดภัย ผ่าน GAP ที่กำหนดผ่านกลไกของกระทรวงการคลัง กรมโรงงานยาสูบ ทำให้เกษตรกรไม่สามารถแก้ไขปัญหาด้วยตนเองได้ จึงเกิดเป็นแนวทางโครงการวิจัย “อิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ในการเป็นสารปรับปรุงดินและดูดซับ-รูปทางเคมีของแคดเมียมในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบระบบโควตา” ทั้งต้นทุนของยิบซัมสังเคราะห์ เป็นวัสดุที่หาง่ายในจังหวัดใกล้เคียงราคาถูก เมื่อเทียบกับการนำโดโลไมท์

ปูนขาว หรือวัสดุปรับปรุงดินอื่นๆ ที่เกษตรกรสามารถมาใช้ในพื้นที่ได้ แต่เนื่องจากถ่านหินที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในแหล่งต่างๆ ย่อมมีสภาพแวดล้อมในการเกิดแตกต่างกัน จึงมีการปนเปื้อนของปริมาณธาตุโลหะหนักและปริมาณธาตุอาหารเสริมอยู่ในถ่านหินที่แตกต่างกัน ดังนั้น US Environmental Protection Agency (USEPA) ได้ให้คำแนะนำถึงการนำยิปซัมมาประยุกต์ใช้ทางด้านเกษตรกรรม ควรพิจารณาความบริสุทธิ์ของยิปซัมที่นำมาใช้ตลอดจนปริมาณโลหะที่มีปริมาณน้อย (Trace metal) ที่เป็นอันตรายต่อพืชและผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม เช่น คุณภาพน้ำผิวดินและคุณภาพน้าใต้ดิน ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้เบื้องต้นพบว่า ยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีศักยภาพสูงที่สามารถนำมาใช้ได้ในการเป็นวัสดุปรับปรุงดิน ดังนั้นควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในประสิทธิภาพในลดปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในพื้นที่ยาสูบ จึงควรศึกษาอิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียม และการสะสมแคดเมียม โดยทำการวิจัยผลของการปรับปรุงดินโดยใช้ยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียม ผลต่อการเคลื่อนย้ายและสะสมแคดเมียมในพืช เพื่อความรู้และข้าใจในกระบวนการเปลี่ยนรูปของแคดเมียมในดิน เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีวิธีการบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม รวมถึงใช้เป็นรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดแคดเมียมในดินการเกษตรที่มีความปลอดภัย เป็นต้นแบบในการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่จริง ผู้วิจัยคาดหวังว่าผลงานชิ้นนี้จะช่วยให้การปลูกยาสูบได้ปริมาณและคุณภาพเป็นที่น่าพอใจ และคงรักษาความมั่นคงของพืชเศรษฐกิจในท้องถิ่นและพืชส่งออกได้อย่างยั่งยืนนั้น อีกทั้งเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานแม่เมาะ ช่วยลดโลกร้อนและถือเป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์แหล่งแร่ยิปซัมธรรมชาติให้ใช้ประโยชน์ได้อย่างยั่งยืน ตลอดจนเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจของประเทศได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

(1) เพื่อสำรวจบริบทและพฤติกรรมการใช้ปุ๋ยเคมี การปรับปรุงบำรุงดิน และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการและความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดและสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของแคดเมียมที่ในพื้นที่เพาะปลูกยาสูบในระบบโควตา

(2) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของยิปซัมสังเคราะห์ จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน

(3) ศึกษาอิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ในการเป็นสารปรับปรุงบำรุงดิน และประสิทธิภาพในการการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชและเปลี่ยนรูปทางเคมี/การแพร่กระจายของแคดเมียมในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบระบบโควตา

(4) เพื่อร่วมกันหาแนวทางการเพาะปลูกยาสูบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และการมีส่วนร่วมในปรับปรุงดินเสื่อมโทรมในพื้นที่เพาะปลูกยาสูบแบบโควตา ในรูปของพหุภาคีเครือข่าย เกษตรกร โรงงานยาสูบ และหน่วยงานวิชาการ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ด้านพื้นที่ พื้นที่ศึกษา ได้แก่ พื้นที่ปลูกยาสูบ ตำบลปากแคว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย

ด้านเนื้อหา

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการใช้ยิปซัมปรับปรุงดินต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมและการดูดซึมแคดเมียมของยาสูบ โดยวิจัยอิทธิพลของยิปซัมดังนี้

วิจัยการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของยาสูบ ได้แก่ ใบ ลำต้น และ ราก

วิจัยผลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้งหมด 6 รูป ได้แก่ รูปอิสระในสารละลายดิน (water soluble), รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable), รูปคาร์บอเนต (carbonate-bound), รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn oxide-bound) รูปอินทรีย์ (organic matter-bound) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (residue)

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

(1) ยิปซัม ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ยิปซัมจากกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

(2) แคดเมียม ที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้แคดเมียม คลอไรด์ ($CdCl_2$) 99.5% ชนิด A.C.S grade ที่ผลิตโดยบริษัท CARLO ERBA ทำการชั่งน้ำหนักสารประกอบ $CdCl_2$ ให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5 และ 30 mg kg^{-1}SDW (soil dry weight)

1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคดเมียม

2.1.1 คุณสมบัติของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุในกลุ่มโลหะหนักที่อยู่ในหมู่ IIB ของตารางธาตุพีริออดิค (periodic table or element) มีสัญลักษณ์ทางเคมีในตารางธาตุคือ Cd จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับสังกะสีและปรอท มีเลขอะตอม (atomic number) 48 มีน้ำหนักอะตอม (atomic weight) 112.40 มีความหนาแน่น 8.65 ที่ 20 °C มีจุดหลอมเหลว 321 °C มีจุดเดือด 765 °C และเป็นธาตุที่หายาก (Yu, 2001; Dart, 2004) แคดเมียมมีสีขาวฟ้า วาวแสง สามารถบิดโค้งงอได้และถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็กๆ แคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ช้าๆ ในอากาศที่มีความชื้นจะทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปออกไซด์ (CdO) แคดเมียมในธรรมชาติจะรวมตัวอยู่กับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟต์ แคดเมียมออกไซด์ หรือแคดเมียมคาร์บอเนต (Wedow, 1973) แคดเมียมสามารถละลายได้ดีในกรดไนตริก (nitric acid) และละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดไฮโดรคลอริค (hydrochloric acid) จากคุณสมบัติการละลายได้ดีในกรดอ่อนของแคดเมียม จึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อรับเข้าไป สารประกอบแคดเมียม เช่น แคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) และแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2$) เป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายได้ดีในน้ำ นอกจากนี้แคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้โดยเฉพาะเมื่อรวมกับไซยาไนด์ (cyanides) และ อะมีน (amines) แคดเมียมในดินอยู่ในสภาพละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ โดยอาจจะอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน (complex ion) เช่น แคตไอออน ($CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$) แอนไอออน ($CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$) และ ในรูปสารประกอบ เช่น CdO หรือ $CdCO_3$ หรืออาจอยู่รวมกับฟอสเฟตได้ เช่นกัน (ศุภมาศ, 2539) ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียมจะมีแตกต่างกัน

แคดเมียมเกิดจากการสลายตัวของหินและแร่ในธรรมชาติเราจะพบโลหะหนักแคดเมียมในปริมาณน้อย โดยทั่วไปจะพบแคดเมียมที่พื้นผิวโลกประมาณ 0.1 - 0.2 mg kg^{-1} (Massaro, 1997; WHO, 1993) โดยเป็นองค์ประกอบของหินและมักปนอยู่กับสินแร่สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง (Massaro, 1997; WHO, 1993; Yu, 2001)โดยอยู่ในสินแร่ grunockite ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และ สินแร่ otavite ในรูปของแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) โดยพบปริมาณแคดเมียมมากที่สุดประมาณร้อยละ 0.3 - 1.0 ในสินแร่สังกะสี (Massaro, 1997; WHO, 1993; Yu, 2001) และจากขั้นตอนการถลุงแร่จากเหมืองแร่สังกะสีจะได้แคดเมียมเป็นผลพลอยได้ใน

อัตราส่วน 3 ตันต่อ 1,000 ตันของสังกะสีบริสุทธิ์ (ทัศนีย์, 2543) ดังนั้นในการทำเหมืองสังกะสีจะได้แคดเมียมซึ่งเป็นผลพลอยได้ การนำเอาแคดเมียมมาใช้ทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ น้ำ และในดินจะอยู่ร่วมกับสังกะสีเสมอทำให้เกิดการปนเปื้อนในพืชและห่วงโซ่อาหาร

2.1.2 การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์

เนื่องจากคุณสมบัติของแคดเมียมที่ดีหลายอย่างจึงมีการนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมและการเกษตร (ชัยวัฒน์, 2525) ในด้านอุตสาหกรรมแคดเมียมและเกลือของแคดเมียมจำนวนมากมักถูกนำมาใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นำมาผสมกับโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม ปรอท แมกนีเซียม นิกเกิล ทำเป็นโลหะผสม อัลลอยด์ ซึ่งนำไปทำเป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องป้องกันไฟ เบ้าหลอม ส่วนประกอบรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้ทำเป็นแบตเตอรี่ นิกเกิล-แคดเมียม (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2532) ในแถบทางตะวันตกของโลก ในปี 1990 มีการใช้ Ni-Cd batteries ถึง 9,100 ตันแคดเมียมต่อปี โดยใช้ในการผสมในการผลิตยางรถยนต์เพื่อให้ทนความร้อนทำ และทำหน้าที่เป็น stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีทาบ้าน สีชุบโลหะ หมึกพิมพ์ สีทำ แก้ว กระดาษ สิ่งทอ เป็นต้น ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับอุปกรณ์เซลสุริยะ ใช้ในงานทางด้านการแพทย์และทันตแพทย์ ด้านเกษตรกรรมแคดเมียมถูกนำมาเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารฆ่าวัชพืช (herbicides) สารฆ่าเชื้อรา (fungicides) และปุ๋ยฟอสเฟตที่วัตถุดิบมีการปนเปื้อนแคดเมียม (BEL, 2002; Dunnick and Fowler, 1988) จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แคดเมียมเข้ามามีบทบาทมากมายในสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและมนุษย์

2.2 แหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม มี 2 เส้นทาง คือ จากแหล่งที่เกิดจากธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากการระเบิดของภูเขาไฟ ซึ่งจะปลดปล่อยละอองไอของแคดเมียมจำนวนมากสู่บรรยากาศ ตลอดจนการชะของฝนจนเกิดการพังทลายของหินต้นกำเนิด และแหล่งกำเนิดแคดเมียมที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งมักก่อให้เกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณที่มากกว่าธรรมชาติ มักมาจากการถลุงแร่ อุตสาหกรรม การหลอม และเผาโลหะ อุตสาหกรรมแก้ว พลาสติก ปุ๋ย ซึ่งจะทำให้เกิดการปนเปื้อนในดิน แหล่งน้ำจืด น้ำทะเล และบรรยากาศในระดับสูง (Krishna Murti, et al., 1987) มักจะพบแคดเมียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำทิ้งบางครั้งมีปริมาณสูงถึง 100 mg kg^{-1} ในน้ำหนักแห้งซึ่งตะกอนเหล่านี้จะนำไปสู่การปนเปื้อนในดินที่ใช้ในการเกษตรได้ (Purves, 1977) แคดเมียมสามารถเคลื่อนย้ายสู่อากาศ ดิน และลงสู่แหล่งน้ำ เมื่อคนและสัตว์บริโภคพืชหรือดื่มน้ำจะได้รับแคดเมียมเข้าไปสะสมไว้และสามารถถ่ายทอด สะสม และเพิ่มขึ้นได้ในกระบวนการห่วงโซ่

อาหาร คนที่ได้รับแคดเมียม จากการทำงานโดยการสูดเอาไอระเหยของแคดเมียมซึ่งส่วนใหญ่มาจากการทำเหมืองและการหลอมโลหะและการสูดควันบุหรี่รวมไปถึงการรับเข้าสู่ร่างกายโดยการกินอาหารและดื่มน้ำที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ ซึ่งแหล่งกำเนิดแคดเมียมที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หลักๆ สามารถจำแนกได้ดังนี้

(1) จากอุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี (ได้แก่ การทำเหมือง การหลอมและถลุง) อุตสาหกรรมแคดเมียม ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จะปล่อยฝุ่น ไอ (fume) น้ำเสีย กากตะกอน (sludge) ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

(2) จากโรงงานชุบโลหะแคดเมียม ซึ่งของเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมีแคดเมียม ประมาณ 100 – 500 mg kg^{-1} และมีโลหะหนักอื่นๆ รวมทั้งไซยาไนด์และสารเคมีอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย

(3) แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดเป็นตัวเคลือบผิวของโลหะอื่นๆ ตัวอย่างเช่น เหล็ก และเหล็กกล้า เพราะแคดเมียมสามารถต่อต้านการผุกร่อนได้ดีมากและยังทนทานการกัดกร่อนโดยสารละลายเบสได้ด้วย ดังนั้นพวกอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้านี้จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย กากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

(4) จากการเผาของเสีย (incineration) การเผาของเสียที่มีแคดเมียมประกอบอยู่ เช่น พลาสติก เม็ดสีโลหะเคลือบ เศษเหล็ก เป็นต้น จะปล่อยแคดเมียมออกมาในรูป cadmium aerosols เช่น cadmium oxide (CdO)

(5) จากยางรถยนต์ที่สึกหรอ ยางรถยนต์จะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20 –90 mg kg^{-1} โดยเป็นสิ่งเจือปน (impurity) ใน zinc oxide ซึ่งเป็นสารรักษาความเร่ง และการสึกหรอจากการเสียดสีทำให้แคดเมียมปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมอีกเส้นทางหนึ่ง

(6) จากปุ๋ยฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟตมีแคดเมียมปนอยู่ เนื่องจากหินฟอสเฟตที่เป็นวัตถุดิบมีแคดเมียม ประมาณ 2 – 170 mg kg^{-1} มีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน เพราะ cadmium phosphate ละลายน้ำได้น้อย และส่วนที่ไม่ละลายพืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน แต่ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียร่วมด้วย แคดเมียมจะละลายได้มากขึ้นเนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนียเป็นไอออนที่ละลายน้ำได้ คือ $Cd(NH_3)_2^{+2}$ และ $Cd(NH_3)_4^{+2}$

(7) จากการใช้ถ่านหิน และ heating oil แคดเมียมเป็นธาตุปริมาณน้อยใน fossil fuels ดังนั้น เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ แคดเมียมจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของไอและเถ้า ปริมาณแคดเมียมในถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25 – 5 mg kg^{-1} ถึงแม้จะไม่ทราบเปอร์เซ็นต์ที่แน่นอนของแคดเมียมที่ถูกปล่อยออกจากปล่อง หรือส่วนที่ถูกขจัดโดย scrubber หรือส่วนที่ถูกทำให้ตกตะกอน (precipitated) แต่พบว่าในเถ้าจากถ่านหิน (coal ash) มีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 150 mg kg^{-1} ส่วน

ความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยใน heating oil โดยประมาณ 0.3 mg kg^{-1} และจากการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศจีนได้ทำให้เกิดมลพิษแคดเมียม 312-315 mg kg^{-1} (Liao and Jiang, 1999)

(8) จากการตกตะกอนของน้ำทิ้ง (sewage sludge) หรือที่เรียกว่า กากตะกอนน้ำเสีย ได้จากโรงงานกำจัดน้ำเสียจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยเฉพาะแคดเมียมในปริมาณความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูง ปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสีย จำนวน 56 แห่งในประเทศสวีเดน มีค่าเฉลี่ย 15.6 mg kg^{-1} และการใช้กากตะกอนเหล่านี้เพื่อเป็นปุ๋ยอินทรีย์ และเป็นแหล่งที่ให้ธาตุอาหารพืช จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน ได้มีการคำนวณว่าจากการใช้กากตะกอนน้ำเสีย (ที่มี Cd ประมาณ 20 mg kg^{-1} หรือมากกว่า) จำนวน 2 – 3 ตัน/ปี ใส่ลงในพื้นที่เพาะปลูกที่ยังไม่มีปัญหามลพิษ (unpolluted agriculture soils ซึ่งมี Cd < 0.1 – 0.5 mg kg^{-1}) จะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินเพาะปลูกนี้เป็น 1.2 – 6 mg kg^{-1} และพบว่าพืชบางชนิด เช่น ข้าว ข้าวสาลี สามารถดูดซึมแคดเมียมจากดินได้ดี

(9) จากการสึกกร่อนของสังกะสี (corrosion of zinc) แคดเมียมเป็นสิ่งเจือปนในสังกะสี เมื่อโลหะหรือภาชนะที่ชุบสังกะสีเกิดการสึกกร่อนแคดเมียมก็จะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

(10) ยาสูบ (tobacco) เป็นพืชที่สามารถดึงดูดแคดเมียมที่มีอยู่ในดินและแคดเมียมจะถูกสะสมไว้มากบริเวณใบยาสูบ ซึ่ง คะนึงนิจ และ ฉันทนา (2549) ได้กล่าวไว้ว่าในใบยาสูบจะมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 0.5 - 3.0 μg g^{-1} ของใบยาสูบ นอกจากนั้นยังพบว่าการสูบบุหรี่หนึ่งซองต่อวัน อาจมีแคดเมียมดูดซึมเข้าสู่ร่างกายประมาณ 1 - 4 μg ในขณะที่ปรีชา และคณะ (2550) พบว่าแคดเมียมในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยาสูบ จำนวน 13 ตัวอย่าง ครอบคลุมทั้งบุหรี่ชนิดซองที่ผลิตขึ้นในประเทศและที่ผลิตในต่างประเทศรวมถึงยาสูบพื้นเมือง มีปริมาณแคดเมียมอยู่ในช่วง 1.05 – 1.82 μg เนื่องจากยาสูบเป็นพืชที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้เป็นอย่างดี และการสูบบุหรี่อาจมีแคดเมียมดูดซึมเข้าสู่ร่างกายหรือออกสู่บรรยากาศ อาจจะนำมาซึ่งผลกระทบและความเสี่ยงต่อการเป็นเกิดโรคมะเร็งในประชาชนที่สูบบุหรี่ได้ (Lugon-Moulin et al., 2004)

2.3 การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนแคดเมียมในระบบนิเวศดินอาจมาจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ ปริมาณแคดเมียมในดินที่มีแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติมีปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันไปเช่น หินตะกอนมีแคดเมียมอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 mg kg^{-1} ซึ่งปริมาณแคดเมียมนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของวัตถุต้นกำเนิดดินที่มีการย่อยสลายมาจากหินชนิดใด เช่น ดินที่สลายจากหินอัคนีมีแคดเมียมประมาณ 0.1 - 0.3 mg kg^{-1} ดินที่สลายจากหินแปรมีแคดเมียม 0.1 - 1 mg kg^{-1} และดินที่

สลายจากหินตะกอนมีแคดเมียมประมาณ 0.3 - 11 mg kg^{-1} (ศุภมาศ, 2539; Alloway, 1990) ขณะที่แคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่และการถลุงแร่สังกะสี และตะกั่ว การปลดปล่อยแคดเมียมจากกิจกรรมอุตสาหกรรมแคดเมียม โดยปล่อยฝุ่น ไอ (fume) น้ำเสีย และกากตะกอน (sludge) ที่มีแคดเมียมปนเปื้อนออกมา ของเสียจากโรงงานชุบโลหะแคดเมียม จะมีแคดเมียมประมาณ 100 - 500 mg kg^{-1} (ทัศนีย์, 2543) และมีโลหะหนักอื่นๆ รวมทั้งไซยาไนด์ผสมอยู่ด้วย การกำจัดของเสียที่มีแคดเมียมผสมอยู่ด้วยโดยการเผา (เม็ดสี สี พลาสติก โลหะเคลือบ และเศษเหล็ก) จะปล่อยแคดเมียมออกมาในรูปแคดเมียมออกไซด์ (CdO) จากการคมนาคมโดยการขัดสีของยางรถยนต์กับพื้นถนนจะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20 - 90 mg kg^{-1} ทำให้แคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในอากาศ เช่น ในสหรัฐอเมริกามีตัวเลขประเมินไว้สูงถึง 6,000 kg Cd $year^{-1}$ เพราะเหตุนี้ดินบริเวณที่ติดริมถนนตลอดจนพืช ผัก และผลไม้ ในบริเวณนั้นมักจะมีแคดเมียมสะสมสูงกว่าที่พบจากแหล่งอื่นๆ (Boon and Soltanpour, 1992) การเกษตรกรรม ที่มีการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต (หินฟอสเฟต และซุปเปอร์ฟอสเฟต) ที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ จะเป็นอีกเส้นทางหนึ่งของการเพิ่มการสะสมแคดเมียมในดิน (Vig et al., 2003) เนื่องจากหินฟอสเฟตที่เป็นวัตถุดิบมีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในหินสูงประมาณ 2 - 170 mg kg^{-1} ปริมาณแคดเมียมจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของหินฟอสเฟตนั้นๆ แคดเมียมที่ปนเปื้อนในปุ๋ยฟอสเฟตจะสามารถละลายน้ำได้น้อย ส่วนที่ไม่สามารถละลายในสารละลายดิน พืชและสิ่งมีชีวิตในดินจะไม่สามารถดูดซึมได้ ทำให้มีการสะสมเพิ่มขึ้นในดินแต่การใช้ปุ๋ยแอมโนเนียร่วมกับปุ๋ยฟอสเฟตทำให้พืชและสิ่งมีชีวิตในดินสามารถดูดซึมแคดเมียมได้ เพราะแคดเมียมเมื่อรวมตัวกับแอมโนเนียเป็นไอออนที่สามารถละลายน้ำได้ และจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลการวิจัยในประเทศและต่างประเทศ มีการนำกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โรงงาน ชุมชนและโรงพยาบาล ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรอย่างแพร่หลายนั้น เนื่องจากกากตะกอนน้ำเสียเหล่านี้มีส่วนประกอบธาตุอาหารพืชในปริมาณที่ใช้เป็นปุ๋ยได้ (Smith, 1996; ศุภมาศ, 2539; อรวรรณ, 2529 และ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2540) แต่มีความเสี่ยงค่อนข้างสูงต่อการปนเปื้อนของโลหะหนักต่างๆ ในดิน เช่น การศึกษาของ Brookes et al., (1986) และ Khan and Frankland (1984) พบว่าการใส่กากตะกอนน้ำเสียในดินอย่างต่อเนื่องมากกว่า 20 ปี ในพื้นที่ที่มีประเภทของเนื้อดินแตกต่างกัน ทำให้มีปริมาณโลหะหนักต่างๆ เช่น ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม ปรอท ทองแดง เพิ่มขึ้น และปริมาณแคดเมียมสะสมในดินเพิ่มขึ้นระหว่าง 4.7 – 60.0 mg kg^{-1} โดยเฉพาะดินร่วนเหนียว (clay loam) มีแคดเมียมสะสมมากที่สุด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Chang et al. (1992) ที่ได้ทดลองใช้กากตะกอนน้ำเสียจากชุมชนในระยะยาวกับการปลูกข้าวบาร์เลย์ พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินมีสะสมมากขึ้นเมื่อใส่กากตะกอนน้ำเสียในอัตราสูงขึ้นและอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน เพราะกากตะกอนน้ำเสียบางชนิดอาจจะมีสังกะสีอยู่สูงถึง 500 mg kg^{-1} (Purves, 1977) บางชนิดอาจมีแคดเมียมสูงถึง 100 – 400 mg kg^{-1} นอกจากนั้นอรวรรณ (2529) และ ศรัญญา (2540) ได้ทำการสุ่มสำรวจและวิเคราะห์

คุณภาพกากตะกอนน้ำเสียจากแหล่งชุมชน โรงพยาบาล ในเขตกรุงเทพมหานคร และต่างจังหวัด พบว่ามีแคดเมียมปนเปื้อนระหว่าง 0.24 – 49.0 mg kg^{-1} แคดเมียมที่ปนเปื้อนในกากตะกอนน้ำเสียจะถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่าย เป็นเพราะไอออนบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation) สามารถไปไล่ที่แคดเมียมก่อนที่จะถูกดูดซับในตะกอนได้มากกว่า (Riffaldi et al., 1983) ขณะเดียวกันเมื่ออยู่ในดินแคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ซึ่งสามารถเข้าแทนที่สังกะสี ทำให้ศักยภาพของการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของแคดเมียมสูงมากเมื่อเทียบกับธาตุโลหะหนักอื่นๆ เรียงจากมากไปน้อยดังนี้ Cd > Zn > Cu ; Ni (Hickey and Kittrick, 1984) แคดเมียมเมื่ออยู่ในกากตะกอนที่เป็นด่าง เช่น Ca-sludge มีแนวโน้มจะอยู่ในลักษณะคีเลตหรือร่วมกับอินทรียสารที่ไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อสภาพความเป็นกรด-ด่างลดลง (pH ~ 5) และอากาศถ่ายเทได้ดี จะทำให้แคดเมียมในดินเปลี่ยนจากรูปสารประกอบอินทรีย์ไปอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากขึ้น (Khalid et al., 1981) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน เช่น ค่า pH ของดิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการละลายได้และการแพร่กระจายของแคดเมียมที่อยู่ในรูปสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพอย่างมาก จะเห็นได้ว่าการนำกากตะกอนน้ำเสียไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่การเกษตร หรือการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อเป็นแหล่งรองรับของเสียจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ อย่างขาดความระมัดระวัง เป็นสาเหตุสำคัญของการเพิ่มปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมในระบบนิเวศดิน และย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในดิน เช่น จุลินทรีย์ดิน และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในดิน พืช และมนุษย์

จากการตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยอินทรีย์ ของกลุ่มงานวิจัยเคมีดินกลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา เรื่องมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) จากตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์จากส่วนกลางและส่วนภูมิภาค และจากการตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยอินทรีย์ จำนวน 6 ธาตุ คือ สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) ปรอท (Hg) และตะกั่ว (Pb) จำนวน 440 ตัวอย่าง พบว่าจำนวนตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์มีการปนเปื้อนโลหะหนัก เกินตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 จำนวน 42 ตัวอย่าง โดยพบว่าปุ๋ยอินทรีย์จำนวน 16 ตัวอย่าง มีการปนเปื้อนแคดเมียม ที่ระดับสูงสุดอยู่ที่ 322.5 mg kg^{-1} และจากการสำรวจของ พิชิต และคณะ (2548) อ้างตามสำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร ผลงานวิจัยปี 2539 – 2548 กรมวิชาการเกษตร (2548) พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในดินแตกต่างกันมากในแต่ละท้องที่ของประเทศไทย พบว่าดินในบริเวณพื้นที่ริมโขงมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างสูง และจากการประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อน พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียม ละโลหะหนักอื่นๆ ในดินที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์เทศบาลระยะยาว มีความเสี่ยงสูง ที่จะมีผลทำให้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเพื่อการเกษตรกรรม มีปริมาณแคดเมียมสูงกว่ามาตรฐานดินเพื่อการเกษตรกรรม

แคดเมียมในหินอัคนี และหินตะกอน จะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 mg kg^{-1} จะพบอยู่ร่วมกับสังกะสีเสมอ แต่ในสภาพดินกรดแคดเมียมจะมีสภาพเคลื่อนที่ได้ดีกว่าสังกะสี แคดเมียมมีรูปประกอบ

ได้เช่นเดียวกับกลุ่มไอออนบวก Zn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+} ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมสภาพการเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมในดิน ด้วยค่า pH ของดินและค่ารีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักดิ์รีดอกซ์สูง แคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ (CdO) หรือสารประกอบแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) หรืออาจอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นกัน แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH 4.4 ถุง 5.5 (ศุภามาศ, 2540) ขณะที่ดินสภาพเป็นด่างแคดเมียมจะไม้ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินเป็นกรด การละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก อลูมีเนียมและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน นอกจากนั้นแคดเมียมในดินจะอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และในรูปสารประกอบที่สลับซับซ้อนกับฮิวมัส จากการใช้วิธีวิเคราะห์ของ McLaren et al. (1998) พบว่าประมาณครึ่งหนึ่งของแคดเมียมจะอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และที่เหลืออีกครึ่งหนึ่งจะดูดยึดอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอลูมีเนียมและอินทรียวัตถุในดิน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินและค่าศักดิ์รีดอกซ์ของดิน จะมีผลต่อการละลายได้และการแพร่กระจายของแคดเมียมเป็นอย่างมาก นอกจากนั้น Rana (2006) ได้กล่าวไว้ว่ากากตะกอนดินในหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยโดยทั่วไปจะมีแคดเมียมปนเปื้อน และแคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปคาร์บอเนตและรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคดเมียมจะสามารถเปลี่ยนรูปออกมาในรูปสารละลายและปนเปื้อนลงสู่น้ำใต้ดิน เมื่อค่า pH ของดินบริเวณนั้นเป็นกรด แคดเมียมโดยส่วยใหญ่จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ทำให้ศักยภาพในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของแคดเมียมสูงมากเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Cd>Zn>Cu>Ni (Hickey and Kittrick, 1984) ดินโดยทั่วไปจะมีโลหะหนักปะปนอยู่ ซึ่งเป็นผลมาจากการพุพังสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิด โลหะหนักส่วนใหญ่จะมีการเคลื่อนที่ได้น้อย เนื่องจากมีความสามารถยึกเกาะอยู่กับส่วนที่เป็นรูปที่แลกเปลี่ยนได้ดี ดังนั้นจึงมีโลหะหนักที่อยู่ในรูปสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (available form) ในรูปสารละลายในดินในดินเหนียวได้น้อยกกว่าในดินทราย ซึ่งมีส่วนที่มีปริมาณดินเหนียวน้อย เนื่องจากดินเหนียวมีพื้นที่ผิวจำนวนมาก และที่ผิวของดินเหนียวจะมีประจุสุทธิเป็นลบมากกว่าดินทราย ดังนั้นจึงสามารถดูดยึดพวกโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดีกว่า จึงเป็นกระบวนการหลักที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของสารประกอบและสารมลพิษในดิน (วีรานุช, 2551) นอกจากนั้นการเคลื่อนย้าย (transportation) และการคงอยู่ของธาตุโลหะหนักในดินจะขึ้นอยู่กับหลายกรณี เช่น การดูดซึมโดยพืช การดูดซึมโดยจุลินทรีย์ในดิน และการเคลื่อนย้ายในสภาพการละลาย และสารแขวนลอย (ศุภมาศ, 2540; ไพบูลย์, 2546; และคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) โดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

(1) การเคลื่อนย้ายในสภาพละลาย (ขนาดเล็กกว่า 0.45 ไมครอน) หรือสารแขวนลอย (ขนาดใหญ่กว่า 0.45 ไมครอน) ซึ่งสภาพการละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของโลหะหนักและมีบทบาทอันสำคัญยิ่งในการกำหนดความเป็นพิษต่อพืช จุลินทรีย์ดิน และสิ่งมีชีวิตในดิน หรือมีมากจนเป็นสารพิษในดิน สภาพเคลื่อนที่ได้ของโลหะหนักในดินเป็นผล

อัตราส่วนระหว่างส่วนที่ละลายได้ กับส่วนที่เป็นของแข็ง อัตราส่วนนี้ถูกกำหนดโดยอัตราการเติมของโลหะหนักสู่ดิน และปฏิกิริยากับสารอื่นในดิน สารพิษที่ละลายอยู่ในดิน และสามรถเคลื่อนย้ายได้ด้วยการแพร่ (diffusion) การเคลื่อนไปกับการไหลของสารลายดิน โดยการไหลของมวล (mass flow) ซึ่งจะต้องเกี่ยวพันกับโมเลกุลของน้ำหรือสารลิแกนด์ (ligend) อื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลิแกนด์ที่เป็นอินทรีย์สาร ตัวอย่างเช่น กรดฟูวิก (fulvic acid) หรือกรดฮิวมิก (humic acid) (ไพบูลย์, 2546)

(2) ค่า pH ของดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดเกี่ยวพันกับการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน โดยค่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พืชสามารถดูดซึมโลหะหนักได้น้อยลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักในรูปที่เปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้จะลดลงเมื่อค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น ตะกั่วและโครเมียมในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่พืชและจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะดูดซึมได้ เนื่องจากส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปท่มีละลายและเคลื่อนที่ได้น้อย ขณะที่แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH ระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ขณะที่ดินที่เป็นด่างแคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินกรดสารละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ศุภมาศ, 2540; ไพบูลย์, 2546)

(3) สภาพศักดิ์รีดอกซ์ ที่แปรผันในดินเป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ดิน เมื่อดินมีการะบายอากาศได้ดี จุลินทรีย์ดินที่ใช้ออกซิเจนจะเจริญได้ดี เมื่ออัตราการหายใจมีมากกว่าอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนบนผิวดินลงสู่ดิน ดินจะเริ่มขาดออกซิเจนซึ่งเมื่อขาดออกซิเจนแล้วกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารอื่นแทนออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกรับวนการหายใจและเจริญเติบโตมากขึ้น เช่น การใช้ไนเตรต (NO_3^-) หรือเหล็กในรูปเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเป็นต้น (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2553)

(4) ความชื้นในดิน น้ำและอากาศในดินต่างอาศัยช่องว่างในเดียวกัน เมื่อน้ำในดินเพิ่มขึ้นอากาศในดินย่อมลดปริมาณลง ซึ่งดินในบริเวณที่มีการผันแปรของน้ำในดินมาก เช่น ดินในบริเวณแหล่งน้ำที่ดินอยู่ในที่ลุ่มน้ำท่วมขังหรือดินนา เป็นต้น ความชื้นในดินเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสภาพริดอกซ์ของดินที่สำคัญที่สุด (จันทร์เพ็ญ, 2553)

(5) เนื้อดินที่ต่างกัน เกิดจากความแปรผันของสัดส่วนผสมของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวที่ต่างกัน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวเกิน 40 % ส่งผลให้เนื้อดินหลักเป็นประเภทดินเหนียว (clay soil) ขณะที่เนื้อดินหลักเป็นประเภททรายแป้ง (silty soil) และประเภทดินทราย (sandy soil) จะต้องมีสัดส่วนของกลุ่มอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคทรายเกิน 80 % และ 90 % ตามลำดับ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ดินที่มีเนื้อดินที่แตกต่างกันมีผลต่อกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อกระบวนการดูดยึดโลหะหนักในดินได้ต่างกัน

อนุภาคดินที่มีบทบาทในการในการดูดยึดสารไอออนในสารละลายดิน คือ อนุภาคดินเหนียว เป็นส่วนของอนินทรียสารที่มีรูปร่างแบบบาง ที่ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่ และมี

พื้นที่ผิวจำเพาะมาก เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีประจุลบ ซึ่งเกิดจากการแตกหักของผลึกหรือการแทนที่กันของธาตุบางตัว ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างภายในผลึกที่ประกอบเป็นอนุภาคดินเหนียว จึงทำให้อนุภาคเหล่านี้ดูดยึดไอออนที่มีประจุบวกไว้ที่ผิวของมัน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

ในกระบวนการดูดยึดธาตุในสารละลายดินจะถูกยึดได้ไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) จะถูกดูยึดได้ดีกว่าแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ถึง 2-3 เท่า ทั้งนี้เพราะเมื่อเปียกขนาดของตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) นั้นเล็กกว่าแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ดังนั้นโอกาสที่ Pb^{2+} จะถูกดูดยึดและตรึงในหลืบแผ่นคอลลอยด์ดินเหนียวจึงมีได้มากกว่า นอกจากนั้นความสามารถในการดูดยึดธาตุประจุบวกของดินยังขึ้นอยู่กับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินด้วย โดยความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมารดินเหนียว และปริมาณอินทรียวัตถุในดินเป็นสำคัญ ไอออนบวกที่ยึดติดที่ยึดเหนี่ยวอยู่ที่พื้นที่ผิวของอนุภาคดินด้วยแรงที่เหนียวแน่นพอสมควรและทนทานต่อการชะล้างของน้ำ (leaching) แต่ก็สามารถถูกไล่ที่ (replaced) ให้หลุดจากพื้นที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวได้ โดยไอออนบวกชนิดหนึ่งที่อยู่ในรูปอิสระในสารละลายดิน หรือเรียกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

(6) ชนิดและปริมาณของสสารอินทรีย์ เมื่อปริมาณอินทรียวัตถุสูงจะส่งผลให้พืชดูดซับโลหะหนักน้อยลงเนื่องจากอินทรียวัตถุจะจับโลหะหนักไว้ ทำให้โลหะหนักสะสมอยู่ในอินทรียวัตถุ (David et al., 2008) ซึ่งธาตุที่มีประจุบวกอาจทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ประเภทต่างๆ เช่น ฮิวมัส โปรตีน กรดอะมิโน และกรดอินทรีย์อื่นๆ กลายเป็นสารประกอบที่สลับซับซ้อมที่เรียกว่า complexes compound หรือ organic complex ซึ่งเกิดขึ้นด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน การดูดยึดเกิดขึ้นโดยการดึงดูดโดยไฟฟ้าต่างๆ เช่น ไอออน – ไอออน การดึงดูดแวนเดอร์วาล พันธะไฮโดรเจน พันธออดิเนต เช่น การแลกเปลี่ยนลิแกนด์หรือพันธะทางเคมีอื่นๆ สารที่สลับซับซ้อนมีหลายชนิดทั้งที่ละลายอยู่ในน้ำอย่างอิสระและที่เกาะเกี่ยวอยู่กับอนุภาคดินเหนียว ปกติพวกที่โมเลกุลเล็กจะละลายน้ำไม่ตกตะกอนง่ายและจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และในทางกลับกันก็เป็นพวกที่จะถูกพัดพาไปหรือถูกชะล้างไปได้ง่ายอีกด้วย พวกที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นไปอีกอาจมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะซึมผ่านผนังเซลล์ของรากพืชเข้าไปได้แม้ว่าจะละลายอยู่อย่างอิสระในน้ำในดินได้ แต่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อยลงเพราะ ความเป็นประโยชน์ต่อพืชของสารประกอบ (complex) พวกที่มีโมเลกุลใหญ่นี้จะขึ้นอยู่กับความคงทนต่อการสลายตัวของมัน เมื่อเทียบกับอำนาจการแลกเปลี่ยนประจุของราก สารที่มีความคงทนต่อการสลายตัวสูงมากจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อยกว่าสารที่มีความคงทนต่ำกว่า (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

อนุภาคฮิวมัส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอินทรีย์สารของดินจะมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก มีประจุลบซึ่งสมมารถดูดซับไอออนบวกได้ดีเช่นเดียวกับอนุภาคดินเหนียว ซึ่งธาตุแต้ละชนิดมีความมี

ความชอบในการถูกดูดซับกับอินทรีย์สารต่างกัน เช่น ทองแดงชอบรวมกับลิแกนด์ที่เป็นสารอินทรีย์ ทองแดงจึงอาจอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุบวกหรือร่วมกับไอออนเชิงซ้อน (anionic complex) จึงพบทองแดงได้น้อยในดินที่มีอินทรียวัตถุสูง

(7) ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน การคงอยู่หรือการหยุดเคลื่อนที่ของธาตุโลหะหนักที่ละลายหรือแขวนลอยในระยะแรกก็คือการดูดยึดไอออนเชิงซ้อน บนพื้นที่ผิวของแข็งและการจับกับสารแขวนลอย การย่อยสลายอินทรียสารโดยจุลินทรีย์ดินช่วยให้มีการปลดปล่อยจุลธาตุเหล่านี้ออกมาแล้วอาจถูกดูดยึดด้วยอนุภาคอนินทรีย์ในดิน ในระยะต่อมาธาตุโลหะหนักเหล่านี้อาจถูกดูดยึดด้วยแรงตรึงในออกไซด์ของเหล็ก แมงกานีส อะลูมิเนียม และสารอื่นๆ ในระยะยาวอาจรวมกับแร่ที่มีความเสถียรหรือตกตะกอนในรูปค่อนข้างเสถียร เช่น เกิดเป็นรูปซิลิเกตต่างๆ (จันทร์เพ็ญ, 2553)

(8) รูปของธาตุโลหะหนักในดิน ธาตุโลหะหนักในรูปที่ละลายในสารละลายดินและรูปที่ถูกดูดยึดในตำแหน่งผิวอนุภาคคอลลอยด์ดินถือเป็นรูปที่แคเลื่อนที่ได้ (mobile) ในดินสามารถถูกพืชนำไปใช้ได้ ส่วนรูปถูกที่ตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ธาตุดิน รูปที่ตกตะกอนหรือเกิดการตกตะกอนกับสารอื่นและรูปที่คลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ในรูปที่หยุดเคลื่อนที่ (immobile) แต่กระบวนการในดินมีลักษณะเป็นพลวัต (dynamic) จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปต่างๆ ที่กล่าวถึงอยู่ตลอดเวลา

2.4 ยิปซัม (Gypsum)

ยิปซัม (ราชบัณฑิตยสถาน, 2546) หมายถึง แร่หรือสารที่มีแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($CaSO_4.2H_2O$) ไม่น้อยกว่า 70% ยิปซัม เป็นสายแร่ชนิดหนึ่งที่พบได้ในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โครงสร้างหลักประกอบด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2-}) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และโมเลกุลของน้ำ (H_2O) มีสูตรทางเคมี คือ $CaSO_4.2H_2O$ จากโครงสร้างดังกล่าวจึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร กล่าวคือ เป็นสารปรับสภาพดินกรดและดินเค็มโดยแคลเซียมไอออนจะเข้าไปอยู่แทนที่อะลูมิเนียมไอออน (Al^{+3}) ในดินกรด และโซเดียมไอออน (Na^+) ในดินเค็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นการช่วยลดระดับความเป็นกรดและความเค็มในดิน ลดภาวะแน่นทึบของดิน ทำให้ดินมีความร่วนซุย เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ทางการเกษตรมากขึ้น นอกจากนี้ ทั้งแคลเซียมและกำมะถันจากยิปซัมยังเป็นธาตุอาหารเสริมที่สำคัญของพืชอีกด้วย ถ้ามีการนำยิปซัมมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน จะช่วยลดปัญหาความเสื่อมโทรมของดินให้เหมาะสมกับการเพาะปลูก ช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร และเป็นการอนุรักษ์ดิน สามารถบรรเทาปัญหาพื้นที่ทำกิน อีกทั้งจะทำให้เกิดความยั่งยืนต่อการพัฒนาการเกษตรของประเทศ (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554) ยิปซัมจำแนกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ ยิปซัมธรรมชาติ(natural gypsum) และยิปซัมสังเคราะห์ (synthetic gypsum)

2.4.1 ยิปซัมธรรมชาติ (Natural Gypsum)

แร่ยิปซัมเป็นสารประกอบในรูปไดไฮเดรตแคลเซียมซัลเฟตที่มีสูตรทางเคมีว่า $CaSO_4.2H_2O$ และมีแคลเซียมประมาณร้อยละ 23 กำมะถันร้อยละ 18.5 แต่ในรูปของปุ๋ยหรือสารปรับปรุงดินจะมีแคลเซียมและกำมะถันประมาณร้อยละ 22 และ 17 ตามลำดับ โดยปกติยิปซัมเป็นแร่ที่มีสีขาวเมื่อบริสุทธิ์ แต่อาจไม่มีสีหรือหรือมีสีเทา สีน้ำเงินเทา ชมพู น้ำตาล หรือเหลืองได้ ขึ้นกับสารมลทินต่างๆที่ทำให้สีของแร่เปลี่ยนแปลงไป ในรูปเม็ดผลึก มีความแข็งต่ำมาก คือมีช่วงความแข็งตามระดับการจำแนกของโมส์ (Mosh scale) ระหว่าง 1.5-2 เท่านั้น สามารถขีดให้เป็นรอยได้ด้วยเล็บมือ มีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 2.23 มีรอยแตกธรรมชาติชัดเจน 1 ทาง และไม่ชัดเจนอีก 1 ทาง ซึ่งจัดได้ว่าเป็นแร่ที่มีน้ำหนักเบา มีระดับ pH เป็นกลาง ละลายน้ำได้ค่อนข้างดี มีรูปร่างที่เกิดแตกต่างกัน แต่ส่วนมากกมีลักษณะเป็นผลึกชัดเจน

2.4.2 การใช้ประโยชน์ในการเกษตร

แร่ยิปซัมสามารนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง โดยทั่วๆ ไปนิยมนำมาทำปูนซีเมนต์ ทำปูนปาสเตอร์สำหรับใช้ในงานต่างๆ เช่น แม่พิมพ์ ใช้ในผลิตภัณฑ์ทันตกรรม ทำแผ่นยิปซัม ชอล์ก และอื่นๆ ในทางเกษตรกรรมยิปซัมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

(1) ใช้เป็นปุ๋ยเพื่อให้ธาตุอาหารพืช ยิปซัมอาจใช้เป็นปุ๋ยเพื่อให้ธาตุแคลเซียมและหรือกำมะถันแก่พืชในกรณีที่ดินขาดธาตุชนิดใดชนิดหนึ่งหรือทั้งสองธาตุ อย่างไรก็ตามการใช้ยิปซัมเป็นปุ๋ยเพื่อให้ธาตุอาหารพืชทั้งสองชนิดยังมีขอบเขตจำกัดมาก เพราะดินโดยทั่วๆ ไปมักไม่มีปัญหาการขาดธาตุแคลเซียม ส่วนกำมะถันก็มักเป็นองค์ประกอบอยู่แล้วในปุ๋ยเคมีไม่มากก็น้อย ในรูปปุ๋ยเดี่ยว เช่น ปุ๋ยแอมโนเนีย ซัลฟเต และปุ๋ยผสมชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้กันโดยทั่วๆ ไป ในทางปฏิบัติการใช้ยิปซัมเป็นปุ๋ยเคมีที่นิยมกันมากคือ การใช้ยิปซัมกับการปลูกถั่วลิสงโดยวิธีการใส่แบบแต่งข้าง ข้างแถวพืชในระยะก่อนออกดอกเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถั่วลิสงที่ปลูกในดินเนื้อหยาบที่มักมีปริมาณแคลเซียมต่ำ ทั้งนี้เพราะพืชชนิดนี้ต้องการแคลเซียมในปริมาณมากเพื่อใช้ในการพัฒนาคุณภาพและความสมบูรณ์ของฝักและเมล็ด ส่วนวิธีการใส่กับพืชอื่นๆ โดยเฉพาะพืชอายุสั้น นิยมใส่โดยการหว่านลงผิวดิน โดยไม่จำเป็นต้องไถกลบ ถ้าดินมีความชื้นอยู่บ้างแล้ว ส่วนปริมาณการใช้ขึ้นกับผลการวิเคราะห์ว่าดินขาดแคลเซียมหรือกมะถันมากน้อยเพียงใด

(2) การใช้เพื่อลดระดับความเค็มของดิน ยิปซัมมีสมบัติช่วยลดความอิ่มตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) ในดินเค็ม หรืออีกนัยหนึ่งช่วยลดระดับโซเดียมที่ถ้ามีมากเกินไปจะเกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นพิษของโซเดียมที่พืชดูดมากเกินไป และผลของโซเดียมในดินต่อสมบัติทางกายภาพของดิน ที่ทำให้ดินมีลักษณะแน่นทึบ ไถพรวนยาก และเกิดความ

ไม่สมดุลของธาตุอาหารบางชนิดในดิน เช่นความสมดุลระหว่างเหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โบรอน (B) ฯลฯ ในเชิงเคมีของดินกลไกของยิปซัมในรูป แอนไฮไดรต์ (anhydrite หรือ $CaSO_4$) ในการลดปริมาณโซเดียมไอออนในดิน หรือลดระดับความเค็มของดินดังกล่าว อาจเขียมได้เป็นสมการเคมี ดังนี้

$$\text{Na-Clay} + CaSo_4 \longleftrightarrow \text{Ca-clay} + Na_2SO_4$$

โดยโซเดียมไอออน (Na^+) ตามสมการเคมีเบื้องต้นหมายถึง โซเดียมที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดินในรูป โซเดียม-เคลย์ (Na-clay) กลไกการใช้ยิปซัมลดความเค็มของดิน โดยเฉพาะดินเค็มโซดิก ก็คือการใช้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่แตกตัวออกจากยิปซัมในรูปแอนไฮไดรด์ (anhydrite, $CaSO_4$) ไปไล่โซเดียมไอออน โดยการเข้าแทนที่โซเดียมไอออนที่ถูกยึดที่ผิวของสารคอลลอยด์ดินให้กายเป็นแคลเซียมเคลย์ (Ca-clay) แทน แล้วโซเดียมที่ถูกแทนที่ออกมาในรูปของไอออน (Na^+) นั้นทำปฏิกิริยากับอนุมูลซัลเฟต (SO^-_4) ที่แตกตัวออกมาจากยิปซัมกลายเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ละลายน้ำได้ดีทำให้โซเดียมไอออนที่แตกตัว (ละลาย) ออกมาจากเกลือโซเดียมถูกชะละลาย (leaching) ออกไปจากดินได้ง่าย โดยฝน ที่ตกลงมาหรือน้ำจืดที่ทดเข้าไปเพื่อล้างเกลือโซเดียมซัลเฟตออกจากพื้นที่ ทำให้ดินเค็มโซดิกมีความเค็มน้อยลง

(3) ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน นอกเหนือจากคุณค่าด้านธาตุอาหารและการช่วยลดระดับความรุนแรงของดินเค็มแล้ว แร่ยิปซัมยังมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงสมบัติของดินไร่หรือดินในที่ดอนที่มีเนื้อเดียวกัน และดินไร่โดยทั่วๆ ไปที่มีความแน่นทึบสูง ทำให้ดินที่มีสมบัติดังกล่าวที่มีการระบายอากาศและน้ำเลว มีความโปร่งพรุนมากขึ้น และระบายอากาศและน้ำได้ดีขึ้น ทำให้ไม่มีน้ำขังแฉะปนผิวดินที่แน่นทึบ นอกจากนั้นยังช่วยให้ดินไร่กักเก็บน้ำได้ดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อดินที่แน่นทึบโปร่งขึ้น น้ำที่ผิวดินจะสามารถแทรกซึมลงไปเก็บไว้ในดินที่ลึกลงไปได้มากขึ้น ในเชิงเคมีกลไกของแร่ยิปซัมในการแก้ไขดินที่มีโครงสร้างแน่นทึบให้มีความแน่นทึบน้อยลง เพราะอนุภาคเม็ดดินเดี่ยวๆ เกิดการจับเป็นก้อน (aggregation) มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การป้องกันการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (surface crust) ก็คือการความคุมการฟุ้งกระจายของอนุภาคดินเหนียวในน้ำโดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolytes) ในสารละรายรอบเม็ดหรืออนุภาคดินเหนียวให้สูงขึ้นมากพอจนถึงระดับที่จะทำให้อนุภาคจับกลุ่มกันเป็นก้อนในรูปฟล็อก (floc) อย่างรวดเร็วโดยกระบวานการฟล็อกคูเลชัน (flocculation) และต่อมาก้อนดินในรูปฟล็อกเกิดการตกตะกอน (precipitation) ลงสู่ส่วนล่างขงหลอดแก้วที่บรรจุสารแขวนลอย หลังจากที่เม็ดดินที่ผิวดินบนโดนเม็ดฝนที่ตกลงมากระแทกแตก และอนุภาคดินส่วนที่เป็นดินเหนียวแขวนลอยปนออกมากับน้ำ ซึ่งในการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ถ้าไม่มีการใส่ยิปซัม อนุภาคดินเหนียวที่แขวนลอยในน้ำ โดยเฉพาะดินที่มีธาตุโซเดียมสูง จะฟุ้งกระจายในน้ำในรูปสารแขวนลอยและอนุภาคเม็ดดินที่ในสารแขวนลอยที่เกิดขึ้นนี้จะไหลออกไปจากบริเวณเม็ดดินเดิมที่แตกไปอุดรูดิน และจับกันเป็นแผ่นที่ผิวเมื่อดินแห้งตัวลง

อย่างไรก็ตามการลดการลดปัญหาความแน่นทึบของดินโดยใช้ยิปซัมนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดผลดีเฉพาะในดินบน หรือในส่วนบริเวณผิวหน้าดินที่สารยิปซัมสามารถละลายและแทรกซึมลงไปในดินล่างโยการนำพาของน้ำเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักจะเกิดผลดีต่อการแก้การเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (Surface crust หรือ Soil seal) เมื่อดินเปียกและแห้ง มากกว่าการแก้ความแน่นทึบของดินที่ลึกลงไปในดินล่าง ซึ่งผลของการใช้ยิปซัมต่อการลดการเกิดแผ่นแข็งแข็งปิดผิว มีผลทำให้พืชที่ปลูกด้วยเมล็ด เช่น ข้าวโพด และฝ้าย มีอัตราการงอกและจำนวนต้นกล้าที่แทงโผล่ผิวดินได้มากกว่าดินที่ไม่ใส่ยิปซัมอย่างเด่นชัด

สรุปได้ว่า ยิปซัมนอกจากจะใช้แก้ไขปัญหาดินเกลือประเภทโซดิกแล้ว ในปัจจุบันยังมีการใช้เพื่อแก่ปัญหาดินแร่ (mineral soils) โดยทั่วๆ ไปที่มีปัญหาทางกายภาพ เพราะมีโครงสร้างดินไม่เหมาะสมด้วย โดยเฉพาะปัญหาการกร่อนของดิน (soil erosion) และการไหลบ่าของน้ำในพื้นที่การเกษตรในที่ดอนที่มีสภาพไม่ราบเรียบ ทั้งนี้เพราะยิปซัมกับดินในพื้นที่ดังกล่าว เกิดผลดีหรือมีกลไกธรรมชาติที่ช่วยลดปัญหาดินกร่อน โดย

(1) เพิ่มอัตราการแทรกซึมน้ำ (water infiltration rate) จากผิวดินลงสู่ดินชั้นล่าง ทำให้ดินสามารถกักเก็บน้ำไว้ให้พืชได้มากขึ้น นานขึ้น รวมทั้งธาตุอาหารพืชที่ละลายอยู่ในน้ำดังกล่าวด้วย หรืออีกนัยหนึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำและปุ๋ย (ธาตุอาหาร) ของพืช

(2) เพิ่มอัตราการแทรกซึมน้ำตามข้อ 1 ทำให้ลดปัญหาการเกิดการไหลบ่าของน้ำในพื้นที่ที่มีความลาดเท เพราะมีน้ำเหนือผิวเหลืออยู่น้อยลง มีผลทำให้ลดการสูญเสียน้ำที่เกิดจากการไหลบ่าหรือถูกนำพาให้เคลื่อนที่ไปด้วยแรงของน้ำรวมทั้งธาตุอาหารพืชที่ลอยอยู่ในน้ำ เนื้อดิน และอนุภาคอินทรียวัตถุที่ลอยอยู่ในน้ำ

(3) ลดปัญหาการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (surface crust หรือ soil seal) อันเนื่องมาจากการแตกของเม็ดดิน (soil aggregate) บริเวณที่มีเสถียรภาพต่ำที่เกิดจากแรงภายนอก โดยเฉพาะแรกตกกระแทกของเม็ดฝน ทำให้เกิดการอุดเคลือบรูดินขนาดใหญ่ และเกิดเป็นแผนแข็งปิดผิวเมื่อดินแห้ง การใช้ยิปซัมจะเกิดกลไกทางธรรมชาติที่ทำให้เม็ดดิน (soil aggregate) มีเสถียรภาพสูงขึ้นไม่แตกง่ายอันเนื่องมาจากแรงกระทบเม็ดดินจากภายนอก

2.4.2 ยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic Gypsum)

(1) ฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum) ฟอสโฟยิปซัมไม่ใช่แร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แต่เป็นผลพลอยได้จากการประกอบอุตสาหกรรม โดยเฉพาะจากการผลิตกรดฟอสฟอริกในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี และโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี หลักการผลิตกรดฟอสฟอริกเป็นแหล่งที่มาของฟอสโฟยิปซัม ได้จากการนำหินฟอสเฟตประเภทฟลูออออพาไทต์ (fiuorapatite) มาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับกรดกำมะถัน โดยกระบวนการเปียก (wet process) ดังสมการเคมี

$$Ca_{10}F_2(PO_4)_6 + 10h_2SO_4 + 10nH_2O \longrightarrow 10CaSO_4nH_2O + 6H_3PO_4 + 2HF$$

(โดย n = 0, ½ หรือ 2.0 ขึ้นกับชนิดของยิปซัมที่ต้องการจะให้ตกผลึกในรูปไฮเดรตชนิดใด)

ผลที่ได้ตามสมการเคมีด้านขวาคือส่วนประกอบของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในรูปกรดที่ได้จากการผลิตด้วยกระบวนการเปียก (wet process acid) ซึ่งเป็นของเหลวและตะกอนในรูปของแข็งของยิปซัมที่กรองแยกออกมา จากของเหลวในรูปกรด สารยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้ในรูปนี้นอกจากส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของจะมีองค์ประกอบในรูปของไฮเดรตเต็ดแคดเซียมซัลเฟตแล้วยังมีฟอสฟอรัสจากกรดฟอสฟอริกที่แยกออกไม่หมดและตกค้างปะปนอยู่กับยิปซัมด้วย จึงเรียกผลพลอยได้ของยิปซัมในรูปนี้ว่า ฟอสโฟยิปซัม นอกจากนั้นกรดไฮโดรฟูออริก (HF) ที่เกิดขึ้นบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับธาตุซิลิคอน (Si) ที่ปะปนอยู่ในหินฟอสเฟต ในรูปของสิ่งเจือปน เกิดเป็นสารประกอบซิลิคอนเตะฟลูออไรด์ (SiF_4) และกับสิ่งเจือปนอื่นๆ ในหินฟอสเฟต (Na K Mg Al ฯลฯ) เกิดเป็นสารประกอบที่สลับซับซ้อนในรูปสารประกอบฟลูออซิลิเกต (fiuorsilicates) ปะปนมากับยิปซัม ส่วนสารพลอยได้ในรูปซิลิคอนเตะตคลอไรด์ (SiF_4) และกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่เหลือจะระเหิดออกไปจากส่วนผสม

องค์ประกอบและสมบัติทางเคมี โดยทั่วๆ ไปของสารฟอสโฟยิปซัมที่แห้งจากโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี ประกอบด้วยแอนไฮไดรค์ (anhydrite) หรือแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ประมาณร้อยละ 97 แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ร้อยละ 1 ฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอรัสเพนตาออกด์ (P_2O_5) ร้อยละ 0.6 ฟลูออออะพาไทต์ (fiuorapatite) ซิลิกา (Si) และสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) ฯลฯ รวมกันร้อยละ 1.4 ในกระบวนการผลิตการฟอสฟอริกด้วยกระบวนการเปียก (wet process) นั้น จะเกิดผลพลอยได้ในรูปฟอสโฟยิปซัมในรูปแห้งประมาณ 4-5 เมตริกตัน ต่อปริมาณฟอสเฟต เพนตาออกไซด์ (P_2O_5) ในกรดฟอสฟอริกที่ผลิตได้ 1 เมตริกตัน เนื่องจากสารประกอบในรูปยิปซัม ($CaSo_4.nH_2O$) ที่เป็นองค์ประกอบหลักในรูปผลพลอยได้แล้ว ฟอสโฟยิปซัมที่ได้จากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกยังมีธาตุหรือสารประกอบในรูปต่างๆ แตกต่างกันไปขึ้นกับประเภทของกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกที่ใช้ ซึ่งโดยทั่วๆ ไปมี 32 กระบานการ คือ 1) กระบวนการได-ไฮเดรต (di-hydrate process) 2) กระบวนการเฮไม-ไฮเดรต (hemi-hydrate process) 3) กระบวนการเฮไม-ได-ไฮเดรต (hemi-di-hydrate process)

เมื่อเปรียบเทียบแร่ยิปซัมที่ขุดจากเหมือง โดยเฉพาะยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์สูง ฟอสโฟยิปซัมมีองค์ประกอบหลักในรูปไฮเดรตยิปซัม ($CaSo_4.nH_2O$) มากกว่าร้อยละ 90 ใกล้เคียงกับแร่ยิปซัมที่ได้จากธรรมชาติ แต่ก็มีองค์ประกอบอื่นๆที่หลากหลายกว่าทั้งนี้เพราะฟอสโฟยิปซัมมีทั้งฟอสฟอรัส (P) ฟลูออรีน (F) รวมทั้งซิลิกา (SiO_2) และสารประกอบในรูปออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) และอลูมินัม (Al_2O_3) นอกจากนั้นยังมีธาตุอาหารพืชชนิดอื่นๆ เช่นแมกนีเซียม สังกะสี รวมทั้งสารกัมมันตภาพรังสีเช่น แร่ยูเรเนียม-238 เรเดียม- 226 อยู่ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักมีสาร

กัมมันตภาพรังสียู่ไม่เกิน 10 picocorie (pCi) ต่อกรัมซึ่งเป็นระดับค่าวิกฤติที่ถ้ามีมากกว่านี้ ในประเทศอเมริกาจะนำฟอสโฟยิปซัมไปใช้ในการเกษตรไม่ได้ ข้อแตกต่างจากแร่ยิปซัมธรรมชาติคือ ฟอสโฟยิปซัมมีค่าการนำไฟฟ้า (ค่าความเค็ม) ประมาณ 2.0 เดซิซีเม็นต่อเซนติเมตร มีปฏิกิริยาเป็นกรดรุนแรงมาก (pH 2-3) เพราะมีกรดฟอสฟอริกในรูปกรดอิสระปะปนอยู่ด้วย ขณะที่แร่ยิปซัมมีปฏิกิริยาเป็นกลาง (pH 7) ดังนั้นการพิจารณาใช้แร่ยิปซัมทั้งสองรูป (ยิปซัมในรูปแร่และฟอสโฟยิปซัม) จึงต้องคำนึงถึงสมบัติ pH ของสารทั้งสองชนิดด้วย

การใช้ประโยชน์ ฟอสโฟยิปซัมเป็นผลพลอยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานผลิตกรดฟอสฟอริก อาจนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง คือ

(1) นำไปใช้ผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต โดยการนำไปทำปฏิกิริยากันแก๊สแอมโมเนียและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยวิธีการที่เรียกว่า กระบวนการยิปซัม (gypsum process)

(2) ใช้ทำซีเมนต์และกรดกำมะถันโดยการเผา (calcination) กับถ่านโค๊ก (coke) และแร่ดินเหนียว (clay mineral) หรือหินชั้น (หินตะกอนในรูปหิน shale)

(3) ทำปูนปาสเตอร์ อิฐมวลเบา และแผ่นยิปซัมบอร์ดสำหรับเป็นวัสดุก่อสร้าง

(4) ใช้ผสมปูนซีเมนต์เพื่อชะลอการแข็งตัวให้ช้าลงตามที่ต้องการ

(5) ใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ในการผลิตปุ๋ยเคมีในรูปปุ๋ยผสมหรือใช้เป็นสารเติมแต่ง (additive) ในปุ๋ยผสมชนิดเม็ดเพื่อช่วยในการทำให้เม็ดปุ๋ยที่ปั้นได้มีความแกร่งมาก (hardness) ขึ้น

(6) ใช้ในการเกษตรเพื่อเป็นปุ๋ยธาตุรอง (ธาตุแคลเซียมและกำมะถัน) และสารปรับปรุงดินในการผลิตพืช โดยเฉพาะดินเค็มและดินที่มีสมบัติทางฟิสิกส์บางประการไม่เหมาะสม

อย่างไรก็ตามในแต่ละปีผลพลอยได้ในรูปฟอสเฟตยิปซัมที่มีประมาณ 150 ล้านตันทั่วโลก ส่วนใหญ่ร้อยละ 60 ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ใดๆ (กองทิ้งไว้เฉยๆ) ประมาณร้อยละ 25 ใช้ถมที่ มีเพียงร้อยละ 15 เท่านั้นที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมนั้นมีสัดส่วนเพียงประมาณร้อยละ 7 ของปริมาณทั้งหมดที่นำมาใช้ประโยชน์ใหม่เท่านั้น

ประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินและการปลูกพืช ในทางการเกษตรที่เกี่ยวกับการปรับปรุงดินและการปลูกพืช ฟอสโฟยิปซัมอาจนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆลักษณะเหมือนกับแร่ยิปซัมดังนี้

(1) เพื่อลดปัญหาความเค็มของดิน โดยแคลเซียมในรูปไอออนประจุบวก (Ca^{2+}) ที่เกิดจากการแตกตัวของยิปซัม ($CaSo_4.nH_2O$) ซึ่งมีอยู่ในสารฟอสโฟยิปซัมที่ใส่ลงไปในดินจะเข้าไปแทนที่โซเดียม (Na^+) ที่ดินเค็มดูดยึดไว้ ทำให้สามารถชะล้างโซเดียมออกจากดินได้ง่าย และทำให้ดินมีความเค็มเพราะอิทธิพลของเกลือโซเดียมน้อยลง

(2) ใช้เป็นปุ๋ยให้ธาตุแคลเซียมและกำมะถันแก่พืชที่ปลูกในดินที่ขาดธาตุทั้งสองชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่ขาดกำมะถัน ตัวอย่างเช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา การใช้ยิปซัมอัตราประมาณ 200-400 กิโลกรัมต่อไร่ พบว่ามีผลดีกับถั่วลิสงที่มีความต้องการธาตุแคลเซียมและกำมะถันเพื่อไปพัฒนาเมล็ดที่มีคุณภาพสูง และการใช้ฟอสโฟยิปซัมกับไม้ผล เช่น ส้ม ในอัตราประมาณ 400 กิโลกรัมต่อไร่ พบว่ามีผลดีและยังมีส่วนช่วยลดการเกิดโรครากเน่า และโรคแคงเคอร์ (cankers) บนลำต้นของสมอีกด้วย (อ้างถึง Stanley, 1992)

(3) เป็นสารปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน เหมือนกับการใช้ยิปซัม โดยเฉพาะการแก้ไขปัญหาการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (surface crust) เมื่อดินเปียกและแห้ง ซึ่งจากการทดลองใช้ยิปซัมเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำโดยนักวิชาการหลายท่านให้ผลสอดคล้องต้องกันว่า ฟอสโฟยิปซัมช่วยลดการสูญเสียดิน และน้ำอย่างเด่นชัดมาก เช่น จากผลการวิจัยของ Agassi และคณะ (อ้างถึง Agassi et.al. 1990) พบว่าการใช้ฟอสโฟยิปซัมในอัตรา 5 ตันต่อเฮกตาร์ (800 กิโลกรัมต่อไร่) ในดินกรูมูโซล (grumusol soil) ช่วยลดการสูญเสียน้ำโดยการไหลบ่า (runoff water) ประมาณร้อยละ 25 และจากผลการทดลองของ Agassi และคณะ (อ้างถึง Agassi et.al. 1989) เช่นกัน พบว่า ในแปลงที่ปลูกมันฝรั่งแบบยกร่องและให้น้ำทางร่องน้ำ การใช้ฟอสโฟยิปซัมหว่านลงบนดินทรายหลังปลูกในอัตรา 10 ตันต่อเฮกตาร์ (1,600 กิโลกรัมต่อไร่) มีผลทำให้การไหลบ่าของน้ำลดลง 6 เท่าตัว และการสูญเสียเนื้อดินโดยการกร่อนดิน (soil erosion) บนร่องปลูก (ridge) ลดลง 20 เท่าตัว ซึ่ง Agassi และคณะ (อ้างถึง Agassi et.al. 1989) ยังได้สรุปไว้ด้วยว่า การใช้ฟอสโฟยิปซัมมีกลไกเชิงบวกที่ทำให้เกิดการสูญเสียดินและน้ำน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญด้วยเหตุผลสำคัญรวม 3 ประการคือ

(3.1) เมื่อใส่ฟอสโฟยิปซัมลงบนผิวดิน ฟอสโฟยิปซัมจะละลายในน้ำฝนที่ตกลงมา น้ำชลประทานหรือน้ำในดิน ถ้าดินมีความชื้นอยู่บ้างแล้วฟอสโฟยิปซัมจะปลดปล่อยอิเล็กโทรไลต์ (electrolytes) หรือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ออกมา มีผลทำให้น้ำที่ละลายอีเล็กโทรไลต์ซึมลงดินล่างได้ลึกมากขึ้น ทั้งนี้เพราะน้ำที่มีอีเล็กโทรไลต์ละลายอยู่ จะทำให้ผิวดินบนมีความพรุนและยอมให้น้ำแทรกซึมลงไปได้ลึกมากขึ้น

(3.2) ฟอสโฟยิปซัมที่หว่านลงไปบนดิน จะทำให้ดินที่มีอยู่เดิมตามธรรมชาติมีเสถียรภาพมากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งมีความคงทนและไม่แตกยุ่ยง่ายเมื่อโดยเม็ดฝนตกกระแทก ทำให้ปัญหาการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (surface crust) เมื่อดินเปียกแล้วแห้งเกิดขึ้นน้อยลง

(3.3) ฟอสโฟยิปซัมที่ละลายในน้ำฝนที่ตกลงมากระแทกเม็ดดินเดิมจะแตก จะทำให้อนุภาคของแร่ดินเหนียวที่แขวนลอยอยู่ในน้ำรวมตัวกันเป็นก้อนในรูปฟล็อก (floc) แล้วตกตะกอนเร็วขึ้นและทำให้มีโอกาสเคลื่อนย้ายหรือไหลไปอุดช่องว่างบนผิวดินได้ช้าลงและน้อยลงด้วยเช่นกัน ทำให้การเกิดแผนแข็งปิดผิว (surface crust) เมื่อดินแห้งเกิดได้ไม่เต็มที่ ซึ้งเป็นผลดีต่อการแทรกซึม

ของน้ำผิวดินลงไปในดินล่าง และลดการไหลบ่าของน้ำและการเกิดการกร่อนดิน (soil erosion) ในพื้นที่ดอนที่ไม่ราบเรียบ

ข้อจำกัดในการใช้ฟอสโฟยิปซัม

แม้ว่าฟอสโฟยิปซัมจะเป็นผลผลิตพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่ไม่มีราคาหรือราคาถูก และผลการวิจัยเชิงลึก ละเอียดและอย่างกว้างขวางจำนวนมากบ่งชี้ชัดว่าสารชนิดนี้สามารถใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพบางประการของดินได้ดี และมีผลต่อการลดการสูญเสียของน้ำและดินได้อย่างเด่นชัด แต่ตัวสารฟอสโฟยิปซัมเองก็มีสมบัติที่เป็นจุดอ่อน ข้อเสียที่ควรระวังบางประการคือ

(1) ผลพลอยได้ในรูปฟอสโฟยิปซับจากโรงงานผลิตกรดฟอสฟอริกโดยทั่วไป จะมีความชื้นสูงเพราะมีน้ำอิสระ (free water) ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักหรือมากกว่า ซึ่งไม่เหมาะจะนำไปใช้ในทันที่เนื่องจากตัวสารมีสภาพแฉะและไม่ร่วนไหลดีพอ ดังนั้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์จึงจำเป็นจะต้องทำให้เนื้อสารแห้งตัวลงจนถึงระดับความชื้นประมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักเสียก่อน จึงจะมีสภาพร่วนไหลดีพอที่จะใช้ได้สะดวก ซึ่งในทางปฏิบัติก็อาจทำโดยการอบในเตาอบ ซึ่งจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเชื้อเพลิง หรืออาจใช้วิธีตากแห้งถ้ามีสภาพอากาศที่เหมาะสม เช่น อากาศนอกฤดูฝนในประเทศแถบร้อน เช่น ในประเทศไทย เป็นต้น ทำให้ไม่ต้องเสียค่าน้ำมันในการอบสารให้แห้งตัวลง

(2) จากการทดลองโดยทั่วๆ ไป พบว่า ปริมาณการใช้ในการปรับปรุงดิน เพื่ออนุรักษ์ดินและน้ำ จำเป็นต้องใช้ฟอสฟอรัสในปริมาณมากถึงประมาณ 500-1000 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้เป็นภาระในการจัดการและต้องเสียค่าใช้จ่ายต่างๆ เกี่ยวกับการใส่สารชนิดนี้ลงในดินมากพอสมควร ได้แก่ ค่าฟอสโฟยิปซัมเอง ค่าขนส่ง ค่าเก็บรักษา และค่าแรงงานในการใส่ ซึ่งการใส่สารชนิดนี้ลงในดินจะเกิดผลคุ้มค่าหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับผลดีที่จะได้รับทั้งทางตรงและทางอ้อม และค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เป็นต้นทุนในการใช้สารชนิดนี้ ซึ่งผลดีโดยตรงก็คือผลต่อการเพิ่มผลผลิตพืช ในฤดูการเพาะปลูกที่มีการใช้ และผลโดยอ้อมก็คือผลต่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ ที่อาจจะมีผลต่อการควบคุมรักษาระดับผลผลิตของพืชที่อาจจะทำให้ไม่ต่ำไปกว่าเดิมหรือได้รับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลระยะยาวที่เกษตรกรหรือผู้ใช้ไม่อาจยอมรับได้

(3) ฟอสโฟยิปซัมอาจมีกัมมันตภาพรังสีในรูปแร่เรเดียม-226 ผสมปะปนมาด้วยจนถึงระดับที่อาจเกิดอันตรายกับผู้ใช้หรือผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีการฟอสโฟยิปซัมชนิดนี้ไปใช้ในการผลิตพืช โดยมาตรฐานทางด้านความปลอดภัยกับผู้ใช้ ฟอสโฟยิปซัมที่จะใช้ ไม่ควรมีสิ่งเจือปนในรูแร่เรเดียม -226 สูงกว่า 0.01 mg kg^{-1}

(4) เนื่องจากฟอสโฟยิปซัมเป็นสารเคมีที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุแคลเซียมและกำมะถันเป็นส่วนใหญ่ และยังมีฟอสฟอรัสและแร่ธาตุอื่นๆ ปะปนมาด้วย การใช้สาร

ชนิดนี้ใส่ลงในดินปริมาณมาก เช่น อัตรา 500-1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ทุกปีหรือทุกฤดู อาจมีผลตกค้างในดินทำให้ดินมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสม ต่อการปลูกพืชได้ เช่น อาจทำให้ดินมีสมบัติทางเคมีบางประการเปลี่ยนแปลงไปในทางลบ หรืออาจทำให้ดินเนื้อหยาบเกิดการขาดธาตุอาหารประจุบวกบางชนิดได้ เช่น ธาตุโพแทสเซียม แมกนีเซียม ฯลฯ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบในทางลบต่อสมบัติดินหรือสภาพสิ่งแวดล้อมดังกล่าว อันเนื่องมาจากการใช้ฟอสโฟยิปซัมในปริมาณมากอย่างต่อเนื่องก็ยังไม่มีงานวิจัยที่น่าเชื่อถือยืนยันได้ว่าการใช้ในปริมาณมากและอย่างต่อเนื่องเกิดผลเสียจริง เกิดผลเสียอย่างไรและในลักษณะไหนต่อดินและพืชที่ปลูก (ปิยะ ดวงพัตรา, 2553)

(5) ฟลูออโรยิปซัม (fluorogypsum) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตกรดไฮโดรฟลูออริกหรือกรดกัดแก้ว (HF) จากแร่ฟลูออสปาร์ (Fluotrspar) สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุสร้างถนน

(6) ยิปซัมจากกระบวนการกำจัดหรือทำให้กรดซัลฟิวริกที่เป็นของเสียที่ใช้แล้วจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อให้เป็นกลางก่นจะนำไปทิ้ง แต่ส่วนมากของเสียจากกระบวนการนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เพราะมีปริมาณไม่มากนักและมักมีสิ่งเจือปนสะสมอยู่เป็นจำนวนมากร่วมด้วย (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554)

2.4.3 เอฟจีดียิปซัม (Flue gas desulfurization gypsum; FGD gypsum)

จากการศึกษาโครงสร้างของเอฟจีดียิปซัมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เรย์ พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต และมีซิลิกอนไดออกไซด์ปะปนอยู่เล็กน้อยองค์ประกอบหลักและองค์ประกอบรองทางเคมีประกอบด้วย

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	30.75-31.85%,
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	44.35-45.20%
อลูมีเนียมออกไซด์ (AlO)	0.58-0.61%
เหล็กออกไซด์ (FeO)	0.19-0.21%
แมกนีเซียมออกไซด์ (MnO)	0.65-0.70 %
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (PO_5)	0.08-0.09 %
โซเดียมออกไซด์ (NaO)	0.01-0.02 %
โพแทสเซียมออกไซด์ (KO)	0.01-0.02 %
น้ำผลึก	19.83-20.82 %
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	0.95-1.12%

ปรอท (Hg)	น้อยกว่า 0.02 mg kg^{-1}
สารหนู (As)	0.17-0.19 mg kg^{-1}
ตะกั่ว (Pb)	4.54-6.71 mg kg^{-1}
แคดเมียม (Cd)	น้อยกว่า 0.02 mg kg^{-1}
ทองแดง (Cu)	6.49-6.86 mg kg^{-1}
โครเมียม (Cr)	9.54-11.61 mg kg^{-1}
นิเกิล (Ni)	1.12-2.31 mg kg^{-1}
แมงกานีส (Mn)	52.21-74.14 mg kg^{-1}
สังกะสี (Zn)	1.82-3.68 mg kg^{-1}

ที่มา: ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี (2555)

การใช้ยิปซัมบำบัดโลหะหนักในดิน นอกจากการประยุกต์ใช้ยิปซัมทางการเกษตรเพื่อแก้ไขปัญหาดินเค็มและปรับปรุงสมบัติดินลดการเกิดเปลือกแข็งปิดผิวดิน (surface crust) แล้ว ยังได้มีการประยุกต์ใช้ยิปซัมหรือฟอสโฟยิปซัมเพื่อการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนสารพิษในสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้เพื่อลดการเคลื่อนย้ายและเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของโลหะหนัก เป็นเทคโนโลยีการบำบัดสิ่งแวดล้อมได้ทางหนึ่ง ตัวอย่าง เช่นจากการศึกษาของ ทัศณางกูล ตุลยากรณ์ (2553) พบว่า ฟอสโฟยิปซัมสามารถดูดซับโลหะสังกะสี นิเกิล และทองแดงได้ ส่วนการทดลองของยุทธ์ดนัย ยอดทองดี (2555) ได้ทำการศึกษาการกักเก็บโลหะหนักในพืชที่ปลูกในดินที่ผสมเอฟจีดียิปซัม พบว่า ในพืชทดลองมีการดูดโลหะหนักเข้าไปในปริมาณน้อยมาก ซึ่งต้นคะน้ามีการดูดซึมโลหะหนักเข้าไปในปริมาณน้อยมาก ส่วนถั่วเขียวได้ศึกษาในเมล็ดถั่วเขียว พบปริมาณโลหะ ทองแดง และตะกั่ว ถูกเก็บสะสมไว้ในเมล็ดในปริมาณที่ไม่สูงมาก และพบในปริมาณที่ไม่เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้มีได้ในอาหาร ในขณะที่ตรวจไม่พบ แคดเมียม โครเมียม นิเกิล สารหนู และปรอท ในพืชทั้งสองชนิด

2.5 ยาสูบ (Tobacco)

2.5.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับยาสูบ

ยาสูบ (Tobacco) ชื่อวิทยาศาสตร์ Nicotiana tabacum Linn. วงศ์ Solanaceae เป็นไม้ล้มลุก สูงประมาณ 1 - 1.5 เมตร ลาต้นตรงมีขนอ่อนนุ่มปกคลุม ไม่แตกกิ่งก้าน ใบเดี่ยวเรียงตัวสลับเวียนรอบลาต้น รูปวงรี หรือรูปใบหอก ขอบใบเรียบ เนื้อบางนุ่ม ผิวมีขน ดอกช่อแบบ Panicle กลีบเกลี้ยงสีขาวเป็นชี่แหลม กลีบดอกสีชมพูอ่อนติดกัน เป็นรูปกรวยแยกเป็น 5 แฉก ออกผลลักษณะเป็นแคปซูล ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด ดินที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกยาสูบต้องเป็นดินร่วน

ปนทราย ดินร่วน และดินร่วนปนดินเหนียว ควรเลือก ที่สูง มีการระบายน้ำดี ค่าความเป็นกรด-เบส ของดินอยู่ระหว่าง 5.6-6.5 การเตรียมดินควรไถให้ลึกอย่างน้อย 6-8 นิ้ว เพื่อให้รากหยั่งลึกไปในดิน และเจริญเติบโตได้ดี ควรปลูกเป็นแถวเดี่ยวแบบยกร่อง ความต้องการน้ำของต้นยาสูบในระยะเดือน แรกมีน้อยมาก แต่หลังจากปลูกแล้ว 30-40 วัน ต้องการความชุ่มชื้นสูงเพื่อการเจริญเติบโต มี สรรพคุณ คือ ใบที่แก่มีลักษณะเป็นสีเหลืองใช้เป็นยา มีสรรพคุณในการฆ่าพวกแมลง เหา และเพลี้ย ทางการแพทย์ไม่มีการใช้ประโยชน์ในรูปยาแต่ทางการเกษตรมีการนามาใช้ในการฆ่าแมลง ยาสูบเป็น พืชควบคุม ภายใต้พระราชบัญญัติยาสูบ ควบคุมดูแล โดยกรมสรรพสามิต ใช้ใบเป็นผลผลิตใน อุตสาหกรรมบุหรี่ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ตามการบ่มได้ 3 ประเภท 1. ยาสูบ ประเภทบ่มไอร้อน (Flue-Cured Tobacco) ได้แก่ ยาสูบเวอร์จิเนีย 2. ยาสูบประเภทบ่มอากาศ (Air-Cured Tobacco) ได้แก่ ยาสูบเบอร์เลย์ 3. ยาสูบประเภทบ่มแดด (Sun-Cued Tobacco) ได้แก่ ยาสูบเตอร์กิช (นันท วัน, 2543)

2.5.2 ประวัติการทำยาสูบ

ยาสูบมีแหล่งกำเนิดในบริเวณตอนกลางของทวีปอเมริกา แม้มนุษย์จะรู้จักใบยาสูบมา ประมาณสองพันปีแล้ว แต่ก็มิได้สูบกันอย่างจริงจังจนเป็นนิสัย จนกระทั่งพวกอินเดียแดง ซึ่งเป็นชาว พื้นเมืองของอเมริกา รู้จักใช้ยาสูบกันอย่างแพร่หลาย จึงได้มีการทำไร่ยาสูบกันทั่วไป การบันทึก ประวัติของยาสูบ มีขึ้นเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2035 เมื่อโคลัมบัส (Christopher Columbus) ขึ้น ฝั่งที่ซานซัลวาดอร์ (San Salvador) ในหมู่เกาะอินดีสตะวันตก เห็นชาวพื้นเมืองเอาใบไม้ชนิดหนึ่งมา มวน จุดไฟตอนปลาย แล้วดูดควัน ตามบันทึกกล่าวว่า ชาวพื้นเมืองมวนยาสูบด้วยใบข้าวโพด สเปน เรียกยามวนนี้ว่า ซิการา (cigara) ต่อมาเพี้ยนเป็นคำว่า ซิการ์ (cigar) จากการขุดพบซากปรักหักพัง ของเมืองเก่าของพวกมายา บนคาบสมุทรคาร์เทน (Cartan) ในประเทศเม็กซิโก ได้พบกล้องยาสูบ สมัยโบราณ ซึ่งตรงโคนสำหรับดูดแยกออกเป็นสองง่าม สำหรับอัดเข้าไปในจมูก ด้วยเหตุนี้ ชาว อเมริกันโบราณสูบยากันทางจมูก กล้องชนิดนี้คนพื้นเมืองเรียกว่า ทาบาโค (tabaco) ซึ่งเป็นต้น กำเนิดของคำว่า โทแบคโค (tobacco) การเพาะปลูกยาสูบในแหล่งอื่นๆ ได้เริ่มที่หมู่เกาะไฮติ เมื่อ พ.ศ. 2074 โดยได้เมล็ดพันธุ์จากเม็กซิโก และขยายไปยังหมู่เกาะข้างเคียง จนกระทั่ง พ.ศ. 2123 จึง ได้เริ่มปลูกในคิวบา และต่อไปจนถึงกายอานา และบราซิล ปลายพุทธศตวรรษที่ 22 แพร่หลายไปยัง ทวีปยุโรป เอเชีย และแอฟริกา มีหลักฐานแสดงว่า มนุษย์ในสมัยโบราณรู้จักการปลูกยาสูบ เพื่อนำใบ ไปซอยและมวนสูบ นอกจากนี้ยังเป็นที่ทราบกันว่า ยาสูบมีคุณสมบัติเป็นยาฆ่าเชื้อโรคที่ดีอย่างหนึ่ง ด้วย ประเทศแรกในทวีปเอเชียที่เริ่มปลูกยาสูบคือ ฟิลิปปินส์ แล้วแพร่หลายต่อไปยังอินเดีย จีน และ อินโดนีเซีย

สำหรับประเทศไทยไม่มีหลักฐานว่า ใครเป็นผู้นำเข้ามา และมาถึงเมื่อใด มีเพียงบันทึกของหมอสอนศาสนาว่า เมื่อเขาเข้ามาเมืองไทยในสมัยสมเด็จพระนารายณ์มหาราชนั้นพบว่า คนไทยสูบยากันทั่วไปแล้ว และจากพระนิพนธ์ของสมเด็จฯ กรมพระยาดำรงราชานุภาพ เรื่องบุหรี่ ทรงกล่าวว่า เมอร์สิเออร์ เดอ ลาลูแบร์ อัครราชทูตฝรั่งเศสในรัชสมัยสมเด็จพระนารายณ์มหาราช เมื่อ พ.ศ. 2111 ได้เขียนเล่าเรื่องประเทศสยามว่า คนไทยชอบใช้ยาสูบอย่างฉุน ทั้งผู้ชาย และผู้หญิง ใบยาที่ใช้กันในสมัยกรุงศรีอยุธยานั้น ได้จากเกาะมะนิลาบ้าง จากเมืองจีนบ้าง และที่ปลูกในบ้านเราบ้าง

2.5.3 การเพาะกล้ายาสูบ

(1) การเพาะกล้า

งานอันดับแรกของการทำไร่ยาสูบ คือ การเพาะกล้ายาสูบ ต้นยาสูบในไร่จะเจริญเติบโตดี ต้องมาจากต้นกล้าที่สมบูรณ์ แข็งแรง เมื่อนำไปปลูกแล้ว ต้นกล้าตายน้อยที่สุด หรือไม่ตายเลย ถ้าต้นกล้าตายหลังจากปลูก 7-10 วัน ควรจะมีการปลูกซ่อมกล้า และไม่ควรจะปลูกซ่อมบ่อยๆ เพราะการซ่อมกล้าเพียงร้อยละ 10 จะทำให้คุณภาพลดลงได้ถึงร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากการเก็บใบยาสูบไปบ่ม ผู้เก็บมักจะเก็บทุกต้นเหมือนกันหมด ทำให้มีใบยาที่ไม่สุกติดเข้าไปบ่มด้วย ทำให้คุณภาพใบยาลดลง

การที่จะผลิตต้นกล้าให้มีความสมบูรณ์ และแข็งแรง จะต้องมีการเตรียมและทำแปลงเพาะกล้าที่ดีมาก่อน นับตั้งแต่การเลือกที่ดิน ควรเป็นดินที่อุดมสมบูรณ์ มีการระบายน้ำดี ถ้าเป็นดินบุกเบิกใหม่ยิ่งดี หลังจากเตรียมดินยกเป็นแปลง (กว้าง 1 เมตร ยาว 11 เมตร) แล้วคลุมด้วยผ้าพลาสติก และรมด้วยก๊าซเมทิลโบรไมด์ นานประมาณ 24-48 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโรคแมลง และวัชพืชในดิน เมื่อเปิดผ้าพลาสติกออกแล้ว ผึ่งดินทิ้งไว้ 12-24 ชั่วโมง ใส่ปุ๋ยรองพื้นสูตร 4-16-25 ในอัตรา 2-4 กิโลกรัมต่อแปลง และใส่ยาฟูราดาน ๓ จี เพื่อป้องกันโรคใบหดในอัตรา 250-300 กรัมต่อแปลง แล้วกลับปุ๋ยและยาให้อยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 1-2 นิ้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดยาสูบที่หว่านได้รับอันตรายจากปุ๋ยและยา

(2) การหว่านเมล็ด

เนื่องจากเป็นเมล็ดที่มีขนาดเล็กมาก (เมล็ดยาสูบ 1 กรัม มีจำนวนประมาณ 10,000-12,000 เมล็ด) จึงควรนำเมล็ดผสมขี้เถ้าในการหว่าน เพื่อให้กระจายทั่วแปลง หรือใส่เมล็ดลงในบัวรดน้ำ คนเมล็ดให้กระจายเข้ากับน้ำจนทั่ว แล้วรดให้ทั่วแปลง โดยใช้เมล็ดแปลงละ 1.0-1.5 กรัม รดน้ำให้ชุ่ม แล้วคลุมแปลงเพาะด้วยผ้าดิบ เพื่อป้องกันแสงแดดในเวลากลางวัน และลดแรงกระแทกของน้ำฝน ในฤดูฝน ถ้าเป็นฤดูแล้งอาจใช้แกลบคลุมได้

การรดน้ำ รดน้ำวันละ 4 ครั้ง จนกว่าเมล็ดจะงอก จึงค่อยๆ ลดลงเหลือวันละ 2-3 ครั้ง การพ่นยาป้องกันโรคและแมลง จะต้องทำทุกสัปดาห์ หลังจากเมล็ดงอกแล้ว โรคที่สำคัญใน

แปลงเพาะได้แก่ โรคโคนเน่า และโรคแอนแทรกโนส สำหรับแมลงได้แก่ หนอน และแมลงหวี่ขาว เมื่อกล้ายาสูบมีอายุ 35-45 วัน จึงถอนย้ายไปปลูกในไร่

2.5.4 การทำไร่ยาสูบ

ยาสูบเป็นพืชที่ต้องการน้ำฝน และความชุ่มชื้นในอากาศ ดังนั้นการปลูกยาในช่วงกลางถึงปลายฤดูฝน จึงจะได้ใบยาที่มีคุณภาพดี เป็นที่ต้องการของตลาด ทั้งในประเทศ และต่างประเทศ สมัยก่อนชาวไร่จะปลูกยาสูบในนาหลังจากเก็บเกี่ยวข้าวแล้ว ซึ่งเป็นช่วงฤดู แล้ง ทำให้ใบยาแห้งที่ได้ขาดคุณภาพที่ดี ปัจจุบันชาวไร่เลื่อนเวลาเพาะปลูกให้เร็วขึ้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือ โรคและแมลงมีมากตามขึ้นมาด้วย ดังนั้นการป้องกัน และกำจัดแมลง จึงมีความสำคัญต้องดูแลอย่างสม่ำเสมอ ดินที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกยาสูบต้องเป็นดินร่วนปนทราย ดินร่วน และดินร่วนปนดินเหนียว ควรเลือกที่สูง มีการระบายน้ำดี ค่าความเป็นกรด-เบสของดินอยู่ระหว่าง 5.6-6.5 การเตรียมดินควรไถให้ลึกอย่างน้อย 6-8 นิ้ว เพื่อให้รากหยั่งลึกไปในดิน และเจริญเติบโตได้ดี ควรปลูกเป็นแถวเดี่ยวแบบยกร่อง ความต้องการน้ำของต้นยาสูบในระยะเดือนแรกมีน้อยมาก แต่หลังจากปลูกแล้ว 30-40 วัน ต้องการความชุ่มชื้นสูง เพื่อการเจริญเติบโต การเลือกใช้ปุ๋ยเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอาหารธาตุไนโตรเจนต้องไม่สูงเกินไป มิฉะนั้นจะทำให้คุณภาพใบยาแห้งลดลง การเก็บใบยาสดแต่ละครั้ง จะต้องรอให้ใบยาสุกจริงๆ เพื่อให้ได้ใบยาแห้งที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ

(1) ยาสูบพื้นเมือง

ยาพื้นเมืองที่โรงงานยาสูบนำมาใช้ในกิจการ ได้มาจากจังหวัดกาญจนบุรี และสุพรรณบุรี ปัจจุบันนำมาใช้ในลักษณะของยาเส้น

(2) การเพาะกล้า

วิธีการปฏิบัติคล้ายๆ กับการเพาะกล้ายาสูบประเภทอื่นๆ โดยเริ่มหว่านเมล็ดประมาณเดือนกรกฎาคม - สิงหาคม เมื่อกล้ามีอายุประมาณ 1 เดือน ถอนย้ายกล้าไปชำในแปลงใหม่อีกประมาณ 1เดือน ก่อนนำไปปลูกในไร่

(3) การปลูก

ส่วนมากปลูกในที่ดินบุกเบิกใหม่ หรือที่ดินริมน้ำ ไม่นิยมใส่ปุ๋ย ไม่ใช้ยาป้องกันหรือกำจัดโรคและแมลง พอดินจืด ก็ย้ายหาที่ปลูกใหม่ การปลูกยาสูบพื้นเมืองอาศัยธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ ไม่ต้องให้น้ำมาก นอกจากในระยะแรกๆ ที่ย้ายกล้าปลูกเท่านั้น การปลูกจะเริ่มกันในเดือนตุลาคม - พฤศจิกายน และเก็บใบยาสด เมื่อต้นยาสูบอายุประมาณ 100-120 วัน เสร็จสิ้นการเก็บใบยาประมาณเดือนมกราคม หรือประมาณ 2 เดือน หลังจากเริ่มเก็บใบยาสดครั้งแรก

2.5.5 การเก็บใบยาสดและการบ่ม

การเก็บใบยาสดในประเทศไทยยังใช้วิธีเก็บด้วยมือ โดยเก็บจากใบยาล่างขึ้นไปหายอด และควรจะเก็บในเวลาเช้า การเก็บให้เลือกเฉพาะใบยาที่เริ่มแก่หรือสุกเท่านั้น เพราะมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพใบยาแห้ง การเก็บครั้งหนึ่งๆ ประมาณ 3-5 ใบต่อต้น แต่ละครั้งห่างกัน 5-10 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของใบยา และตำแหน่งของใบบนลำต้น เช่น ใบยาชั้นล่างจะแก่หรือสุกเร็วกว่าใบยายอด เป็นต้น

(1) โรคของยาสูบ

สาเหตุที่ทำให้ยาสูบเกิดโรคมีอยู่หลายประการ ทั้งที่เกิดจากเชื้อโรคที่มีชีวิต เช่น รา บัคเตรี ไวรัส และไส้เดือนฝอย หรืออาจเกิดจากสิ่งที่ไม่มีชีวิต เช่น สภาพแวดล้อมที่ผิดปกติ และการขาดธาตุอาหารต่างๆ โรคที่สำคัญ และพบเห็นเป็นประจำ ได้แก่

โรคในแปลงเพาะกล้า

(1.1) โรคโคนเน่า (damping-off) เกิดจากเชื้อราพิเทียม หรือไรซอกโทเนีย (Pythium spp. หรือ Rhizoctonia spp.) ที่อาศัยอยู่ในดิน ทำให้ต้นกล้าเน่าล้มลงกับพื้นดิน

(1.2) โรคแอนแทรกโนส (anthracnose) เกิดจากเชื้อรา คอลลีโทตริกุม หรือกลีโอสปอเรียม (Colletotrichum sp. Or Gloeosporium sp.)เชื้อโรคเหล่านี้อาศัยอยู่ในดิน หรืออาจปลิวมาตามลม หรือติดมากับเมล็ดได้ อาการเริ่มแรกคือ ใบเป็นจุดช้ำ แล้วต้นกล้าจะยุบตัวลง คล้ายกับโรคโคนเน่า การป้องกัน และกำจัด นอกจากใช้ยาเคมีแล้ว ควรเปิดผ้าคลุมแปลงเพาะให้ต้นกล้าได้รับแสงแดดอยู่เสมอ ในเวลาเช้าและเย็น เพื่อลดความชื้นในดิน ถ้าต้นกล้าขึ้นแน่นเกินไป ควรถอนทิ้งบ้าง

โรคในไร่ปลูก

(1.3) โรคตากบ (frogeye) เกิดที่ใบ เป็นแผลแห้งกลมๆ ทั่วไป เนื่องจากเชื้อราเซอร์โคสปอเรียม (Cercosporium nicotianae Ell. & Ev.) พบมาก เมื่ออากาศร้อน และความชื้นสูง เช่น ฤดูฝน

(1.4) โรคใบจุดสีน้ำตาล (brown spot) เกิดจากเชื้อราแอลเทอร์นาเรีย (Alternaria alternata Fries.) พบในช่วงที่อากาศอบอุ่น และความชื้นปานกลาง ใบจะเป็นจุดสีน้ำตาลเป็นวงซ้อนๆ กัน

(1.5) โรคราแป้ง (powdery mildew) เกิดบนใบ เป็นกลุ่มผงสีขาวคล้ายโรยด้วยแป้ง เนื่องจากเชื้อราอีริซิฟี (Erysiphe chichoracearum DC.) ระบาดเมื่ออากาศเย็น ความชื้นปานกลาง ได้รับแสงแดดน้อย เช่น ไร่ยาสูบที่อยู่ตามเชิงเขา

(1.5) โรคไฟลามทุ่งและใบจุดเหลี่ยม (wildfire and angular leaf spot) เกิดจากเชื้อบัคเตรีซูโดโมนัส (Pseudomonas tabaci (Wolf & Foster) Steven) อาศัยอยู่ในดิน จะ

ระบาด เมื่อมีความชื้นสูง เริ่มแรกใบยาสูบจะเป็นรอยช้ำ และเป็นแผลกลมๆ หรือรูปเหลี่ยม อาการนี้มักจะเกิดปนกัน

(1.6) โรคใบหด (leaf curl) เกิดจากเชื้อไวรัส โดยมีแมลงหวี่ขาว (white fly-Bemisia tabaci Genn.) เป็นพาหะนำโรค ระบาดมากในช่วงฤดูฝน ถึงปลายฤดูฝน ถือได้ว่า เป็นโรคที่มีความสำคัญมากที่สุด ของการเพาะปลูกยาสูบในประเทศไทย ใบยาสูบจะม้วนลง หรือเป็นคลื่น แล้วแต่ความรุนแรงของโรค การป้องกันและกำจัด ควรใช้ยาประเภทดูดซึมจะได้ผลดีที่สุด เช่น ฟูราดาน 3 จี หรือคูราแทร์ ใส่รองก้นหลุมก่อนปลูกยาสูบต้นละ 2 กรัม และควรพ่นยาฆ่าแมลงประเภทดูดซึมชนิดอื่นอีกทุกสัปดาห์

(1.7) โรคใบด่าง (mosaic) เกิดจากเชื้อไวรัสติดต่อได้ง่ายโดยการสัมผัส สีของใบไม่สม่ำเสมอ บางครั้งใบเสียรูปทรง

(1.8) โรคแผลละเอียด (streak)

เกิดจากเชื้อไวรัส ระบาดได้โดยการสัมผัส และแมลงพวกตั๊กแตนที่กัดกินใบ จะเห็นแผลสีน้ำตาลเล็กๆ เกิดขึ้นระหว่างเส้นใบ การป้องกันและกำจัด ควรพ่นยาฆ่าแมลงเป็นประจำ และล้างมือให้สะอาดอยู่เสมอระหว่างปฏิบัติงานในไร่ด้วยน้ำกับสบู่ หรือน้ำยาไตรโซเดียมฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์

(1.9) โรคเหี่ยวด้านเดียว (fusarium wilt)

เกิดจากเชื้อราฟิวซาเรียมที่อาศัยอยู่ในดิน (Fusarium oxysporum Schlecht) เชื้อโรคเข้าทำอันตรายทางราก ทำให้ใบเหี่ยวเพียงด้านเดียวของลำต้น แต่ในระยะสุดท้ายจะเหี่ยวทั้งต้น

(1.10) โรคแข้งดำ (black shank) เกิดจากเชื้อราไฟทอพโทรา (Phytopthora parasitica var. nicotiana (Breda de Haan) Tucker) เป็นเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ในดินได้เป็นเวลานาน เข้าทำลายทางราก ทำให้ใบและลำต้นเหี่ยวตาย

(1.11) โรคเหี่ยวเฉา (bacterial wilt) เกิดจากเชื้อบัคเตรีซูโดโมนัสที่อาศัยอยู่ในดิน (Pseudomonas solanacearum Smith) เข้าทำอันตรายทางราก ทำให้ใบและลำต้นเน่าและเหี่ยวในที่สุด การป้องกันและกำจัด ควรปลูกพืชชนิดอื่นหมุนเวียนสลับกับการปลูกยาสูบ และควรปลูกยาสูบพันธุ์ที่มีความต้านทานต่อโรคโดยเฉพาะ เช่น พันธุ์โคเกอร์ 48 และสเปจต์จี 28 (Speight G-28) ซึ่งมีความต้านทานต่อเชื้อโรคที่อยู่ในดินทั้งสามชนิดข้างต้น หรือ พันธุ์โคเกอร์ 319 ซึ่งมีความต้านทานต่อโรคเหี่ยวด้านเดียว พันธุ์เค (K-399) มีความต้านทานต่อโรคแข้งดำ และพันธุ์โคเกอร์ 347 มีความต้านทานต่อโรคเหี่ยวเฉาโดยเฉพาะ เป็นต้น แต่ทั้งนี้ในบริเวณนั้นจะต้องปราศจากไส้เดือนฝอยรากปม เนื่องจากจะเข้าทำอันตรายระบบราก ทำให้พืชลดความต้านทานลง หรือหมดความต้านทานเลย

(1.12) โรคไส้เดือนฝอยรากปม (root-knot nematode) เกิดจากพยาธิตัวกลม เมลอยโดกาย (Meloidogyne spp.) อาศัยอยู่ในดิน มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ทำให้รากบวมโตผิดปกติ ต้นพืชจะดูดน้ำและอาหารได้ยาก ทำให้ผลิตผลลดลง และพืชลดความต้านทานโรคลงด้วย

การป้องกันและกำจัด มีวิธีปฏิบัติอยู่ 2 วิธี คือ การใช้ยาฉีดลงไปในดิน (fumigation) และปลูกพืชชนิดอื่นหมุนเวียนสลับกับยาสูบ เช่น ข้าว ข้าวโพด และงา เป็นต้น เพื่อลดปริมาณไส้เดือนฝอยลง สำหรับวิธีแรกนั้นได้ผลดี แต่เสียค่าใช้จ่ายสูง

นอกจากนี้อาการขาดธาตุอาหารต่างๆ เช่น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แมกนีเซียม โบรอน และแคลเซียม ซึ่งพบเห็นเป็นประจำ รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่ผิดปกติต่างๆ เช่น ความหนาวเย็น อากาศเป็นพิษ และการใช้สารเคมีไม่ถูกวิธี ก็ ถือว่าเป็นอาการของโรคยาสูบเช่นเดียวกัน ซึ่งเราสามารถป้องกัน และแก้ไขได้

(2) แมลงศัตรูพืช

แมลงที่มีความสำคัญ และเป็นอุปสรรคกับการเพาะปลูกยาสูบในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 จำพวกใหญ่ๆ คือ

(2.1) แมลงจำพวกปากดูด

แมลงหวี่ขาว (white fly) เป็นแมลงที่ทำให้เกิดปัญหามากที่สุด ในการเพาะปลูกยาสูบในประเทศไทย คือ เป็นพาหะนำเชื้อโรคไวรัสมาสู่ต้นยาสูบ ทำให้เกิดโรคใบหด

เพลี้ยอ่อนยาสูบ (green peach aphid : Myzus persicae Sulzer) เกาะดูดน้ำเลี้ยงบนใบ และขับถ่ายมูลซึ่งเป็นอาหารอย่างดีของราดำ ทำให้ใบยาขาดคุณภาพ การป้องกันและกำจัด ปฏิบัติเช่นเดียวกับการป้องกัน และกำจัดโรคใบหด

(2.2) แมลงจำพวกปากกัด

หนอนคืบกินกล้า (cabbage looper : Trichoplusia sp.)

หนอนกระทู้กินยอด (tobacco budworm : Helicoverpa armigera Hubner)

หนอนกระทู้กินใบ (tobacco leaf eating caterpillar : Spodoptera litteralis Fabricius)

การป้องกัน และกำจัด ถ้าใช้ยาฟูราดาน ๓ จี หรือคูราแทร์ รองก้นหลุมก่อนปลูกยาสูบ จะป้องกันหนอนกระทู้ได้ 30-40 วัน แล้วจึงพ่นด้วยยาเมโทมิล (แลเนตและนูดริน) หรือออร์ทีนทุกๆ 7 วัน นอกจากนี้ยังมีแมลงอื่นๆ อีกหลายชนิดแต่การระบาดไม่ค่อยรุนแรงนัก เช่น หนอนเจาะลำต้นยาสูบ (tobacco stem borer) ตั๊กแตนหนวดสั้น (short horned grasshopper) ตั๊กแตนหนวดยาว (long horned grasshopper) หนอนกระทู้กัดต้นยาสูบ (tobacco cutworm) จิ้งหรีดโป่ง (field cricket) แมลงกระชอน (mole cricket) และด้วงขาวกินรากยาสูบ (white grub)

แมลงที่ทำความเสียหายกับใบยาแห้งมี 2 ชนิด คือ มอดยาสูบ (cigarette beetle) และซีปะขาวยาสูบ (tobacco moth) การป้องกัน และกำจัด ใช้การรมด้วยแก๊ส และรักษาความสะอาดภายในและภายนอกโรงเรือน ที่เก็บใบยา จะได้ผลดีที่สุด

การจัดชั้นใบยา

ใบยาที่บ่มเสร็จเรียบร้อยแล้ว (เวอร์ยิเนีย และเบอร์เลย์) จะต้องนำมาคัดเป็นใบๆ เพื่อกำหนดชั้นมาตรฐานให้ถูกต้อง สำหรับการซื้อขาย แล้วรวมมัดใบยาชั้นเดียวกันเข้าด้วยกันเป็นกำๆ และมัดหัวกำ ด้วยใบยาอีกทีหนึ่ง นำใบยาชั้นเดียวกันมาอัดรวมเป็นห่อ โดยใช้เครื่องอัดใบยา ซึ่งทำขึ้นโดยเฉพาะ ใบยาแต่ละห่อหนักประมาณ 60-70 กิโลกรัม แล้วห่อหุ้มด้วยกระสอบป่าน สำหรับใบยาเตอร์กิช ได้คัดและแยกใบยาเป็นพวกๆ ตามขนาดและคุณภาพ ตั้งแต่หลังจากเก็บใบยาสดแล้ว และนำมาร้อยด้วยเชือกแยกเป็นพวกๆ หลังจากนั้นจึงนำใบยาที่แห้งและกองหมักได้ที่แล้ว มาอัดเป็นห่อๆ ได้เลย ห่อหนึ่งๆ หนักประมาณ 15-20 กิโลกรัม

ใบยาเวอร์ยิเนีย การจัดชั้นใบยาได้อาศัยหลักมาตรฐานการจัดชั้นใบยาเวอร์ยิเนียอเมริกัน ซึ่งประกอบด้วย หมู่ คุณภาพ และสี ดังนี้

หมู่ การจัดใบยาสูบให้อยู่ในหมู่ใดนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะบางประการ ที่มีส่วนสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับตำแหน่งของใบบนลำต้น

คุณภาพ การจัดใบยาสูบให้อยู่ในระดับคุณภาพใดนั้น ขึ้นอยู่กับระดับสูงต่ำขององค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ขนาดของใบยากว้างยาว ตำหนิ และส่วนเสีย เป็นต้น

สี สีเป็นองค์ประกอบที่จะระบุคุณค่าของใบยา ใบยาแต่ละสีจะมีกลิ่นและรสแตกต่าง ใบยาเบอร์เลย์ การจัดชั้นใบยาได้อาศัยหลักมาตรฐานการจัดชั้นใบยาเบอร์เลย์อเมริกา เช่นเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วย หมู่ คุณภาพและสี

2.6 การปลูกยาสูบพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

พันธุ์ที่ปลูก พันธุ์ TN90 เป็นประเภทบ่มอากาศ เรียกว่า ยาสูบเบอร์เลย์ ใบยามีคุณสมบัติพิเศษกว่าประเภทอื่น คือ มีโครงสร้างโปร่ง ดูดซับน้ำหอม น้ำปรุง ได้ดี มีคุณสมบัติในการเผาไหม้ดี ในการผลิตบุหรี่ รสอเมริกันโดยทั่วไปใช้ใบยาเบอร์เลย์ 14-45% ใบยาแห้งมีสีเนื้อ หรือน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลแก่ ปริมาณนิโคตินสูง (2.5-4.0%) ปริมาณน้ำตาลน้อยมาก (0-4%) มีน้ำหนักเบา คุณภาพในการบรรจุมวนดี เป็นใบยาที่มีคุณภาพดี มีกลิ่นหอมคล้ายโกโก้

พื้นที่ปลูก ประมาณ 32,000 – 40,000 ไร่ อ.ศรีสำโรง , อ.เมือง , อ.สวรรคโลก

เกษตรกร ประมาณกว่า 10,000 ราย (สังกัดโรงงานยาสูบ 6,000 ราย) ผลิตใบยาสูบให้โรงงานยาสูบและ บริษัทส่งออก ตามโควตา

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษา อิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ในการเป็นสารปรับปรุงดินและดูดซับ-รูปทางเคมีของแคดเมียมในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบระบบโควตา เป็นการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการ พร้อมกับการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยมีขั้นตอน ระบบเบียบวิธีการวิจัย ดังนี้

3.1 สำรวจบริบทและพฤติกรรมการใช้ปุ๋ยเคมี การปรับปรุงบำรุงดิน ในพื้นที่ปลูกยาสูบ

เป็นการสำรวจบริบทและพฤติกรรมการใช้ปุ๋ยเคมี การปรับปรุงบำรุงดิน เป็นการสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่าง และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการและความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดและสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของแคดเมียมที่ในพื้นที่เพาะปลูกยาสูบในระบบโควตา

(1) การเก็บข้อมูลทางด้านสังคมโดยการสังเกตพฤติกรรมการทำการเพาะปลูกยาสูบ การใช้ปุ๋ยเคมี โดยการสัมภาษณ์เชิงลึก เกษตรกรผู้เพาะปลูกยาสูบ โดยเลือกแบบเจาะจงผู้เพาะปลูกยาสูบระบบโควตา มาเป็นเวลา 15 ปีขึ้นไป จำนวน 20 ราย

(2) ศึกษาสภาพปัญหา บริบทการเพาะปลูกยาสูบ การเก็บข้อมูลทางด้านสังคมโดยการสังเกตพฤติกรรมการทำการเพาะปลูกยาสูบ การใช้ปุ๋ยเคมี โดยการสัมภาษณ์เชิงลึก เกษตรกรผู้เพาะปลูกยาสูบ จำนวน 20 ราย

(3) สำรวจและสุ่มเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 20 แปลง โดยกำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่างดิน โดยผ่านกระบวนการอบรมและแนะนำการเก็บตัวอย่างดินที่ถูกต้อง โดยเกษตรกรร่วมกันนักวิจัย ในการเก็บตัวอย่างดินและการเตรียมตัวอย่างดิน และตัวอย่างดินต้องเป็นพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกยาสูบมาอย่างต่อเนื่องยาวนานกว่า 15 ปี และทำการเพาะปลูกยาสูบในระบบโควตา ของโรงบ่มยาสูบกรมโรงงานยาสูบ 9 หมู่บ้าน บริเวณตำบลปากแคว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย โดยเก็บตัวอย่างดินที่ความลึก 0 - 20 cm จำนวน 10 จุด ต่อ 1 พื้นที่เพาะปลูกยาสูบและนำตัวอย่างดินที่ได้มารวมกัน (composite sample) และผสมคลุกเคล้าตัวอย่างดินที่เก็บได้จากทุกจุดให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ และนำมาตากให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นทุบให้แตกหรือบดให้ละเอียดก่อน จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2 mm และเก็บเศษสารอินทรีย์ออก เก็บรวบรวมตัวอย่างดินเก็บใส่ถุงพลาสติก พร้อมทั้งเขียนหมายเลขตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินบางประการ และรูปทางเคมีของแคดเมียมในห้องปฏิบัติการต่อไป

3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของยิปซัมสังเคราะห์ จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน

(1) สุ่มเก็บตัวอย่างยิปซัมสังเคราะห์ ที่โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จำนวน 10 ตัวอย่าง

(2) การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (Moisture content) โดยการอบ 105 C

(3) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุรองและจุลธาตุ ปริมาณแคดเมียม ใน ยิปซัมสังเคราะห์ ปริมาณแคลเซียม ซัลเฟอร์ โซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี และปริมาณแคดเมียม ในยิปซัมสังเคราะห์จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานถ่านหินโดยใช้เทคนิค F-A-A-S

(4) ใช้สถิติเชิงพรรณนาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูล โดยหาค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ค่าสูงสุด (Max) และค่าต่ำสุด (Min)

3.3 ศึกษาอิทธิพลของยิปซัมสังเคราะห์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ในการเป็นสารปรับปรุงบำรุงดิน และประสิทธิภาพในการการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชและเปลี่ยนรูปทางเคมี/การแพร่กระจายของแคดเมียมในดินของพื้นที่ยาสูบ

เป็นการศึกษาถึงปัจจัยของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินบางประการที่แตกต่างกัน ระยะเวลาที่แคดเมียมตกค้าง (residence time) ในดิน และอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ที่มีผลต่อรูปทางเคมีของแคดเมียม และการแพร่กระจายของความเข้มข้นแคดเมียมในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบ โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังนี้

(1) ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวอย่างดินตัวแทนพื้นที่ว่างเปล่าและมีการปลูกไม้ผลแบบอินทรีย์ ในเขตตำบลปากแคว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย บนข้อจำกัดมีเนื้อดินและเป็นชุดดินแม่สายเหมือนกับพื้นที่เพาะปลูกยาสูบ วิธีการทดลองโดยการบ่มดินในภาชนะพลาสติก (pot incubation experiment) ระยะเวลาทั้งสิ้น 60 วัน ทำการบันทึกและเก็บตัวอย่างดินเมื่อครบกำหนดระยะเวลาการบ่มดิน วิเคราะห์ตัวอย่างดินภายในห้องปฏิบัติการ

(2) แผนการทดลองและกรรมวิธีการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ randomize complete block design (RCBD) มี 4 ซ้ำ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ในดินในอัตรา 0, 2, 4,6 ตัน/ไร่ 4 อัตรา ความเข้มข้นของแคดเมียม 2 ระดับ คือ 5 mg kg^{-1} เพื่อเป็นระดับความเข้มข้นตัวแทนในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมต่ำ และ 10 mg kg^{-1} เป็นระดับความเข้มข้นที่เป็นตัวแทนในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมสูง โดยใช้แคดเมียมมาตรฐานในรูปของแคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) เป็นสารทดสอบในครั้งนี้ เพื่อเปรียบเทียบการดูดซับและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดินชนิดต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่มดิน 7 ช่วงเวลา (1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน) ดังนั้นจึงมีกรรมวิธีการทดลองทั้งสิ้น 60 กรรมวิธี

(2.1) การเตรียมหน่วยทดลองและการบ่มดิน ชั่งดินที่ผ่านการผึ่งแห้งและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2 mm น้ำหนัก 400 g เทตัวอย่างดินลงบนแผ่นพลาสติกโดยเกลี่ยตัวอย่างดินให้มีความหนาประมาณ 0.5 cm ให้สม่ำเสมอกัน หลังจากนั้นใส่สารละลาย $CdCl_2$ ที่ระดับความเข้ม 2 ระดับ โดยเติมสารละลายแคดเมียมให้ทั่วดินตัวอย่างและสม่ำเสมอ หลังจากนั้นทำการผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน และเทตัวอย่างดินที่ใส่แคดเมียมเรียบร้อยแล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกและปิดปากถุงพลาสติกเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้แคดเมียมได้มีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอในตัวอย่างดิน (McLaughlin et al., 2002) หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินของแต่ละกรรมวิธีไปผึ่งให้แห้งในที่ร่มและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.5 mm อีกครั้ง และชั่งตัวอย่างดินน้ำหนัก 40 g บรรจุลงในภาชนะพลาสติกและเติมน้ำปราศจากอิออน (DI water) เพื่อปรับความชื้นดินตัวอย่างที่ 50% WHC และนำไปบ่มในตู้บ่ม (incubator) ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C และบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28, และ 60 วัน เมื่อครบกำหนดเวลาบ่มดิน นำตัวอย่างดินมาสกัดตามลำดับขั้นตามวิธีของ Tessier et al. (1979)

(2.2) การควบคุมดูแลตลอดงานทดลอง การทดลองโดยวิธีบ่มดินนี้มีจำเป็นต้องมีการรักษาระดับความชื้นของดินให้คงที่ตามกรรมวิธีทดลองตลอดการทดลอง โดยทำการตรวจสอบความชื้นทุกๆ 3 วัน

(2.3) การเก็บตัวอย่างดิน ทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาสกัดตามลำดับ เมื่อครบกำหนดระยะเวลาบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28, และ 60 วัน เก็บตัวอย่างดินที่ครบกำหนดของแต่ละตำรับไปผึ่งให้แห้งในที่ร่ม แล้วนำตัวอย่างดินไปบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 mm และเก็บรักษาตัวอย่างในขวดพลาสติกที่ปิดฝาสนิท และนำตัวอย่างดินเข้าห้องปฏิบัติการเพื่อสกัดตามลำดับขั้นต่อไป

(2.4) การสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction) ในดินที่เติมแคดเมียม ดำเนินตามขั้นตอนการสกัดลำดับขั้นตามวิธีของ Tessier et al. (1979) โดยนำดินปนเปื้อนแคดเมียมมาทำการสกัดตามลำดับขั้นเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีของแคดเมียมทั้ง 6 รูป ดังนี้ รูปอิสระในสารละลายดิน (water soluble), รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable), รูปคาร์บอเนต (carbonate-bound), รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe–Mn oxide-bound), รูปออร์แกนิก (organic matter-bound) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (residue) โดยเริ่มจากชั่งตัวอย่างดิน 1.000 g จากแต่ละกรรมวิธี ใส่ในหลอด polyethylene centrifuge tube ขนาด 50 ml และดำเนินการสกัดตามลำดับขั้น

แคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดิน (water soluble Cd fraction; SLU) ทำการสกัดด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water; DI) 15 ml เขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2

ชั่วโมง และดำเนินการแยกส่วนโดยการทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

แคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Cd fraction; EXC) นำตะกอนดินส่วนที่คงเหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินมาสกัดอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง โดยเติมสารละลาย 1 M $MgCl_2$ (pH 7.0) จำนวน 8 ml เขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และดำเนินการแยกส่วนโดยการทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

แคดเมียมในรูปคาร์บอเนต (carbonate- bound Cd fraction; CA) นำตะกอนดินส่วนที่คงเหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ มาสกัดอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง โดยเติมสารละลาย 8 ml ของ 1 M NaOAc ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 5.0 ด้วย acetic acid (HOAc) เขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และดำเนินการแยกส่วนโดยการทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

แคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe/Mn oxides-bound Cd; Fe-Mn) นำตะกอนดินส่วนที่คงเหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปคาร์บอเนต มาสกัดอย่างต่อเนื่องด้วยการเติมสารละลาย 20 ml ของ 0.04 M NH_2OH-HCl ใน 25% (v/v) ของ CH_3COOH โดยดำเนินการทดลองใน water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิ 96 ± 3 °C พร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และดำเนินการแยกส่วนโดยการทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

แคดเมียมในรูปออร์แกนิก (organic-bound Cd; OM) นำตะกอนดินส่วนที่คงเหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปของเหล็กและแมงกานีสมาสกัดอย่างต่อเนื่อง โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรก ด้วยการเติมสารละลาย 3 ml ของ 0.02 M HNO_3 และ 5 ml ของ 30% H_2O_2 ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 2 ด้วย HNO_3 ผสมให้เข้ากันและดำเนินการต้มในหม้อต้ม (water bath) ที่ควบคุมอุณหภูมิ 85 ± 2 °C พร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สอง เติมสารละลาย 3 ml ของ 30% H_2O_2 (ปรับค่า pH เท่ากับ 2 ด้วยกรด HNO_3) หลังจากนั้นดำเนินการต้มอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 ± 2 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นและเติมสารละลาย 5 ml ของ 3.2 M NH_4OAc ใน 20% (v/v) ของกรด HNO_3 และเขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที และดำเนินการแยกส่วนโดยการทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

แคดเมียมในรูปที่คงเหลือจากการสกัด (residual Cd fraction; RES) นำตะกอนดินส่วนที่คงเหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปออร์แกนิก มาย่อยด้วยกรด HNO_3: $HClO_4$ ที่อัตราส่วนผสม 2: 1 จำนวน 8 ml โดยดำเนินการย่อยด้วยเครื่อง microwave digest ที่ควบคุมอุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วกรองตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

หลังจากการสกัดในแต่ละลำดับขั้น จะแยกส่วนโดยการทำให้ตะกอนดินมีการตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำที่ระดับ 6000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 ส่วนที่คงเหลือของแคดเมียมในแต่ละรูปทางเคมีที่ได้ผ่านการสกัดในแต่ละลำดับขั้นของการสกัด จะทำการล้างดินตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) ตามด้วยการเขย่าดินตะกอน และตามด้วยการทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำอีกครั้งและทำกรองตัวอย่างอีกครั้ง ก่อนที่จะดำเนินการสกัดในรูปทางเคมีถัดไป ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในแต่ละรูปทางเคมีที่ทำการสกัดได้ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเครื่อง flame atomic absorption spectrophotometer (FAAS) รุ่น AA-6501F ผลิตโดยบริษัท SHIMADZU

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การดูดซับและแพร่กระจายของแคดเมียมในดินและพืช ของแต่ละ Treatment ที่มีการเก็บตัวอย่างดินในช่วงเวลาต่างๆตลอดระยะการทดลอง และเมื่อนำตัวอย่างพืชและดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมนั้นมาสกัดตามลำดับขั้นและวิเคราะห์รูปทางเคมีแล้วนั้น มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี least significant difference (LSD) และ standard error of a difference (SED) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัยด้วยวิธี t-test ($p<0.05$) และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในแต่ละรูปทางเคมีตามช่วงระยะเวลา และค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างรูปทางเคมีของแคดเมียมกับองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของดิน ได้แก่ pH อินทรีย์คาร์บอเนต เนื้อดิน ค่า CEC แคลเซียมคาร์บอเนต และออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ระบบการเพาะปลูกยาสูบโควตา การใช้ปุ๋ยและผลผลิตยาสูบของเกษตรกร

จากการสัมภาษณ์เกษตรผู้เพาะปลูกใบยาเบอร์เลย์ ในระบบโควตา ของสำนักงานยาสูบสุโขทัย โรงงานยาสูบ กระทรวงการคลัง โดยการสังเกตพฤติกรรมการทำการเพาะปลูกยาสูบ การใช้ปุ๋ยเคมี โดยการสัมภาษณ์เชิงลึก เกษตรกรผู้เพาะปลูกยาสูบ โดยเลือกแบบเจาะจงผู้เพาะปลูกยาสูบระบบโควตา มาเป็นเวลา 15 ปีขึ้นไป จำนวน 20 ราย พบว่าพื้นที่เพาะปลูกยาส่วนใหญ่มีพื้นที่เป็นของตนเอง 1-10 ไร่ ร้อยละ 80% และอีก 20% การเช่าพื้นที่เพาะปลูก เกษตรกรจะทำการเพาะปลูกยาสูบปีละ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการเพาะปลูก 4 เดือน ในช่วง พฤศจิกายน - กุมภาพันธ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ถ้าฝนตกยาวนานมีน้ำท่วมขังพื้นที่เพาะปลูก ก็จะเลื่อนการเพาะปลูกออกไปประมาณเกือบเดือน จำนวนการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในฤดูการเพาะปลูก ฉีดพ่นส่วนใหญ่ 5-6 ครั้ง ร้อยละชนิดของสารเคมีที่ใช้แต่ละครั้งในการฉีดพ่น 3-6 ชนิด เป็นยากำจัดหนอน เพลีย กำจัดเชื้อรา แบคทีเรีย และเชื้อรา ใช้ผสมกัน อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับฉีด ส่วนใหญ่เครื่องพ่นสารเคมีอัดแรงสูง ขนาด 250 ลิตร และเครื่องพ่นแบบสะพายหลัง ขนาด 25 ลิตร และข้อมูลที่น่าสนใจส่วนใหญ่ไม่เคยใช้วิธีอื่นนอกจากสารเคมีและปุ๋ยยาที่ถูกกำหนดชนิด ปริมาณ ระยะเวลา การใช้ ตามอัตราแนะนำของโรงงานยาสูบในแต่ละปีการเพาะปลูก โดยรับข้อมูลหรือคำแนะนำเกี่ยวกับการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช ส่วนใหญ่จากเจ้าหน้าที่โรงงานยาสูบ

การเพาะปลูกยาสูบในพื้นที่ตำบลปากแคว อำเมือง จังหวัดสุโขทัย เป็นระบบการเพาะปลูกแบบโควตา ที่ทางโรงงานยาสูบดำเนินการจัดสรรโควตา/แจ้งสภาวะการผลิตใบยา (ความต้องการใบยา) กำหนดราคารับซื้อ/ติดตามแนะนำส่งเสริมการผลิตใบยาทุกขั้นตอน (เกษตรกรจะทราบก่อนฤดูกาลผลิตใบยา) การปลูกภายใต้ระบบโควตาไม่ว่าจะเป็นโควตาของโรงงานยาสูบหรือโควตาที่จัดสรรผ่านธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตรโดยผ่านระบบรัฐบาล และเอกชนออกเงินทุนให้กับเกษตรกรไม่จำเป็นต้องมีเงินสดอยู่ในมือไว้มากนัก เพราะจะมีการจัดสรรปุ๋ยเคมีอัตราต่อไร่ ประกอบด้วย ปุ๋ยเร่งการเจริญเติบโต (27-0-0) 50 กิโลกรัม/ไร่, ปุ๋ยบำรุง (6-12-24) 200 กิโลกรัม/ไร่ และปุ๋ยอินทรีย์ 50 กิโลกรัม/ไร่ และยากำจัดศัตรูพืชและฮอร์โมนที่ใช้ตั้งแต่การเพาะต้นกล้าเพาะปลูก และเก็บผลผลิตใบยาสูบแต่จากระบบการจัดสรรดังกล่าว เป็นปัญหาหรือสาเหตุหนึ่งที่ไม่ตรงกับปริมาณที่ต้องการใช้จริงกล่าวคือบางรายได้รับมากเกินความต้องการและบางรายได้รับมาน้อยกว่าที่ต้องการ ส่งผลให้คุณภาพและผลิตผลใบยาสูบยาวใหญ่ แต่เมื่อใบยาแห้ง ปรากกฏว่าใบยามีสีขาวซีดและไม่มีน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักมาตรฐานที่ทางโรงงานยาสูบกำหนด คือ 400 กิโลกรัมแห้ง/ไร่ และบางกรณีตรวจพบการตกค้างของสารเคมี ทำให้ไม่สามารถรับซื้อได้ ทำให้เกษตรกรผู้เพาะปลูกยาสูบ

มากกว่า 90% อยู่ในสภาวการณ์เป็นหนี้ครัวเรือนสูง และปัจจุบันพบว่าปัจจัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกมีผลทำให้สภาพอากาศที่แปรปรวน ฝนตกนอกฤดู และหรือสภาพอากาศเย็นรุนแรง ผนวกกับปัญหาจากราคาปัจจัยการผลิตที่สูงขึ้นมาก และขาดระบบระบบการประเมินสถานะธาตุอาหารและสมบัติของดิน ทำให้เกิดผลกระทบต่อมั่นคงของเกษตรกรผู้เพาะปลูกยาสูบ ทำให้พื้นที่เพาะปลูกยาสูบสุโขทัยลดลงแม้ว่าระบบโควตายาสูบจะมีราคาที่สูงก็ตาม ในขณะที่สถานการณ์ส่งออกมีปริมาณความต้องการยาสูบสูงขึ้น

“ลุงว่านะดินเดี๋ยวนี้เสื่อมลงไปเยอะ เพาะปลูกอะไรก็ยาก แมลงที่มันมากัดกินใบยาสูบก็เยอะ อากาศฟ้าฝนมันก็แล้วแต่ดวง ถ้าฝนดีก็ดีไป แต่ถ้ามันแล้งขึ้นมา ลุงก็ขาดทุนเหมือนกัน มันก็จำเป็นต้องใช้สารเคมีมาช่วย ลุงก็รู้ว่ามันทำให้สิ่งแวดล้อมไม่ดี แต่ก็ไม่รู้จะทำยังไงมันจำเป็นจริงๆ” (ชาย อายุ 52 ปี)

“ดินสมัยนี้ มันไม่เหมือนแต่ก่อนเลย แต่ก่อนนะปลูกอะไรก็งามไปหมด ไม่ต้องพ่นยา ฉีดยาเลย แต่เดี๋ยวนี้ มันไม่ได้แล้ว ปลูกอะไรนิดอะไรหน่อยก็ต้องพ่นยาฆ่าแมลง มันเลยทำให้ดินไม่ดี ดินเสื่อมหมด แต่มันก็จำเป็นเนาะ เราจะไม่พ่นยามันก็ไม่ได้ แมลงมันเยอะ อีกอย่างใครๆ เขาก็อยากให้ผลผลิตออกมาดี ไม่มีแมลงกัดกิน มันถึงขายได้ราคาสูง เมื่อก่อนปลูกผักในแปลงยาสูบผักงามมาก แต่ตอนนี้ไม่กล้าปลูกกินเพราะมีสารตกค้างเยอะ ” (หญิง อายุ 32 ปี)

4.2 สมบัติของดินที่ปลูกยาสูบ

จากการวิเคราะห์สมบัติของดินที่ปลูกยาสูบในพื้นที่ ต.ปากแคว อ.เมือง จ.สุโขทัย จากดินทั้งหมด 45 ตัวอย่าง พบว่าสมบัติของดินทั้งหมดมีลักษณะที่คล้ายกัน ค่า pH มีสภาพเป็นกรดรุนแรง และพบว่าปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 1.3% ซึ่งเป็นระดับต่ำถึงค่อนข้างต่ำ (เอิบ, 2533) ทั้งนี้สอดคล้องจากการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์ที่พบว่าพื้นที่ดังกล่าวเป็นการปลูกพืชเชิงเดี่ยวและการปลูกยาสูบจะมีมวลชีวภาพของซากพืชน้อยมาก ผนวกกับดินมีความเป็นกรดจัด จะส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน และพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในดินของพื้นที่เพาะปลูกยาสูบ อยู่ในระดับต่ำ ในช่วง 4.6-17.4 ma kg^{-1} อาจเกิดจากธาตุฟอสฟอรัสที่เกษตรกรให้แก่ดินในรูปของปุ๋ยอาจมีการตกค้างอยู่น้อย เนื่องจากช่วงที่เก็บตัวอย่างดินเป็นช่วงก่อนการเพาะปลูก และการเพาะปลูกจะเริ่มใส่ปุ๋ยผสมสูตร 4-16-24+4 รองก้นหลุมก่อนการเพาะปลูกยาสูบ นอกจากนี้อาจเกิดจากฟอสฟอรัสถูกตรึง เนื่องจากระดับ pH ของดินเป็นกรด และเมื่อพิจารณาจากปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในดินของพื้นที่ปลูกยาสูบค่อนข้างสูง โดยพบว่าปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในช่วง 62.3-406.3 mg kg^{-1} และ 26.8-32.3 mg kg^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 2) ฟอสเฟตในดินอาจทำปฏิกิริยากับไอออนดังกล่าว ทำให้พบฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในปริมาณต่ำ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) อาจเป็นไปได้ว่าการเคลื่อนที่ของฟอสฟอรัสจากดิน

ชั้นบนไปสู่ดินชั้นล่างเกิดขึ้นน้อยมาก และคาดว่าดินในพื้นที่แปลงยาสูบจะมีฟอสฟอรัสตกค้างอยู่ในดินชั้นบนในปริมาณมาก เพราะเมื่อพิจารณาจากการให้ปุ๋ยเคมีในพื้นที่ยาสูบมีอัตราที่สูงต่อไร่ สำหรับโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินของพื้นที่ยาสูบทั้ง 45 ตัวอย่างอยู่ในช่วงที่กว้าง 9.8 -65.9 mg kg^{-1} คือในระดับต่ำมากถึงระดับปานกลาง ซึ่งคาดว่าเป็นผลตกค้างของปุ๋ยที่ใส่เพื่อการบำรุงยาสูบในฤดูกาลเพาะปลูกที่ผ่านมา

Table 4.1 Soil properties of tobacco farms under agrochemicals system, Sukhothai Province

Soil properties	Level of soil properties		
	Mix	Min	Average
pH	3.8	5.8	4.5
EC	70.0	290.0	134.8
Organic Matter (mg kg^{-1})	0.5	1.3	0.9
Available P (mg kg^{-1})	17.4	4.6	8.5
Exchangeable K (mg kg^{-1})	9.8	65.9	36.4
Exchangeable Na (mg kg^{-1})	11.7	48.2	28.7
Exchangeable Ca (mg kg^{-1})	62.3	406.6	291.0
Exchangeable Mg (mg kg^{-1})	16.8	182.3	70.6
Available Zn (mg kg^{-1})	9.6	31.5	21.6
Available Mn (mg kg^{-1})	2.8	37.4	10.8
Available Cu (mg kg^{-1})	5.6	32.8	19.8
Available Pb (mg kg^{-1})	7.7	18.8	13.8
Available Cd (mg kg^{-1})	0.8	1.2	1.0
Total Zn (mg kg^{-1})	76.7	124.3	100.7
Total Mn (mg kg^{-1})	260.9	953.4	737.2
Total Cu (mg kg^{-1})	19.3	36.5	27.9
Total Pb (mg kg^{-1})	22.6	49.8	37.8
Total Cd (mg kg^{-1})	3.2	5.0	4.2

สำหรับระดับของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินค่อนข้างผันแปรตาม pH ของดิน โดยดินในพื้นที่มีค่า pH ต่ำ ยังคงมีธาตุดังกล่าวในระดับต่ำ ส่วนดินที่มีค่า pH ในระดับ 5.0-

5.8 พบว่ามีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการเป็นแหล่งธาตุอาหารพืช ข้อมูลจากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าดินในพื้นที่ปลูกยาสูบ ต.ปากแคว อ.เมือง จ.สุโขทัย มีค่า pH ต่ำกว่า 5.5 ถึง 93% ของจำนวนพื้นที่ที่ใช้ศึกษาทั้งหมด แสดงว่าพื้นที่ดังกล่าวควรจะต้องมีการปรับปรุงดินให้มีค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกยาสูบ 5.5 -6.5 โดยการใช้ปูนขาวหรือ โดโลไมท์ ตามอัตราที่เหมาะสมและควรตรวจ pH อย่างสม่ำเสมอก่อนการใส่ปูนขาวหรือโดโลไมท์ในพื้นที่ เนื่องจากการปรับ pH จะช่วยให้ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ละลายออกมาและเป็นประโยชน์ต่อพืช

pH ของดินในพื้นที่ปลูกยาสูบ

เมื่อพิจารณาจากค่า pH ของดิน พบว่าพื้นที่เพาะปลูกยาสูบ เขตตำบลปากแคว มีค่า pH อยู่ในช่วงของดินเป็นกรด ถึง 3 ระดับ คือ ดินกรดจัดมาก กรดจัด และกรดแก่ โดยมีค่า pH ระหว่าง 3.83-5.45 (N=45 ตัวอย่าง; ภาพที่ 4.1) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากการสัมภาษณ์เกษตรกรและผู้จัดการโรงงานยาสูบเกี่ยวกับการใช้สารปรับปรุงดิน เช่น ปูนขาว และโดโลไมท์ ที่เกษตรกรบางรายจะมีการปรับปรุงดินโดยการใส่ปูนขาว และหรือโดโลไมท์ ที่หาซื้อเองในท้องตลาดหรือบางปีจะมีการจัดสรรจากทางโรงงานยาสูบมาพร้อมปุ๋ยเคมี ในขณะที่บางรายไม่มีการปรับปรุงดิน เพราะเนื่องจากไม่ได้รับโควตาและไม่ทราบว่าดินตนเองเป็นกรด กล่าวได้ว่าดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบมีสภาพเป็นกรดอย่างรุนแรง เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้การเจริญเติบโตของพืชและผลผลิตของยาสูบตกต่ำ เพราะทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหลักของพืชลดลงหรือมีไม่พอเพียงต่อความต้องการของพืช ส่วนธาตุอาหารของพืชบางชนิดมีเกินความจำเป็นซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชที่ปลูก สาเหตุเนื่องมาจากการการปลูกพืชแบบเชิงเดี่ยวและการใช้ปุ๋ยเคมีติดต่อกันเป็นเวลานานและต่อเนื่องของพื้นที่แปลงยาสูบ มีผลทำโครงสร้างดินเปลี่ยนแปลงและค่า pH ของดินลดลง และสิ่งสำคัญค่า pH ของดินพื้นที่ปลูกยาสูบทั้ง 45 พื้นที่ นั้นเอื้อต่อการละลายได้ของธาตุโลหะหนักต่างๆ ที่ดินมีสภาพเป็นกรด โดยเฉพาะแคดเมียมสามารถละลายออกมาอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินได้สูง (Van Gestel and Koolhaas, 2004) ค่า pH ในดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของธาตุพิษ (Barancikova et al., 2004) และค่า pH ของดินยังมีบทบาทต่อการควบคุมการดูดซับธาตุพิษ (Seuntjens et al., 2004; Amini et al., 2005; Basta et al., 2005)

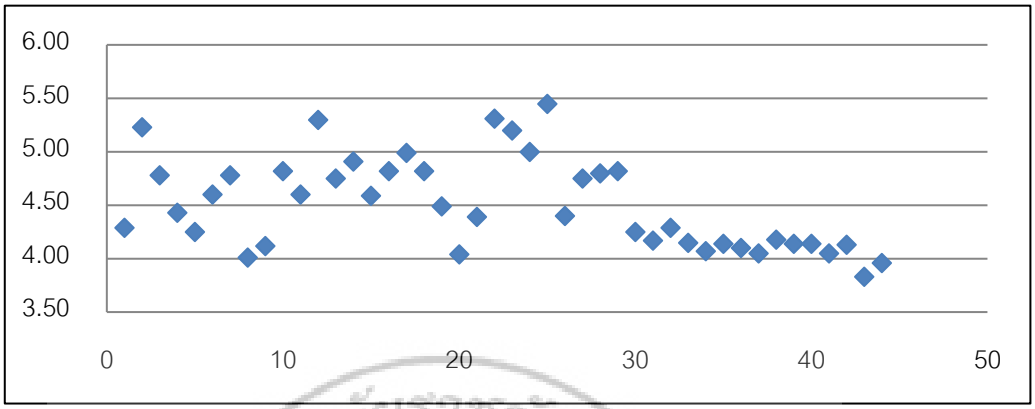


Figure 4.1 pH of the soil in tobacco farms under agrochemicals system, Sukhothai Province

4.3 การปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน

สำรวจสุ่มเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของธาตุพิษบางชนิด (Pb, Cd, Cu, Zn, Mn, Fe) ในรูปของปริมาณทั้งหมด (Total) และสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailable) ของโลหะหนักในดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบ (ตารางที่ 1และภาพที่ 2) จะเห็นได้ว่าผลจากการเพาะปลูกแบบเคมีเกษตรที่รุนแรง โดยการใช้ปุ๋ยเคมี สารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืช และปุ๋ยอินทรีย์ อย่างต่อเนื่องและยาวนานมากกว่า 15 ปี ของพื้นที่ปลูกยาสูบ เขตตำบลปากแคว ในระบบการเพาะปลูกยาสูบแบบโควตา ส่งผลให้ดินในพื้นที่ทั้งหมด 45 ตัวอย่าง มีสภาพเป็นกรดจัดซึ่งในสภาพที่เป็นกรดจัดจะเอื้อต่อการละลายได้ของธาตุโลหะหนักต่างๆ จะทำให้แคดเมียมและโลหะหนักอื่นๆ สามารถละลายออกมาอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินได้สูง (Van Gestel and Koolhaas, 2004) ค่า pH ในดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของโลหะหนัก โดยเฉพาะธาตุพิษอย่างแคดเมียม (Barancikova et al., 2004) และค่า pH ของดินยังมีบทบาทต่อการควบคุมการดูดซับโลหะหนักของพื้นที่ผิวของแร่ดินเหนียว (Seuntjens et al., 2004; Amini et al., 2005; Basta et al., 2005) จากภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าปริมาณแคดเมียมสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailability Cd) มีค่าอยู่ในช่วง 0.80-1.24 mg kg^{-1} และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (total Cd) มีค่าอยู่ในช่วง 3.27 – 5.08 mg kg^{-1} กล่าวได้ว่าตัวอย่างดินทั้งหมด 45 ตัวอย่าง มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินมีค่าเกินระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินประเทศไทยกำหนดไว้ เท่ากับ 0.15 mg kg^{-1} (พิชิต, 2548) และเป็นที่สูงกว่าค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป: The European Economic Community (EEC) Maximum Permissible (MP) (3.0 mg kg^{-1}) การปลูกยาสูบแบบเกษตรเคมี ที่อาจมีการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตที่วัตถุต้นกำเนิดมีการปนเปื้อนแคดเมียม (Zarcinas et al., 2004) และการใช้สารเคมีกลุ่มฆ่าเชื้อราในพื้นที่

การเกษตร (Adriano, 2001) และการใช้กากตะกอนน้ำเสียหรือปุ๋ยอินทรีย์ในพื้นที่การเกษตรติดต่อกันเป็นระยะเวลายาวนาน ส่งผลให้เกิดการสะสมและตกค้างของแคดเมียม (Liphadzi and Kirkham, 2006) ในดินชั้นบน (0 - 20 cm) เพิ่มมากขึ้น และจากที่ดินมีระดับเป็นกรดแก่ จะเอื้อต่อการละลายของแคดเมียมอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินได้สูง ทำให้พืชและสิ่งมีชีวิตดูดซึมแคดเมียมไปสะสมในส่วนต่างๆ ได้ทันที (ศุภมาศ, 2539)

ในขณะที่ปริมาณทั้งหมด (total) และสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailable) ของตะกั่ว (Pb), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn) และแมงกานีส (Mn) ในตัวอย่างดินทั้ง 45 ตัวอย่าง โดยพบความเข้มข้นของปริมาณตะกั่วทั้งหมดอยู่ในช่วง 22.6- 49.8 mg kg^{-1}; ตะกั่วสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพอยู่ในช่วง 7.71-18.82 mg kg-1 ในขณะที่ทองแดงในรูปปริมาณทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 19.34 – 36.54 mg kg^{-1} และสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพอยู่ในช่วง 5.61 – 32.85 mg kg^{-1}; ปริมาณแมงกานีสทั้งหมดอยู่ในช่วง 260.02 - 953.42 mg kg^{-1}; แมงกานีสสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพอยู่ในช่วง 2.83 – 37.42 mg kg^{-1} มีระดับที่ต่ำกว่าระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย (พิชิต, 2548)และต่ำกว่าค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป: The European Economic Community (EEC) Maximum Permissible (MP) (Cu = 100, Pb = 100, Mn = 4,000 mg kg^{-1}) แต่จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าปริมาณทั้งหมดของสังกะสีในดินทั้ง 45 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 76.72 – 124.34 mg kg^{-1} ซึ่งเป็นระดับที่สูงระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 70 mg kg^{-1} (พิชิต, 2548) เป็นไปได้ว่าการปุ๋ยฟอสเฟตจะเป็นเส้นทางของการทำให้มีการปนเปื้อนของแคดเมียมและสังกะสี เนื่องจากสินแร่สังกะสีและแคดเมียมจะอยู่ร่วมกันเสมอและมักพบในสินแร่ grunockite ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และ สินแร่ otavite ในรูปของแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) โดยพบปริมาณแคดเมียมมากที่สุดประมาณร้อยละ 0.3 - 1.0 ในสินแร่สังกะสี (Massaro, 1997; WHO, 1993; Yu, 2001) แต่ในสภาพดินเป็นกรด แคดเมียมจะมีสภาพเคลื่อนที่ได้ดีกว่าสังกะสี แคดเมียมมีรูปประกอบได้ เช่นเดียวกับกลุ่มไอออนบวก Zn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+} ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมสภาพการเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมในดิน ด้วย ค่า pH ของดิน และค่าศักย์รีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักย์รีดอกซ์สูงแคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบแคดเมียมออกไซด์ (CdO) หรือสารประกอบแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) หรืออาจอยู่รวมกับฟอสเฟตได้เช่นกัน แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH 4.5 ถึง 5.5 (ศุภามาศ, 2539)

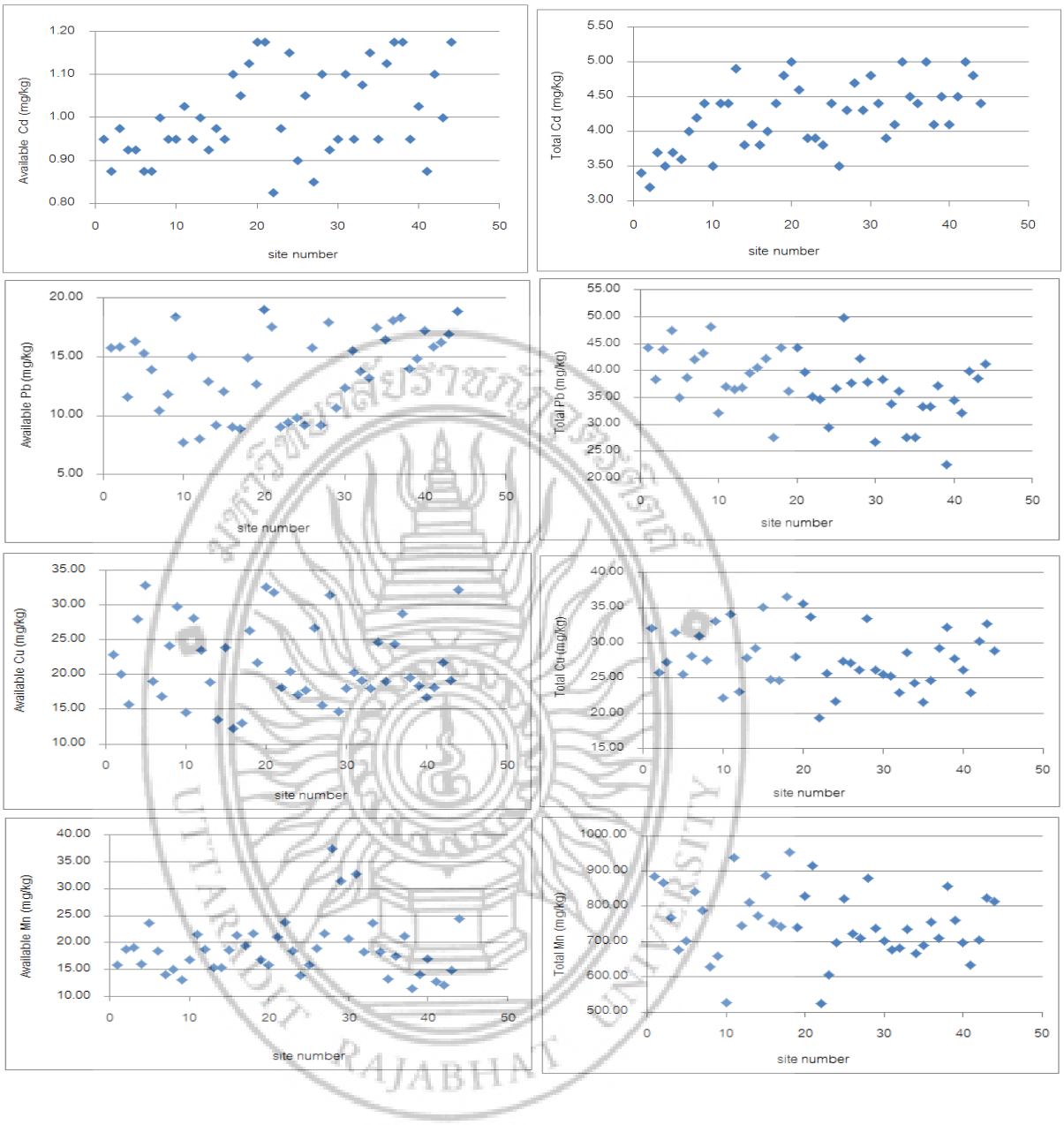


Figure 4.2 Concentration of heavy metals (Cd, Pb, Cu, Mn, Zn) in chemical from bioavailability and total of soil in tobacco farms under agrochemicals system, Sukhothai Province

4.4 การปนเปื้อนของแคดเมียมในปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยฟอสเฟต และพืช

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าปุ๋ยเคมีสูตร 15 – 15 – 15 และปุ๋ยอินทรีย์ ที่ทำการสุ่มเก็บจากบ้านของเกษตรกร พบว่าปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์มีการปนเปื้อนของแคดเมียมสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailability Cd) และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (total Cd) ค่อนข้างสูง เช่นการศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินในพื้นที่บางแห่งของประเทศไทย ของนิตยาพร และ จุไร (2549) พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินเพาะปลูก ในภาคกลาง มีปริมาณเฉลี่ย สูงสุดเท่ากับ 0.94 mg kg^{-1} โดยดินเพาะปลูกจากจังหวัดลพบุรี มีค่าสูงที่สุดคือ 2.73 mg kg^{-1} สำหรับพื้นที่ซึ่งปลูกพืชชนิดต่างๆ ซึ่งใช้ปุ๋ยเคมีสูตรต่างกัน ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงสุด คือ ดินจากพื้นที่ปลูกผัก (1.35 mg kg^{-1}) พื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่ใช้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 และปริมาณแคดเมียมในปุ๋ย 15-15-15 มีค่าเท่ากับ 17.10 mg kg^{-1} (นิตยาพร และ จุไร, 2549) และจากผลการศึกษาวิจัยของ Zarcinas et al. (2004) ยังพบว่าระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่สูงและความเข้มข้นของแคดเมียมที่สะสมในโกโก้ *(Theobroma cacao)* มีปริมาณมากเกินระดับมาตรฐานที่พบได้ทั่วไปในพืช ในบริเวณพื้นที่ของทางด้านตะวันตกของประเทศ มาเลเซีย (Peninsula Malaysia) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต นอกจากนั้น Booth (2005) และ Stephens และ Calder (2005) ยังได้กล่าวไว้อีกว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตปลอมหรือการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตที่มีราคาถูก เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานและไม่ได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพเพื่อรับรองมาตรฐานนั้น จะมีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนของโลหะหนักโดยเฉพาะแคดเมียม

Table 4.2 Concentration of cadmium in organic fertilizer and phosphate fertilizer

ตัวอย่าง (N=5)	Available Cd (mg kg^{-1})			Total Cd (mg kg^{-1})		
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
ปุ๋ยสูตร 15 – 15 – 15	-	-	-	11.12	9.10	10.08
ปุ๋ยสูตร 15 – 15 – 15	-	-	-	10.20	8.42	9.45
ปุ๋ยอินทรีย์ 1	1.55	0.97	1.25	2.27	1.33	1.75
ปุ๋ยอินทรีย์ 2	1.86	1.37	1.53	2.45	2.27	2.38
ปุ๋ยอินทรีย์ 3	2.01	1.56	1.82	2.50	1.68	2.09
ปุ๋ยอินทรีย์ 4	1.67	1.01	1.52	2.12	1.86	2.69
ปุ๋ยอินทรีย์ 5	2.04	2.71	2.92	4.37	3.06	2.57

4.5 สมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง

จากการคัดเลือกชุดดินตัวแทนเพื่อเป็นปัจจัยในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน โดยพิจารณาจากเนื้อดินที่แตกต่างกัน ซึ่งได้คัดเลือกตัวแทนชุดดินสามชนิด ที่มีเนื้อดินต่างกันได้แก่ ดินเหนียวปนทรายแป้ง ดินร่วน และดินร่วนปนทราย โดยใช้กลุ่มชุดดินที่ 7 กลุ่มชุดดินที่ 38 และกลุ่มชุดดินที่ 56 เป็นชุดดินตัวแทนในการศึกษาครั้งนี้

สมบัติทางกายภาพของดิน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินตังแทนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าชุดดินตัวแทนมีปริมาณองค์ประกอบของเนื้อดินที่ต่างกัน โดยมีปริมาณดินทรายอยู่ในช่วง 29.34 – 65.96 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณดินร่วนและดินเหนียวอยู่ในช่วง 18.04-54.27 และ 16.71-38.16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยกลุ่มชุดดินที่ 7 ซึ่งเก็บตัวอย่างดินจากนาข้าวมีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (Clay 38.16 %, silt 32.5 %, sand 29.34 %) ชุดดินที่ 38 ที่เก็บตัวอย่างดินจากแปลงปลูกพืชไร่มีลักษณะเป็นดินร่วน (Clay 17.27 %, silt 43.12%, sand 39.61%) และ ชุดดินที่ 56 ที่เก็บตัวอย่างดินจากแปลงปลูกข้าวโพดและมันสำปะหลังมีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (Clay 16.71 %, silt 18.04 % , sand 65.96%) จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พบว่าดินที่จะนำมาทดลองในห้องปฏิบัติการมีลักษณะเนื้อดินที่แตกต่างกัน คาดได้ว่าน่าจะมีผลต่อการดูดซับ การเคลื่อนย้าย และการแพร่กระจายของความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีต่างๆ ในดินที่ต่างกัน เนื่องจากแต่ละชุดดินมีปริมาณดินเหนียวที่ต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อรูปเคมีของแคดเมียมในดิน (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552)

สมบัติทางเคมีของดิน

จากการวิเคราะห์สมบัติดินทางเคมีพบว่า ชุดดินที่นำมาทดลองมีสมบัติทางเคมีที่ต่างกัน ดังนี้ ค่า pH พบว่าดินที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ มีค่าpHของดินที่ต่างกันอยู่ช่วง 5.71-6.50 โดยกลุ่มชุดดินที่ 7 มีค่าpH 6.22 (มีระดับเป็นกรดอ่อน) กลุ่มชุดดินที่ 38 มีค่า pH 5.71 (มีระดับเป็นกรดปานกลาง) กลุ่มชุดดินที่ 56 มีค่า pH 6.50 (มีระดับเป็นกรดอ่อน)

ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) พบว่าชุดดินทั้งสามชุดดินมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่ต่างกัน และมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินอยู่ในระดับต่ำ-ค่อนข้างต่ำ โดยมีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในช่วง 0.44-1.46 เปอร์เซ็นต์ ชุดดินที่ 38 มีปริมาณอินทรียวัตถุมากที่สุด (1.46 %) รองลงมาคือกลุ่มชุดดินที่ 7 (1.14 %) และกลุ่มชุดดินที่ 56 (0.44 %) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

ชุดดิน	ชุดดินที่ 7	ชุดดินที่38	ชุดดินที่ 56	ยิปซัม	method
pH (ดิน:น้ำ = 1:2.5)	6.22	5.71	6.50	8.08	pH meter
OM %	1.14	1.46	0.44	-	wet oxidation
CEC (cmol/kg)	22.74	17.13	9.76	-	ammonium saturation
Particle – size					
Sand (> 0.05 mm.)	29.34	39.61	65.96	-	
Silt (0.002-0.05 mm)	32.5	43.12	18.04	-	
Clay (<0.002 mm.)	38.16	17.27	16.71	-	
Soil texture	Silty Clay	Loam	Sandy Loam	-	pipette method
Available Cd (mg/kg)	0.162	0.62	0.160	ไม่พบ	$MgCl_2$ extraction
Total Cd (mg/kg)	0.69	1.65	0.50	0.057	EDTA extraction

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) เป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของดิน พบว่า ชุดดินกลุ่มที่ 7 และ ชุดดินกลุ่มที่ 38 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก อยู่ในระดับสูง ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างดินมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 22.74 cmol/kg และ 21.13 cmol/kg ตามลำดับ ขณะที่ ชุดดินกลุ่มที่ 56 มี

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ โดยมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 10.76 cmol/kg

จากการประเมินสมบัติของดินทั้งสามชุดดิน พบว่าดินแต่ละชุดดินแต่ละชุดมีสมบัติที่ต่างกันทั้งทางกายภาพและเคมี ซึ่ง สมบัติดินที่ต่างกันนี้จะมีผลต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินอาจจะมีความต่างกันด้วย

4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่แตกต่างกันตามช่วงเวลา หลังใส่ยิปซัมและแคดเมียมในดิน 3 ชนิด

หลังใส่ยิปซัมในดินทั้งสามชนิด ได้แก่ ดินร่วนเหนียว ดินร่วน และดินร่วนทราย ในอัตรา 0, 4 และ 8 % ของนำหนักดิน และเติมสารละลายแคดเมียม ($CdCl_2$) ที่อัตราการปนเปื้อนแคดเมียม 5 และ 30 mg/kg โดยใช้ชุดดินที่ 7 ชุดดินที่ 38 และชุดดินที่ 56 เป็นตัวแทน ในช่วงเวลาต่างๆ คือ 1, 3,7, 14, 21, 28, และ 60 วัน พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมี ทั้ง 6 รูป ได้แก่ รูปอิสระในสารละลายดิน (SLU) รูปที่แลกเปลี่ยนได้(EXC) รูปคาร์บอเนต(CA) รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) รูปออร์แกนิก (OM) และรูปที่เหลือจากการสกัด(RES) มีการแพร่กระจายในดินที่เพิ่มขึ้นและลดลงในดินแต่ละชนิด ที่มีและไม่มีการผสมยิปซัมต่างกันตามช่วงเวลา ซึ่งสามารถเห็นการการเปลี่ยนความเข้มขนของแคดเมียมในรูปทางเคมีต่างๆ ในดินทั้ง 3 ชนิด ที่มีและไม่มีการผสมยิปซัมได้จากดังแสดงในภาพที่ 4.3 และได้แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแคดเมียมในแต่ละตำรับและรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราการผสมยิปซัม 0, 4 และ 8 % ของนำหนักดินและอัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 และ 30 mg/kg ดังตารางที่ 4.4

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน

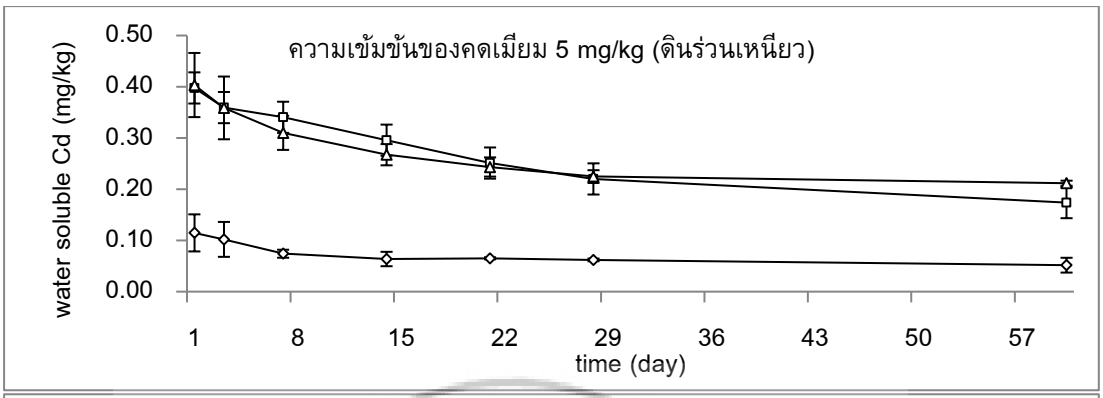
จากภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลา พบว่า ในรูปอิสระในสารละลายดินทุกตำรับแคดเมียมมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมากในช่วง 1 ถึง 14 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการลงลงของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีอัตราลดลง แต่ยังลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มและมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ในช่วง 0.05-0.11 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 0.11 mg/kg เหลือ 0.05 mg/kg (ลดลง 0.06 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 0.17- 0.40 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 0.40 mg/kg เหลือ 0.17 mg/kg (ลดลง 0.22 mg/kg) ส่วนตำรับ

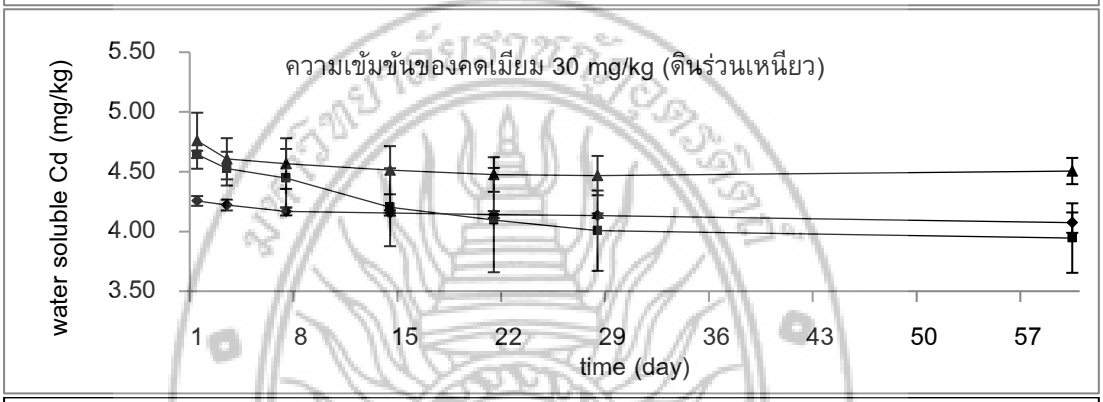
ที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 0.21 – 0.40 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 0.40 mg/kg เหลือ 0.21 mg/kg (ลดลง 0.19 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินอยู่ในช่วง 4.07 - 4.26 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 4.26 mg/kg เหลือ 4.07 mg/kg (ลดลง 0.18 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 3.94-4.64 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 4.64 mg/kg เหลือ 3.94 mg/kg (ลดลง 0.70 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 4.56-4.76 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 4.76 mg/kg เหลือ 4.56 mg/kg (ลดลง .20 mg/kg)

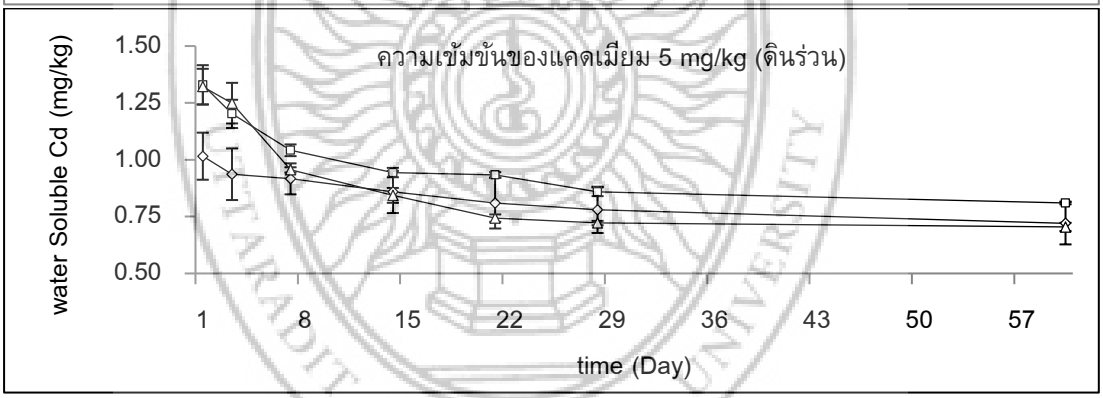
และ จากภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินร่วนตามช่วงเวลา พบว่า ในทุกตำรับแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมากในช่วง 1 ถึง 14 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการลงลงของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีอัตราลดลง แต่ยังลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มและมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ในช่วง 0.72-1.02 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 1.02 mg/kg เหลือ 0.72 mg/kg (ลดลง 0.30 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 0.81-1.33 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 1.33 mg/kg เหลือ 0.81 mg/kg (ลดลง 0.52 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 0.71-1.32 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 1.32 mg/kg เหลือ 0.71 mg/kg (ลดลง 0.61 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินอยู่ในช่วง 10.03-10.29 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 10.29 mg/kg เหลือ 10.03 mg/kg (ลดลง 0.26 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 10.59-11.61 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 11.61 mg/kg เป็น 10.59 mg/kg (ลดลง 1.02 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 10.55-11.78 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระใน

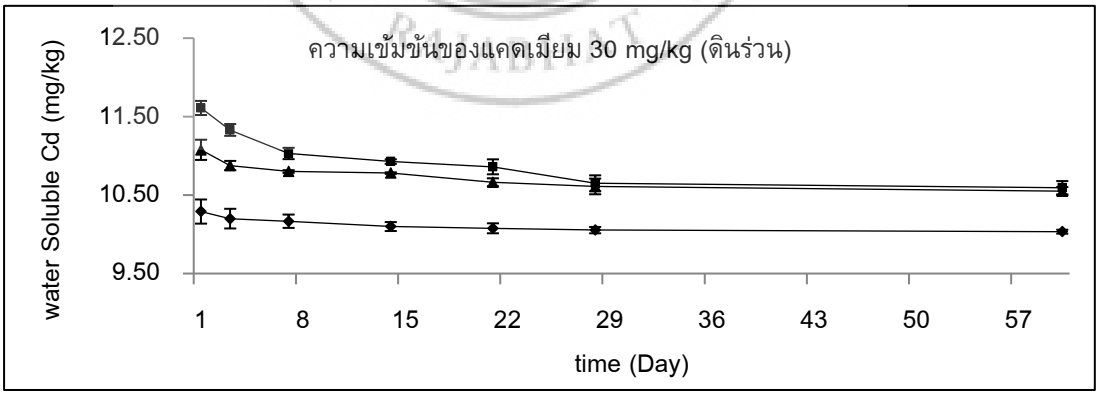
สารละลายดินลดลงจาก 11.78 mg/kg เหลือ 10.55 mg/kg (ลดลง 1.23 mg/kg) ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่าที่อัตราความเข้มข้น 5 mg/kg การกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินนั้นไม่มีความแตกต่างกัน แต่ที่อัตราความเข้มข้น 30 mg/kg ในตำรับที่ใส่ยิปซัมมีผลให้แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าตำรับควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 4.3

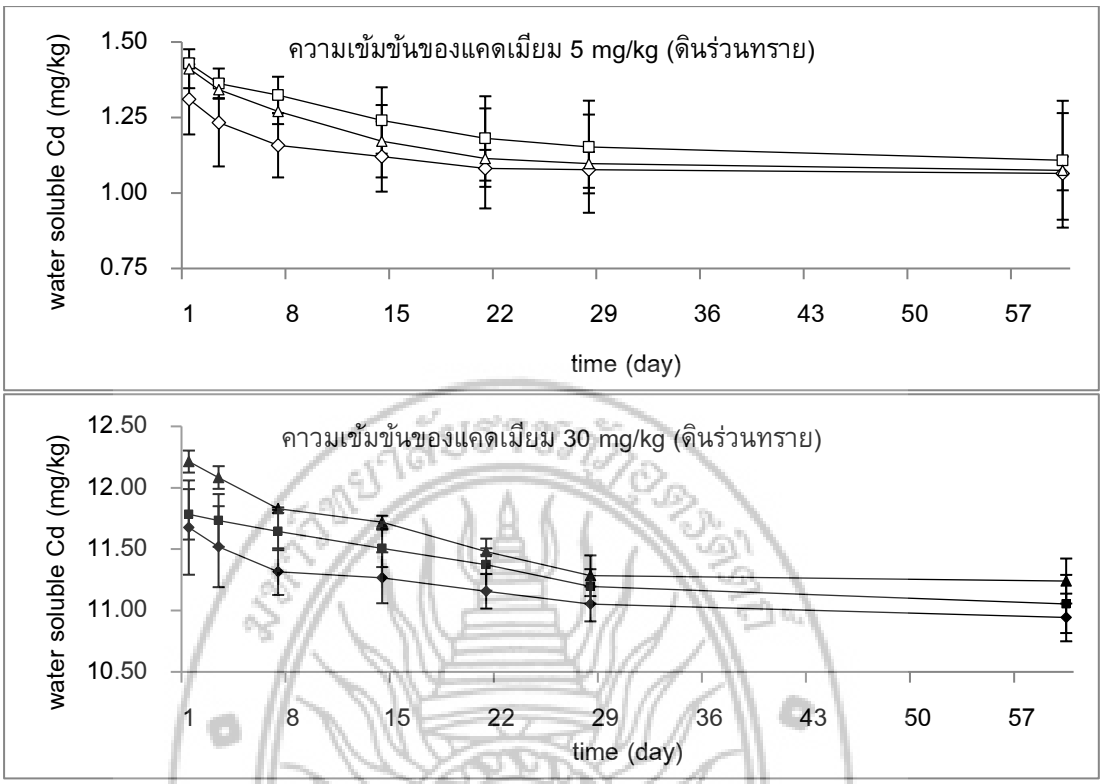
นอกจากนั้น จากภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่า ในทุกตำรับแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมากในช่วง 1 ถึง 14 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการลงลงของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีอัตราลดลง แต่ยังลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มและมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ในช่วง 1.06-1.31 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 1.31 mg/kg เหลือ 1.06 mg/kg (ลดลง 0.25 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 1.11-1.41 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 1.41 mg/kg เหลือ 1.11 mg/kg (ลดลง 0.32 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 1.08-1.41 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงจาก 1.41 mg/kg เหลือ 1.08 mg/kg (ลดลง 0.34 mg/kg) ส่วนที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินอยู่ในช่วง 10.94-11.78 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.73 mg/kg (ลดลงจาก 11.78 mg/kg เหลือ 10.94 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 11.05-11.78 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 1.02 mg/kg (ลดลงจาก 11.78 mg/kg เหลือ 11.05 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ในช่วง 11.24-12.21 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.97 mg/kg (ลดลงจาก 12.21 mg/kg เหลือ 11.24 mg/kg)


ความเข้มข้นของคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
water soluble Cd (mg/kg)
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (day)


ความเข้มข้นของคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
water soluble Cd (mg/kg)
5.50
5.00
4.50
4.00
3.50
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วน)
water Soluble Cd (mg/kg)
1.50
1.25
1.00
0.75
0.50
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วน)
water Soluble Cd (mg/kg)
12.50
11.50
10.50
9.50
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)



ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม ◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

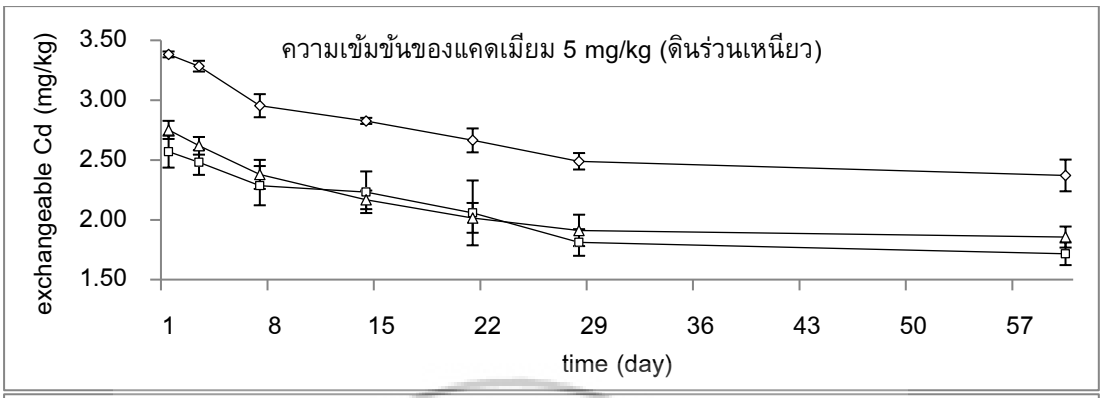
จากภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลา พบว่าทุกตำรับและทุกชนิดดินแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มและมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด โดยกระจายตัวในช่วง 2.37-3.38 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 3.38 mg/kg เหลือ 2.37 mg/kg (ลดลง 1.01 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.72- 2.57 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 2.57 mg/kg เหลือ 1.72 mg/kg (ลดลง 0.85 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.86 –

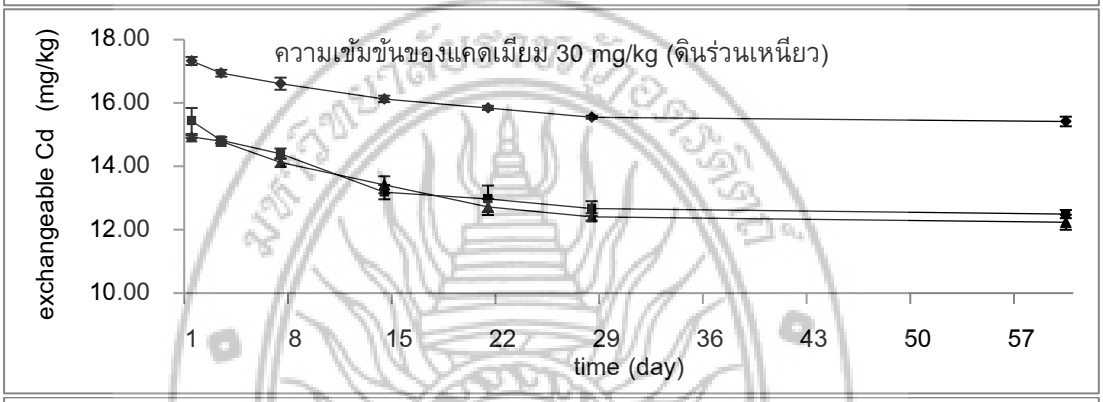
2.75 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 2.75 mg/kg เหลือ 1.86 mg/kg (ลดลง 0.90 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินเข้มข้นมากที่สุด โดยกระจายตัวอยู่ที่ 15.42 -17.33 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 17.33 mg/kg เหลือ 15.42 mg/kg (ลดลง 1.91 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 12.49-15.43 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 15.43 mg/kg เหลือ 12.49 mg/kg (ลดลง 2.94 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 12.24 – 14.93 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 14.93 mg/kg เหลือ 12.24 mg/kg (ลดลง 2.70 mg/kg)

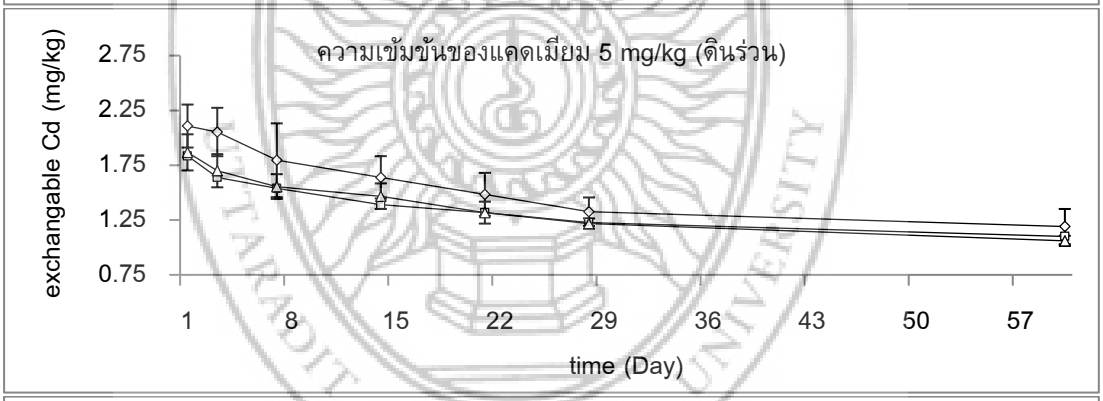
จากภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่าทุกตำรับและทุกชนิดดินแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดินเช่นเดียวกับดินร่วนเหนียว และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มและมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด โดยกระจายตัวในช่วง 1.19-2.11 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 2.11 mg/kg เหลือ 1.19 mg/kg (ลดลง 0.92 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.10-1.84 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 1.84 mg/kg เหลือ 1.10 mg/kg (ลดลง 0.74 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.06-1.87 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 1.87 mg/kg เหลือ 1.06 mg/kg (ลดลง 0.81 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินเข้มข้นมากที่สุด โดยกระจายตัวอยู่ที่ 10.06-11.83 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 2.11 mg/kg เหลือ 1.19 mg/kg (ลดลง 1.77 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 8.12-9.63 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 9.63 mg/kg เหลือ 8.12 mg/kg (ลดลง 1.51 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 7.86-10.08 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจาก 10.08 mg/kg เหลือ 7.86 mg/kg (ลดลง 2.22 mg/kg) และจาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่า ยิปซัมมีอิทธิพลทำให้แคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.05$) ที่อัตราแคดเมียม 30

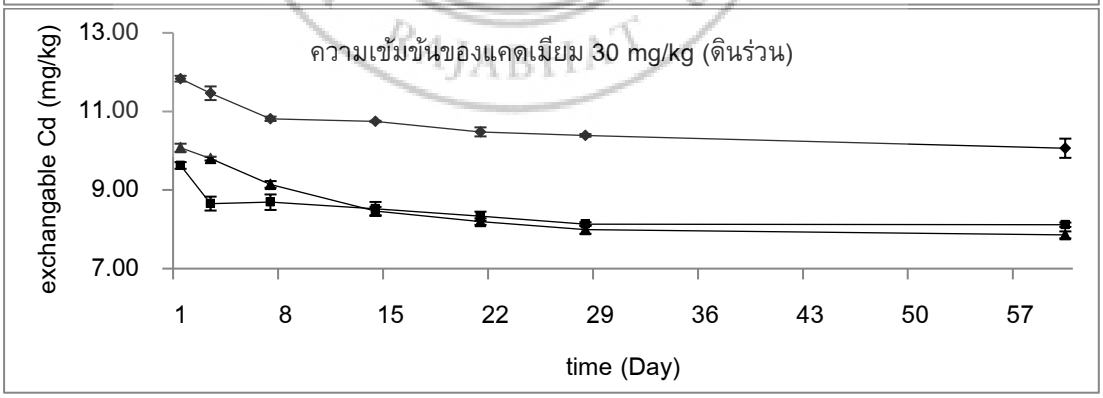
mg/kg และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$)เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดินมากขึ้น ดังตาราง 4.4

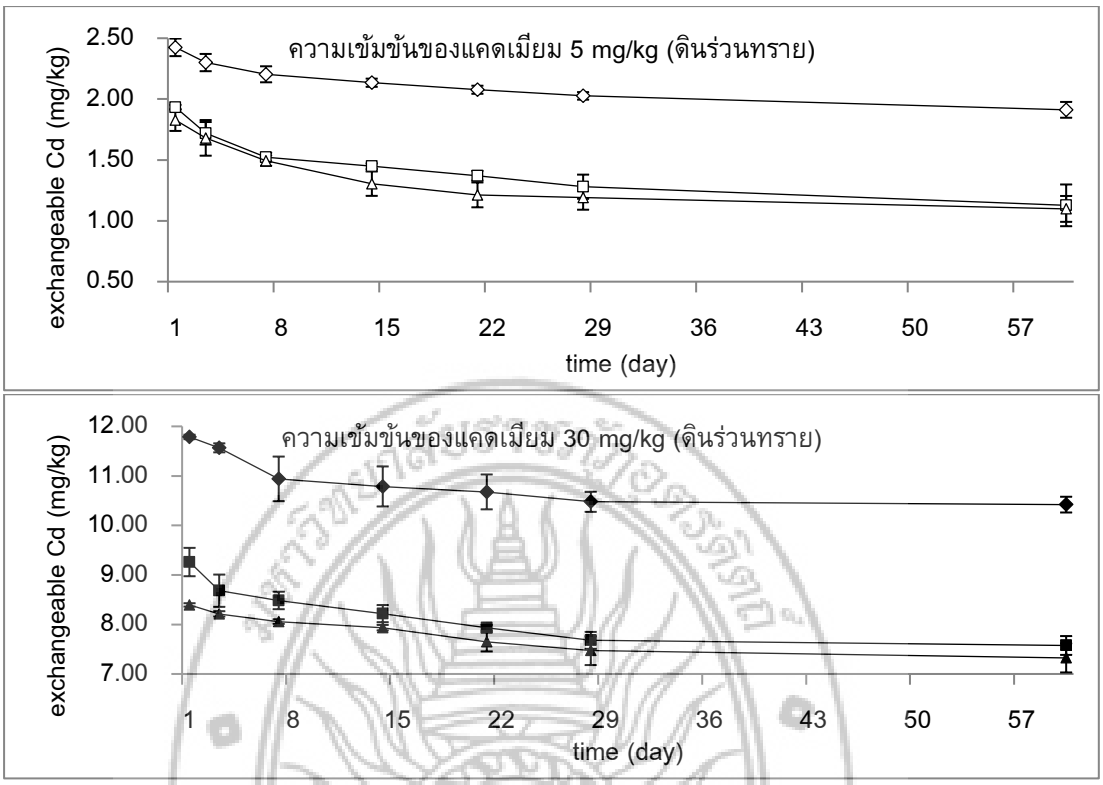
จากภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินร่วนทรายตามช่วงเวลา พบว่าทุกตำรับและทุกชนิดดินแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มและมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด โดยกระจายตัวในช่วง 1.91-2.43 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.51 mg/kg (ลดลงจาก 2.43 mg/kg เหลือ 1.91 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.13-1.93 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.81 mg/kg (ลดลงจาก 1.93 mg/kg เหลือ 1.13 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.10–1.83 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.73 mg/kg (ลดลงจาก 1.83 mg/kg เหลือ 1.10 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินเข้มข้นมากที่สุด โดยกระจายตัวอยู่ในช่วง 10.42-11.79 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 1.37 mg/kg (ลดลงจาก 10.42 mg/kg เหลือ 11.79 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 7.58-9.26 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 1.69 mg/kg (ลดลงจาก 7.58 mg/kg เหลือ 9.26 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 7.32-8.93 mg/kg และปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 1.07 mg/kg (ลดลงจาก 8.93 mg/kg เหลือ 7.32 mg/kg)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
exchangeable Cd (mg/kg)
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
exchangeable Cd (mg/kg)
18.00
16.00
14.00
12.00
10.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วน)
exchangable Cd (mg/kg)
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วน)
exchangable Cd (mg/kg)
13.00
11.00
9.00
7.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)



ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม ◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg

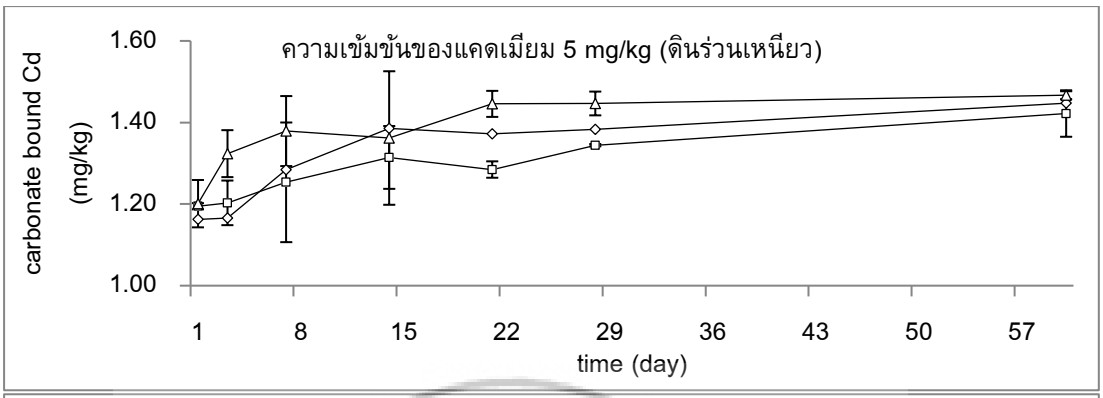
การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดิน

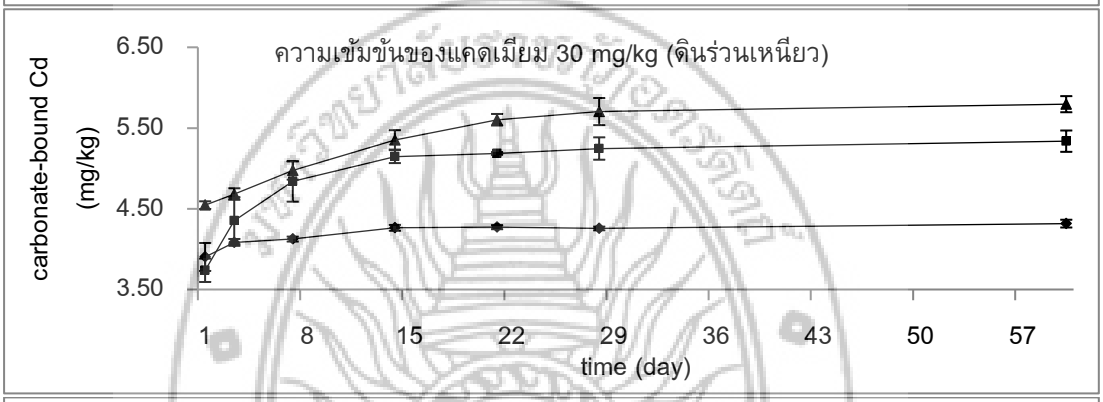
จากภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่าในทุกตำรับแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินมีอัตราลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 1.16-1.45 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 0.29 mg/kg (เพิ่มจาก 1.16 mg/kg เป็น 1.45 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.19-1.42 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.23 mg/kg (เพิ่มจาก 1.19 mg/kg เป็น 1.42 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.20-1.47 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.27 mg/kg (เพิ่มจาก 1.20 mg/kg เป็น 1.47

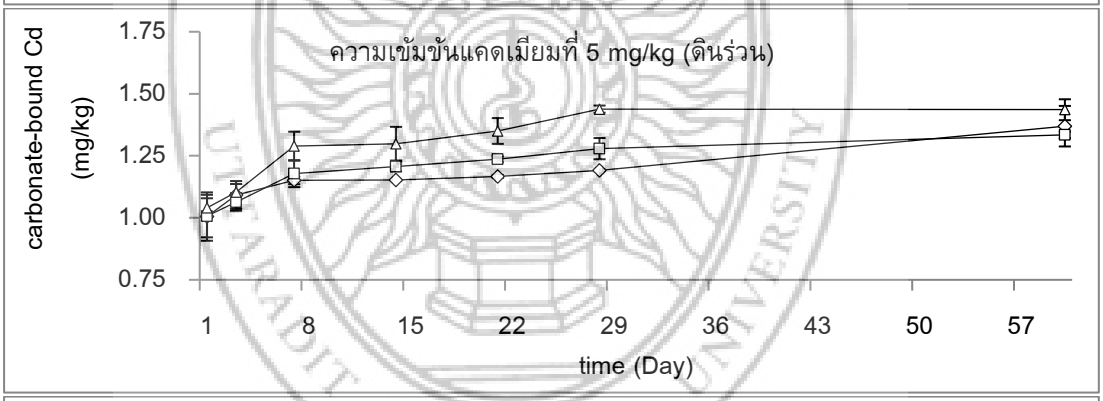
mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินกระจายตัวอยู่ที่ 3.90-4.32 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.41 mg/kg (เพิ่มจาก 3.90 mg/kg เป็น 4.32 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 3.74-5.34 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.60 mg/kg (เพิ่มจาก 3.74 mg/kg เป็น 5.34 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 4.55-5.80 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.25 mg/kg (เพิ่มจาก 4.55 mg/kg เป็น 5.80 mg/kg)

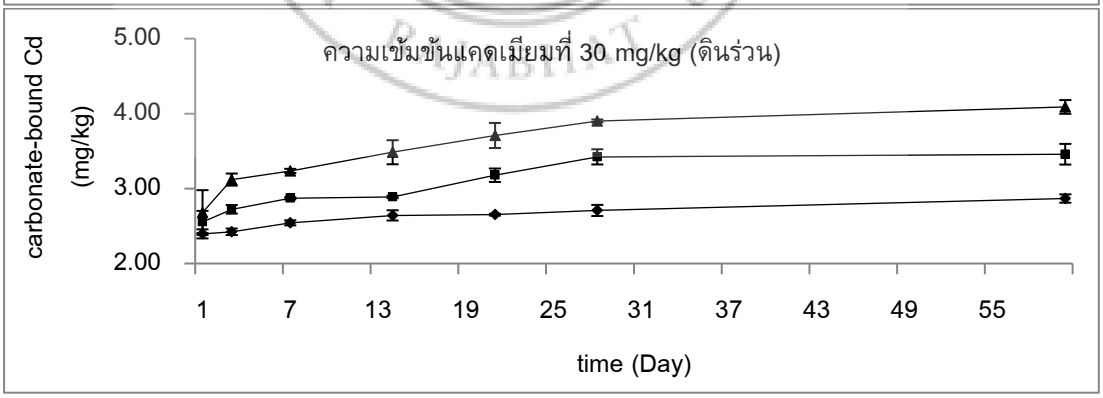
จากภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่าในทุกตำรับแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินมีอัตราลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 1.01-1.37 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 0.36 mg/kg (เพิ่มจาก 1.01 mg/kg เป็น 1.37 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.01-1.33 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.32 mg/kg (เพิ่มจาก 1.01 mg/kg เป็น 1.33 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.04-1.44 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.40 mg/kg (เพิ่มจาก 1.04 mg/kg เป็น 1.44 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินกระจายตัวอยู่ที่ 2.40-2.87 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.47 mg/kg (เพิ่มจาก 2.40 mg/kg เหลือ 2.87 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 2.55-3.46 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.09 mg/kg (เพิ่มจาก 2.55 mg/kg เป็น 3.46 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 2.68-4.09 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.41 mg/kg (เพิ่มจาก 2.68 mg/kg เป็น 4.09 mg/kg) จาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg อัตรายิปซัมมีผลต่อแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.05$) และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

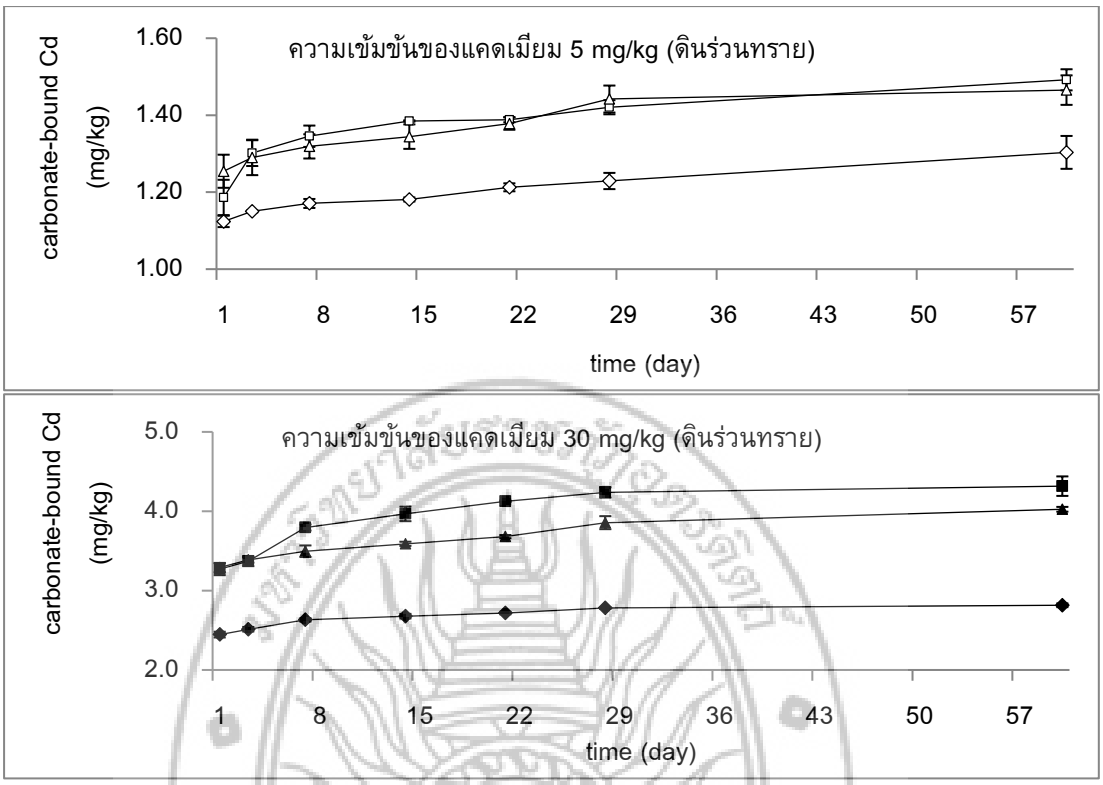
จากภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่าในทุกตำรับแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินมีอัตราลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่อง ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 1.12-1.30 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 0.18 mg/kg (เพิ่มจาก 1.12 mg/kg เป็น 1.30 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.19-1.49 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.31 mg/kg (เพิ่มจาก 1.19 mg/kg เป็น 1.49 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.25-1.47 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.21 mg/kg (เพิ่มจาก 1.25 mg/kg เป็น 1.47 mg/kg) ส่วนที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินกระจายตัวอยู่ที่ 2.45-2.82 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.37 mg/kg (เพิ่มจาก 2.45 mg/kg เป็น 2.82 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 3.27-4.32 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.05 mg/kg (เพิ่มจาก 3.27 mg/kg เป็น 4.32 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 3.29-4.03 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.73 mg/kg (เพิ่มจาก 3.29 mg/kg เป็น 4.03 mg/kg)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
carbonate bound Cd (mg/kg)
1.60
1.40
1.20
1.00
1 8 15 22 29 36 43 50 57
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
carbonate-bound Cd (mg/kg)
6.50
5.50
4.50
3.50
1 8 15 22 29 36 43 50 57
time (day)


ความเข้มข้นแคดเมียมที่ 5 mg/kg (ดินร่วน)
carbonate-bound Cd (mg/kg)
1.75
1.50
1.25
1.00
0.75
1 8 15 22 29 36 43 50 57
time (Day)


ความเข้มข้นแคดเมียมที่ 30 mg/kg (ดินร่วน)
carbonate-bound Cd (mg/kg)
5.00
4.00
3.00
2.00
1 7 13 19 25 31 37 43 49 55
time (Day)



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 8 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม ◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดิน

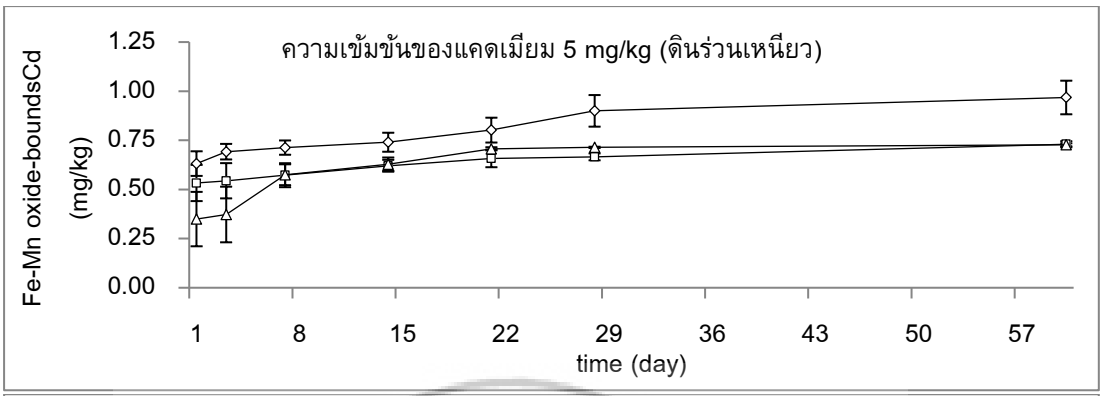
จากภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า ทุกตำรับแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเปลี่ยนแปลงมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.63-0.97 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.34 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.63 mg/kg เป็น 0.97 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.53-0.73 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.20 mg/kg (เพิ่มจาก 0.53 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสได้ตลอด

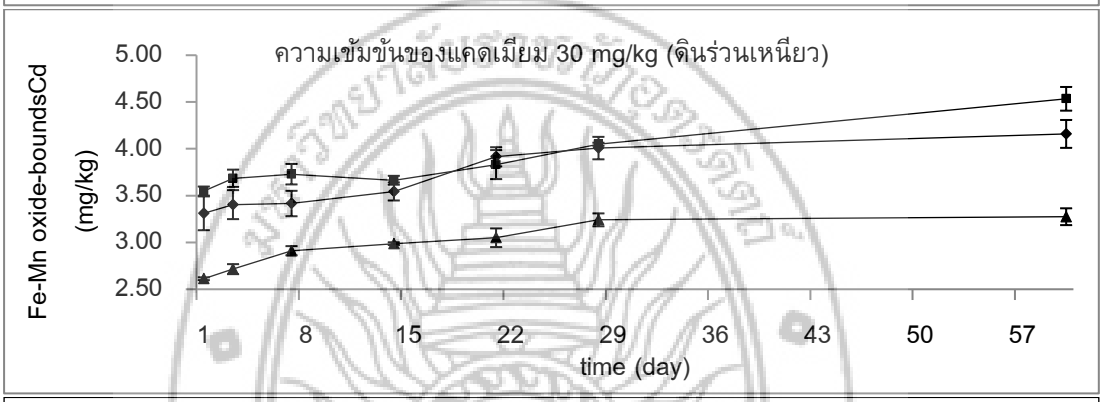
ช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.35-0.73 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.38 mg/kg (เพิ่มจาก 0.35 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 3.31-4.16 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.85 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 3.31 mg/kg เป็น 4.16 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 3.55-4.53 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.99 mg/kg (เพิ่มจาก 3.55 mg/kg เป็น 4.53 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 2.61-2.97 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.66 mg/kg (เพิ่มจาก 2.61 mg/kg เป็น 2.97 mg/kg)

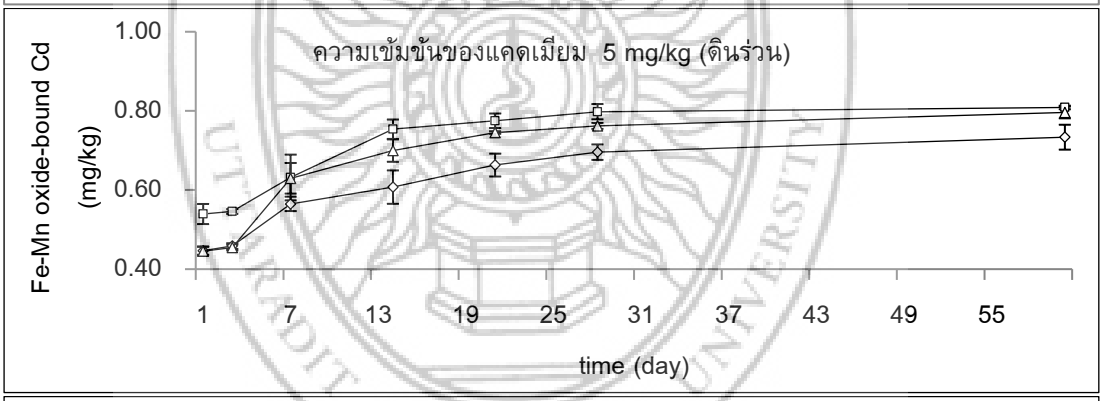
จากภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่า ทุกตำรับแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเปลี่ยนมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.45-0.73 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.28 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 1.01 mg/kg เป็น 1.37 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.54-0.81 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.27 mg/kg (เพิ่มจาก 0.54 mg/kg เป็น 0.81 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.45-0.80 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.35 mg/kg (เพิ่มจาก 0.45 mg/kg เป็น 0.80 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 2.07-2.86 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.79 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 2.07 mg/kg เป็น 2.86 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 2.29-3.33 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 1.04 mg/kg (เพิ่มจาก 2.29 mg/kg เป็น 3.33 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 2.16-3.04 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.88 mg/kg

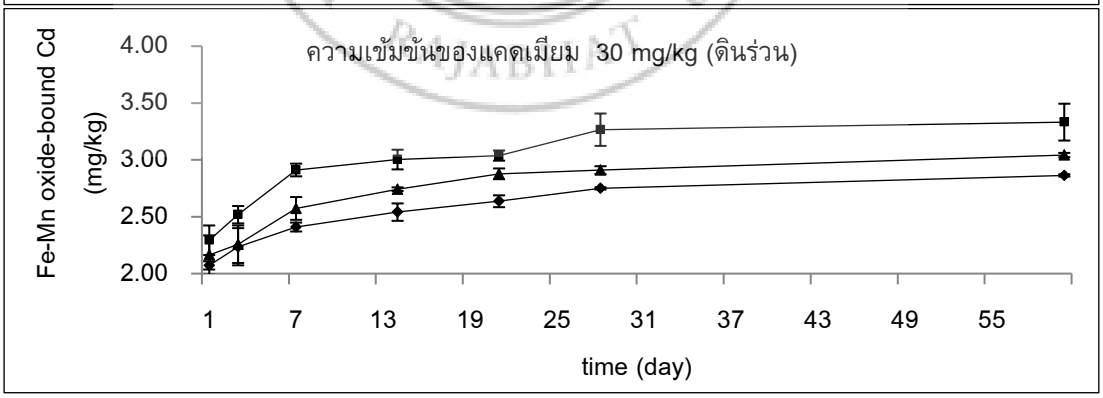
(เพิ่มจาก 2.16 mg/kg เป็น 3.04 mg/kg) จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่า ยิปซัมไม่มีผลต่อแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดิน อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังตารางที่ 4.4

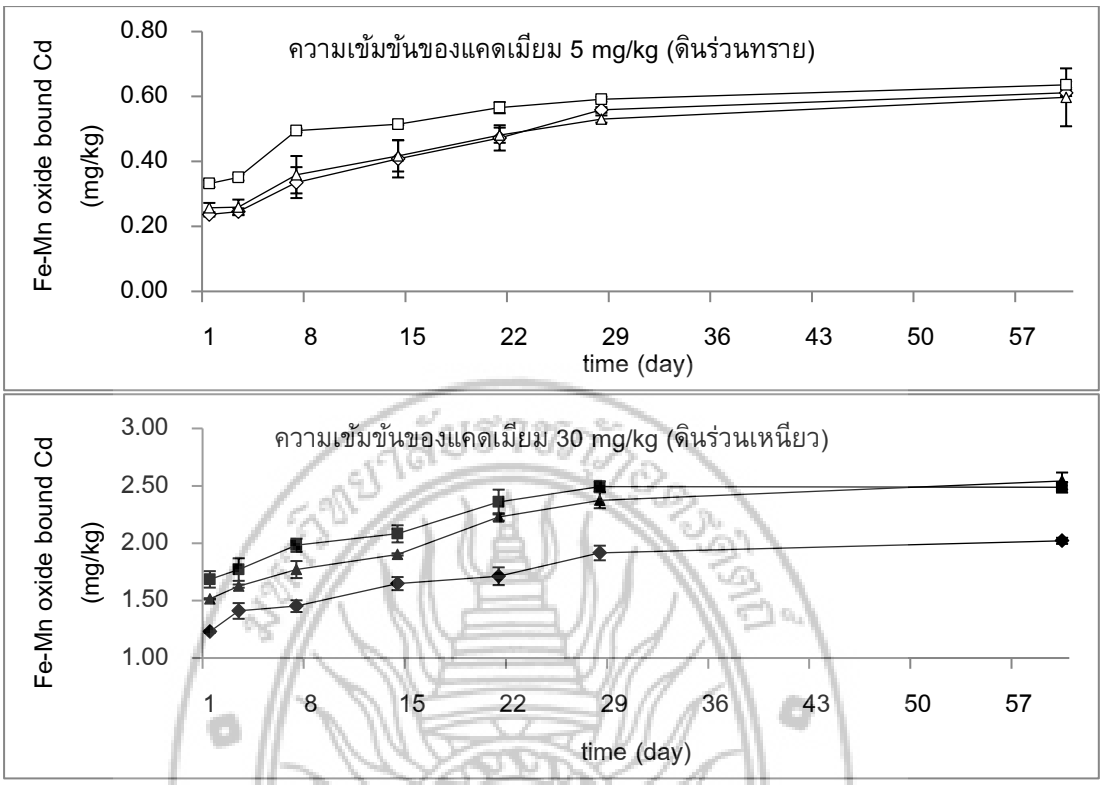
จากภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่า ทุกตำรับแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเปลี่ยนมากในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ในช่วง 0.24-0.61 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.37 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.24 mg/kg เป็น 0.61 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.33-0.64 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0. 30 mg/kg (เพิ่มจาก 0.33 mg/kg เป็น 0.64 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.26-0.60 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.34 mg/kg (เพิ่มจาก 0.26 mg/kg เป็น 0.60 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ในช่วง 1.23-2.02 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.79 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 1.23 mg/kg เป็น 2.02 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.69-2.49 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.80 mg/kg (เพิ่มจาก 1.69 mg/kg เป็น 2.49 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 1.52-2.54 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 1.02 mg/kg (เพิ่มจาก 1.52 mg/kg เป็น 2.54 mg/kg)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
Fe-Mn oxide-boundsCd (mg/kg)
1.25
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
Fe-Mn oxide-boundsCd (mg/kg)
5.00
4.50
4.00
3.50
3.00
2.50
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วน)
Fe-Mn oxide-bound Cd (mg/kg)
1.00
0.80
0.60
0.40
1
7
13
19
25
31
37
43
49
55
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วน)
Fe-Mn oxide-bound Cd (mg/kg)
4.00
3.50
3.00
2.50
2.00
1
7
13
19
25
31
37
43
49
55
time (day)



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังเติมแคดเมียม ◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปออร์แกนิก

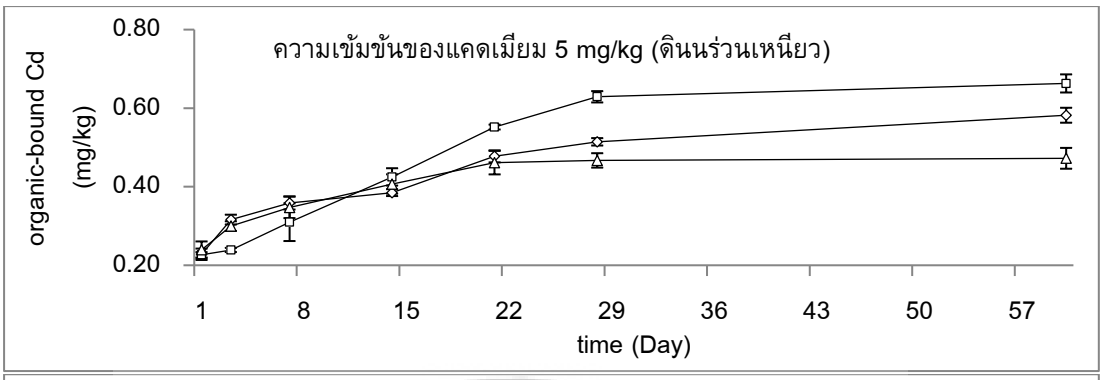
จากภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่าในทุกตำรับแคดเมียมรูปที่ออร์แกนิกในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวนที่ 60 ของการบ่ม ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.23-0.58 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.35 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.23 mg/kg เป็น 0.58 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.23-0.66 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.44 mg/kg (เพิ่มจาก 0.23 mg/kg เป็น 0.66 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.24-0.47 mg/kg และมี

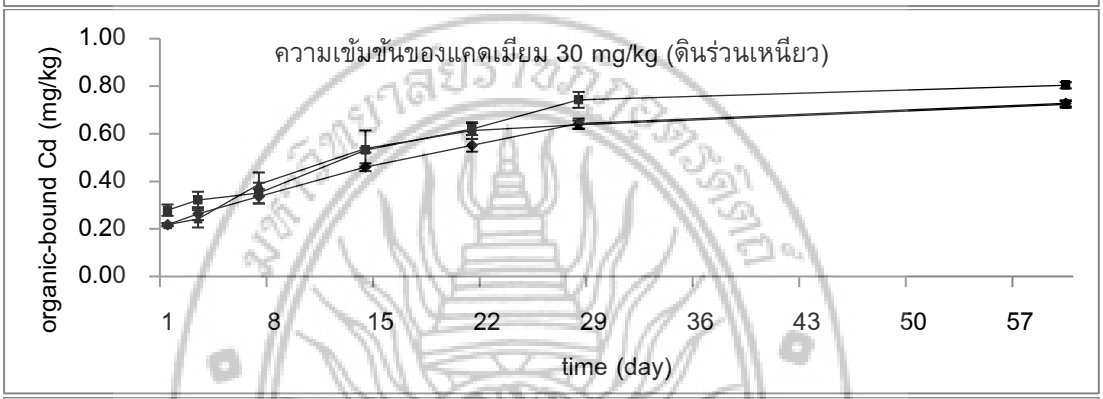
ปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.23 mg/kg (เพิ่มจาก 0.24 mg/kg เป็น 0.47 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.22-0.73 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.51 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.22 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.28-0.80 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.53 mg/kg (เพิ่มจาก 0.28 mg/kg เป็น 0.80 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.22-0.72 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.51 mg/kg (เพิ่มจาก 0.22 mg/kg เป็น 0.72 mg/kg)

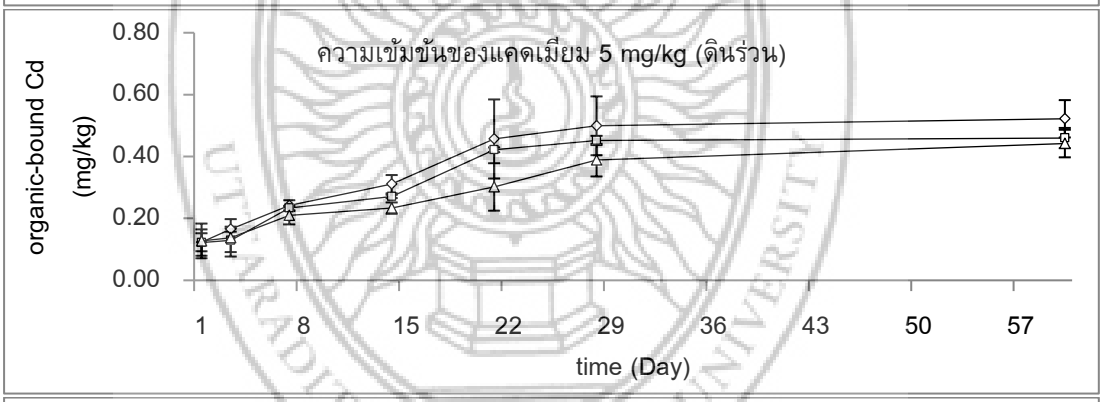
จากภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่า ในทุกตำรับแคดเมียมรูปที่ออร์แกนิกในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.12-0.52 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.40 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.12 mg/kg เป็น 0.52 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.12-0.46 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.34 mg/kg (เพิ่มจาก 0.12 mg/kg เป็น 0.46 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.13-0.44 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.31 mg/kg (เพิ่มจาก 0.13 mg/kg เป็น 0.44 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.21-0.75 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.54 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.21 mg/kg เป็น 0.75 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.18-0.68 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.50 mg/kg (เพิ่มจาก 0.18 mg/kg เป็น 0.68 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.24-0.69 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.45 mg/kg (เพิ่มจาก 2.16 mg/kg เป็น 3.04 mg/kg) และจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่ายิปซัมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในออร์แกนิกในดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

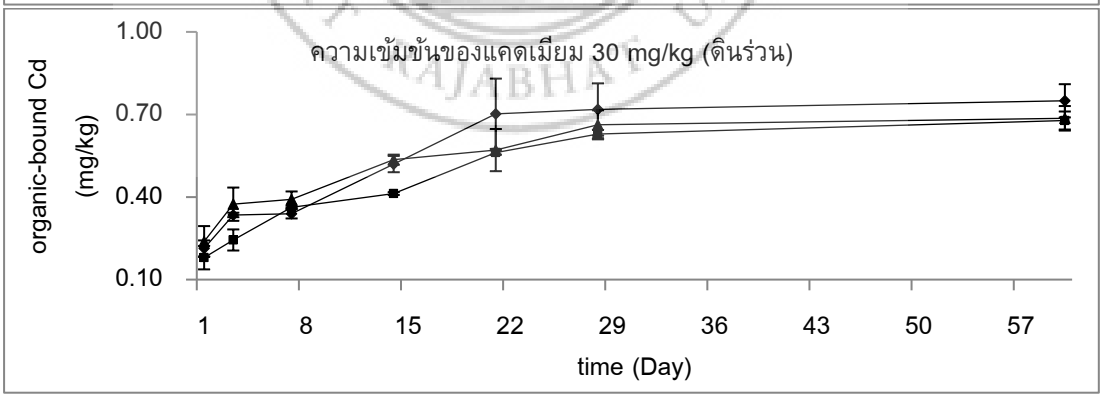
จากภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่า ในทุกตำรับแคดเมียมรูปที่ออร์แกนิกในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ถึง 7 วัน

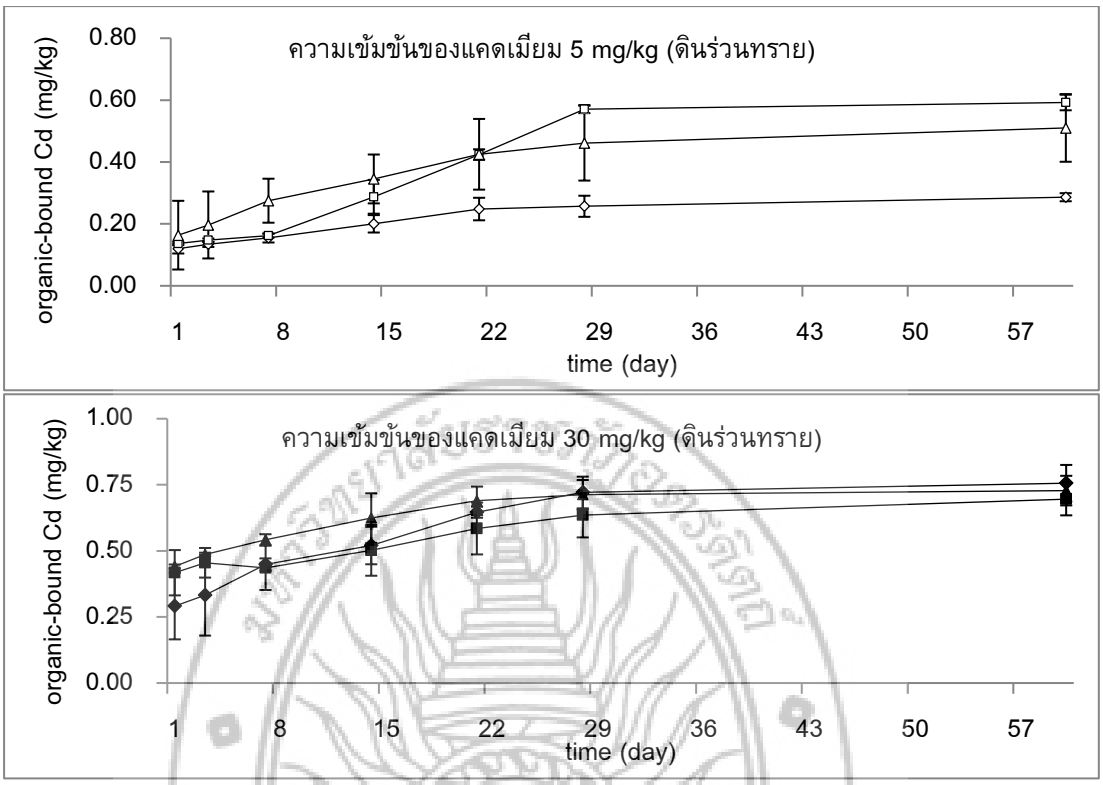
แรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.12-0.29 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.17 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.12 mg/kg เป็น 0.29 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.14-0.59 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.45 mg/kg (เพิ่มจาก 0.14 mg/kg เป็น 0.59 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.16-0.51 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.35 mg/kg (เพิ่มจาก 0.16 mg/kg เป็น 0.51 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.29-0.76 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.47 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.29 mg/kg เป็น 0.76 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.42-0.70 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.28 mg/kg (เพิ่มจาก 0.42 mg/kg เป็น 0.70 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.44-0.73 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.29 mg/kg (เพิ่มจาก 0.44 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) และจาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่ายิปซัมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในออร์แกนิกในดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.4


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินนร่วนเหนียว)
organic-bound Cd (mg/kg)
0.80
0.60
0.40
0.20
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
organic-bound Cd (mg/kg)
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วน)
organic-bound Cd (mg/kg)
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วน)
organic-bound Cd (mg/kg)
1.00
0.70
0.40
0.10
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)



ภาพที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออร์แกนิก ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม ◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด

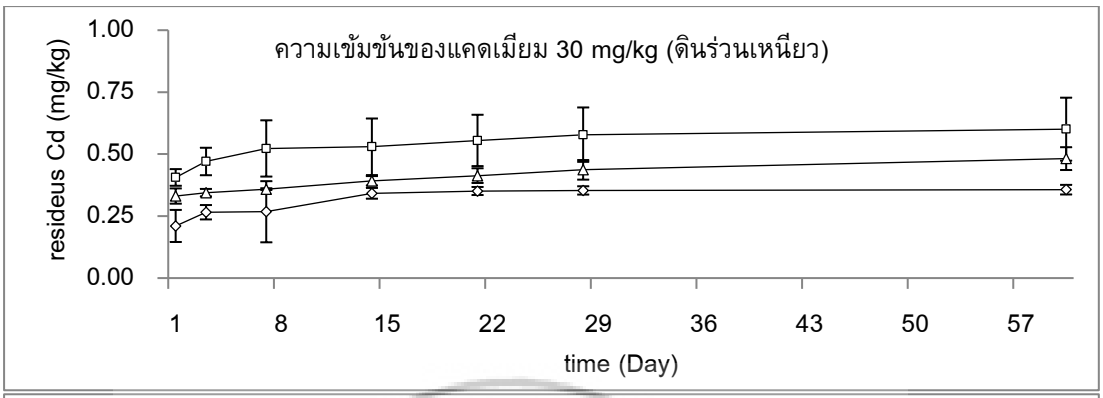
จากภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่าในทุกตำรับแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มดินและมีแนวโน้มจะเพิ่มอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.21-0.36 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.15 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.21 mg/kg เป็น 0.36 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.41-0.60 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.19 mg/kg (เพิ่มจาก 0.41 mg/kg เป็น 0.60 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.33-0.48 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.15 mg/kg (เพิ่มจาก 0.33 mg/kg เป็น 0.48 mg/kg) และที่อัตราความ

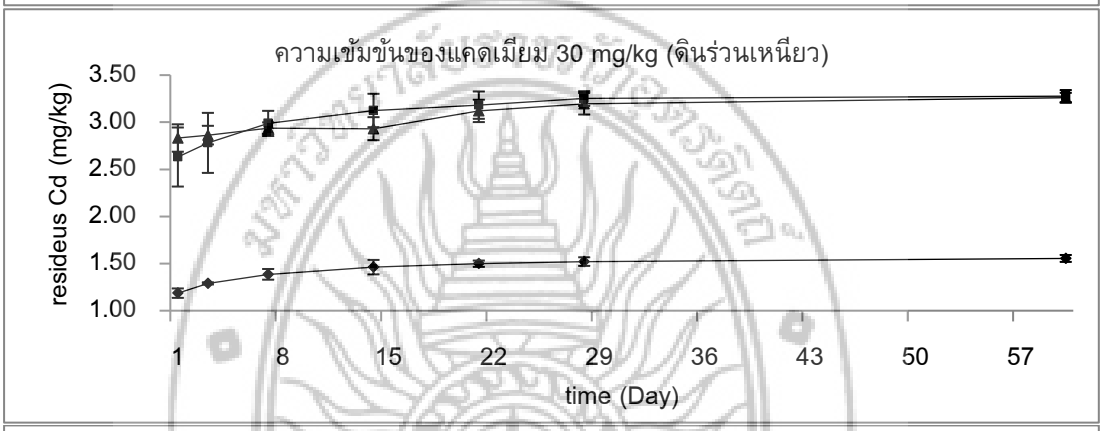
เข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 1.19 -1.55 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.37 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 1.19 mg/kg เป็น 1.55 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 2.63-3.28 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.65 mg/kg (เพิ่มจาก 2.63 mg/kg เป็น 2.28 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 2.83- 3.26 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.43 mg/kg (เพิ่มจาก 2.83 mg/kg เป็น 3.26 mg/kg) จาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าอัตราการใส่ยิปซัมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) ในทุกตำรับและปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังที่แสดงในตาราง 2

จากภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่าในทุกตำรับแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มดินและมีแนวโน้มจะเพิ่มอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับที่ 1(ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.46-0.58 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.12 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.46 mg/kg เป็น 0.58 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.62-0.74 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.12 mg/kg (เพิ่มจาก 0.62 mg/kg เป็น 0.74 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.80-0.92 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.12 mg/kg (เพิ่มจาก 0.80 mg/kg เป็น 0.92 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 3.64-3.82 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.18 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.64 mg/kg เป็น 0.82 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 3.91-4.22 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.21 mg/kg (เพิ่มจาก 3.91 mg/kg เป็น 4.22 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 3.97- 4.10 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.13 mg/kg (เพิ่มจาก 2.16 mg/kg เป็น 3.04 mg/kg) จาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

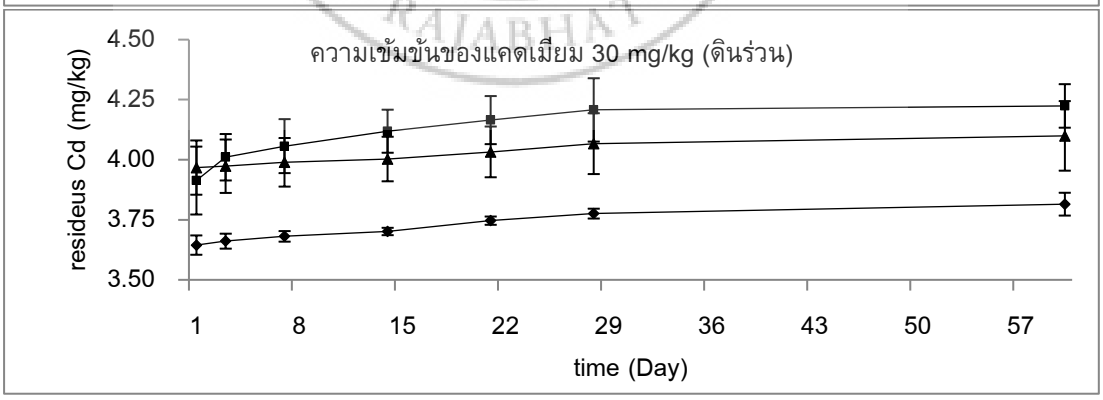
แสดงให้เห็นว่าอัตราการใส่ยิปซัมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) ในทุกตำรับและปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังที่แสดงในตาราง 2

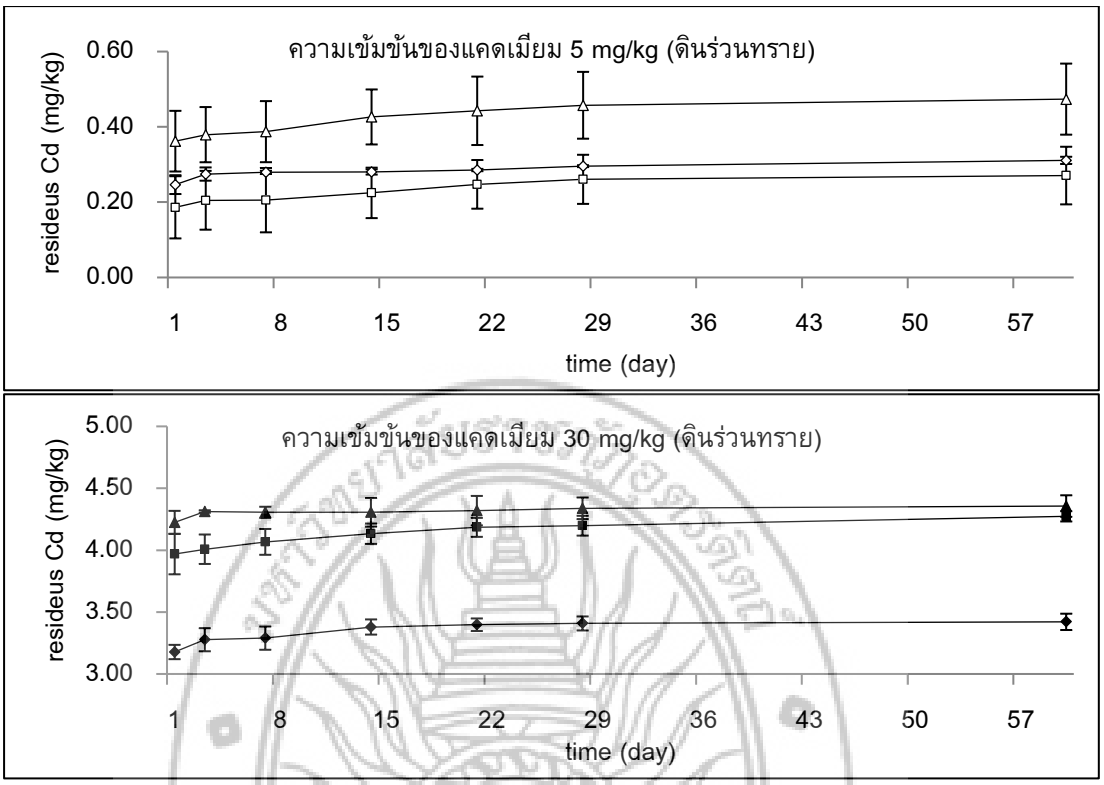
จากภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในดินร่วนทรายตามช่วงเวลา พบว่าในทุกตำรับแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มดินและมีแนวโน้มจะเพิ่มอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าตำรับควบคุมมีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.25-0.31 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.06 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 0.25 mg/kg เป็น 0.31 mg/kg) ตำรับที่ 2 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.19-0.27 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.08 mg/kg (เพิ่มจาก 0.19 mg/kg เป็น 0.27 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 3 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 0.36-0.47 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.11 mg/kg (เพิ่มจาก 0.36 mg/kg เป็น 0.47 mg/kg) และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าตำรับที่ 4 (ควบคุม) มีอัตราความเข้มขันของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 3.19-3.42 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.24 mg/kg (เพิ่มขึ้นจาก 3.19 mg/kg เป็น 3.42 mg/kg) ตำรับที่ 5 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 3.97-4.27 mg/kg และปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.30 mg/kg (เพิ่มจาก 3.97 mg/kg เป็น 4.27 mg/kg) ส่วนตำรับที่ 6 มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 4.22- 4.36 mg/kg และมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.13 mg/kg (เพิ่มจาก 4.22 mg/kg เป็น 4.36 mg/kg) จาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าอัตราการใส่ยิปซัมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) ในทุกตำรับและปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังที่แสดงในตาราง 4.4


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
resideus Cd (mg/kg)
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วนเหนียว)
resideus Cd (mg/kg)
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)

ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg (ดินร่วน)
resideus Cd (mg/kg)
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)


ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg (ดินร่วน)
resideus Cd (mg/kg)
4.50
4.25
4.00
3.75
3.50
1
8
15
22
29
36
43
50
57
time (Day)



ภาพที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในช่วงเวลา 1, 3 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม ◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่างๆ (mg/kg) หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน (ข้อมูลตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย N=4)

soil type/ fraction	applied Cd	applied gypsum	time (day)							mean
			1	3	7	14	21	28	60	
silty clay										
SOL[1)]										
	5 mg/kg	0 %	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.08d
		4 %	0.40	0.36	0.34	0.30	0.25	0.22	0.17	0.29c
		8 %	0.40	0.36	0.31	0.27	0.24	0.22	0.21	0.29c
	30 mg/kg	0 %	4.26	4.22	4.17	4.15	4.14	4.13	4.07	4.16b
		4 %	4.64	4.53	4.45	4.20	4.10	4.01	3.94	4.27b
		8 %	4.76	4.61	4.57	4.51	4.48	4.47	4.51	4.56a
EXC										
	5 mg/kg	0 %	3.38	3.28	2.95	2.83	2.66	2.49	2.37	2.85c
		4 %	2.57	2.48	2.29	2.23	2.06	1.81	1.72	2.16d
		8 %	2.75	2.62	2.38	2.17	2.02	1.91	1.86	2.24d
	30 mg/kg	0 %	17.33	16.94	16.61	16.13	15.85	15.55	15.42	16.26a
		4 %	15.43	14.83	14.40	13.19	12.98	12.67	12.49	13.71b
		8 %	14.93	14.79	14.12	13.42	12.72	12.40	12.24	13.52b
Ca										
	5 mg /kg	0 %	1.16	1.17	1.28	1.39	1.37	1.38	1.45	1.31d
		4 %	1.19	1.20	1.25	1.31	1.28	1.34	1.42	1.29d
		8 %	1.20	1.32	1.38	1.36	1.45	1.45	1.47	1.38d
	30 mg/kg	0 %	3.90	4.08	4.12	4.26	4.27	4.26	4.32	4.17c
		4 %	3.74	4.35	4.84	5.15	5.19	5.25	5.34	4.83b
		8 %	4.55	4.68	4.98	5.35	5.60	5.70	5.80	5.24a
Fe-Mn										
	5 mg/kg	0 %	0.63	0.69	0.71	0.74	0.80	0.90	0.97	0.78d
		4 %	0.53	0.54	0.57	0.62	0.66	0.67	0.73	0.62e
		8 %	0.35	0.37	0.58	0.63	0.71	0.71	0.73	0.58e
	30 mg/kg	0 %	3.31	3.40	3.42	3.54	3.91	4.01	4.16	3.68b
		4 %	3.55	3.69	3.73	3.66	3.83	4.05	4.53	3.86a
		8 %	2.61	2.72	2.91	2.99	3.05	3.24	3.28	2.97c

OM										
	5 mg/kg	0 %	0.23	0.32	0.36	0.39	0.48	0.51	0.58	0.41b
		4 %	0.23	0.24	0.31	0.43	0.55	0.63	0.66	0.43ab
		8 %	0.24	0.30	0.35	0.41	0.46	0.47	0.47	0.38b
	30 mg/kg	0 %	0.22	0.26	0.34	0.46	0.55	0.64	0.73	0.46ab
		4 %	0.28	0.32	0.35	0.53	0.62	0.74	0.80	0.52a
		8 %	0.22	0.24	0.39	0.54	0.61	0.64	0.72	0.48ab
RES										
	5 mg/kg	0 %	0.21	0.27	0.27	0.34	0.35	0.35	0.36	0.31d
		4 %	0.41	0.47	0.52	0.53	0.56	0.58	0.60	0.52c
		8 %	0.33	0.34	0.36	0.39	0.41	0.44	0.48	0.39d
	30 mg/kg	0 %	1.19	1.29	1.39	1.46	1.50	1.52	1.55	1.41b
		4 %	2.63	2.78	2.99	3.12	3.18	3.25	3.28	3.03a
		8 %	2.83	2.86	2.94	2.93	3.12	3.20	3.26	3.02a
loam										
SLU										
	5 mg/kg	0 %	1.02	0.94	0.92	0.86	0.81	0.78	0.72	0.86c
		4 %	1.33	1.20	1.04	0.94	0.93	0.86	0.81	1.02c
		8 %	1.32	1.25	0.96	0.84	0.74	0.72	0.70	0.93c
	30 mg/kg	0 %	10.29	10.20	10.17	10.10	10.08	10.05	10.03	10.13b
		4 %	11.61	11.33	11.03	10.93	10.86	10.65	10.59	11.00a
		8 %	11.08	10.88	10.80	10.78	10.66	10.61	10.55	10.77a
EXC	5 mg/kg	0 %	2.11	2.05	1.80	1.64	1.48	1.33	1.19	1.66c
		4 %	1.84	1.64	1.54	1.39	1.32	1.23	1.10	1.44c
		8 %	1.87	1.70	1.56	1.47	1.32	1.22	1.06	1.46c
	30 mg/kg	0 %	11.83	11.46	10.81	10.75	10.48	10.39	10.06	10.83a
		4 %	9.63	8.65	8.69	8.52	8.33	8.13	8.12	8.58b
		8 %	10.08	9.80	9.14	8.46	8.20	8.00	7.86	8.79b
Ca	5 mg /kg	0 %	1.12	1.15	1.17	1.18	1.21	1.23	1.30	1.20d
		4 %	1.19	1.30	1.35	1.39	1.39	1.42	1.49	1.36d
		8 %	1.25	1.29	1.32	1.34	1.38	1.44	1.47	1.36d
	30 mg/kg	0 %	2.45	2.51	2.63	2.68	2.72	2.78	2.82	2.65c
		4 %	3.27	3.37	3.80	3.97	4.13	4.24	4.32	3.87a
		8 %	3.29	3.39	3.50	3.59	3.68	3.86	4.03	3.62b

Fe-Mn	5 mg/kg	0 %	0.45	0.46	0.57	0.61	0.66	0.70	0.73	0.60c
		4 %	0.54	0.55	0.63	0.75	0.78	0.80	0.81	0.69c
		8 %	0.45	0.45	0.63	0.70	0.75	0.76	0.80	0.65c
	30 mg/kg	0 %	2.07	2.24	2.41	2.54	2.64	2.75	2.86	2.50b
		4 %	2.29	2.52	2.91	3.00	3.04	3.27	3.33	2.91a
		8 %	2.16	2.26	2.57	2.74	2.88	2.91	3.04	2.65ab
OM	5 mg/kg	0 %	0.12	0.17	0.24	0.31	0.46	0.50	0.52	0.33ab
		4 %	0.12	0.13	0.23	0.27	0.42	0.45	0.46	0.30b
		8 %	0.13	0.14	0.21	0.23	0.30	0.39	0.44	0.26b
	30 mg/kg	0 %	0.21	0.33	0.34	0.52	0.60	0.62	0.65	0.47a
		4 %	0.18	0.24	0.36	0.41	0.56	0.63	0.68	0.44a
		8 %	0.24	0.27	0.39	0.54	0.39	0.54	0.57	0.42ab
RES	5 mg/kg	0 %	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.57	0.58	0.53e
		4 %	0.62	0.62	0.65	0.66	0.68	0.71	0.74	0.67d
		8 %	0.80	0.81	0.84	0.87	0.90	0.91	0.92	0.87c
	30 mg/kg	0 %	3.64	3.66	3.68	3.70	3.75	3.78	3.82	3.72b
		4 %	3.91	4.01	4.06	4.12	4.17	4.21	4.22	4.10a
		8 %	3.97	3.97	3.99	4.00	4.03	4.07	4.10	4.02a
sandy loam										
SLU	5 mg/kg	0 %	1.31	1.23	1.16	1.12	1.08	1.08	1.06	1.15d
		4 %	1.43	1.36	1.32	1.24	1.18	1.15	1.11	1.26d
		8 %	1.41	1.34	1.27	1.17	1.11	1.10	1.08	1.21d
	30 mg/kg	0 %	11.68	11.52	11.32	11.27	11.16	11.05	10.94	11.28c
		4 %	11.78	11.73	11.64	11.51	11.37	11.20	11.05	11.47b
		8 %	12.21	12.08	11.83	11.72	11.48	11.28	11.24	11.69a
EXC	5 mg/kg	0 %	2.43	2.30	2.20	2.13	2.08	2.03	1.91	2.15d
		4 %	1.93	1.72	1.52	1.45	1.37	1.28	1.13	1.49e
		8 %	1.83	1.68	1.49	1.31	1.21	1.19	1.10	1.40e
	30 mg/kg	0 %	11.79	11.57	10.94	10.79	10.68	10.48	10.42	10.95a
		4 %	9.26	8.68	8.48	8.22	7.93	7.68	7.58	8.26b
		8 %	8.39	8.21	8.06	7.94	7.65	7.47	7.32	7.86c

Ca	5 mg/kg	0 %	1.12	1.15	1.17	1.18	1.21	1.23	1.30	1.20e
		4 %	1.19	1.30	1.35	1.39	1.39	1.42	1.49	1.36d
		8 %	1.25	1.29	1.32	1.34	1.38	1.44	1.47	1.36d
	30 mg/kg	0 %	2.45	2.51	2.63	2.68	2.72	2.78	2.82	2.65c
		4 %	3.27	3.37	3.80	3.97	4.13	4.24	4.32	3.87a
		8 %	3.29	3.39	3.50	3.59	3.68	3.86	4.03	3.62b
Fe-Mn	5 mg/kg	0 %	0.24	0.25	0.34	0.41	0.47	0.56	0.61	0.41c
		4 %	0.33	0.35	0.50	0.51	0.57	0.59	0.64	0.50c
		8 %	0.26	0.26	0.36	0.42	0.48	0.53	0.60	0.41c
	30 mg/kg	0 %	1.23	1.41	1.45	1.65	1.71	1.92	2.02	1.63b
		4 %	1.69	1.77	1.98	2.08	2.36	2.49	2.49	2.12a
		8 %	1.52	1.63	1.77	1.90	2.23	2.37	2.54	1.99a
OM	5 mg/kg	0 %	0.12	0.13	0.15	0.20	0.25	0.26	0.29	0.20c
		4 %	0.14	0.15	0.16	0.29	0.42	0.57	0.59	0.33b
		8 %	0.16	0.20	0.28	0.35	0.43	0.46	0.51	0.34b
	30 mg/kg	0 %	0.29	0.33	0.45	0.52	0.65	0.72	0.76	0.53a
		4 %	0.42	0.46	0.44	0.50	0.58	0.64	0.70	0.53a
		8 %	0.44	0.49	0.54	0.62	0.69	0.71	0.73	0.60a
RES	5 mg/kg	0 %	0.25	0.27	0.28	0.28	0.29	0.30	0.31	0.28e
		4 %	0.19	0.21	0.21	0.22	0.25	0.26	0.27	0.23e
		8 %	0.36	0.38	0.39	0.43	0.44	0.46	0.47	0.42d
	30 mg/kg	0 %	3.18	3.28	3.29	3.38	3.40	3.41	3.42	3.34c
		4 %	3.97	4.01	4.07	4.13	4.18	4.20	4.27	4.12b
		8 %	4.22	4.31	4.31	4.31	4.32	4.34	4.36	4.31a

[1)] SOL(แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน), EXC (แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้), Ca (แคดเมียมรูปคาร์บอเนต), Fe/Mn (แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส), OM (แคดเมียมรูปออร์แกนิก), RES (แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

[2)] รูปเคมีเดียวกันตัวเลขในช่องสดมภ์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (least significant difference: LSD)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสถานะธาตุอาหารพืชและปริมาณแคดเมียมในไร่ยาสูบในระบบเคมีเกษตร จังหวัดสุโขทัย ที่อยู่ภายใต้ระบบโควตายาสูบแบบเคมีเกษตร พบว่า pH ของดินพื้นที่เพาะปลูกยาสูบมีสภาพเป็นกรดรุนแรง อยู่ในช่วง 3.83-5.45 ซึ่งค่า pH เป็นช่วงที่กว้าง การที่จะมีการใช้ปูนขาวหรือโดโลไมท์เพื่อปรับ pH ต้องพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ดินเป็นหลัก ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีระดับต่ำถึงค่อนข้างต่ำเพราะขาดการปลูกพืชหมุนเวียนและซากวัสดุอินทรีย์เหลือทิ้งน้อยมากหลังจากเก็บผลผลิต และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำคาดว่ามีสาเหตุมาจากสภาพความเป็นกรดรุนแรง แต่ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในดินของพื้นที่ปลูกยาสูบค่อนข้างสูง อาจเป็นสาเหตุให้พืชดูดใช้โพแทสเซียมได้ลดลง การเพาะปลูกยาแบบเคมีเกษตรอย่างต่อเนื่องยาวนานมากกว่า 15 ปี ส่งผลให้ดินมีสภาพเป็นกรดจัดซึ่งสภาพที่เป็นกรดจัดจะเอื้อต่อการละลายได้ของธาตุโลหะหนักต่างๆ จะทำให้แคดเมียมและโลหะหนักอื่นๆ สามารถละลายออกมาอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินได้สูงนั้น ดินมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมด อยู่ในช่วง 3.27 – 5.08 mg kg^{-1} ซึ่งเป็นระดับที่เกินเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินประเทศไทย และสูงกว่าค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป ในขณะที่ปริมาณตะกั่ว, ทองแดง, สังกะสี และแมงกานีส มีระดับที่ต่ำ แต่ปริมาณทั้งหมดของสังกะสีในดินมีระดับที่สูงกว่าระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยอินทรีย์ พบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailability Cd) และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (total Cd) ค่อนข้างสูง ดังนั้นภาครัฐ โดยเฉพาะหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ควรแร่งแก้ไขปัญหาสภาพความเป็นกรดของดินให้เหมาะสม เพื่อลดอัตราการดูดซับธาตุพิษไปสะสมในใบยาสูบ และเพื่อให้ธาตุอาหารที่มีอยู่ในดินสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ นั้นหมายถึงการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพคุณภาพยาสูบ ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่ผูกขาดในระบบโควตาของภาครัฐ

สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ทดลอง

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ในกลุ่มชุดดินที่ 7 กลุ่มชุดดินที่ 38 และกลุ่มชุดดินที่ 56 พบว่า มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ มีค่า CEC ต่างกันตามเนื้อดิน และมีเนื้อดินที่ต่างกัน โดยในชุดดินที่ 7 มีอนุภาคดินเหนียวเป็นองค์ประกอบอยู่สูง ซึ่งช่วยให้มีผลต่อความสามารถดูดยึดไอออนของแคดเมียมที่มีประจุบวก (Cd^{2+}) ไว้ที่ผิวดินได้ดี ส่วนชุดดินที่ 38 มีอนุภาคดินเหนียวปาน

กลาง ในขณะที่ชุดดินที่ 56 มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณน้อย และค่า pH ของดินที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 5.71-6.50 จะทำให้แคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายและเคลื่อนที่ได้น้อย ซึ่งค่า pH เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน การใส่ยิปซัมลงในดินสามารถปรับปรุงค่า pH ของดินได้โดยส่งผลให้ค่า pH ดินเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้แคดเมียมที่อยู่ในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพมีการเคลื่อนที่ได้น้อยลง ดังนั้นพืช จุลิททรีย์ดิน และสิ่งมีชีวิตในดินมีโอกาสที่จะดูดซึมแคดเมียมไปสะสมไว้ได้น้อยลง อิกทั้งปริมาณดินเหนียวละอินทรียวัตถุที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อการควบคุมรูปทางเคมีของแคดเมียมและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดิน อันนำมาซึ่งการประเมินผลของยิปซัมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินต่อไป

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน

จากข้อมูลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดิน 3 ชนิด ได้แก่ ขุดดินที่ 7 (ดินร่วนเหนียว) ชุดดินที่ 38(ดินร่วน) และชุดดินที่ 56 ดินร่วนทราย) ที่บ่มดินนาน 60 วัน จะเห็นได้ว่าในชุดดินที่มีสภาพเป็นกรดทำให้อยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินมากกว่าสภาพที่เป็นด่าง ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของดินเมื่อนำมาเรียงลำดับพบว่า ชุดดินที่มีเนื้อดินประเภทดินเหนียว (ชุดดินที่ 7) ดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินประเภทดินร่วน (ชุดดินที่ 38) มากกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินประเภทดินทราย (ชุดดินที่ 56) ความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินมีผลต่อการดูดซับแคดเมียม โดยชุดดินที่มีปริมาณอนุภาคดินเหนียวน้อยและมีค่า pH ต่ำจะทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพ ได้มากกว่าถูกดูดซับไว้ในดิน และผลจากการใส่ยิปซัมในดินยังส่งผงต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณลดลงในทุกชนิดดิน ในขณะที่แคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออแกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนี้

แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผล รูปอิสสระในสารละลายดิน ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ดี มีปริมาณความเข้มข้นลงลงมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และมีแนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ตำรับที่3 < ตำรับที่ 2 < ตำรับที่ 1 < ตำรับที่ 4 < ตำรับที่ 6 < ตำรับที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบตามชุดดินแล้วจะเห็นว่าในชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินน้อยกว่า ชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วน และน้อยกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนทราย แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของ

แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินขึ้นกับอัตราการใส่ยิปซัม ปริมาณแคดเมียมที่เติมลงในดิน สมบัติของดินโดยเฉพาะค่า pH ความสามารถในการดูดซับแคตไอออนของดิน และเนื้อดิน

แคดเมียมรูปอิสระที่แลกเปลี่ยนได้ ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผล แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดิน มีปริมาณความเข้มข้นลงลงมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และมีแนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ตำรับที่3 < ตำรับที่ 2 < ตำรับที่ 1 และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg ได้ดังนี้ ตำรับที่ 4 < ตำรับที่ 6 < ตำรับที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบตามชุดดินแล้วจะเห็นว่าในชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนทรายมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินน้อยกว่า ชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วน และน้อยกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน จะมีปริมาณความเข้มข้นมากหรือน้อยขึ้นกับสมบัติของดินโดยเฉพาะค่า pH ความสามารถในการดูดซับแคตไอออนของดิน เนื้อดินอัตราการใส่ยิปซัม และปริมาณแคดเมียมที่เติมลงในดิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าในชุดดินที่มีเนื้อดินร่วนเหนียว จะมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่าชุดดินอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าในชุดดินร่วนเหนียวมีการดูดซับแคดเมียมไว้ที่อนุภาคดินในปริมาณมาก และพร้อมที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนในสารละลายดินได้เสมอ เมื่อสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป

แคดเมียมรูปคาร์บอเนต ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผล แคดเมียมรูปคาร์บอเนต ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้น้อย มีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัมเล็กน้อย และมีแนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต ที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ตำรับที่ 2 < ตำรับที่ 3 < ตำรับที่ 1 และที่อัตราความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg ได้ดังนี้ ตำรับที่ 5 < ตำรับที่ 4 < ตำรับที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบตามชุดดินแล้วจะเห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในแต่ละชุดดินมีปริมาณความเข้มข้นไม่ต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต จะมีปริมาณความเข้มข้นมากหรือน้อย ตามปริมาณอัตรายิปซัมที่ใส่ลงไปในดิน

จากผลการวิจัย สรุปได้ว่า การใส่ยิปซัมในดินมีผลให้แคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์ (รูปอิสสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้) ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ดี มีปริมาณความเข้มข้นลงลงมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และมี

แนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ จันทร์เพ็ญ ชุมแสง (2552) ได้รายงานว่า รูปทางเคมีของแคดเมียมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น/ลดลง ตามระยะเวลาที่บ่มดิน โดยแคดเมียมในรูปที่เป็นประโยชน์มีปริมาณความเข้มข้นลดลง ส่วนแคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิก และรูปที่เหลือจากการสกัดมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใส่ยิปซัมในดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียม เนื่องจากยิปซัมมีสมบัติเป็นด่างสามารถยกระดับ pH ของดินให้สูงขึ้นได้ และมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆซึ่งสามารถลดความเป็นพิษของแคดเมียมลงได้ในระดับหนึ่ง ดังจะเห็นได้จากการวิจัยของ Yang et al., (2015); Yan et al., (2014) ที่พบว่ายิปซัมยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียได้ 24.6 % และสามารถกำจัดแคดเมียมในดินชั้นบน (0-30 ซ.ม.) ได้ 30.5 % ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ยิปซัมปรับปรุงดินที่ใช้ปลูกพืชยังช่วยลดการสะสมโลหะหนักในพืชได้ ซึ่งการใช้ยิปซัมปรับปรุงดินไม่ส่งผลกระทบในด้านลบกับพืชที่ปลูกถึงแม้จะใส่ในอัตราที่สูงก็ตาม(ยุทธนา ยอดทองดี, 2555) แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเป็นวัสดุปรับปรุงดินชนิดหนึ่งซึ่งจะเป็นทางเลือกที่ดีสำรับเกษตรกรที่จะนำไปใช้ปรับปรุงดินเพื่อลดผลกระทบของแคดเมียมในดินได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียม และยังเป็นทางเลือกในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินทั่วไปได้ เนื่องจากมีธาตุแคลเซียมและกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) จากผลการวิจัย แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเป็นวัสดุปรับปรุงดินอีกชนิดที่เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับเกษตรกรสามารถนำไปใช้เพื่อลดความเป็นพิษของแคดเมียมในดินได้ โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน อีกทั้งยังเป็นแหล่งธาตุอาหารรองของพืชอีกด้วย

2) การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมและระยะเวลาที่จำกัด ในการวิจัยต่อไปควรทำการวิจัยในระยะเวลาที่มากขึ้นหรือทดลองในสภาพพื้นที่แปลงเพาะปลูกจริง เพื่อให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมภายใต้สิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ ระยะเวลาที่มากขึ้นและการดูดซับแคดเมียมของพืชในแปลงเพาะปลูก

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

กนกนพ กลิ่นลออ, โกติเย่ แลนรอด และ แสงดาว เขาแก้ว. (2556). การเพิ่มการละลายของแคดเมียมในดินนาปนเปื้อนแคดเมียม. ใน *รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51*: สาขาวิทยาศาสตร์, สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 210-218.

กรมควบคุมมลพิษ. (2541). *แคดเมียม (Cadmium).* (เอกสารวิชาการเฉพาะเรื่อง). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: อินทิเกรเต็ด โปรโมชัน เทคโนโลยี

กรมควบคุมมลพิษ. (2547). *รายงานผลการตรวจสอบและประเมินการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในบริเวณลุ่มน้ำห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก*. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). *แนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อนจากการประกอบการอุตสาหกรรม.* กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ, สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน.

กรมวิชาการเกษตร. (2558). *ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย*. ค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558, จาก http://www.agriqua.doae.go.th/organic/soil/soil1/soil1.html.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2547). *การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก* [เอกสาร]. กรุงเทพ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, สำนักบริหารและฟื้นฟู.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2541). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.* พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จันทร์เพ็ญ ชุมแสง. (2552). *ผลกระทบทางนิเวศวิทยาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินบางชนิดของไทยต่อสิ่งมีชีวิตในดิน.* วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

จันทร์เพ็ญ ชุมแสงและณิชารีย์ ใจคำวัง. (2558). สถานะธาตุอาหารและปริมาณแคดเมียมในไร่ยาสูบในระบบเคมี จังหวัดสุโขทัย. ใน *บทคัดย่อ การประชุมใหญ่โครงการส่งเสริมการวิจัยอุดมศึกษา ครั้งที่ 3*. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา.

จุฑาภรณ์ ผลิตัน. (2556). *การปรับปรุงเสถียรภาพดินจากการสลายตัวของหินดินดานโดยวิธีใช้ซีเมนต์ เถ้าลอย และกากเอฟจีดียิปซัมเป็นสารผสมเพิ่ม.* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์ (2525). *สารานุกรมธาตุ.* กรุงเทพฯ : อินเดียนสโตร์.

ชุลีมาศ บุญไทย อิวาย. (2548). *นิเวศวิทยาการประเมินความเสี่ยงและผลกระทบของมลพิษสิ่งแวดล้อมด้านระบบนิเวศ (Ecotoxicology and Ecological Rick Assessment).* ขอนแก่น : คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ทัศนางกูล ตุลยากรณ์. (2553). *การใช้ฟอสโฟยิปซัมดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ.* วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธเรศ ศรีสถิตย์. (ม.ป.ป.). *เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและตะกอนลำน้ำ.* [เอกสารวิชาการ]. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธวัชชัย ศุภดิษฐ์. (2546). *การจัดการอนามัยสิ่งแวดล้อม.* กรุงเทพฯ : หลักสูตรการจัดการสิ่งแวดล้อม. สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษา, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ธวัชชัย ศุภดิษฐ์. (2548). *สิ่งแวดล้อม นิเวศวิทยา และการจัดการ.* พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เพิ่มพูนการพิมพ์.

นุจรินทร์ ศิริวาลย์ (2554). การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ยิปซัมเพื่อความยังยืนทางการเกษตร. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 5*(1), 118-126.

ปภามญชุ์ ซีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และสิรินาฎ เลาหะโรจนพันธ์. (2555). *การดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดินนาข้าว.* ในรายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ครั้งที่ 12 . หน้า 285-291.

ปรีชา บุณจง, วิภาวี เสาหิน, ธีรวุฒ แลหะ, ปกาศิต การกระสัง และสุรินทร์ เยาว์ด้วง. (2550). การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในผลิตภัณฑ์ยาสูบ. *วารสารเภสัชศาสตร์อีสาน (IJPS), 3*(1), 36-42

ปิยะ ดวงพัตรา. (2553). *สารปรับปรุงดิน.* พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยะดา วชิระวงศกร, สิรินรัตน์ รอดขาว และ เจนจิรา ช่วยปุ่น. (2558). การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคผักประเภทใบที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วและแคดเมียม: กรณีศึกษาเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย. *Rajabhat J. Sci. Humenlt. Soc. Sci., 16*(2), 167-177.

พิดาลัด วงศ์พานิช. (2548). *การปนเปื้อนของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม: กรณีศึกษาลุ่มน้ำห้วยแม่ตาว ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.* สารนิพนธ์สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะพัฒนาสังคม, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ไพบูรย์ วิวัฒนาวงศ์วนา. (2546). *เคมีดิน.* เชียงใหม่: เชียงใหม่พิมพ์สวย.

ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี. (2555). *การปลดปล่อยโลหะหนักบางชนิดจากดินผสมเอฟจีดียิปซัมด้วยเทคนิคการชะแบบคอลัมน์.* วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รจนา ชุณหบัณฑิต, (ม.ป.ป). *แคดเมียม ปัญหาจากสิ่งแวดล้อมกับการเกิดมะเร็ง* [เอกสาร]. กรุงเทพฯ: โรงพยาบาลรามาธิบดี, สำนักงานวิจัย คณะแพทยศาสตร์.

ราชบัณฑิตยสถาน. (2556). *พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 7 รอบ 5 ธันวาคม 2554*. กรุงเทพฯ: ศิริวัฒนาอินเตอร์พริ้นท์

วราภร สิทธินาง. (255). *การเตรียมวัสดุดูดซับจากของผสมของเถ้าหนักกับเอฟจีดียิปซัมสำหรับการดูดซับสีย้อม*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิภาวรรณ กิติวัชระเจริญ. (ม.ป.ป.). *ยาสูบพืชเศรษฐกิจของไทย.* (เอกสารวิชาการ). กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยพืชไร่, กรมวิชาการเกษตร.

วิรานุช หลาง. (2551). จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 326 หน้า.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2540). *มลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.* พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเกษตรจังหวัดสุโขทัย (2558). *สถานการณ์ผลิตพืชเศรษฐกิจสำคัญของจังหวัดสุโขทัย.* [เอกสาร] ข้อมูล ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2558, สุโขทัย: สำนักงานฯ.

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2532). *เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการเรื่อง แคดเมียม.* กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม.

สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์. (2550). *หลักการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน.* พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.

อภิญญา พิมพ์ทอง (2556). *การใช้ใบโอชาร์และจุลินทรีย์ในการลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม.* วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อุทิศ เกตุทัต. (2535). ยาสูบ. ใน *สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน* (เล่มที่15, น.59-81). กรุงเทพฯ: เครือข่ายกาญจนาภิเษก

Agassi, M., I, Shainberg, and J. Morin. (1990). Slop, aspect and phosphogypsum effects on runoff and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, *54*, 162-165

BEL. (2002). Draft rick assessment report-cadmium metal and cadmium oxide. Ministry of Social Affair, *Public Health and the Environment. Belgian Federal Department of the Environment Quality, 34*, 49-63.

David, B., Kim, D. and Peter, V. (2008). Assessment of cadmium distribution in some Australian Krasnozoms by sequential extraction. *Water Air Soil Pollution. 190*, 157-169

Dunnick, J.K. and Fowler, B.A. (1998). *Cadmium in Handbook on toxicity of inorganic compound*. (edited by Hans G. Seiler and Helmut Sigel), Marcel Dekker, INC, New York and Basel. 254 p.

E. Alvarez-Ayuso, X. Querol and A. Tomas (2008). Implications of moisture content determination in the environmental characterisation of FGD gypsum for its disposal in landfills. *J. Hazardous Materials. 153*(2008), 544-550.

Hickey, M.G. and J.A. Kittrick. (1984). Chemical partitioning of Cd, Cu, Ni and Zn in solution sediments containing high levels of heavy mental. *Journal of Environmental Quality, 13*, 372-376.

Krishan Murti, C.R. (1987). "Grop report: cadmium" in *T.C. Hutchinson and K.M. Meema, eds.,lead, mercury, cadmium, and asenic in the environment.* Scienific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) 31. John Wiley and sons, New York. 273 p.

Liao, H.C. and Jiang, S.J. (1999). Determination of cadmium, mercury and lead in coal fly ash by slurry sampling electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochemica Acta Part B, 54*, 1233-1242

Lugon-Moulin, Zhang,N. Gadain, M., Rossi, F., Krauss, D. and Wangner, G.J.M. (2004). Critical revive of the science and option for reducing cadmium in tobacco (Nicotinna tabacum L.) and other plant. *Advances in Agronomy, 83*, 111-180

McLaren, R.G. Backer, C.A., Rate, A.W. and Switt, R.S. (1998). Cadmium and cobalt desorption kinetics from soil clay, Effect of sorption period. *Soil Science Society of America Journal, 62*, 332-337.

Ping Yang, Xian Li, Ze-Jun Tong, Qu-Sheng Li, Bao-Yan He, Li-Li Wang, Shi-Hong Guo and Zhi-Min Xu. (2015). Use of flue gas desulfurization gypsum for leaching

Cd and Pb in reclaimed tidal flat soil. (research article). *Environ Sci Pollut Res.*

Purves, D. (1977). Trace element contamination of the environment. Fundamental aspects of forest soil. *Environmental Science and Technology, 138*, 29-50

Rana, S.V.S. (2006). *Environmental Pollution: Health and Toxicology*. Alpha Science international Lid. Oxford, UK.

Stanley. D. (1992). What a waste-phosphogypsum enriches the Soil. *Agric. Res.J.*, *ARS, USDA*, 12-13.

Tessier, A., Campbell,P.G.C. and Bisso, M. (1979) Sequnetial extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, *51*, 844-851

United States Environmental Protection Agency (US.EPA.). (1993). *"Clean Water Act"*, sec. 5039. 58 (32). Washington, D.C.: US. EPA.

Yubo Yan Xiaoli Dong, Xiaolei Sun, Xiuyun Sun, Jiansheng Li, Jinyou Shen, Weiqing Han, Xiaodong Liu and Lianjun Wang (2014). Conversion of waste FGD gypsum into hydroxyapatite for removal of Pb^{2+} and Cd^{2+} from wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science*, *429* (2014), 68–76