

บทที่ 4 ผลการวิจัย

คุณสมบัติของดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม

การผสมกันระหว่างดินนา (ปราศจากการปนเปื้อนแคดเมียม) กับแร่สังกะสีซิลิเกต (zinc silicate) ที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอัตราส่วน 1:1 (Suksabye et al., 2016) นำตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณสมบัติของดินตามพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าความเข้มข้น
พีเอช	7
% ขนาดอนุภาคดิน	
-% ดินทราย	42
-% ทรายแป้ง	24
-% ดินเหนียว	34
อินทรีย์วัตถุ (%)	1.96
ฟอสฟอรัส (mg/kg)	25
โพแทสเซียม (mg/kg)	165
แคลเซียม (mg/kg)	2664
แมกนีเซียม (mg/kg)	489
CEC (cmol _c /kg)	19.50
ปริมาณแคดเมียม (mg/kg)	103.68±2.70

จากผลการทดลองพบว่าดินมีพีเอช 7 ซึ่งจัดว่าเป็นดินที่มีพีเอชกลาง และวิเคราะห์ % ขนาดอนุภาคของดิน พบว่าดินส่วนใหญ่เป็นดินทราย และพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุ 1.96 % จัดว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ระดับปานกลาง นอกจากนี้จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมมีอยู่ในปริมาณที่สูง โดยมีปริมาณ 165, 2,664 และ 489 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนฟอสฟอรัส มีเพียง 25 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จัดว่าอยู่ในระดับปานกลาง ส่วนค่า CEC มีค่า 19.20 cmol_c/kg ส่วนปริมาณแคดเมียมในดินมีความเข้มข้นเริ่มต้น 103.68±2.70 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ เศษกระดูกอาหารและไบโอชาร์จากเศษกระดูกอาหารด้วย เครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy

การวิเคราะห์หาปริมาณออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเศษกระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา (ไบโอชาร์จากกระดูกหมู) และกระดูกไก่เผา (ไบโอชาร์จากกระดูกไก่) ด้วย เครื่อง X-ray fluorescence แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปรับปรุงดิน

สารปรับปรุงดิน	CaO (%)	P ₂ O ₅ (%)	Na ₂ O (%)	Cl (%)	SO ₃ (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)
กระดูกหมู	62.5	30.1	2.22	1.55	0.979	0.967	0.919
กระดูกหมูเผา	58.3	36.2	2.80	1.29	0.249	1.08	0.574
กระดูกไก่	60.4	31.4	1.39	0.303	0.849	1.10	2.73
กระดูกไก่เผา	60.2	36.0	1.30	0.302	0.367	1.12	0.162

ตารางที่ 4.2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปรับปรุงดิน (ต่อ)

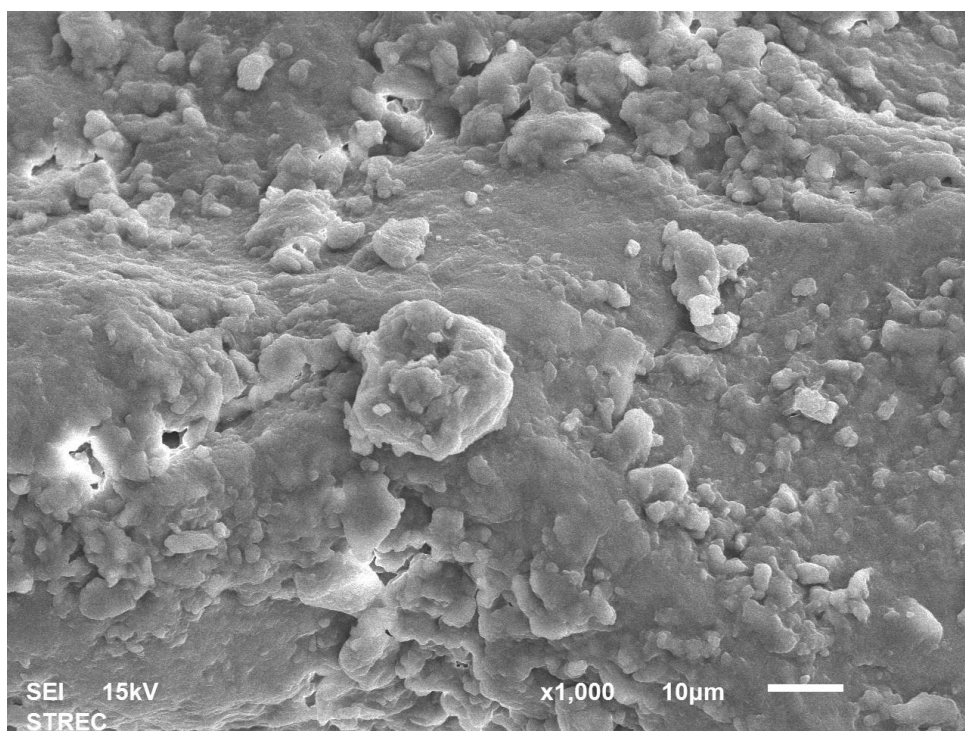
ตัวดูดซับ	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	ZnO (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	SrO (%)
กระดูกหมู	0.333	0.227	0.224	0.0776	0.0409	0.0174	0.0153
กระดูกหมูเผา	0.0318	0.170	0.0307	0.0534	-	-	0.0125
กระดูกไก่	0.904	0.281	0.390	0.0931	0.0701	-	0.0210
กระดูกไก่เผา	0.0763	0.293	0.0618	0.0854	-	-	0.0231

จากตารางที่ 4.2 พบว่า กระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา และกระดูกไก่เผา มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงสุด และรองลงมาได้แก่ P₂O₅ เมื่อเทียบกับองค์ประกอบของธาตุอื่น ๆ โดย พบว่า แคลเซียมออกไซด์ มีอยู่ใน กระดูกหมู สูงสุด (62.5 %) และรองลงมาได้แก่ ในกระดูกไก่ (60.4%) และ กระดูกไก่เผา (60.2%) และ กระดูกหมูเผา (58.3%) ส่วนปริมาณของ P₂O₅ ที่พบในกระดูกหมูเผาสูงที่สุด (36.2%) รองลงมาได้แก่ กระดูกไก่เผา (36.0%) กระดูกไก่ (31.4%) และกระดูกหมู (30.1%) ตามลำดับ ซึ่งเศษกระดูกอาหารและไบโอชาร์จากเศษกระดูกอาหารเหล่านี้มีปริมาณของ แคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบที่สูงเนื่องจาก โดยทั่วไปกระดูกจะมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 30 และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 70

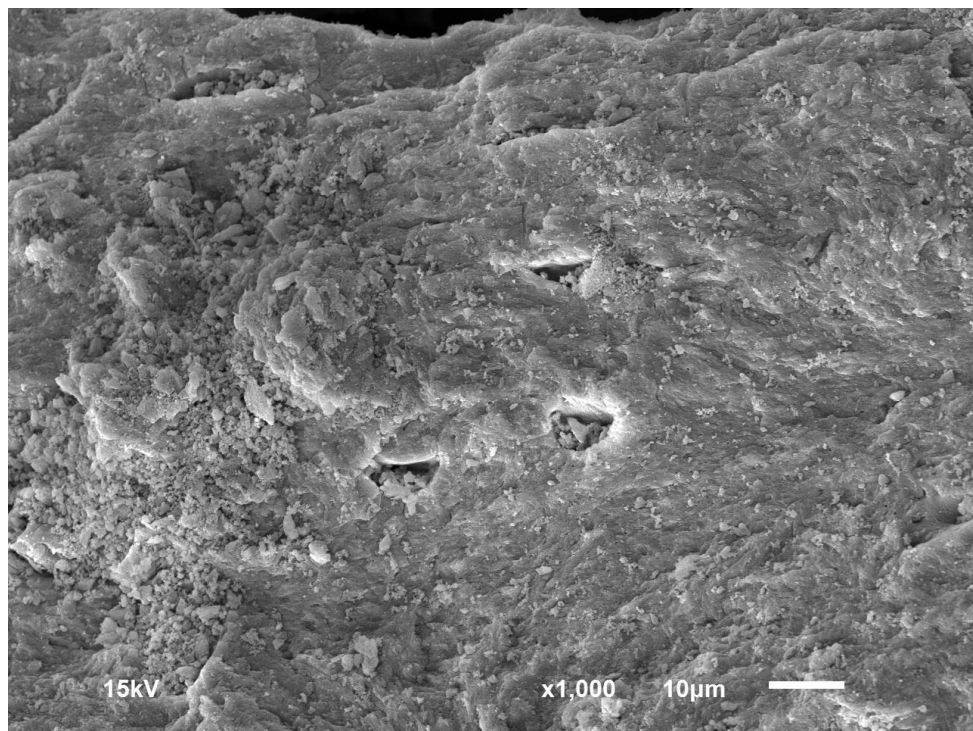
(Kizilkkaya et al., 2010) ซึ่งสารอนินทรีย์ในกระดูกที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ hydroxylapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ (HAP) (Modin et al., 2011)

การศึกษาลักษณะของวัสดุปรับปรุงดินด้วย Scanning Electron Microscope with Electron Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDS)

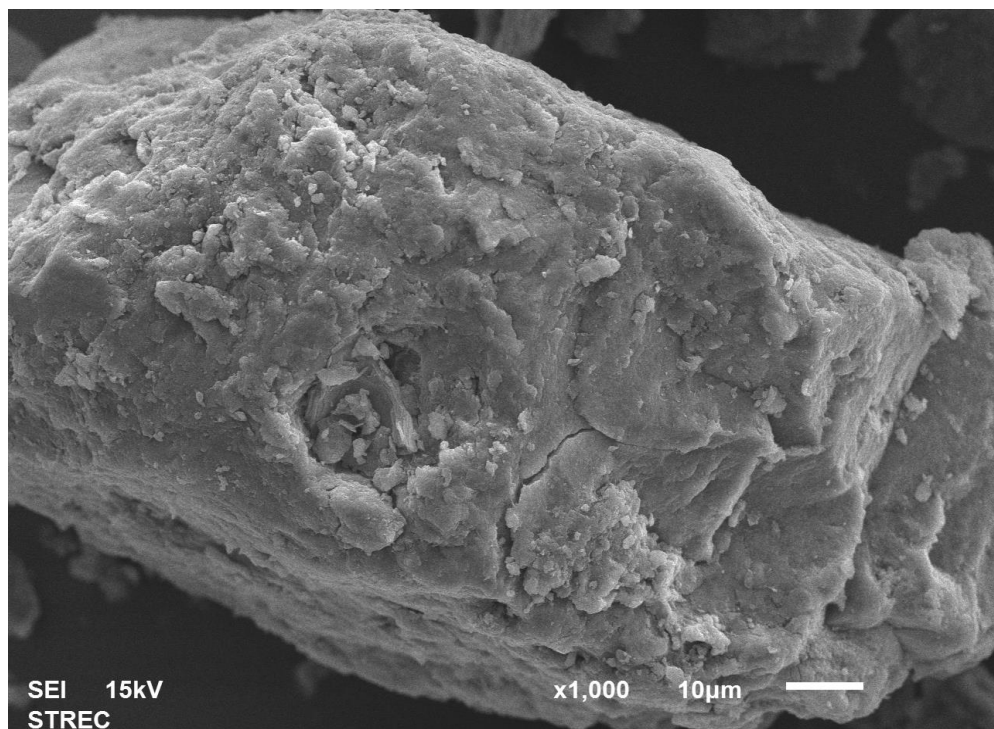
ลักษณะของพื้นผิวของกระดูกหมู กระดูกหมูเผา กระดูกไก่ และกระดูกไก่เผา แสดงดังภาพที่ 4.1-4.2 จากภาพสังเกตเห็นว่ากระดูกหมู และกระดูกไก่แทบจะไม่มีรูพรุน ซึ่งก็สอดคล้องผลของการวัดพื้นที่ผิว (BET surface area) ในตารางที่ 4.3 ที่พบว่าพื้นที่ผิวต่ำเพียง 3.79 และ 3.00 ตารางเมตร /กรัม ตามลำดับ แต่กระดูกหมูเผา และกระดูกไก่ (เผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) มีจำนวนรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และจากสภาพของพื้นผิวยังพบว่า จำนวนรูพรุนของกระดูกไก่เผา มีรูพรุนมากกว่า กระดูกหมูเผา (สอดคล้องกับผลการทดลอง BET surface area ในตารางที่ 4.3) ดังนั้นจากภาพที่ 4.1-4.2 จะเห็นได้ว่าการนำเศษกระดูกอาหาร เช่น กระดูกหมู กระดูกไก่มาเผาจะทำให้พื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น



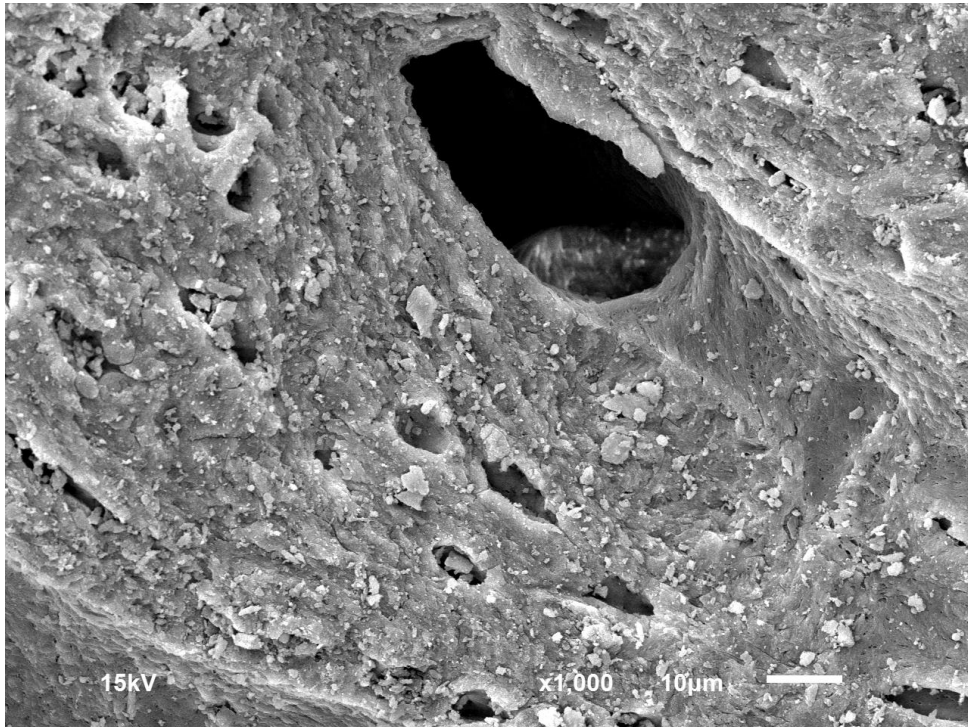
ก.กระดูกหมู X 1000 เท่า



ข. กระจุดกหุ่มเฒ่า X 1000 เท่า

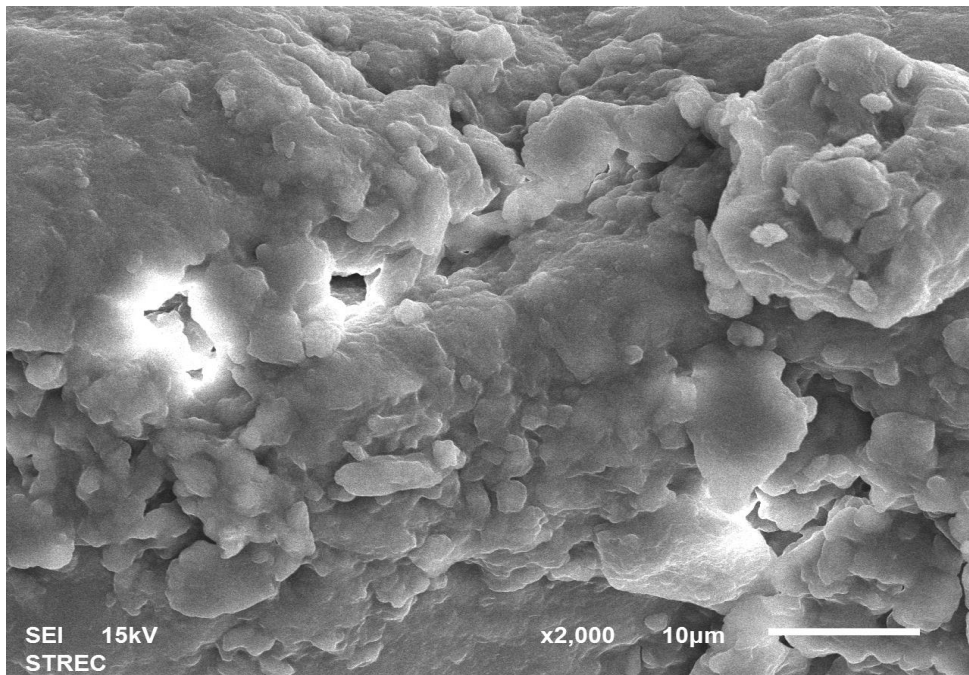


ค. กระจุดกไถ่ X 1000 เท่า

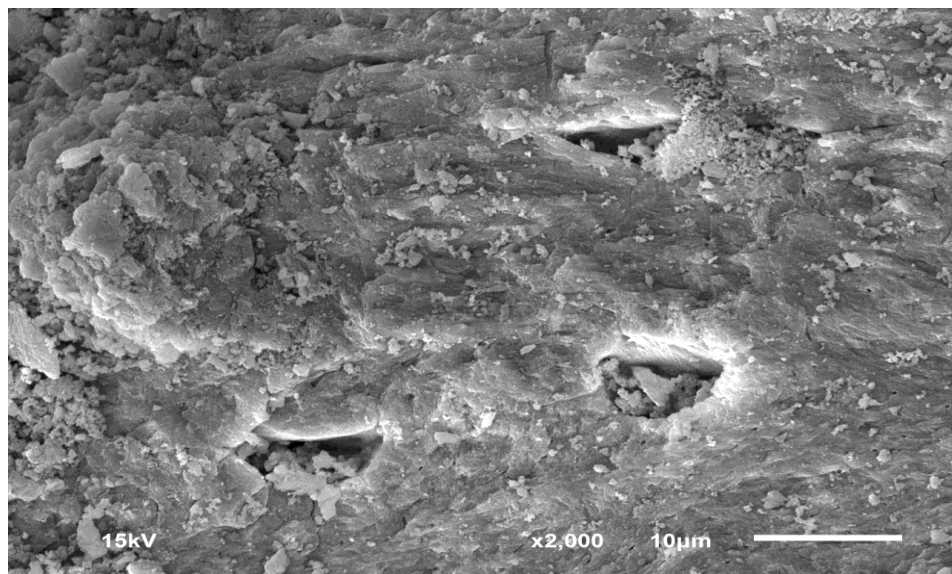


ง. กระจูดไก่อเฒ่า X 1000 เท่า

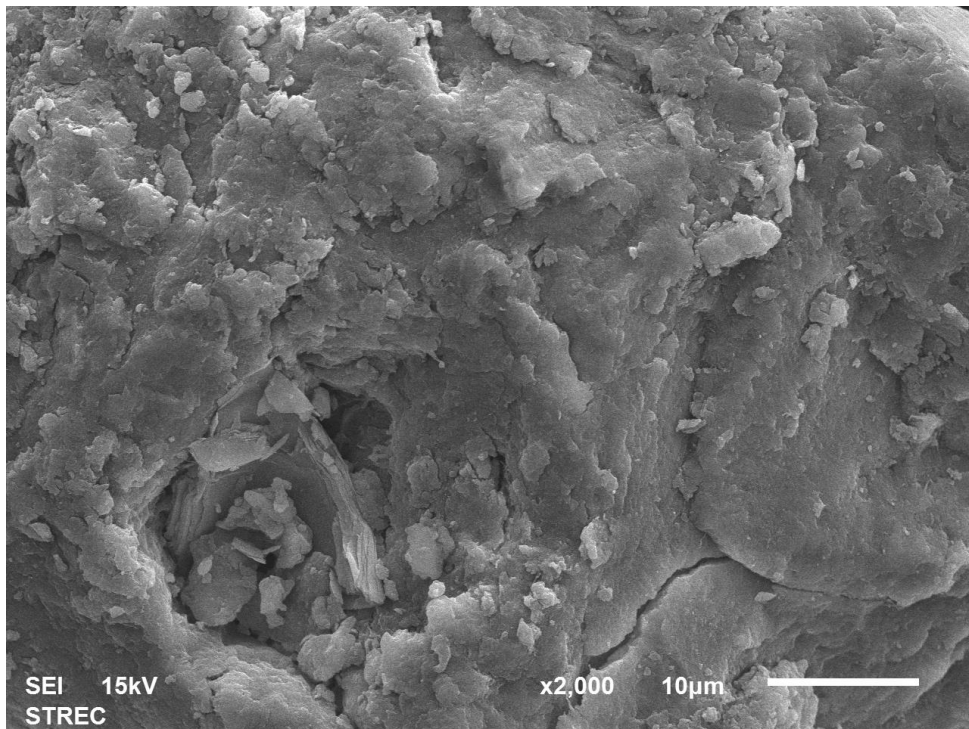
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก SEM (ก) กระจูดหนุม X 1000 เท่า (ข) กระจูดหนุมเฒ่า X 1000 เท่า (ค) กระจูดไก่อ X 1000 เท่า (ง) กระจูดไก่อเฒ่า X 1000 เท่า



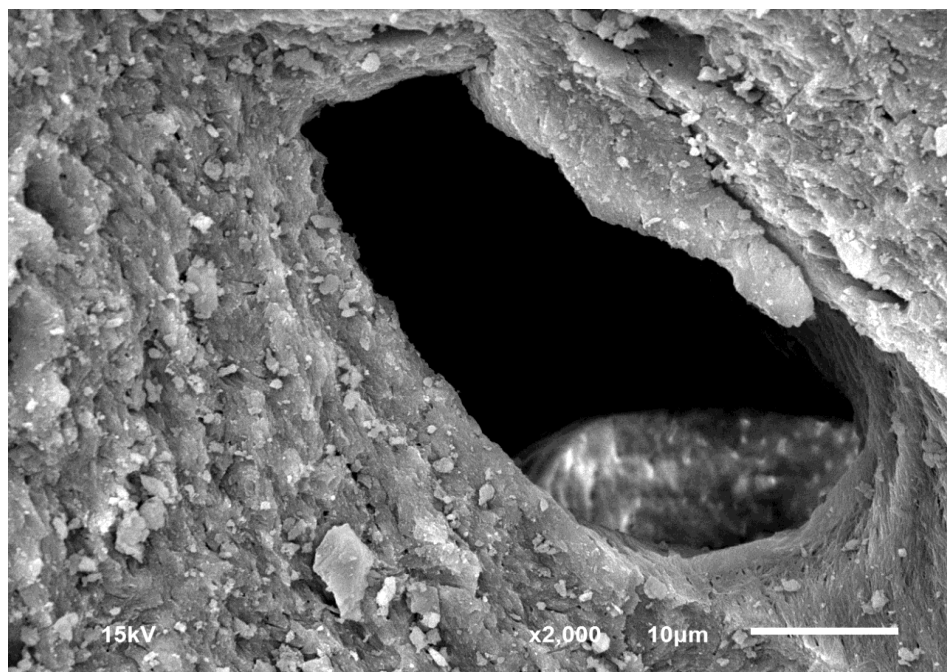
ก.กระดุกหมู X 2000 เท่า



ข.กระดุกหมูเผา X 2000 เท่า



ค.กระดุกไม้ X 2000 เท่า

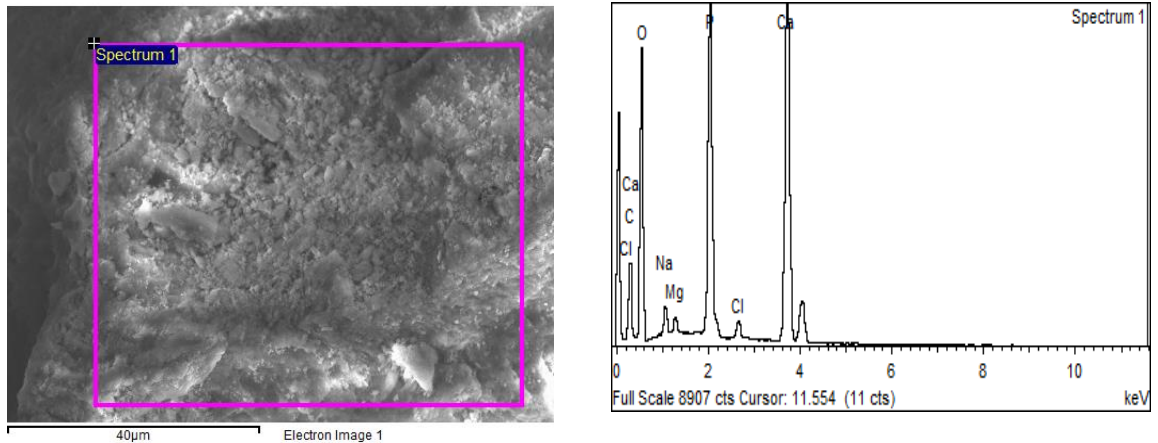


ง.กระดุกไม้เผา X 2000 เท่า

ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายจาก SEM (ก) กระดุกหมู X 2000 เท่า (ข) กระดุกหมูเผา X 2000 เท่า

(ค) กระดุกไม้ X 2000 เท่า (ง) กระดุกไม้เผา X 2000 เท่า

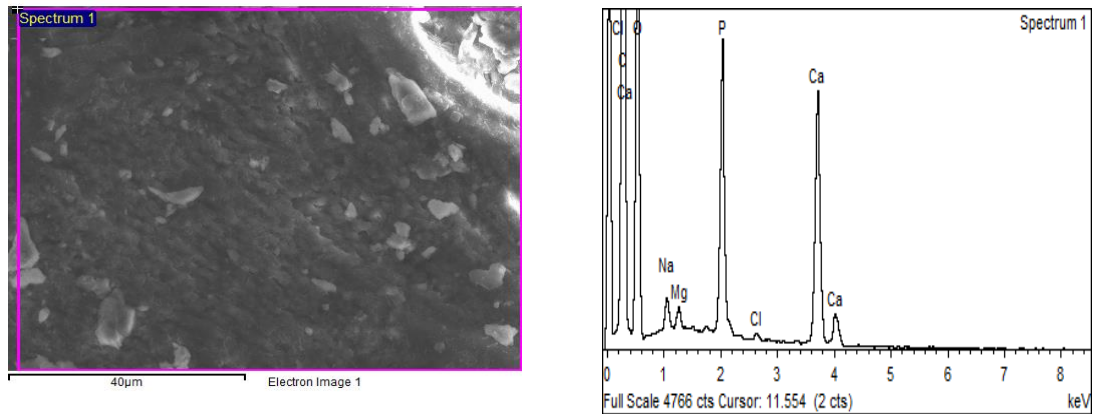
นอกจากนี้การทดลองยังวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา กระดูกไก่เผา ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope with Electron Dispersive X-ray Spectroscopy ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ภาพที่ 4.3-4.6 และตารางที่ 4.3 -4.6



ภาพที่ 4.3 ภาพองค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดูกหมู ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดูกหมู ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

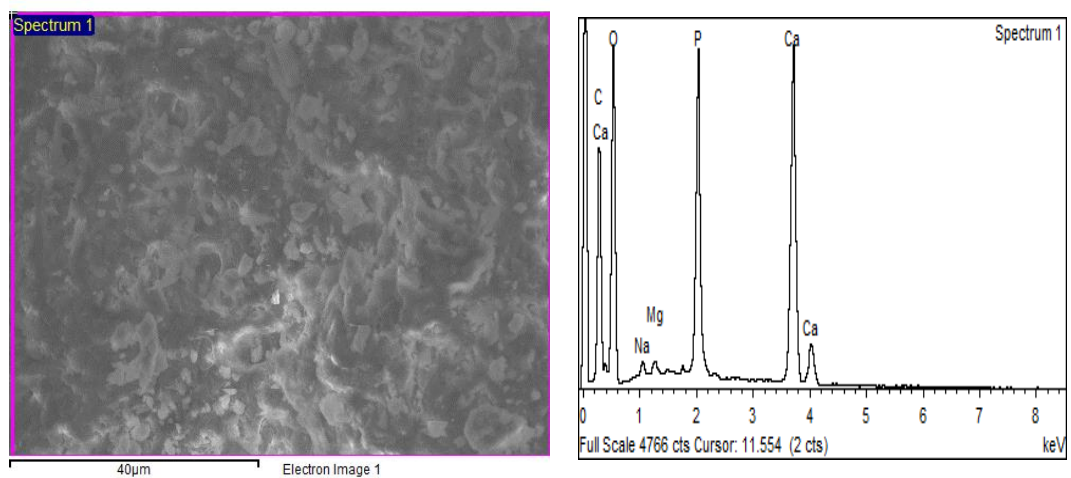
ธาตุ	%
C	58.33
O	33.80
Na	0.52
Mg	0.25
P	2.79
Cl	0.07
Ca	3.41



ภาพที่ 4.4 ภาพองค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดุกหมูเฝ้า ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดุกหมูเฝ้า ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

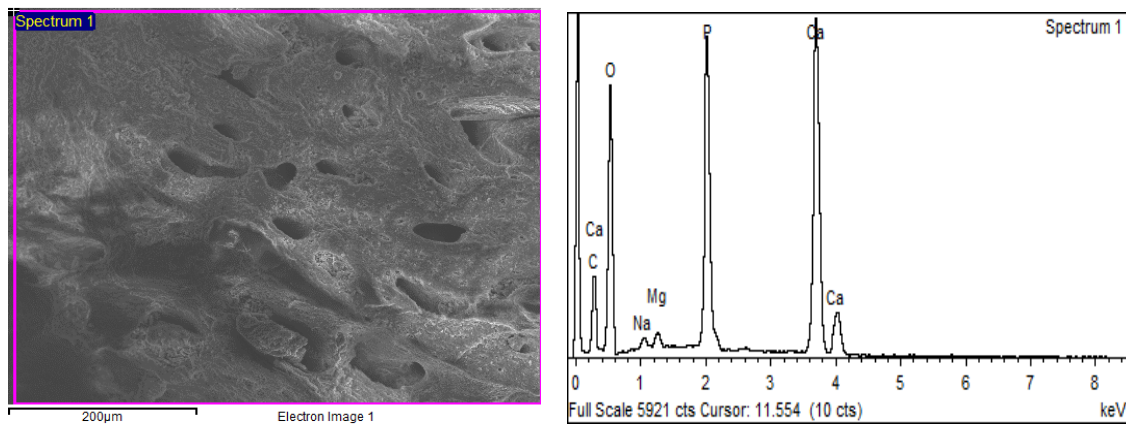
ธาตุ	%
C	24.71
O	52.91
Na	0.99
Mg	0.42
P	8.49
Cl	0.49
Ca	11.99



ภาพที่ 4.5 ภาพองค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดุกไก่ ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดูกไก่ ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

ธาตุ	%
C	40.53
O	44.67
Na	0.36
Mg	0.21
P	5.84
Ca	8.39



ภาพที่ 4.6 ภาพองค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดูกไก่เผา ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของธาตุ (element) ในกระดูกไก่เผา ที่วิเคราะห์ด้วย SEM/EDS

ธาตุ	%
C	23.97
O	53.86
Na	0.39
Mg	0.43
P	8.55
Ca	12.80

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบ กระจุกหุ้ม (ตารางที่ 4.3) กับกระจุกหุ้มเผา (เมื่อนำไปเผา 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเผาแบบมีอากาศ (ตารางที่ 4.4) ปริมาณของคาร์บอนลดลง จาก 58.33 % เป็น 24.71 % ส่วนปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 33.8 % เป็น 52.91 % ทั้งนี้ที่ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากการเผาที่มีออกซิเจน ทำให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น และปริมาณคาร์บอนลดลง ส่วนปริมาณ Na, Mg, P และ Ca มีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังจากการเผา โดยปริมาณแคลเซียม และ P เพิ่มขึ้นจาก 3.41 % เป็น 11.99% และ เพิ่มขึ้นจาก 2.79% เป็น 8.49 % ตามลำดับ

ส่วนกระจุกไก่อและกระจุกไก่เผาก็เช่นเดียวกัน ผลการทดลองพบว่ากระจุกไก่เผา (ตารางที่ 4.6) มีปริมาณคาร์บอนลดลง จาก 40.53% เป็น 23.97% และ มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น จาก 44.67% เป็น 53.86% ส่วนปริมาณ Na, Mg, P และ Ca มีปริมาณเพิ่มขึ้น หลังจากการเผา โดยปริมาณแคลเซียม และ P เพิ่มขึ้นจาก 8.39 % เป็น 12.80% และ เพิ่มขึ้นจาก 5.84 % เป็น 8.55 % ตามลำดับ

ผลของลักษณะพื้นที่ผิวของเศษกระดูกอาหารและไบโอชาร์ของเศษกระดูกอาหาร (BET surface area)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) ของเศษกระดูกอาหารได้แก่ กระจุกหุ้มและกระจุกไก่ ส่วนไบโอชาร์ของเศษกระดูกอาหาร ได้แก่ กระจุกหุ้มเผาและกระจุกไก่เผาที่ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ด้วยเครื่อง surface area analyzer พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface Area) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ รูพรุน (pore size diameter) ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 พื้นที่ผิวจำเพาะของกระจุกหุ้ม กระจุกไก่ กระจุกหุ้มเผา และกระจุกไก่เผาที่ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน

ตัวอย่าง	BET (m ² /g)	Total pore volume (cc/g)	Average pore diameter (Å)
กระจุกหุ้ม	3.79	0.0025	33.85
กระจุกไก่	3.00	0.0102	108.13
กระจุกหุ้มเผา	92.26	0.2546	110.41
กระจุกไก่เผา	135.47	0.2785	82.13

ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) พบว่ากระจุกหุ้ม และกระจุกไก่อมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำมากเพียง 3.79 และ 3.00 ตารางเมตร /กรัม ตามลำดับ แต่เมื่อนำมาเผา 2 ชั่วโมง 500 องศาเซลเซียส พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของกระจุกหุ้มและกระจุกไก่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมี

ค่าเท่ากับ 92.26 และ 135.47 ตารางเมตร /กรัม ตามลำดับ และการทดลองยังพบว่า ปริมาตรรูพรุน (Total pore volume) และส่วนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (Average pore diameter) เมื่อนำ กระดุกหมูและกระดุกไก่มาเผาจะมีค่าสูงขึ้น

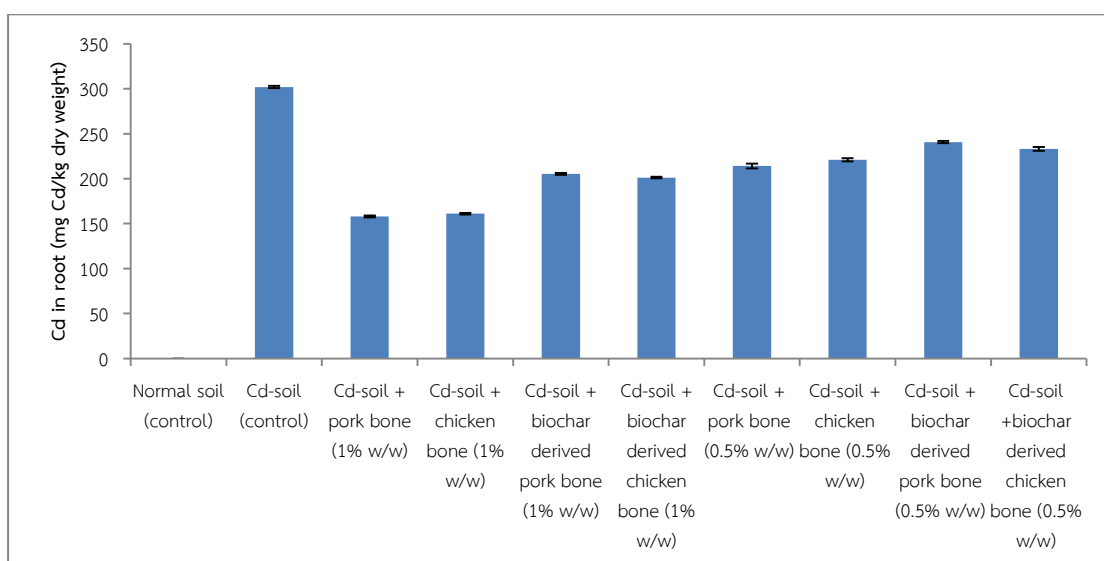
ผลการใช้เศษกระดูกอาหาร ไบโอดีของเศษกระดูกอาหาร ในการลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าว

การทดลองศึกษาเงื่อนไขของเศษกระดูกอาหาร ไบโอดีของเศษกระดูกอาหาร และ *Bacillus subtilis* ในการลดสะสมแคดเมียมในต้นข้าวแสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.7

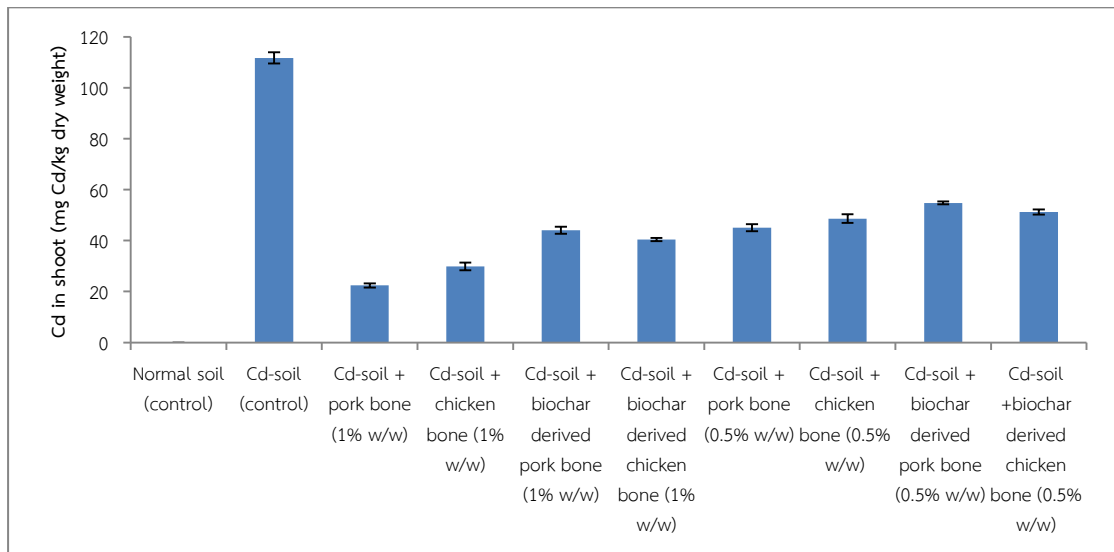
ตารางที่ 4.8 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวในเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน

เงื่อนไขการทดลอง	ปริมาณแคดเมียม (mg Cd/kg dry weight)			
	ราก	ลำต้น	เปลือก	เมล็ด
Normal soil (control)	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd-soil (control)	301.91±1.25 ^a	111.70±2.23 ^a	13.45±0.82 ^a	3.70±0.24 ^a
Cd-soil + pork bone (1%w/w)	157.96±1.02 ^b	22.39±0.78 ^b	2.72±0.20 ^b	0.18±0.01 ^b
Cd-soil + chicken bone (1% w/w)	161.16±0.91 ^c	29.86±1.48 ^c	3.42±0.48 ^c	0.45±0.03 ^c
Cd-soil + biochar derived from pork bone (1% w/w)	205.37±1.21 ^d	44.01±1.39 ^d	6.76±0.23 ^d	1.98±0.25 ^d
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (1% w/w)	201.16±0.89 ^e	40.38±0.65 ^e	5.96±0.42 ^e	1.56±0.07 ^e
Cd-soil + pork bone (0.5%w/w)	214.16±2.67 ^f	45.11±1.38 ^f	6.91±0.09 ^f	2.08±0.08 ^f
Cd-soil + chicken bone (0.5% w/w)	220.96±1.72 ^g	48.61±1.71 ^g	7.38±0.28 ^g	2.59±0.15 ^g
Cd-soil + biochar derived from pork bone (0.5% w/w)	240.67±1.28 ^h	54.78±0.61 ^h	8.75±0.18 ^h	3.21±0.07 ^h
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (0.5% w/w)	233.10±2.24 ⁱ	51.20±1.01 ⁱ	8.22±0.08 ⁱ	2.91±0.02 ⁱ

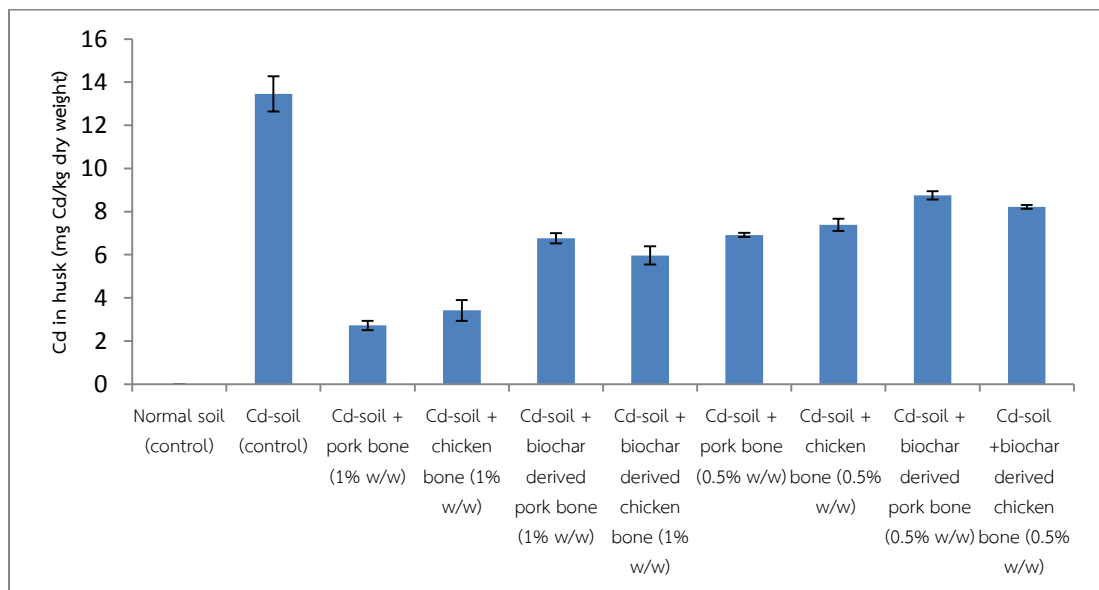
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จำแนกโดย Duncan multiple range test



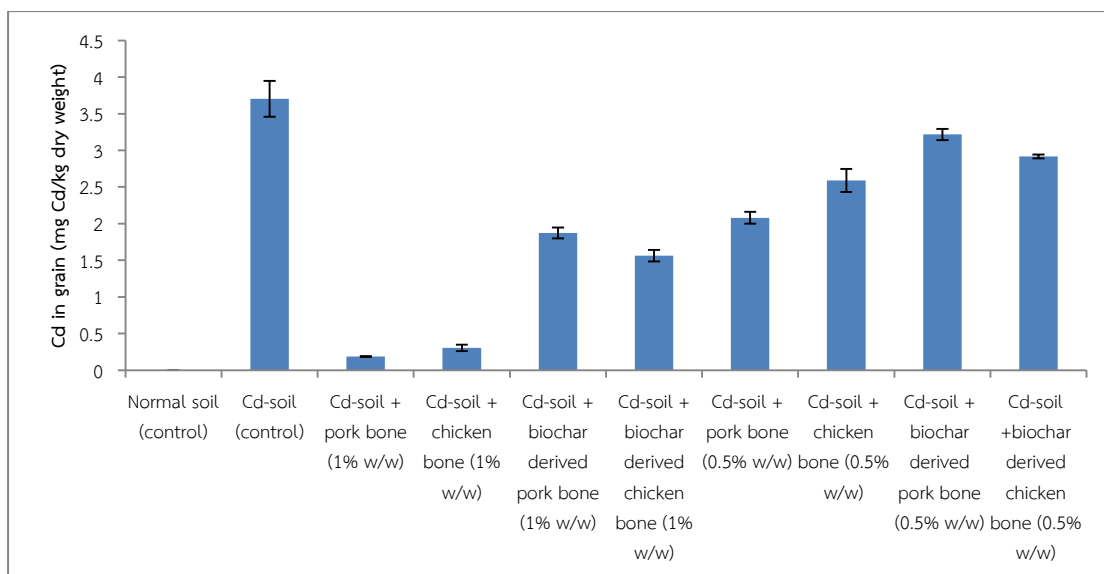
ก) ราก



ข) ลำต้น



ค) เปลือก



ง) เมล็ด

ภาพที่ 4.7 ปริมาณแคดเมียมในราก (ก) ลำต้น (ข) เปลือก (ค) และเมล็ดข้าว (ง) เมื่อปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ หลังเก็บเกี่ยว 90 วัน

จากผลการทดลองตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.7 พบว่าการใช้กระดูกหมู 1% w/w เติมในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 หลังเก็บเกี่ยวข้าว 90 วัน พบว่า กระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา และ กระดูกไก่เผา มีศักยภาพในการลดการสะสมของแคดเมียมใน ราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดของข้าว แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อใช้กระดูกหมู 1% w/w เป็นสารปรับปรุงดินจะมีปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเมล็ดต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ โดยมีปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเหลือเพียง 0.18 ± 0.01 mg Cd/kg dry weight ซึ่งปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวดังกล่าว มีค่าไม่เกินมาตรฐานของ Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดให้ปริมาณค่าแคดเมียมในเมล็ดข้าวไม่ควรเกิน 0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าการใช้ กระดูกหมู 1% w/w เติมในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าว มีศักยภาพที่สามารถลดแคดเมียมที่สะสมในเมล็ดข้าวให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนการใช้กระดูกหมู 0.5 % w/w ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเมล็ดข้าวลดลงเช่นกันแต่ก็ยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) โดยปริมาณแคดเมียมที่เหลือในเมล็ดข้าวเมื่อใช้กระดูกหมู 0.5% เป็นสารปรับปรุงดินมีค่าเท่ากับ 2.08 ± 0.08 mg Cd/kg dry weight

และจากผลการทดลองยังพบว่า หลังจากเก็บเกี่ยวข้าว 90 วัน ใช้ กระดูกหมู 1% w/w สามารถลดปริมาณการสะสมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดข้าว ได้สูงกว่าการปลูกข้าวในดินปนเปื้อนแคดเมียมที่ปราศจากสารปรับปรุงดิน (Cd-soil) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณแคดเมียมที่สะสมในราก ลำต้น เปลือก และ เมล็ดข้าว ของการเติมกระดูกหมู 1% w/w มีค่าเท่ากับ 157.96 ± 1.02 , 22.39 ± 0.78 , 2.72 ± 0.20 และ 0.18 ± 0.01 mg Cd/kg dry weight

ตามลำดับ ส่วน) โดยปริมาณแคดเมียมที่สะสมในราก ลำต้น เปลือก และ เมล็ดข้าว ของการปลูกข้าวในดินปนเปื้อนแคดเมียมที่ปราศจากการใส่สารปรับปรุงดิน (Cd-soil) มีปริมาณแคดเมียมที่สะสมเท่ากับ 301.91 ± 1.25 , 111.70 ± 2.23 , 13.45 ± 0.82 และ 3.70 ± 0.24 mg Cd/kg dry weight ตามลำดับ นอกจากนี้ผลของตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.7 พบว่า การใช้กระดูกหมู 1% w/w เป็นสารปรับปรุงดินจะมีประสิทธิภาพในการลดการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าวดีที่สุด รองลงมาได้แก่ การใช้กระดูกไก่ 1% w/w, กระดูกไก่เผา 1% w/w, กระดูกหมูเผา 1% , กระดูกหมู 0.5 % w/w, กระดูกไก่ 0.5 % w/w, กระดูกไก่เผา 0.5 % w/w และ กระดูกหมูเผา 0.5 % w/w ตามลำดับ การที่กระดูกหมูมีประสิทธิภาพการลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวได้ดีไม่จำเป็นจะเกี่ยวกับปริมาณรูพรุนของตัวดูดซับ เพราะจากภาพ SEM ภาพที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่า กระดูกหมูแทบจะไม่มีรูพรุนบนพื้นที่ผิวที่เมื่อเปรียบเทียบกับ กระดูกหมูเผาและ กระดูกไก่เผา แต่การทดลองนี้ได้ นำสารปรับปรุงดินอย่างละ 2 w/v เติมในน้ำ ปราศจากไอออน (DI) นำไปเข้าไปเขย่าในเครื่องเขย่า (shaker) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า กระดูกหมู 1 % (w/v) มีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมละลายออกมาในน้ำ DI สูงสุดโดยมีค่าแคลเซียมเท่ากับ 7.31 ± 1.31 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าแมกนีเซียมเท่ากับ 4.42 ± 1.69 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) รองลงมาได้แก่ กระดูกไก่, กระดูกไก่เผา และกระดูกหมูเผา ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวจะสอดคล้องกับการทดลองในพื้นที่จริงในการปลูกข้าวในดินปนเปื้อนแคดเมียมที่มีการใส่สารปรับปรุงดิน สาเหตุที่ทำให้ในราก ลำต้น เปลือก และ เมล็ดข้าวการใช้ กระดูกหมู 1 % w/w มีประสิทธิภาพการลดแคดเมียมในต้นข้าวดีที่สุด อาจเนื่องจาก กระดูกหมูมีความสามารถในการละลายแคลเซียม และ แมกนีเซียมในน้ำออกมาสู่ดินสูงสุด ซึ่งในการทดลองจริงเมื่อมีการรดน้ำข้าวที่ปลูกด้วยน้ำประปา จะทำให้แคลเซียมและแมกนีเซียมละลายออกมาได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ ทำให้แคดเมียมไอออน แยกจับกับแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนเพื่อเข้าไปในเซลล์รากของพืช (Tian et al., 2011 : Cho, et al, 2012) ดังนั้นปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในต้นข้าวสูงจะช่วยให้ปริมาณแคดเมียมลดลง

ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคลเซียมและ แมกนีเซียมจากตัวดูดซับที่แยกชะด้วยน้ำ DI

ตัวอย่าง	แคลเซียม	แมกนีเซียม
กระดูกหมู 2% (v/w)	7.31 ± 1.31	4.42 ± 1.69
กระดูกไก่ 2% (v/w)	7.02 ± 0.81	1.81 ± 0.23
กระดูกหมูเผา 2% (v/w)	1.18 ± 0.89	0.17 ± 0.09
กระดูกไก่เผา 2% (v/w)	2.6 ± 0.41	0.18 ± 0.03

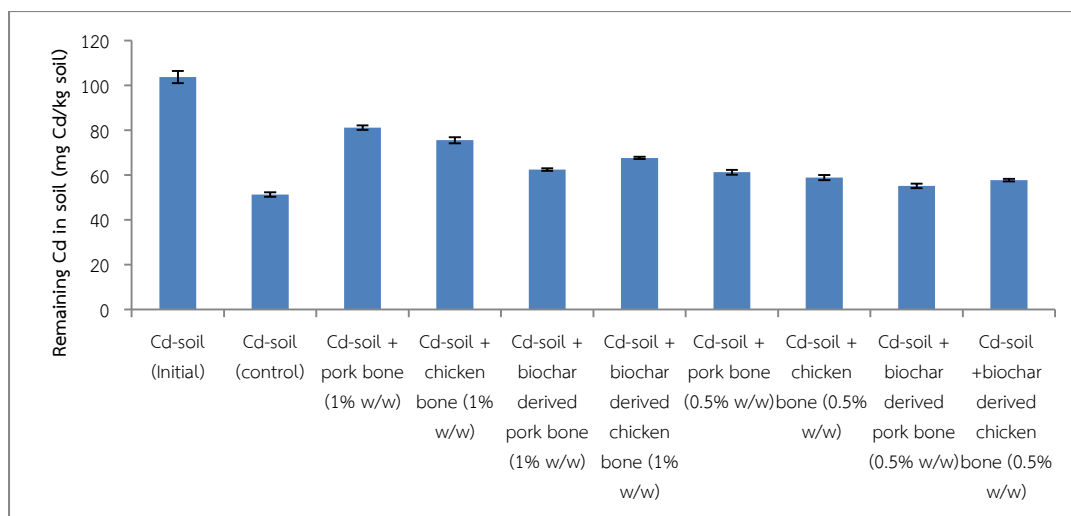
ปริมาณของแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน

ปริมาณของแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน หลังจากเติมสารปรับปรุงดินชนิดต่าง ๆ ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าว แสดงดังตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.8

ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน หลังจากเก็บเกี่ยว 90 วัน

เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ	ปริมาณแคดเมียม (mg Cd/kg soil)
Cd- soil (initial)	103.68±2.70 ^a
Cd-soil (control)	55.64±1.43 ^b
Cd-soil + pork bone (1%w/w)	81.15±0.96 ^c
Cd-soil + chicken bone (1% w/w)	75.49±1.37 ^d
Cd-soil + biochar derived from pork bone (1% w/w)	62.72±0.58 ^e
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (1% w/w)	67.61±0.49 ^f
Cd-soil + pork bone (0.5 %w/w)	61.23±1.02 ^f
Cd-soil + chicken bone (0.5%w/w)	58.81±1.12 ^g
Cd-soil + biochar derived from pork bone (0.5%w/w)	55.14±1.00 ^h
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (0.5%w/w)	57.72±0.52 ⁱ

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จำแนกโดย Duncan multiple range test



ภาพที่ 4.8 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ หลังจากเก็บเกี่ยว 90 วัน

จากตารางที่ 4.10 และ ภาพผลการทดลองที่ 4.8 พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินเริ่มต้น (Initial) มีค่าเท่ากับ 103.68 ± 2.70 mgCd/kg soil และเมื่อใช้สารปรับปรุงดิน กระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา และกระดูกไก่ เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าว ปริมาณของแคดเมียมในดินเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่มีการใส่สารปรับปรุงดิน (Cd-soil control) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าการเติมกระดูกหมู 1% w/w จะมีปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดินสูงที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้สารปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ รองลงมาได้แก่ กระดูกไก่ 1% w/w, กระดูกไก่เผา 1% w/w, กระดูกหมูเผา 1% , กระดูกหมู 0.5 % w/w, กระดูกไก่ 0.5 % w/w, กระดูกไก่เผา 0.5 % w/w และ กระดูกหมูเผา 0.5 % w/w ตามลำดับ

จากกราฟที่ 4.8 และตาราง 4.9 พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดินเมื่อใช้กระดูกหมู 1%w/w มีค่าเท่ากับ 81.15 ± 0.96 mg Cd/kg soil จากปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น 103.68 ± 2.70 mg Cd /kg soil แสดงให้เห็นว่า แคดเมียมในดินจะถูกดูดซับด้วยกระดูกหมูที่อยู่ในดินสูงกว่าการใช้สารปรับปรุงดินชนิดอื่น ๆ โดย สมมุติฐานว่าแคดเมียมจะถูกตรึง (immobilization) ไว้กับเศษกระดูกหมู ในสถานะที่ค่อนข้างเสถียร (stabilization) ทำให้แคดเมียมอยู่ในดินค่อนข้างสูงเนื่องจากแคดเมียมเคลื่อนที่ (mobility) จากดินสู่ต้นข้าวตลอดจนเมล็ดข้าวได้น้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากในกระดูกมีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักได้แก่คือ hydroxylapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ (HAP) (Modin et al., 2011; Kizilkaya et al. , 2010) ซึ่ง HAP มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดีด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับ Ca^{2+} บนผิวของกระดูก (Kizilkaya et al. , 2010) นอกจากนี้จะเป็นว่าปริมาณ CaO จากการวิเคราะห์ด้วย XRF ดังตารางที่ 4.1 จากเห็นว่ากระดูกหมูมีปริมาณ CaO สูงสุด (62.5 %) เมื่อเปรียบเทียบกับ กระดูกไก่, กระดูกหมูเผา, กระดูกไก่เผา จึงทำให้โอกาสแลกเปลี่ยนไอออนของแคดเมียมกับ Ca^{2+} บนผิวของกระดูกได้สูงกว่าการใช้สารปรับปรุงดินชนิดอื่น ดังนั้น การใช้กระดูกหมู 1% w/w เป็นสารปรับปรุงดินจึงมีปริมาณแคดเมียมเคลื่อนย้ายจากดิน ไปสู่

ราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารปรับปรุงดินชนิดอื่น ๆ (ดังตารางที่ 4.8)

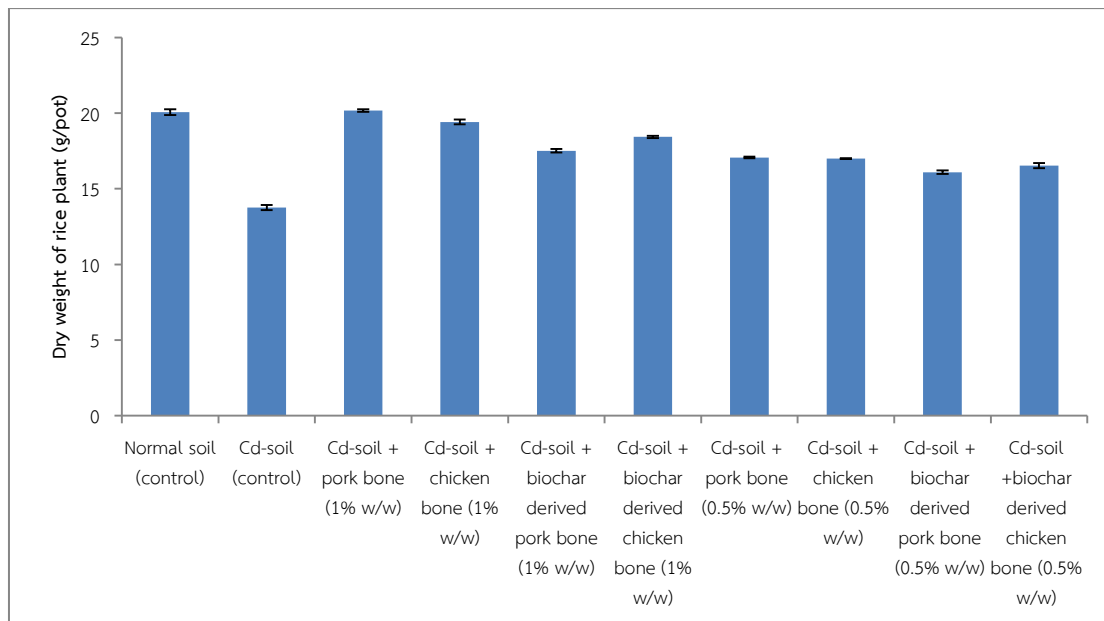
ผลผลิตของข้าวในรูปน้ำหนักแห้งหลังเก็บเกี่ยว

หลังเก็บเกี่ยวข้าว 90 วัน การทดลองได้ ชั่งน้ำหนักแห้ง (dry weight) ของต้นข้าว เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของต้นข้าวเมื่อใช้เงื่อนไขการทดลองต่างกันในการเติมในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.9 ซึ่งจากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.9 พบว่า น้ำหนักของต้นข้าว (dry weight) เมื่อใช้ กระดูกหมู (pork bone) 1%w/w เติมในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าว จะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 20.17 ± 0.08 กรัมต่อกระถาง ซึ่งปริมาณน้ำหนักแห้งของต้นข้าว เมื่อกระดูกหมู (pork bone) 1%w/w เป็นสารปรับปรุงดินจะมีน้ำหนักสูงกว่าเงื่อนไขการทดลองที่ใส่สารปรับปรุงดินชนิดอื่น ๆ และการปลูกข้าวที่ปราศจากการใส่สารปรับปรุงดิน (Cd-soil) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (significant) ($p < 0.05$) โดยน้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่ปราศจากการใส่สารปรับปรุงดิน มีค่าเพียง 13.75 ± 0.17 กรัม/กระถาง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เศษกระดูกหมู 1 %w/w เป็นวัสดุปรับปรุงดิน น้ำหนักแห้งหลังจากเก็บเกี่ยวของพืชใกล้เคียงกับการปลูกข้าวในดินที่ปราศจากการปนเปื้อนแคดเมียม (Normal soil) จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงว่าการใช้กระดูกหมูเป็นวัสดุปรับปรุงดินนอกจากมีศักยภาพลดการสะสมของแคดเมียมในข้าวแล้วยังทำให้เพิ่มการเจริญเติบโตของต้นข้าวได้อีกด้วย

ตารางที่ 4.11 น้ำหนักแห้ง (dry weight) ของต้นข้าวหลังเก็บเกี่ยว 90 วัน

เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ	น้ำหนักของต้นข้าว (dry weight, g/pot)
Normal soil (control)	20.05 ± 0.18^a
Cd-soil (control)	13.75 ± 0.17^b
Cd-soil + pork bone (1%w/w)	20.17 ± 0.08^c
Cd-soil + chicken bone (1% w/w)	19.41 ± 0.15^d
Cd-soil + biochar derived from pork bone (1% w/w)	17.50 ± 0.11^e
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (1% w/w)	18.42 ± 0.07^f
Cd-soil + pork bone (0.5 %w/w)	17.06 ± 0.06^g
Cd-soil + chicken bone (0.5%w/w)	16.99 ± 0.01^h
Cd-soil + biochar derived from pork bone (0.5%w/w)	16.09 ± 0.11^i
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (0.5%w/w)	16.53 ± 0.17^j

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จำแนกโดย Duncan multiple range test



ภาพที่ 4.9 น้ำหนักแห้ง (dry weight) ของต้นข้าวหลังเก็บเกี่ยว 90 วัน

ผลของแคลเซียมต่อปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าว

แคลเซียมจัดเป็นธาตุที่จำเป็นต่อพืชและมีบทบาทที่สำคัญในพืช เช่น ช่วยในการสร้างเซลล์และโครงสร้างของเซลล์ของพืช ช่วยให้เซลล์ติดต่อกัน และจะช่วยเชื่อมผนังเซลล์ และให้เป็นรูปร่าง (Cho et al., 2012) และเมื่อพืชขาดแคลเซียมใบจะบิดเบี้ยว งอ ใบเหลือง (Schmitz-Eiber et al., 2002; Cho et al., 2012) และถ้าพืชอยู่ในระยะออกดอก ติดผล ตาดอกและแฉะกลีบดอกจะไม่พัฒนาดอกและผลจะร่วง

ผลของแคลเซียมที่สะสมในราก ลำต้น เปลือก และ เมล็ด แสดงดังตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.10 จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณแคลเซียมจะสูงขึ้นเมื่อใช้วัสดุปรับปรุงดินเมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกข้าวในดินที่ปราศจากการเติมสารปรับปรุงดิน (Cd-soil) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ กระดูกหมู (pork bone) 1%w/w เป็นสารปรับปรุงดิน จะมีปริมาณแคลเซียมในราก ลำต้น เปลือก เมล็ด สูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุปรับปรุงดินชนิดอื่น ๆ ทั้งนี้ อาจเนื่องจากในกระดูกหมูจะมีปริมาณองค์ประกอบของ CaO สูงถึง 62.5 % (ตารางที่ 4.1) และจากตารางที่ 4.9 การทดสอบการละลาย แคลเซียมในน้ำปราศจากอิออน (DI) พบว่ามีปริมาณแคลเซียมละลายออกมา สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ กระดูกไก่ กระดูกไก่เผา และกระดูกหมูเผา

ดังนั้นเมื่อนำกระดูกหมูไปเป็นวัสดุปรับปรุงดินในการปลูกข้าวจึงมีปริมาณแคลเซียมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดสูง โดยเมื่อใช้ กระดูกหมู (pork bone) 1%w/w เติมในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าวจะมีปริมาณแคลเซียมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ด มีค่าเท่ากับ 21071.70 ± 161.10 , 8099.79 ± 1.47 , 3617.46 ± 29.26 , $373.83.15 \pm 54.6$ mg Ca /kg dry weight แต่ในทางตรงกันข้าม พบว่าปริมาณของแคดเมียมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดของข้าว เมื่อเติมกระดูกหมู (pork bone) 1%w/w จะมีปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของข้าว น้อยกว่าเมื่อ

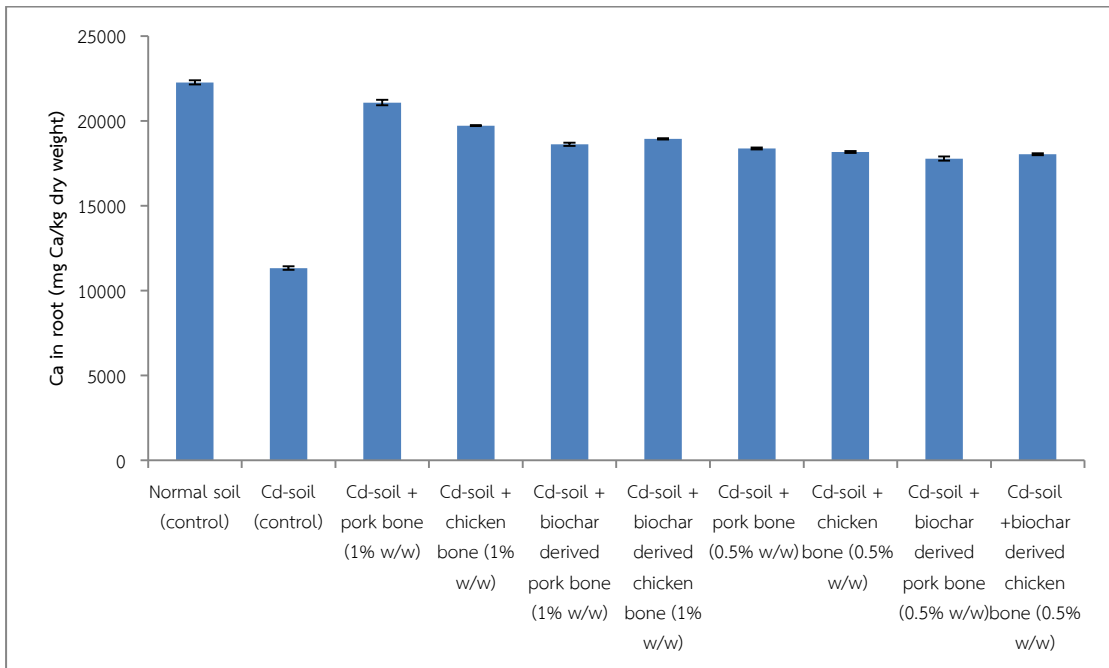
เปรียบเทียบกับการใช้วัสดุปรับปรุงดินอื่น ๆ และปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีค่าไม่เกินมาตรฐานของ Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) (ตารางที่ 4.8 ภาพที่ 4.7) แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวจะแปรผกผันกับปริมาณแคดเมียมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ด แสดงให้เห็นว่า แคดเมียมน่าจะช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมในต้นข้าว โดยปริมาณแคดเมียมจึงลดลงเมื่อมีปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้นในต้นข้าว แคดเมียมอ็อกไซด์และแคดเมียมอ็อกไซด์จับเข้าในเซลล์ของพืช (Tian et al., 2011 : Cho, et al, 2012) นอกจากนี้ Lu et al. (2010) ยังได้ศึกษาพบว่า ปริมาณแคดเมียมจะช่วยลดปริมาณแคดเมียมที่สะสมในลำต้นของ *S. alfredii*

การทดลองปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมเมื่อใช้กระดูกหมู 1 % w/w ปริมาณแคดเมียมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ด มีค่าสูงกว่าการใช้วัสดุปรับปรุงดินชนิดอื่นและไม่ใช้วัสดุปรับปรุงดิน (Cd-soil control) ทั้งนี้เป็นไปได้ว่า กระดูกหมูมีองค์ประกอบของแคดเมียมสูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ และสามารถละลายออกสู่ดินได้ดังนั้น แคดเมียมอ็อกไซด์ในสวนราก ลำต้น เปลือกและเมล็ดจึงมีปริมาณแคดเมียมสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นเนื่องจากแคดเมียมอ็อกไซด์สามารถแย่งจับกับแคดเมียมอ็อกไซด์ที่เข้ามาในต้นข้าวได้ทำให้แคดเมียมในต้นข้าวลดลง (Suksabye et al., 2016) เมื่อใช้กระดูกหมู

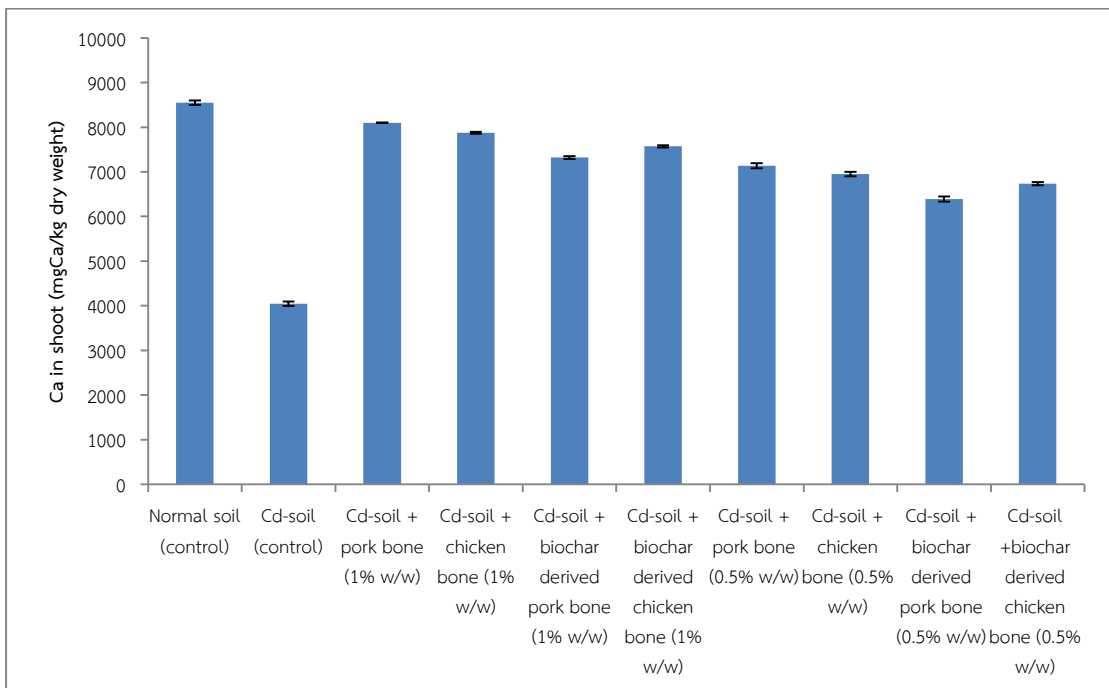
ตารางที่ 4.12 ปริมาณแคลเซียมที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวหลังเก็บเกี่ยวข้าว 90 วัน

เงื่อนไขการทดลอง	ปริมาณแคลเซียม (mg Ca/kg dry weight)			
	ราก	ลำต้น	เปลือก	เมล็ด
Normal soil (control)	22263.11±125.54 ^a	8548.08±49.06 ^a	4153.22±50.03 ^a	441.13±25.27 ^a
Cd-soil (control)	11323.05±103.33 ^b	4043.19±48.95 ^b	2096.80±6.54 ^b	220.45±10.22 ^b
Cd-soil + pork bone (1%w/w)	21071.70±161.10 ^c	8099.79±1.47 ^c	3617.46±29.26 ^c	373.83±5.46 ^c
Cd-soil + chicken bone (1% w/w)	19716.81±28.88 ^d	7876.02±22.42 ^d	3482.16±27.18 ^d	358.62±0.75 ^d
Cd-soil + biochar derived from pork bone (1% w/w)	18615.37±99.44 ^e	7320.24±34.64 ^e	3185.50±23.73 ^e	328.31±1.41 ^e
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (1% w/w)	18938.72±29.51 ^f	7570.19±26.58 ^f	3204.12±6.94 ^f	336.56±1.67 ^f
Cd-soil + pork bone (0.5%w/w)	18371.52±57.55 ^g	7136.04±59.34 ^g	2965.51±56.33 ^g	320.38±2.06 ^g
Cd-soil + chicken bone (0.5%w/w)	18163.30±52.93 ^h	6952.38±51.06 ^h	2835.86±55.71 ^h	311.68±3.03 ^h
Cd-soil + biochar derived from pork bone (0.5%w/w)	17774.23±125.44 ⁱ	6390.14±57.55 ⁱ	2453.75±52.26 ⁱ	283.42±4.49 ⁱ
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (0.5%w/w)	18033.39±58.46 ^j	6734.44±32.55 ^j	2698.41±8.23 ^j	296.42±5.13 ^j

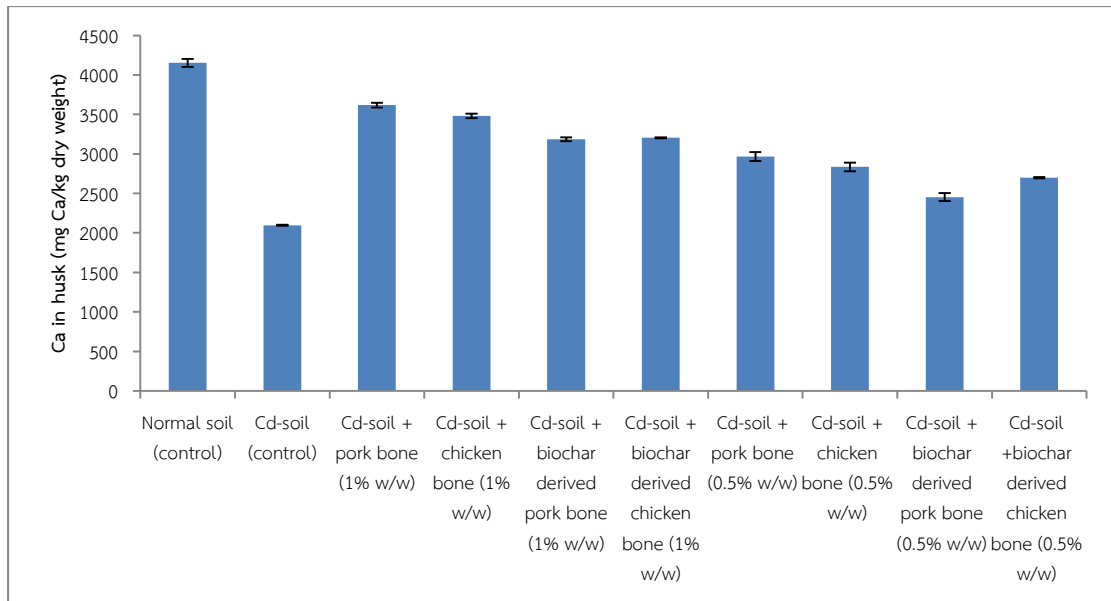
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จำแนกโดย Duncan multiple range test



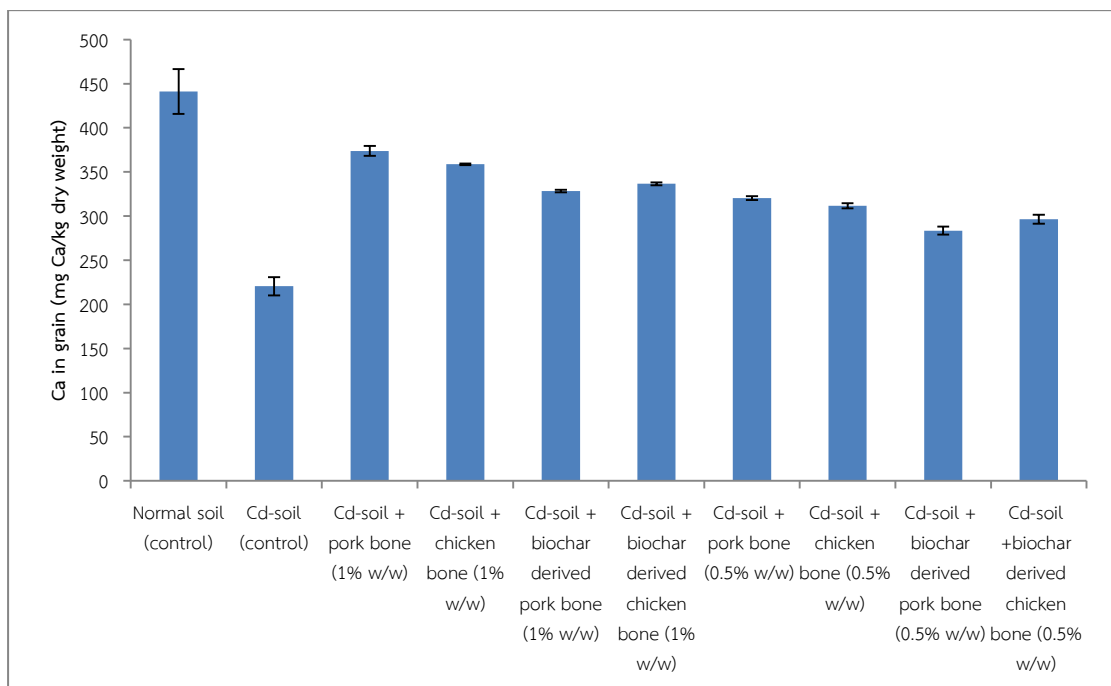
ก) ราก



ข) ลำต้น



ค) เปลือก



ง) เมล็ด

ภาพที่ 4.10 ปริมาณแคลเซียมในราก (ก) ลำต้น (ข) เปลือก (ค) และเมล็ดข้าว (ง) เมื่อปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ หลังเก็บเกี่ยว 90 วัน

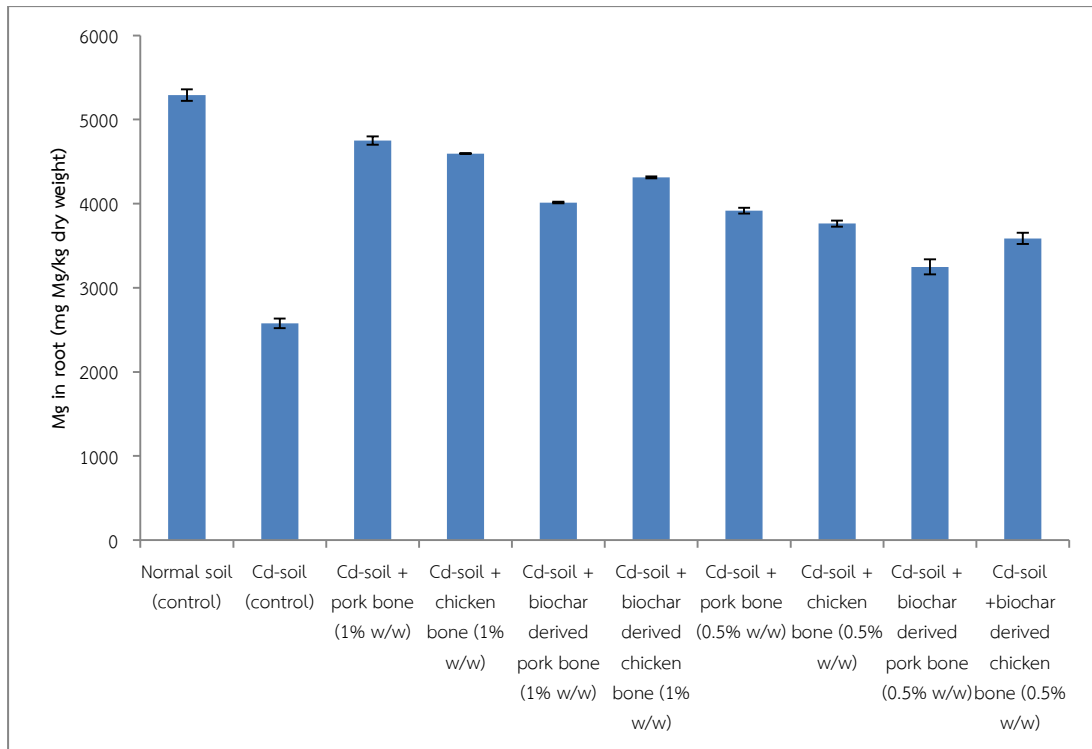
ผลของแมกนีเซียมต่อปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าว

แมกนีเซียมมีความสำคัญกับพืช เช่น เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช เป็นตัวเร่งและส่วนประกอบของเอนไซม์ในพืช ช่วยในการเคลื่อนย้ายอาหารในพืชและเป็นตัวนำพาฟอสฟอรัสในการดูดซึมจากรากไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช (Chou et al, 2011) ซึ่งผลของ แมกนีเซียมต่อปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวแสดงดังตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.11

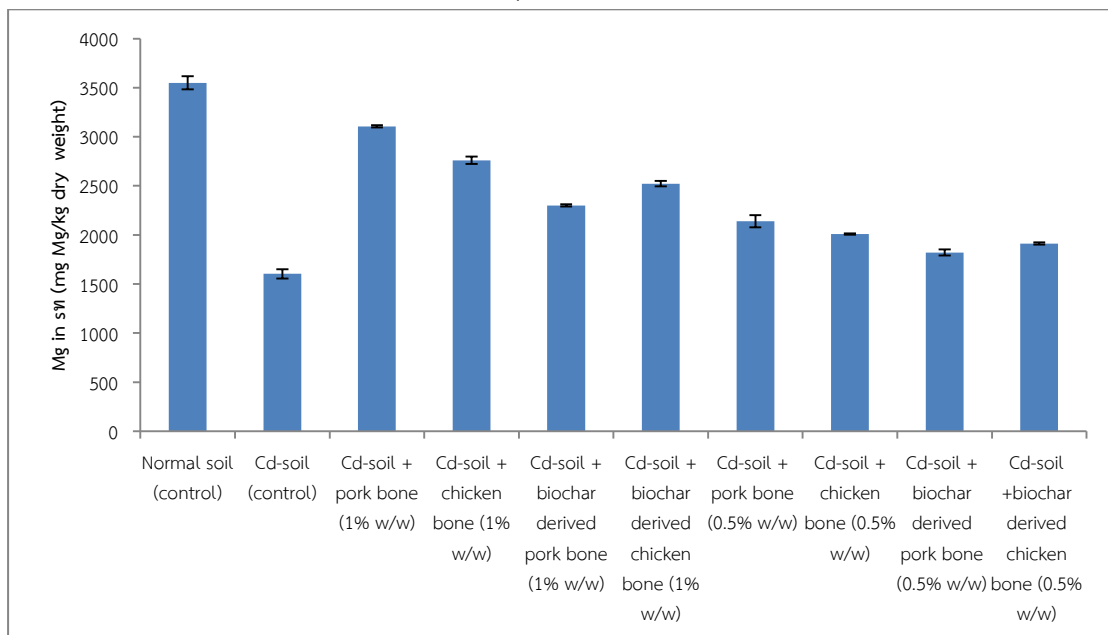
ตารางที่ 4.13 ปริมาณแมกนีเซียมที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวหลังเก็บเกี่ยว 90 วัน

เงื่อนไขการทดลอง	ปริมาณแมกนีเซียม (mg Mg/kg dry weight)			
	ราก	ลำต้น	เปลือก	เมล็ด
Normal soil (control)	5289.54±68.24 ^a	3550.25±66.01	2023.04±29.91	205.85±6.00
Cd-soil (control)	2576.71±56.61 ^b	1731.71±35.34	966.45±13.11	104.34±3.82
Cd-soil + pork bone (1%w/w)	4750.27±49.77 ^c	3106.29±12.05	1795.30±4.88	196.00±0.66
Cd-soil + chicken bone (1% w/w)	4596.16±5.97 ^d	2760.73±37.57	1647.97±11.49	188.25±1.00
Cd-soil + biochar derived from pork bone (1% w/w)	4012.33±9.68 ^e	2300.51±11.55	1343.54±16.98	172.98±0.73
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (1% w/w)	4312.48±12.50 ^f	2522.25±28.37	1497.90±2.44	178.34±1.00
Cd-soil + pork bone (0.5%w/w)	3917.23±33.77 ^g	2139.52±63.20 ^g	1295.43±4.96 ^g	169.38±0.85 ^g
Cd-soil + chicken bone (0.5%w/w)	3763.05±37.04 ^h	2009.49±6.92 ^h	1217.25±29.35 ^h	166.46±0.99 ^h
Cd-soil + biochar derived from pork bone (0.5%w/w)	3248.29±88.50 ⁱ	1820.79±31.00 ⁱ	1009.45±7.93 ⁱ	159.13±0.89 ⁱ
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (0.5%w/w)	3586.89±66.50 ^j	1911.87±11.89 ^j	1191.3±9.51 ^j	162.38±1.10 ^j

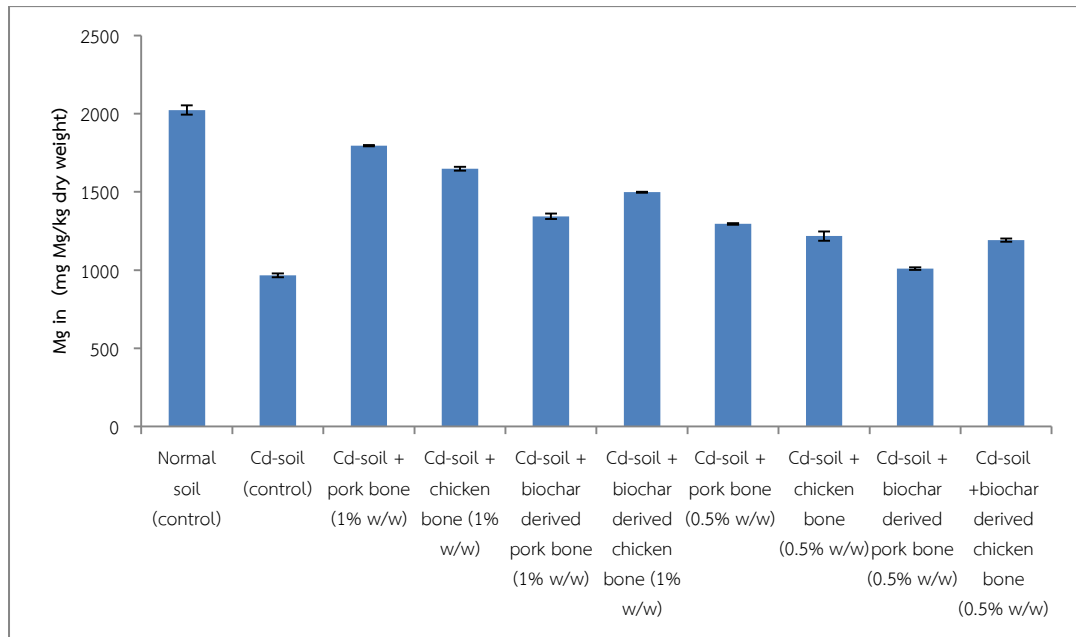
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จำแนกโดย Duncan multiple range test



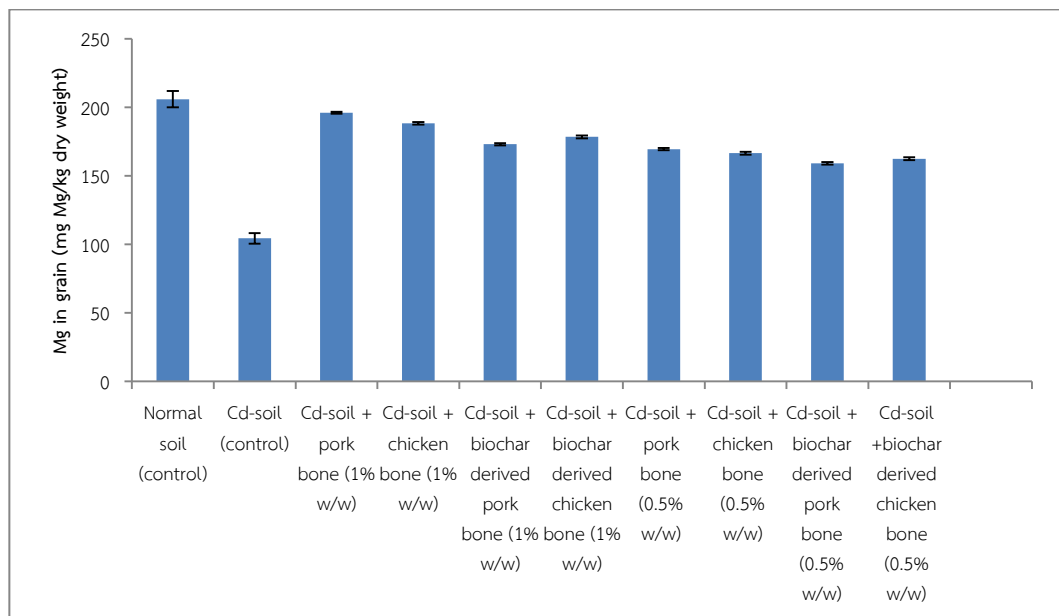
ก) ราก



ข) ลำต้น



ค) เปลือก



ง) เมล็ด

ภาพที่ 4.11 ปริมาณแมงกนีเซียมในราก (ก) ลำต้น (ข) เปลือก (ค) และเมล็ดข้าว (ง) เมื่อปลูกข้าว ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ หลังเก็บเกี่ยว 90 วัน

จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.11 พบว่า การเติมกระดูกหมู (pork bone) 1%w/w ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในการปลูกข้าว จะมีปริมาณแมกนีเซียมในราก ลำต้น เปลือก และ เมล็ด สูงกว่าการใช้วัสดุปรับปรุงดินชนิดอื่น ๆ ตลอดจนไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน (Cd-soil) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการทดสอบการละลาย แคดเมียมในน้ำปราศจากอิออน (DI) ในตารางที่ 4.13 พบว่ามีปริมาณแมกนีเซียม ละลายออกมา สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ กระดูกไก่ กระดูกไก่เผา และกระดูกหมูเผา ดังนั้นเมื่อนำกระดูกหมูไปเป็นวัสดุปรับปรุงดินในการปลูกข้าวจึงมีปริมาณแมกนีเซียมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดสูง ขณะที่ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดเมื่อเติมกระดูกหมู (pork bone) 1%w/w ในการปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมมีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเติมวัสดุปรับปรุงดินเงื่อนไขอื่น ๆ (ตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.7) แสดงว่าแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นจะลดปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว (Nazar et al., 2012) สอดคล้องกับการวิจัยของ Kashem and Kawai (2007) ที่รายงานว่าแมกนีเซียมจะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชเนื่องจากช่วยลดความเป็นพิษจากแคดเมียม โดยประจุ 2+ ของแคดเมียมและแมกนีเซียมจะแย่งกันเพื่อเข้าจับกับเมนเบรนของพืช (Nazar et al., 2012).

ผลของสารปรับปรุงดินต่อค่าพีเอชของดินในการปลูกข้าว

ตารางที่ 4.14 ค่าพีเอชดินในการปลูกข้าวเมื่อใช้วัสดุปรับปรุงดินต่างกัน

เงื่อนไขการทดลอง	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเก็บเกี่ยว 90 วัน
Normal soil (control)	6.95	6.90
Cd-soil (control)	6.98	6.90
Cd-soil + pork bone (1%w/w)	7.04	6.85
Cd-soil + chicken bone (1% w/w)	7.05	6.80
Cd-soil + biochar derived from pork bone (1% w/w)	7.02	6.83
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (1% w/w)	7.10	6.88
Cd-soil + pork bone (0.5%w/w)+	6.95	6.89
Cd-soil + chicken bone (0.5%w/w)	6.91	6.84
Cd-soil + biochar derived from pork bone (0.5%w/w)	6.99	6.80
Cd-soil + biochar derived from chicken bone (0.5%w/w)	6.95	6.81

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อวิเคราะห์พีเอชของดินเริ่มต้น และ วันที่ 90 (เก็บเกี่ยว) พบว่าค่าพีเอชลดลง เล็กน้อยของทุกเงื่อนไขทุกการทดลองซึ่งการที่พีเอชลดลงอาจเนื่องจากการที่พืชดูดโลหะหนักทำให้ปลดปล่อย H^+ จึงทำให้พีเอชลดลง (Sriprapat and Thiravetyan, 2011)

การดูดซับสารละลายแคดเมียมด้วยเศษกระดูกอาหาร และไบโอชาร์ของเศษกระดูก

เป็นการทดลองศึกษากลไกการดูดซับในสารละลายแคดเมียม (ที่สกัดจากดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม (รายละเอียดแสดงในบทที่ 3) ของกระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา (ไบโอชาร์) และกระดูกไก่เผา (ไบโอชาร์) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การดูดซับสารละลายแคดเมียมด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

ตัวดูดซับ	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
กระดูกหมู	96.92±0.089
กระดูกไก่	95.91±0.11
กระดูกไก่เผา	93.65±0.23
กระดูกหมูเผา	90.59±0.11

จากผลการทดลองตารางที่ 4.15 จะเห็นกระดูกหมูมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายแคดเมียมสูงสุด 96.92±0.089 % รองลงมาได้แก่ กระดูกไก่ (95.91±0.11 %) กระดูกไก่เผา (93.65±0.23 %) กระดูกหมูเผา (90.59±0.11%) และ เชื้อ *Bacillus subtilis* มีประสิทธิภาพการดูดซับเพียง 25.68±28 %

ประสิทธิภาพการแยกแคดเมียมออกจากตัวดูดซับ (desorption)

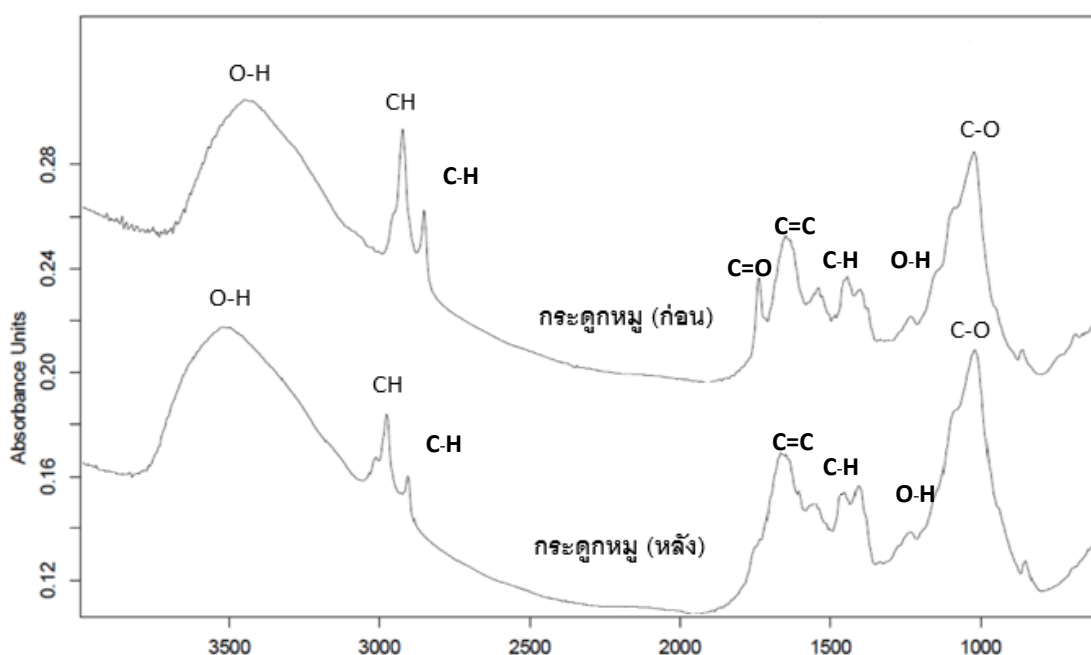
ตารางที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพการแยกแคดเมียม (desorption) ออกจากตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับได้แก่ กระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา กระดูกไก่เผา ซึ่งการทดลองพบว่าเมื่อใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 1 โมลาร์ (M) เป็นสารแยกจะ มีการแยกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.5 โมลาร์ (M) และน้ำ Deionized water (DI) โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้กรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ (M) เป็นสารแยก ประสิทธิภาพการแยกของ กระดูกหมูเผาสูงถึง 77.44% รองลงมาได้แก่ กระดูกไก่ (52.65%) กระดูกหมู (43.48%) และ กระดูกไก่เผา (4.12%) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพการแยกชะแคะเมียมออกจากตัวดูดซับ

Eluents	% desorption
กระดุกไถ่	
Deionized water (DI)	1.3388
1 M H ₂ SO ₄	52.659
0.5 M NaOH	6.9620
กระดุกหมู	
Deionized water (DI)	1.2899
1 M H ₂ SO ₄	43.4891
0.5 M NaOH	2.8894
กระดุกไถ่เผา	
Deionized water (DI)	1.0102
1 M H ₂ SO ₄	4.1271
0.5 M NaOH	1.2341
กระดุกหมูเผา	
Deionized water (DI)	12.3448
1 M H ₂ SO ₄	77.4401
0.5 M NaOH	1.5044

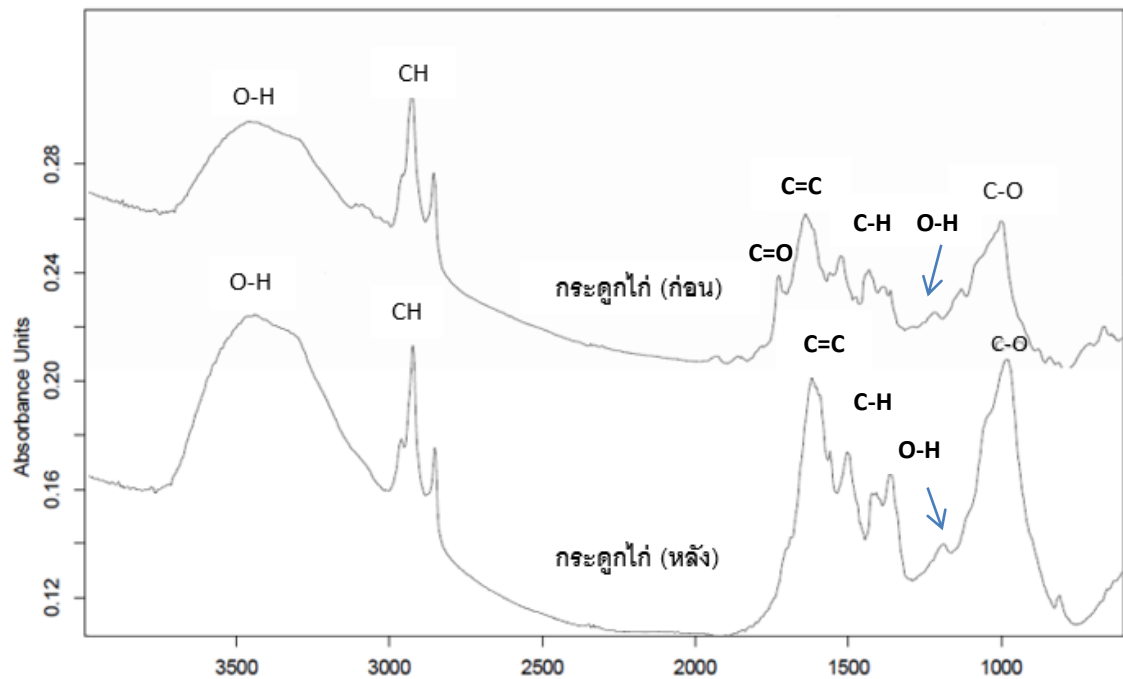
การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของตัวดูดซับด้วย FTIR (Fourier Transform Infrared spectrophotometer (FTIR)

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของกระดูกหมู กระดูกไก่ กระดูกหมูเผา และกระดูกไก่เผา ทั้งก่อนและหลังการดูดซับสารละลายแคดเมียมด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลแสดงดังภาพที่ 4.12 – ภาพที่ 4.15



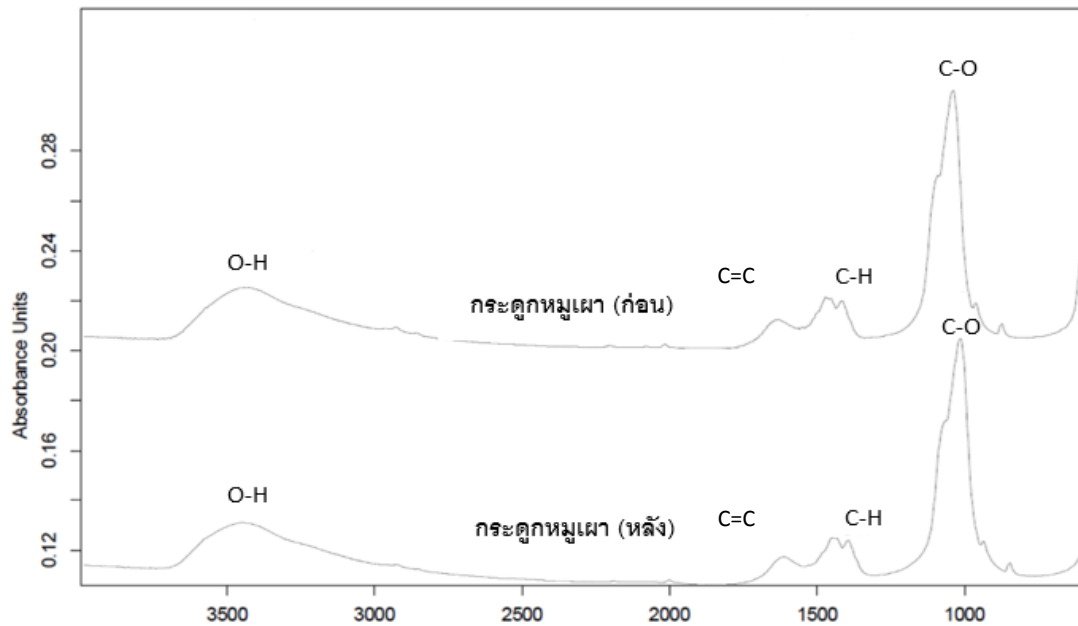
ภาพที่ 4.12 หมู่ฟังก์ชันของกระดูกหมูก่อนดูดซับและหลังดูดซับสารละลายแคดเมียม

จากผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่า หมู่ฟังก์ชันบนผิวของกระดูกหมูก่อนดูดซับสารละลายแคดเมียม ได้แก่ หมู่ ไฮดรอกซิล (O-H) (ตำแหน่งพีคที่ 3449 ต่อเซนติเมตร และ 1241 ต่อเซนติเมตร) หมู่ C-H (ตำแหน่งพีคที่ 2925, 2854, 1452, 1412 ต่อเซนติเมตร) หมู่คาร์บอนิล (C=O) (ตำแหน่งพีคที่ 1743 ต่อเซนติเมตร) หมู่ C=C (ตำแหน่งพีค 1656 ต่อเซนติเมตร และ 1547 ต่อเซนติเมตร) และ หมู่ C-O (ตำแหน่งพีค 1031 ต่อเซนติเมตร) และหลังการดูดซับพบว่า ไม่มีหมู่คาร์บอนิล (C=O) บนผิวของกระดูกหมูแต่หมู่ฟังก์ชันอื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังมีคงเดิม แสดงว่า C=O อาจมีผลต่อการดูดซับสารละลายแคดเมียม



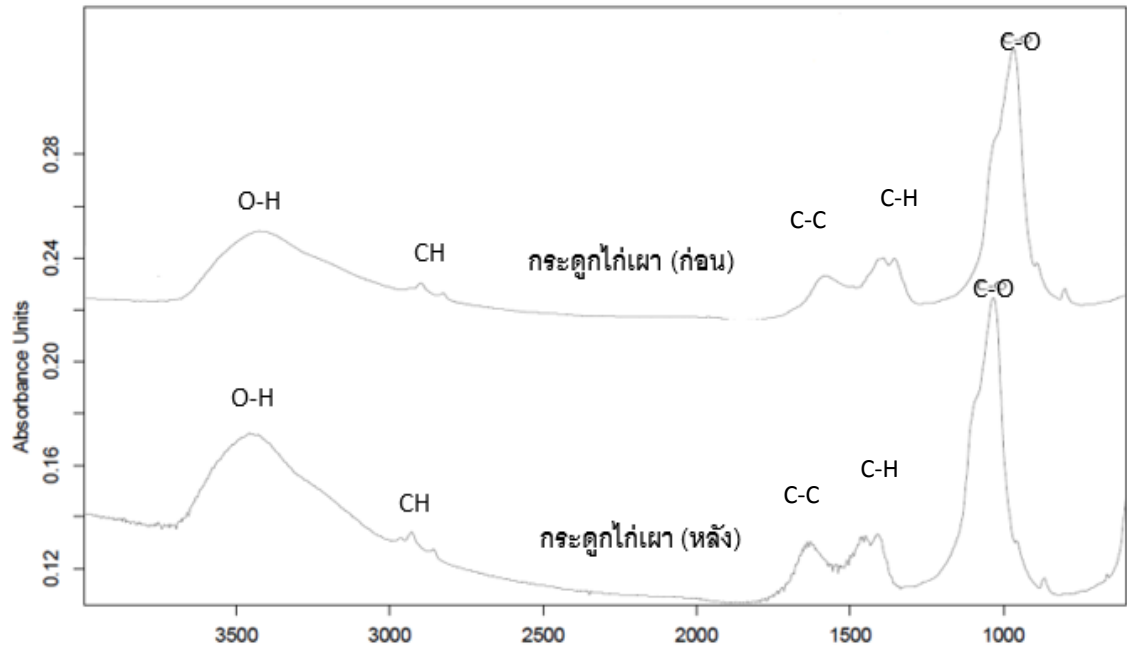
ภาพที่ 4.13 หมู่ฟังก์ชันของผงกระดุกไก่อ่ก่อนดูดซับและหลังดูดซับสารละลายแคดเมียม

จากผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่า หมู่ฟังก์ชันบนผิวของกระดุกหมูก่อนดูดซับสารละลายแคดเมียม ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (O-H) (ตำแหน่งพีคที่ 3451 ต่อเซนติเมตร และ 1241 ต่อเซนติเมตร) หมู่ C-H (ตำแหน่งพีคที่ 2925, 2853, 1453, 1451 ต่อเซนติเมตร) หมู่คาร์บอนิล (C=O) (ตำแหน่งพีคที่ 1743 ต่อเซนติเมตร) หมู่ C=C (ตำแหน่งพีค 1657 ต่อเซนติเมตร และ 1544 ต่อเซนติเมตร) และ หมู่ C-O (ตำแหน่งพีค 1027 ต่อเซนติเมตร) และหลังการดูดซับพบว่า ไม่มีหมู่คาร์บอนิล (C=O) บนผิวของกระดุกหมูแต่หมู่ฟังก์ชันอื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังมีคงเดิม แสดงว่า C=O อาจมีผลต่อการดูดซับสารละลายแคดเมียม



ภาพที่ 4.14 หมู่ฟังก์ชันของผงกระดุกหมูเผาก่อนดูดซับและหลังดูดซับสารละลายแคดเมียม

จากภาพที่ 4.14 พบว่า หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของกระดุกหมูเผา ได้แก่ หมู่ ไฮดรอกซิล (O-H) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งพิกที่ 3424 ต่อเซนติเมตร หมู่ C=C อยู่ในตำแหน่งพิก 1631 ต่อเซนติเมตร หมู่ C-H อยู่ในตำแหน่งพิก 1468 และ 1414 และหมู่ C-O อยู่ในตำแหน่งพิก 1037 ต่อเซนติเมตร และหลังการดูดซับสารละลายแคดเมียม พบว่า ตำแหน่งพิกของหมู่ฟังก์ชันไม่มีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.15 หมู่ฟังก์ชันของผงกระตุกไก่เผาก่อนดูดซับและหลังดูดซับสารละลายแคดเมียม

จากภาพที่ 4.15 พบว่า หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของกระตุกหมูเผา ได้แก่ หมู่ ไฮดรอกซิล (O-H) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งพิกที่ 3441 ต่อเซนติเมตร หมู่ C=C อยู่ในตำแหน่งพิก 1640 ต่อเซนติเมตร หมู่ C-H อยู่ในตำแหน่งพิก 1452 และ 1416 และหมู่ C-O อยู่ในตำแหน่งพิก 1036 ต่อเซนติเมตร และหลังการดูดซับสารละลายแคดเมียม พบว่า ตำแหน่งพิกของหมู่ฟังก์ชันไม่มีการเปลี่ยนแปลง