

# การประยุกต์ใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาบำบัดดินทางชีวภาพ

## Application of Compost Produced from the Wastewater of Mulberry Pulp and Paper Handicrafts on Soil Bioremediation

บุญจรัตน์ โจนันท์<sup>1</sup> ฐิรญาดา นันตะเต<sup>1</sup> สุรศักดิ์ ทวีพัฒน์<sup>1</sup> ธิดารัตน์ ชันจันทรแสง<sup>1</sup>  
 อรทัย แซ่โล<sup>1</sup> และ เกศสุดา สิทธิสันติกุล<sup>2</sup>

Banjarata Jolanun<sup>1</sup>, Thirayada Nantatae<sup>1</sup>, Surasak Thawiphat<sup>1</sup>,  
 Thidarat Khanjansang<sup>1</sup>, Orathai Saelo<sup>1</sup> and Katesuda Sitthisuntikul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่

<sup>2</sup>สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์เกษตร ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University  
 of Technology Lanna, Chiangmai

<sup>2</sup>Department of Agricultural, Resource and Environmental Economics, Faculty of Economics,  
 Maejo University, Chiangmai

\*E-mail: [bjolanun@gmail.com](mailto:bjolanun@gmail.com) โทร. 089-6337761

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปุ๋ยหมักน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาบำบัดดินที่ปนเปื้อนทางชีวภาพ โดยแปรผันอัตราส่วนผสม (โดยมวล) ระหว่าง ดิน:น้ำต้มเยื่อ:ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ จำนวน 5 เปรียบ คือ 100:10:0, 100:10:15, 100:10:30, 100:10:45 และ 100:10:60 และทำการบ่มดินในห้องปฏิบัติการ (ความชื้น  $20 \pm 5\%$  และ อุณหภูมิ  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) ตลอดระยะเวลาทดสอบได้ประเมินการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน (12 สัปดาห์) การทดสอบ ดัชนีการงอกของเมล็ด (4 สัปดาห์) และการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (216 ชั่วโมง) ผลการศึกษาพบว่าทุกชุด การทดลองมีค่าความหนาแน่น (แห้ง) ของดินเฉลี่ย  $0.072\text{--}1.274\text{ g/cm}^3$  ค่าพี pH เฉลี่ยมีค่า  $5.39\text{--}6.80$  ค่าการนำไฟฟ้า เฉลี่ยมีค่า  $6.64\text{--}109.20\text{ }\mu\text{S/cm}$  ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุเฉลี่ยมีค่า  $4.73\text{--}15.77\text{ meq/100g}$  ค่าอินทรีย์วัตถุ เฉลี่ยมีค่า  $0.48\%\text{--}12.42\%$  ค่าไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยมีค่า  $0.02\text{--}0.62\%$  ค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยมีค่า  $168.18\text{--}834.35\text{ mg/kg}$  ค่าโพแทสเซียมเฉลี่ยมีค่า  $134.50\text{--}1,660.00\text{ mg/kg}$  ตามลำดับ ค่าดัชนีการงอก (สัปดาห์ที่ 4) ของเมล็ดผักกาดมีค่าเฉลี่ย  $83.96\%\text{--}118.85\%$  และค่าดัชนีการงอกของเมล็ดผักโขมมีค่าเฉลี่ย  $82.11\%\text{--}114.55\%$  ตามลำดับ การเกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมของทุกชุดการทดลอง พบว่าอยู่ในช่วง  $0\%\text{--}0.76\%$  และ  $6.34\%\text{--}11.70\%$  จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่าอัตราส่วนผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อค่าสภาพ การนำไฟฟ้า ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค่าฟอสฟอรัส ค่า โพแทสเซียม และค่าดัชนีการงอก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P\text{-value} < 0.05$ )

คำสำคัญ : ปุ๋ยหมัก น้ำทิ้ง ดิน บำบัดทางชีวภาพ หัตถกรรมกระดาษสา

### Abstract

This study is aimed to investigate the effects of compost produced from the wastewater of mulberry pulp and paper handicrafts on the remediation of contaminated soil by varying the 5 ratios (by mass) of soil: black liquor: compost as 100:10:0, 100:10:15, 100:10:30, 100:10:45 and 100:10:60. All experiments were carried out in the laboratory and incubated under the moisture and temperature condition of  $20 \pm 5\%$  and  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Changes in the physical and chemical properties (12 weeks), the

phytotoxicity analysis (4 weeks), and the  $\text{CO}_2$  evolution (216 hrs) were examined. The results revealed that soil density (dry basis), pH, OM, EC, CEC, TN, P, and K of all experiments were 0.072-1.274 g/cm<sup>3</sup>, 5.39-6.80, 6.64-109.20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 4.73-15.77 meq/100g, 0.48%-12.42%, 0.02%-0.62 %, 168.18-834.35 mg/kg, 134.50-1,660.00 mg/kg, respectively. The germination index (GI, week 4) of Canton lettuce and Chinese spinach seeds were 83.96%-118.85% and 82.11%-114.55%, respectively. The  $\text{CO}_2$  evolution and accumulation of all experiments were 0%-0.76% and 6.34%-11.70%, respectively. It was found that the differences ( $P>0.05$ ) for the EC, CEC, OM, TN, P, K, and GI among treatments were also pronounced statistically.

**Keywords :** compost, wastewater, soil, bioremediation, mulberry paper handicraft

## 1. บทนำ

หัตถกรรมกระดาษสา ถือเป็นวิสาหกิจที่มีความสำคัญทั้งทางด้านภูมิปัญญา ตลอดจนการสร้างงาน อาชีพและรายได้ให้แก่ประชาชนในเขตภาคเหนือตอนบนของประเทศ (เชียงใหม่ แพร่ น่าน) อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะหมู่บ้านหัตถกรรมกระดาษสา เทศบาลตำบลต้นเปา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ จัดเป็นหนึ่งในเครือข่าย (Cluster) ที่ได้รับการคัดเลือกให้เป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการพัฒนาระดับจังหวัด (Office of the National Economic and Social Development Council, 2014) อย่างไรก็ตาม หัตถกรรมกระดาษสาในระดับท้องถิ่น จัดเป็นวิสาหกิจที่ปล่อยของเสียเข้าสู่สิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ อากาศ) และส่งผลกระทบต่อทรัพยากรและคุณภาพชีวิตของคนในชุมชนโดยรอบอย่างสำคัญประเภทหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาน้ำเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษสู่สิ่งแวดล้อม โดยส่วนใหญ่มักปนเปื้อนด้วยสารเคมีที่เป็นพิษในปริมาณสูง เช่น โซดาไฟ (NaOH) จากกระบวนการเตรียมและต้มเยื่อ (Pulp cooking) สารฟอกขาว เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และโซเดียมเปอร์ออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) และสารเติมแต่งอื่น ๆ จากกระบวนการฟอกเยื่อ (Pulp bleaching) และการปรับปรุงเยื่อ (Pulp modifying) เป็นต้น (Papong, 2001; Ren, 1998) ดังนั้น การส่งเสริมหัตถกรรมกระดาษสาในระดับท้องถิ่น จำเป็นต้องตระหนักและหาแนวทางการแก้ไขปัญหาน้ำเสียที่เกิดขึ้นอย่างเร่งด่วนควบคู่กัน

แม้ว่า ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถบำบัดน้ำทิ้งจากหัตถกรรมกระดาษสาให้ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานน้ำทิ้งได้ อย่างไรก็ตาม จากการลงสำรวจและข้อมูลเชิงประจักษ์ในพื้นที่เทศบาลตำบลต้นเปา พบว่าทางผู้ประกอบการหัตถกรรมกระดาษสาในระดับท้องถิ่น ยังคงประสบปัญหาค่าใช้จ่ายทั้งในส่วนของการลงทุนและการดำเนินการเกี่ยวกับการจัดสร้างเทคโนโลยีการบำบัดเสีย รวมถึงปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ในการก่อสร้างระบบบำบัดฯ เป็นต้น จึงไม่คุ้มค่าต่อการดำเนินการ ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว จึงทำให้ผู้ประกอบการหัตถกรรมกระดาษสาในระดับท้องถิ่นขาดมาตรการในการจัดการน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เป็นแหล่งรับของเสียค่อนข้างรุนแรงโดยตรง

เมื่อเร็วนี้ Jolanun *et al.* (2014) และ Jolanun *et al.* (2016) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาทางชีวภาพโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการหมักปุ๋ยทั้งแบบพลิกกลับกองและแบบเติมอากาศ (Turned windrow and forced aeration composting) ภายใต้แนวคิดการบำบัดของเสียให้เหมาะสมตามระดับความพิษหรือความสกปรกตามหลักการเทคโนโลยีสะอาดและมาตรการหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ น้ำทิ้งรวม (ยกเว้นน้ำเสียจากกระบวนการต้มเยื่อ) จากหัตถกรรมกระดาษสาจะถูกบำบัดและนำกลับมาใช้ประโยชน์โดยการแปรรูปเป็นปุ๋ยหมัก ซึ่งถือเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียอีกแนวทางหนึ่ง การศึกษาพบว่าระบบการหมักให้ประสิทธิภาพที่ดีสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์และบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ (Bioremediation) โดยการแปรรูปน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาเป็นปุ๋ยหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาต่อยอดถึงประโยชน์ของปุ๋ยหมักน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาที่ผลิตขึ้นในการบำบัดหรือฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนทางชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ ผลลัพธ์ของการวิจัยนอกจากได้ทางเลือก



หรือแนวทางการใช้ประโยชน์จากปุ๋ยหมักน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาด้านการอนุรักษ์ดิน ยังถือเป็นการขยายผลเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ในการจัดการหรือบำบัดน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาให้แก่ท้องถิ่นสืบไป

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### วัสดุทดลอง

ดินที่ใช้ในการศึกษาได้จากการเก็บตัวอย่างดิน ณ สถานประกอบการฟาร์มกระดาษสา เทศบาลเมืองต้นเปา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ (กลุ่มชุดดินที่ 5; กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) ที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร ดินที่ถูกเก็บจะนำมาทุบพอให้เนื้อดินที่เกาะกันแยกออกจากกันและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินก่อนนำไปทดลอง (ตารางที่ 1)

น้ำต้มเยื่อ (Black liquor) ที่ใช้ในการทดลองได้จากกระบวนการต้มเยื่อ (Cooking process) ของสถานประกอบการฟาร์มกระดาษสา ซึ่งใช้โซดาไฟในกระบวนการต้มปอสา (NaOH process) ส่วนปุ๋ยหมักน้ำทิ้งหัตถกรรมกระดาษสาที่ผลิตขึ้น (Jolanun *et al.*, 2016) จะถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง (ตารางที่ 1) สำหรับการทดสอบความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity test) การศึกษานี้ใช้เมล็ดผักกาด (Canton lettuce) และเมล็ดผักโขมจีน (Chinese spinach) ทดสอบภายใต้เงื่อนไขการศึกษาที่เสนอโดย Tam and Tiquia (1994)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุทดลอง

พารามิเตอร์ (Parameters)	ดิน (Soil)	น้ำต้มเยื่อ (Black liquor)	ปุ๋ยหมัก (Compost)
pH	6.95	12.46	6.48
Conductivity (EC, ds/m)	0.020	0.004	0.27
Moisture content (%)	2.40	-	32.60
Cation Exchange Capacity (CEC, meq/100g)	4.62	-	34.30
Organic Matter (OM, %)	0.50	-	22.46
Total Nitrogen (N, %)	0.02	-	1.12
Extractable Phosphorus (P, %)	0.0002	-	0.9300
Exchangeable Potassium (K, %)	0.0227	-	0.7700
Exchangeable Sodium (NaCl, %)	0.0192	-	0.7900
Carbon to Nitrogen ratio (C/N)	-	-	12
Dry density (kg/m <sup>3</sup> )	1,273.52	-	-
Wet density (kg/m <sup>3</sup> )	1,404.94	-	-
Suspended solid (SS, mg/l)	-	66.67	-
Chemical Oxygen Demand (COD, mg/l)	-	19,493	-

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์สองซ้ำ (Two replicates)

### แผนการทดลองและการวิเคราะห์

การศึกษานี้ได้แบ่งแผนการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาทดลองบ่มดินในระดับห้องปฏิบัติการ (ตารางที่ 2) วัสดุทดลองจะถูกผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันและบรรจุในถุง polyethylene ขนาด 7×11 นิ้ว แล้วจึงนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (20±1°C) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ตลอดช่วงการศึกษาคือทำการควบคุมความชื้นอยู่ในช่วงประมาณ 20±5% โดยการตรวจสอบน้ำหนักตัวอย่างทุก 7 วัน

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมี จะทำการเก็บตัวอย่างของทุกชุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 0, 6, และ 12 (45 ตัวอย่าง) ส่วนการวิเคราะห์การงอกของเมล็ด (Tam and Tiquia, 1994) จะเก็บตัวอย่าง

ของทุกชุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 0, 1, 2, 3 และ 4 (75 ตัวอย่าง) ตามที่กำหนดไว้ รวมจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 120 ตัวอย่าง

## ตารางที่ 2 แผนการทดลองบ่มดินในห้องปฏิบัติการ

Experiment	S:BW:C (w/w)	Control conditions
Exp.1	100 : 10: 0 g	Aerobic incubation
Exp.2	100 : 10: 15 g	Moisture content 20±5%
Exp.3	100 : 10: 30 g	Temperature 20±1°C
Exp.4	100 : 10: 45 g	Incubation 12 weeks
Exp.5	100 : 10: 60 g	

หมายเหตุ: ทำการทดลองสามซ้ำ (Three replicates)

S:BW:C = ดิน:น้ำต้มเหื่อ:ปุ๋ยหมัก/ Soil : Black liquor Wastewater : Compost

ส่วนที่ 2 เป็นการประเมินทางชีวเคมีโดยการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ( $\text{CO}_2$  evolution) ในระดับห้องปฏิบัติการ วัสดุผสม (ตารางที่ 2) ของทุกชุดการทดลองถูกนำมาปรับขยายมวลเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 ทำการผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันและบรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร (ประยุกต์ใช้กระดาดฟอยด์ปิดฝาขวดรูปชมพู่) และทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องมือวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (GM70 Vaisala Oyj, Finland) เก็บข้อมูลในช่วงความถี่ทุก 30 นาที ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิห้องและการควบคุมความชื้นประมาณ 20±5% ตลอดระยะเวลาสังเกตการณ์ 216 ชั่วโมง

สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางด้านกายภาพและเคมีในห้องปฏิบัติการ อ้างอิง Handbook of Reference Methods for Soil Analysis (Rev. Ed 2000) การวิเคราะห์ข้อมูลและการทดสอบสมมติฐานปัจจัยทางสถิติ ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการวิเคราะห์ One-way ANOVA ที่นัยสำคัญทางสถิติ 0.05

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ผลการศึกษาการบ่มดินในห้องปฏิบัติการตลอด 12 สัปดาห์ โดยแปรผันอัตราส่วนผสม ดิน : น้ำต้มเหื่อสา : ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ จำนวน 5 ชุดการทดลอง คือ 100 : 10 : 0 (Exp.1), 100 : 10 : 15 (Exp.2), 100 : 10 : 30 (Exp.3), 100 : 10 : 45 (Exp.4) และ 100 : 10 : 60 (Exp.5) พบว่า การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมี มีดังนี้

#### ความหนาแน่นของดิน

จากการทดลองบ่มดินในห้องปฏิบัติการ พบว่าการใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ที่ลดกรรมกระดาดสาฟืนฟูดินที่ปนเปื้อน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของดิน โดยสิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 12) ค่าความหนาแน่นแบบแห้งและแบบเปียกของดินในทุกชุดการทดลอง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.280 \pm 0.79$  และ  $1.414 \pm 3.47 \text{ g/cm}^3$  (Exp.1),  $0.080 \pm 0.75$  และ  $0.072 \pm 0.95 \text{ g/cm}^3$  (Exp.2),  $0.073 \pm 0.31$  และ  $0.063 \pm 0.15 \text{ g/cm}^3$  (Exp.3),  $0.074 \pm 0.27$  และ  $0.061 \pm 0.48 \text{ g/cm}^3$  (Exp.4),  $0.072 \pm 0.12$  และ  $0.061 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$  (Exp.5) ตามลำดับ ในตารางที่ 3

ผลการศึกษาพบว่า ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ สามารถประยุกต์ใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินได้เป็นอย่างดี การใส่ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ทำให้ลักษณะเนื้อดินเดิมที่เป็นฝุ่นผงมีสภาพร่วนซุยมากขึ้น ไม่อัดตัวกันแน่นทึบ ดังนั้น ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ที่ลดกรรมกระดาดสาจึงมีส่วนช่วยเพิ่มความพรุนของดิน ดังค่าความหนาแน่นของดินแบบแห้งและแบบเปียก ในชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ (Exp.2-Exp.5) มีค่าลดลงจากชุดการทดลองเดิมกรณีที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ (Exp.1) โดยเฉลี่ย 17 และ 22 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากปุ๋ยหมักเป็นวัสดุที่มีสมบัติในการปรับปรุงสภาพหรือลักษณะของดิน (Soil conditioner) ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ถ้าดินนั้นเป็นดินเนื้อละเอียดอัดตัวกันแน่นปุ๋ยหมักจะช่วยให้นดินนั้นมีสภาพร่วนซุยมากขึ้น ไม่อัดตัวกันแน่นทึบ ทำให้ดินมีสภาพการระบายน้ำ ระบายอากาศดีขึ้น ทั้งยังช่วยให้ดิน



มีความสามารถในการอุ้มน้ำหรือดูดซับน้ำที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้น (Harpstead *et al.*, 2001) เมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งๆ ในอัตราส่วนที่ต่างกัน (15%-60%) เห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่ 3, 4 และ 5 มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของดินใกล้เคียงกันโดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยแบบแห้ง เท่ากับ 0.073, 0.074 และ 0.072 g/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ และแบบเปียกเฉลี่ย เท่ากับ 0.063, 0.061 และ 0.061 g/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังนั้น การศึกษานี้ แนะนำว่าเงื่อนไขปริมาณปุ๋ยหมักน้ำทิ้งๆ ที่อัตราส่วนผสม 30% (Exp.3) เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่ใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งๆ ผสมดินในปริมาณที่น้อยกว่าแต่ให้ค่าความหนาแน่นของดินใกล้เคียงกับเงื่อนไขอัตราส่วนผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งๆ 45%-60%

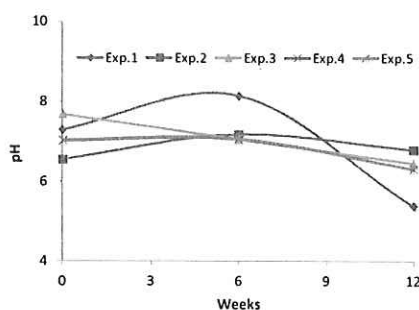
### ตารางที่ 3 ค่าความหนาแน่นของดินที่ทดลอง

ชุดการทดลอง	ดิน:น้ำตมเยื่อ:ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งๆ (มวลแห้ง)	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> ) สัปดาห์ที่ 12	
		แบบแห้ง	แบบเปียก
Exp.1	100 : 10 : 0	1.280±0.79	1.414±3.47
Exp.2	100 : 10 : 15	0.080±0.75	0.072±0.95
Exp.3	100 : 10 : 30	0.073±0.31	0.063±0.15
Exp.4	100 : 10 : 45	0.074±0.27	0.061±0.48
Exp.5	100 : 10 : 60	0.072±0.12	0.061±0.10

หมายเหตุ: ค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของดินเดิม เท่ากับ 1.274 g/cm<sup>3</sup> (แห้ง) และ 1.405 g/cm<sup>3</sup> (เปียก)

#### ปฏิกิริยาดิน

ผลการวิเคราะห์ปฏิกิริยาดิน หรือ ค่าพีเอช (pH) ของทุกชุดการทดลอง โดยวิเคราะห์ค่า pH ในสัปดาห์ที่ 0, 6 และ 12 พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 มีค่า pH เฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.39-8.15 ชุดการทดลองที่ 2 มีค่า pH เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.56-7.18 ชุดการทดลองที่ 3 มีค่า pH เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.45-7.10 ชุดการทดลองที่ 4 มีค่า pH เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.32-7.05 และชุดการทดลองที่ 5 มีค่า pH เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.32-7.08 ตามลำดับ (ภาพที่ 1)



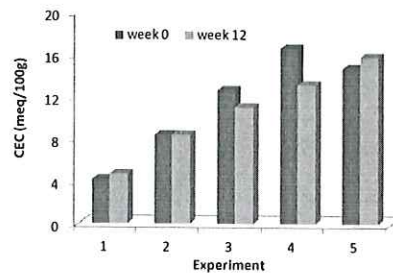
ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของชุดการทดลอง

ค่า pH ของดินส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอย่างมาก เนื่องจากสภาพละลายได้ของธาตุอาหารและกิจกรรมของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับค่า pH ของดิน การเจริญเติบโตของพืชและกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน โดยส่วนมากเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีระดับค่า pH ค่อนข้างเป็นกลางประมาณ 6.0-7.0 นอกจากนี้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินจะควบคุมระดับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ที่พืชใช้เป็นประโยชน์ได้อย่างมาก เมื่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดำเนินไปได้ดีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชก็สูงตามไปด้วย (Polprasert, 1996; Harpstead *et al.*, 2001) ค่า pH ของดินในชุดการทดลองที่ 1 มีการเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 6 (pH 8.15) และลดลงอย่างรวดเร็วในสัปดาห์ที่ 12 (pH 5.39) ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 3, 4 และ 5 ค่า pH ของดินมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยอยู่ในช่วงระหว่าง 6.32-7.10 คือ มีค่า pH ค่อนข้างเป็นกลาง ดังนั้น ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ยหมัก

น้ำทิ้งฯ ผสมในดินที่ปนเปื้อนส่งผลต่อค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ในทางบวกและช่วยปรับปรุงให้สภาพดินเป็นกลาง สำหรับ การศึกษานี้ เจือปนปริมาณปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ คือ อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 (Exp.3) เนื่องจาก เป็นเงื่อนไขที่ใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ผสมดินในปริมาณที่น้อยกว่าแต่สามารถปรับสภาพปฏิกิริยาดินให้ค่า pH ของดินค่อนข้าง เป็นกลาง

#### ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและสภาพการนำไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ซึ่งทำการทดลองหาค่า CEC ในสัปดาห์ที่ 0 (เริ่มต้นการบ่มดิน) และสัปดาห์ที่ 12 (สิ้นสุดการบ่มดิน) พบว่าชุดการทดลองที่ 1 มีค่า CEC เฉลี่ยเท่ากับ 4.20 และ 4.73 meq/100g ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่า CEC เฉลี่ยเท่ากับ 8.41 และ 8.41 meq/100g ตามลำดับ ชุดการทดลอง ที่ 3 มีค่า CEC เฉลี่ยเท่ากับ 12.61 และ 11.04 meq/100g ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 4 มีค่า CEC เฉลี่ยเท่ากับ 16.61 และ 13.14 meq/100g ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ 5 มีค่า CEC เฉลี่ยเท่ากับ 14.71 และ 15.77 meq/100g ตามลำดับ (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่า CEC ของชุดการทดลอง

สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (EC) ของดินในทุกชุดการทดลอง ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าสภาพ การนำไฟฟ้าในสัปดาห์ที่ 0, 6 และ 12 พบว่าชุดการทดลองที่ 1 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 15.84, 9.23 และ 6.64  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 41.60, 39.00 และ 32.30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 77.70, 80.10 และ 63.60  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 4 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 102.60, 100.10 และ 84.40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ และชุด การทดลองที่ 5 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 125.00, 120.10 และ 109.20  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ

ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินเป็นค่าที่ใช้ประเมินเกลือที่ละลายได้ในดิน ผลการวิเคราะห์พบว่าทุกชุดการทดลอง สภาพการนำไฟฟ้าของดินในสัปดาห์ที่ 12 (สิ้นสุดการทดลอง) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.64-125.00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  หรือ 0.01-0.13 dS/cm ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 dS/cm อยู่ในระดับที่ไม่มีความเค็ม บ่งชี้ว่าดินกรณีที่มีผสมปุ๋ยและไม่ผสมปุ๋ยหมักในการปรับปรุงดิน ไม่มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช สำหรับค่า CEC หรือความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน หมายถึง ปริมาณประจุบวกแลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ หากระดับ CEC ของดินต่ำย่อมหมายความว่าดิน ชนิดนั้นมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวหรืออินทรีย์วัตถุอยู่น้อย จากผลการทดลองในสัปดาห์ที่ 12 (สิ้นสุดการทดลอง) บ่งชี้ ว่าชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่า CEC ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 3-10 meq/100g ขณะที่การผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในดินที่ ปนเปื้อนอัตราส่วนผสมประมาณ 30-60% ส่งผลให้ค่า CEC ของดินเพิ่มสูงขึ้น โดยชุดการทดลองที่ 3 และ 4 มีค่า CEC อยู่ในช่วงปานกลาง (10-15 meq/100g) และชุดการทดลองที่ 5 มีค่า CEC อยู่ในช่วงค่อนข้างสูง (15-20 meq/100g) ดังนั้นการประยุกต์ใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน นอกจากไม่ส่งผลต่อค่าความเค็มของดินแล้วยังช่วยเพิ่ม ความจุในการดูดซับธาตุอาหารให้คงไว้ในดิน (Sanguansupayakorn, 2016; Raton, 2000; Harpstead *et al.*, 2001)

#### ปริมาณอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหาร

จากการวิเคราะห์ค่าอินทรีย์วัตถุ (OM) ในสัปดาห์ที่ 0 (เริ่มต้นการบ่มดิน) และสัปดาห์ที่ 12 (สิ้นสุดการบ่มดิน) พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 มีค่าอินทรีย์วัตถุเฉลี่ยเท่ากับ 0.75% และ 0.48% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าอินทรีย์



วัตถุเฉลี่ยเท่ากับ 4.04% และ 4.17% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3 มีค่าอินทรีย์วัตถุเฉลี่ยเท่ากับ 6.22% และ 6.22% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 4 มีค่าอินทรีย์วัตถุเฉลี่ยเท่ากับ 6.14% และ 5.33% ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ 5 มีค่าอินทรีย์วัตถุเฉลี่ยเท่ากับ 6.08% และ 12.42% ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

ผลการวิเคราะห์ค่าไนโตรเจนทั้งหมดในสัปดาห์ที่ 0 (เริ่มต้นการบ่มดิน) และสัปดาห์ที่ 12 (สิ้นสุดการบ่มดิน) พบว่าชุดการทดลองที่ 1 มีค่าไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.04 และ 0.02% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.20 และ 0.21% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3 มีค่าไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.31 และ 0.21% ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 4 มีค่าไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.31 และ 0.27% ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ 5 มีค่าไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.30 และ 0.53% ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในสัปดาห์ที่ 0 (เริ่มต้นการบ่มดิน) และสัปดาห์ที่ 12 (สิ้นสุดการบ่มดิน) พบว่าชุดการทดลองที่ 1 มีค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยเท่ากับ 168.88 และ 168.18 mg/kg ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยเท่ากับ 291.17 และ 291.13 mg/kg ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3 มีค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยเท่ากับ 562.01 และ 565.35 mg/kg ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 4 มีค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยเท่ากับ 554.97 และ 662.22 mg/kg ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ 5 มีค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยเท่ากับ 709.81 และ 834.35 mg/kg ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

ผลการวิเคราะห์ค่าโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในสัปดาห์ที่ 0 (เริ่มต้นการบ่มดิน) และสัปดาห์ที่ 12 (สิ้นสุดการบ่มดิน) พบว่าชุดการทดลองที่ 1 มีค่าโพแทสเซียมเฉลี่ยเท่ากับ 127.40 และ 134.50 mg/kg ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าโพแทสเซียมเฉลี่ยเท่ากับ 597.65 และ 645.38 mg/kg ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3 มีค่าโพแทสเซียมเฉลี่ยเท่ากับ 1,031.25 และ 1,129.25 mg/kg ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 4 มีค่าโพแทสเซียมเฉลี่ยเท่ากับ 1,617.50 และ 1,362.50 mg/kg ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ 5 มีค่าโพแทสเซียมเฉลี่ยเท่ากับ 1,622.50 และ 1,660.00 mg/kg ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารของชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ดิน:น้ำทิ้ง:ปุ๋ยหมัก (โดยมวล)	สัปดาห์ที่ 0				สัปดาห์ที่ 12			
		OM <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	P <sup>2</sup>	K <sup>2</sup>	OM <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	P <sup>2</sup>	K <sup>2</sup>
Exp.1	100 : 10 : 0	0.75	0.04	168.88	127.40	0.48	0.02	168.18	134.50
Exp.2	100 : 10 : 15	4.04	0.20	291.17	597.65	4.17	0.21	291.13	645.38
Exp.3	100 : 10 : 30	6.22	0.31	562.01	1031.25	6.22	0.21	563.35	1129.25
Exp.4	100 : 10 : 45	6.14	0.31	554.97	1617.50	5.33	0.27	662.22	1362.50
Exp.5	100 : 10 : 60	6.08	0.30	709.81	1622.50	12.42	0.53	834.35	1660.00

หมายเหตุ: <sup>1</sup> หน่วย (%) <sup>2</sup> หน่วย (mg/kg)

จากการทดสอบปัจจัยอัตราส่วนผสมการใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งที่ลดกรรมกระดาษสาที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่บ่มในห้องปฏิบัติการทางสถิติ พบว่าอัตราส่วนผสมการใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยสภาพการนำไฟฟ้า (EC) ค่าความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ค่าอินทรีย์วัตถุ (OM) ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (N) ค่าฟอสฟอรัส (P) และค่าโพแทสเซียม (K) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} < 0.05$ ) ขณะที่กลับไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นและค่าพีเอช (pH) เฉลี่ยของดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} > 0.05$ )

จากผลการทดลองบ่งชี้ว่า การใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ผสมหรือปรับปรุงดินที่ปนเปื้อน ส่งผลให้ค่าอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้น โดยการผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในดินที่อัตราส่วนผสมช่วง 15%-60% (Exp.2-Exp.5) ช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงสูง-สูงมาก (3.5%-> 4.5%) ขณะที่ชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งไม่มีการผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-1.0% เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดินมีอิทธิพลต่อสมบัติหรือกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในดิน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเหล่านี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืชทั้งทางตรงทางอ้อม (Polprasert, 1996; Raton, 2000; Harpstead *et al.*, 2001; Jolanun *et al.*, 2014; Jolanun *et al.*,

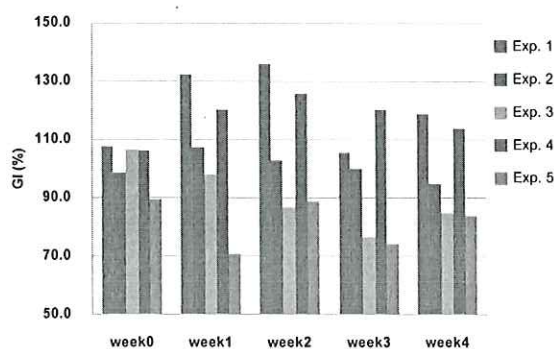
2016) ดังนั้น การศึกษานี้แนะนำว่าการผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งที่ลดผลกระทบกระดาสาในดิน (บ้านต้นเปา) ที่ร้อยละ 15 ขึ้นไป ก็เพียงพอต่อการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารสำคัญของพืช ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าการผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งในดินที่อัตราส่วนผสม 30%-60 % (Exp.3-Exp.5) ส่งผลให้ไนโตรเจนทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 5-8 เท่า อยู่ในช่วงระดับปานกลาง (0.30%-0.60%) ขณะที่เงื่อนไขการผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งที่อัตราส่วนผสม 0%-15% (Exp.1 และ Exp.2) มีค่าไนโตรเจนในดินอยู่ในระดับต่ำมาก-ต่ำ (<0.10-0.21%) เนื่องจากการไม่มีการผสมปุ๋ยหมักซึ่งเป็นแหล่งธาตุอาหารให้แก่ดิน สำหรับการลดลงของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน อาจเป็นผลเนื่องจากการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน (N-Mineralization) และการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียที่ระเหย ( $\text{NH}_3^+$ -Volatilization) ระหว่างการบ่มดินภายใต้กิจกรรมย่อยสลายทางชีววิทยาที่เร่งขึ้น (20±5%) ก่อนข้างต่ำ (Polprasert, 1996; Epstein, 1997; Jolanun *et al.*, 2014) นอกจากนี้ ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งในดิน ได้ส่งผลให้ค่าฟอสฟอรัส (>50 mg/kg) และโพแทสเซียม (>120 mg/kg) ที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของพืชและเหลือใช้สำรองไว้ในดินต่อไปได้อีก (Land Development Department, 2017)

### การประเมินความเป็นพิษต่อพืช

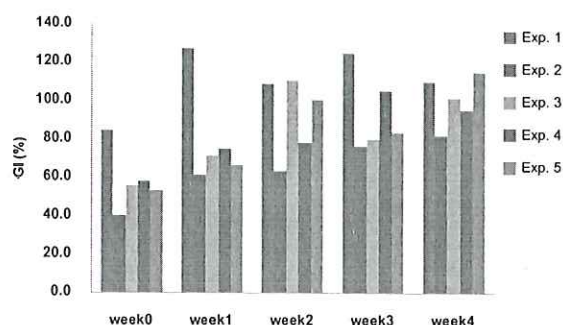
ผลการทดสอบดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination index) โดยทดสอบกับพืช 2 ชนิด (เมล็ดผักกาดและเมล็ดผักโขมจีน) พบว่าค่าดัชนีการงอกของเมล็ดผักกาดทุกชุดการทดลองที่เริ่มต้นการทดสอบ (สัปดาห์ที่ 0) มีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ยประมาณ 89.52%-107.69% หลังจากนั้น พบว่าค่าดัชนีการงอกมีความแปรปรวนอยู่ในช่วงเฉลี่ยประมาณ 105.49%-136.14% (Exp.1), 95.00%-107.58% (Exp.2), 76.53%-106.61% (Exp.3), 106.40%-125.71% (Exp.4) และ 70.89%-89.52% (Exp.5) จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ (4 สัปดาห์) ตามลำดับ ส่วนการทดสอบการงอกของเมล็ดผักโขมจีน พบว่าค่าดัชนีการงอกในทุกชุดการทดลองตลอดระยะ 4 สัปดาห์ มีความแปรปรวนค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงเฉลี่ยประมาณ 84.31%-127.16% (Exp.1), 40.34%-82.11% (Exp.2), 55.60%-110.47% (Exp.3), 58.10%-105.30% (Exp.4), และ 53.03%-114.80% (Exp.5) ตามลำดับ (ภาพที่ 3-4)

แม้ว่าค่าเฉลี่ยดัชนีการงอก (เมล็ดผักกาดและเมล็ดผักโขม) ในทุกชุดการทดลองตลอดช่วง 4 สัปดาห์ ของการทดสอบความเป็นพิษต่อพืชจะแปรปรวนอยู่ในช่วง 40.34%-136.14% อย่างไรก็ตาม เมื่อสิ้นสุดการสังเกตการณ์ (สัปดาห์ที่ 4) ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดผักกาดวางตั้งและเมล็ดผักโขมของทุกชุดการทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 80% บ่งชี้ว่าปุ๋ยหมักน้ำทิ้งที่ลดผลกระทบกระดาสาไม่ส่งผลเป็นพิษต่อพืช และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงและฟื้นฟูดินได้ (Tam and Tiquia, 1994; Jolanun *et al.*, 2011) นอกจากนี้ การทดสอบปัจจัยอัตราส่วนผสมการใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งที่ต่างกัน ต่อค่าดัชนีการงอกของเมล็ดของดินที่บ่มในห้องปฏิบัติการทางสถิติ พบว่าอัตราส่วนผสมของปุ๋ยหมักน้ำทิ้งที่ต่างกัน ส่งผลต่อค่าดัชนีการงอกของเมล็ดผักกาดและดัชนีการงอกของเมล็ดผักโขมจีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} < 0.05$ )



ภาพที่ 3 ดัชนีการงอกของเมล็ดผักกาด





ภาพที่ 4 ดัชนีการงอกของเมล็ดผักโขม

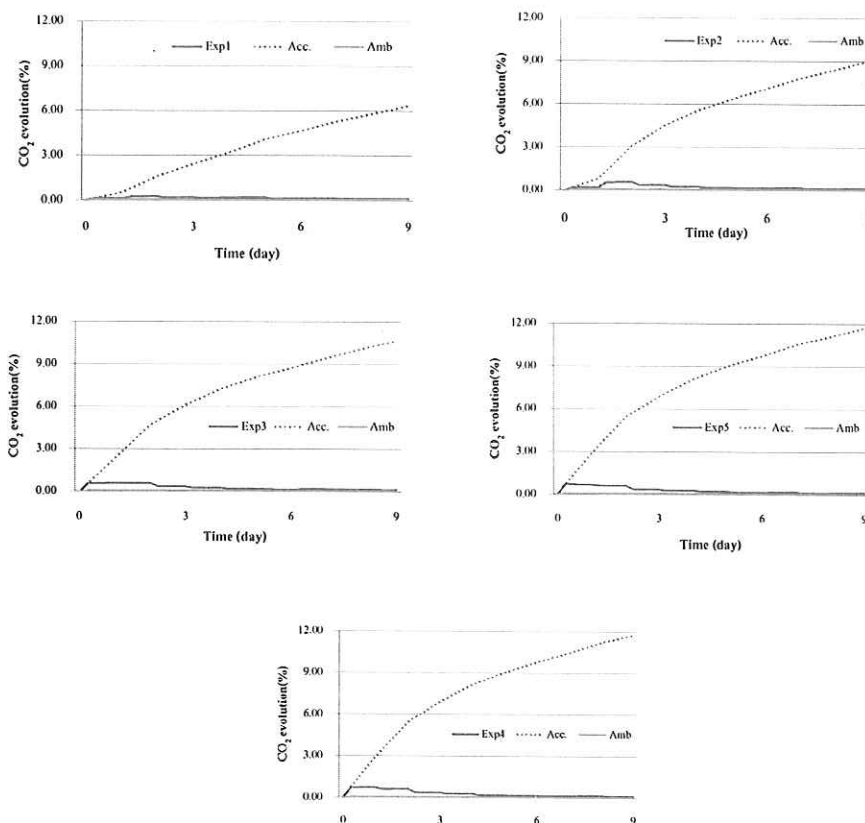
### การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการย่อยสลายทางชีววิทยา ตลอดระยะเวลาสังเกตการณ์ 216 ชั่วโมง (9 วัน) พบว่าทุกชุดการทดลองเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในช่วง 48 ชั่วโมงแรก โดยค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงประมาณ 0%-0.28% (Exp.1), 0%-0.59% (Exp.2), 0%-0.61% (Exp.3), 0%-0.75% (Exp.4) และ 0%-0.76% (Exp.5) ตามลำดับ หลังจากนั้นจนถึงการสังเกตการณ์ (216 ชั่วโมง) พบว่าการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องโดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0-0.76% นอกจากนี้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่สิ้นสุดการทดลอง มีค่าประมาณ 6.34% (Exp.1), 9.01% (Exp.2), 10.65% (Exp.3), 11.26% (Exp.4) และ 11.70% (Exp.5) ตามลำดับ สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศสิ่งแวดล้อมพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0%-0.07% (ภาพที่ 5)

ผลการศึกษาพบว่า การผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในดินที่ปนเปื้อนส่งผลบวกต่อกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนผสมปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ที่สูงขึ้นจะแปรผันตรงกับการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสม (Epstein, 1997; Jolanun *et al.*, 2010) อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ผสมในปริมาณที่ค่อนข้างสูงช่วง 45%-60% (Exp.4 และ Exp.5) กลับไม่ส่งผลต่อกิจกรรมการย่อยสลายที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่มีค่าใกล้เคียงกันหรือเกือบเท่ากัน (11.26%-11.70%) ดังนั้น การศึกษานี้แนะนำให้ใช้ปริมาณของปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ควรผสมในช่วง 30%-45% ซึ่งหากใช้ปริมาณปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในปริมาณที่มากกว่านี้อาจเป็นการสิ้นเปลืองมากกว่าการเพิ่มประสิทธิภาพกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์

## 4. สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ หักดองกรรมกระดาษสาบำบัดดินที่ปนเปื้อน (น้ำต้มเยื่อ) ทางชีวภาพ โดยแปรผันเงื่อนไขอัตราส่วนผสมของปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ตั้งแต่ 0%-60% ในระดับห้องปฏิบัติการ สรุปได้ว่าการใช้ประโยชน์จากปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ส่งผลบวกต่อการปรับปรุงสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดิน เช่น การทำให้ค่าความหนาแน่นของดินลดลง ดินมีความร่วนซุย มีรูพรุนเพิ่มขึ้นและไม่อัดตัวแน่น การทำให้ดินมีค่า pH ค่อนข้างเป็นกลาง ปราศจากความเค็ม เพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุ ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน ตลอดจนส่งเสริมกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน เป็นต้น นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในการฟื้นฟูดินพบว่ามีความปลอดภัยไม่ส่งผลต่อความเป็นพิษต่อพืชหรือค่าดัชนีการงอกของเมล็ด สำหรับการศึกษา อัตราส่วนผสมของปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ที่ร้อยละ 30 ถือเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นเงื่อนไขการใช้ปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในอัตราส่วนผสมปริมาณต่ำสุด แต่กลับให้ประสิทธิผลในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน รวมทั้งการส่งเสริมกิจกรรมการย่อยสลายในดินได้ใกล้เคียงกับอัตราส่วนผสมของปุ๋ยหมักน้ำทิ้งฯ ในช่วงที่สูงกว่าร้อยละ 45%-60%



ภาพที่ 5 การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณสะสม

## 5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงได้ภายใต้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภททุน UR โครงการส่งเสริมการผลิตผลงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ปีงบประมาณ 2558 ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ และขอขอบคุณ ฟาร์มกระดาศสา เทศบาลเมืองต้นเปา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยอย่างยิ่ง

## 6. เอกสารอ้างอิง

- Epstein E. 1997. The science of composting. Lancaster, PA: A Technomic Publishing Company, Inc. USA.
- Harpstead, M.I., Sauer, T.J., and Bennett, W.F. 2001. Soil science simplified. 4<sup>th</sup> Edition, Iowa State University Press, U.S.
- Jolanun, B. and Towprayoon, S. 2010. Novel bulking agent from clay residue for food waste composting. Bioresource Technology 101(12): 4484-4490.
- Jolanun, B., Jaimook, W., Pongprom, A., and Somsri, A. 2011. Small-scale turned windrow to manage residue waste of curcuma nursery. The Journal of Industrial Technology 7(2): 39-48.
- Jolanun, B., Kaewkam, C., Bauoon, O., and Chiemchaisri, C. 2014. Turned windrow composting of cow manure as appropriate technology for zero discharge of mulberry pulp wastewater. Environmental Technology 35(16): 2104-2114.



- Jolanun, B., Sasudjit, K., and Maungrung, M. 2016. Negative pressure mode for composting of wastewater from mulberry pulp and paper handicraft. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Environment and Natural Resources International Conference (ENRIC 2016), November 16-17, 2016, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand: 22-27.
- Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2017. LDD Soil Guide. (online). Available: <http://oss101.ddd.go.th/> [2017 May 19]. (in Thai).
- Office of the National Economic and Social Development Council. 2014. Database of Sa paper and product cluster. (online). Available: <http://cm.nesdb.go.th/> [2014 March 21]. (in Thai).
- Papong, S. 2001. Cleaning technology in pulp and paper making from paper mulberry. Thesis of Master Engineering (Chemical Engineering). Kasetsart University.
- Polprasert C. 1996. Organic waste recycling. John Wiley & Sons Ltd., U.K.
- Raton B. 2000. Handbook of reference methods for soil analysis. Rev.ed. CRC Press. FL, USA.
- Ren X.1998. Cleaner production in China's pulp and paper industry. J Clean Prod. 6: 349-355.
- Sanguansupayakorn, C. 2016. Soil data analysis for utilization. Training course for soil and water conservation. (online). Available: <http://e-library.ddd.go.th/> [2016 August 3]. (in Thai).
- Tam, N.F.Y. and Tiquia S. 1994. Assessing toxicity of spent pig litter using a seed germination technique. Resource, Conservation and Recycling 11: 261-274.