

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. เปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์หาค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของปุ๋ยหมัก เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของปุ๋ยหมัก

1.1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิก

จากการวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักแต่ละชนิด พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากน้อยแตกต่างกัน โดยปุ๋ยหมักเปลือกยูคาลิปตัสมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงสุดเท่ากับ 33.57% ขณะที่ปุ๋ยหมักจากกากตะกอนน้ำเสีย ฟางข้าว ชานอ้อย และ filter cake มีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดหลั่นกันตามลำดับ (ตารางที่ 6) ส่วนปริมาณกรดฮิวมิกที่ได้จากการละลายปุ๋ยหมักด้วย NaOH แล้วปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกรดนั้น พบว่าสอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุที่วิเคราะห์ได้ (ตารางที่ 6) โดยปุ๋ยหมักที่มีอินทรีย์วัตถุสูงจะมีปริมาณกรดฮิวมิกสูงเช่นเดียวกัน ปุ๋ยหมักแต่ละชนิดมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิกมากน้อยแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักมีคุณสมบัติแตกต่างกัน และมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 6 ปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักจากเปลือกยูคาลิปตัส กากตะกอนน้ำเสีย ฟางข้าว ชานอ้อย และ filter cake

ชนิดปุ๋ยหมัก	อินทรีย์วัตถุ (%)	กรดฮิวมิก (%)
เปลือกยูคาลิปตัส	33.57	5.80
กากตะกอนน้ำเสีย	32.11	5.64
ฟางข้าว	30.94	4.32
ชานอ้อย	26.79	3.95
filter cake	26.77	2.76

1.2 ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC)

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของปุ๋ยหมักแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 7) โดยปุ๋ยหมักเปลือกยูคาลิปตัสมีค่าเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ $58.26 \text{ cmol kg}^{-1}$ รองลงมาคือ ปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสียมีค่าเท่ากับ $52.40 \text{ cmol kg}^{-1}$ ปุ๋ยหมัก filter cake และปุ๋ยหมักฟางข้าว มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เท่ากับ 47.60 และ $46.13 \text{ cmol kg}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่ปุ๋ยหมักชานอ้อยมีค่าเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ $36.44 \text{ cmol kg}^{-1}$

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 7) โดยวิธีของ Black วิเคราะห์ได้สูงสุด เท่ากับ $75.90 \text{ cmol kg}^{-1}$ รองลงมาคือ วิธีของ Faithfull และวิธีของ Hendershot มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ เท่ากับ 50.35 และ $48.43 \text{ cmol kg}^{-1}$ ตามลำดับ วิธีของ AOAC เท่ากับ $43.12 \text{ cmol kg}^{-1}$ ขณะที่วิธีของ Lax วิเคราะห์ได้ต่ำสุด เท่ากับ $23.10 \text{ cmol kg}^{-1}$

ตารางที่ 7 ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธีและปุ๋ยหมักแต่ละชนิด

ชนิดปุ๋ยหมัก	CEC (cmol kg^{-1})					ค่าเฉลี่ย (**)
	AOAC	Faithfull	Black	Hendershot	Lax	
เปลือกยูคาลิปตัส	62.65	71.62	66.17	58.81	32.07	58.26a
กากตะกอนน้ำเสีย	48.66	64.24	69.09	50.67	29.40	52.40b
ฟางข้าว	42.80	45.78	87.02	40.96	14.08	46.13c
ขานอ้อย	28.34	33.96	69.85	36.55	13.51	36.44d
filter cake	33.15	36.18	87.38	55.15	26.45	47.60c
ค่าเฉลี่ย (**)	43.12c	50.35b	75.90a	48.43b	23.10d	

หมายเหตุ ** = แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ข้อมูลในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรร่วมกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 โดยวิธีการแบบ DMRT

จากผลการทดลองพบว่าปุ๋ยหมักเปลือกยูคาลิปตัสมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากปุ๋ยหมักเปลือกยูคาลิปตัสมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิกสูง ส่วนวิธีของ Black วิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้สูงกว่าวิธีการอื่นๆ อาจเนื่องมาจากวิธีของ Black ทำให้ปุ๋ยหมักอิ่มตัวด้วย Na^+ ก่อน แล้วแทนที่ด้วย NH_4^+ ซึ่งเป็น monovalent cation เหมือนกัน โดย NH_4^+ มีอำนาจในการแทนที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับ นงลักษณ์ (2510) ที่เปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนใน 13 ชุดดิน พบว่าการใช้ K^+ ไล่ที่ NH_4^+ และ NH_4^+ ไล่ที่ Na^+ จะวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้สูงกว่าการใช้ Na^+ ไล่ที่ Ca^{2+} ส่วนวิธีของ Faithfull วิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้สูงกว่าวิธีของ AOAC ถึงแม้ว่าจะใช้ Ba^{2+} แทนที่ H^+ เหมือนกัน แต่ความเข้มข้นของ H^+ และ Ba^{2+} แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาตัวแทนที่ แม้ว่าทั้งสองวิธีใช้แคตไอออนที่มีอำนาจในการแทนที่เท่ากัน แต่วิธีของ Faithfull มีปริมาณ Ba^{2+} มากกว่าวิธีของ AOAC กล่าวคือ มีความเข้มข้นสูงกว่านั้นเอง จึงมีความสามารถในการแทนที่ได้สูงกว่า หรืออาจเนื่องมาจากระดับ pH ของสารละลายที่ใช้ในการแทนที่ โดยวิธีของ Faithfull มีการปรับค่า pH ของสารละลายแบเรียมอะซิเตต เท่ากับ 7.00

ขณะที่วิธีของ AOAC ไม่ได้ปรับค่า pH ทำให้วิธีของ Faithfull สามารถไล่ที่ H^+ ออกมาในปริมาณสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Sullivan and Miller (2001) ที่กล่าวว่าระดับ pH ที่เหมาะสมในการวัดค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของปุ๋ยหมักคือ pH เท่ากับ 7.00 เนื่องจากปุ๋ยหมักมีค่า pH อยู่ในช่วง 6-8 ขณะที่วิธีของ Lax วิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากไม่ได้บ่มปุ๋ยหมักจนอิ่มตัวด้วยแคตไอออน อาจทำให้แคตไอออนดูดซับที่ผิวประจุลบได้ไม่มากนัก ค่าที่วิเคราะห์ได้จึงต่ำกว่าวิธีอื่นๆ นอกจากนี้ในขั้นตอนการวิเคราะห์อาจมีการสูญเสียของตะกอนแบเรียมซัลเฟตทำให้วัดค่าได้ต่ำ

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (CV) ของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธี

ชนิดปุ๋ยหมัก	วิธีการวิเคราะห์				
	AOAC	Faithfull	Black	Hendershot	Lax
เปลือกยูคาลิปตัส	1.978	4.724	9.568	5.893	26.266
กากตะกอนน้ำเสีย	1.559	3.448	0.455	4.599	23.238
ฟางข้าว	2.912	2.794	7.795	9.196	22.999
ขานอ้อย	0.990	9.962	4.826	10.283	13.640
filter cake	0.884	3.535	5.999	11.767	14.640
ค่าเฉลี่ย (%CV)	1.665	4.893	5.729	8.347	20.156

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (CV) ของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธี (ตารางที่ 8) พบว่าวิธีของ AOAC มีค่าเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 1.665 ขณะที่วิธีของ Faithfull, Black, Hendershot และ Lax มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามลำดับ เท่ากับ 4.893, 5.729, 8.347 และ 20.156 ตามลำดับ แสดงว่าวิธีของ AOAC มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันที่บ่งบอกถึงวิธีการที่มีความน่าเชื่อถือกว่าวิธีของ Faithfull แม้ว่าจะใช้สารเคมีชนิดเดียวกัน แต่ปริมาณตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ใช้วิเคราะห์แตกต่างกัน โดยวิธีของ AOAC ใช้ตัวอย่าง 2 กรัม ขณะที่วิธีของ Faithfull ใช้ตัวอย่างเพียง 0.2 กรัม ซึ่งน้อยกว่าถึง 10 เท่า อาจเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าวิเคราะห์

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธีกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ตารางที่ 9) พบว่าค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่วิเคราะห์โดยวิธี

ของ AOAC มีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุมากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.950** รองลงมาคือ วิธีของ Faithfull มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.932** ขณะที่วิธีของ Black, Hendershot และ Lax นั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุอย่างมีนัยสำคัญ ปุ๋ยหมักที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงจะมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง อาจเนื่องมาจากฮิวมัสเป็นสารประกอบที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธี กับปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิก

CEC (cmol kg^{-1})	อินทรีย์วัตถุ (%)	กรดฮิวมิก (%)
วิธีของ AOAC	0.950**	0.630*
วิธีของ Faithfull	0.932**	0.693**
วิธีของ Black	-0.395	-0.389
วิธีของ Hendershot	0.419	0.123
วิธีของ Lax	0.446	0.299

หมายเหตุ * และ ** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ 0.01 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธี กับปริมาณกรดฮิวมิก (ตารางที่ 9) พบว่าค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่วิเคราะห์โดยวิธีของ Faithfull มีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดฮิวมิกมากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.693** รองลงมาคือ วิธีของ AOAC มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.630* ขณะที่วิธีของ Black, Hendershot และ Lax นั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดฮิวมิกอย่างมีนัยสำคัญ ปุ๋ยหมักที่มีปริมาณกรดฮิวมิกสูงจะมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง อาจเนื่องมาจากกรดฮิวมิกมี functional group จำพวก carboxyl groups และ phenolic groups สูง

1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธี (ตารางที่ 10) พบว่าวิธีการวิเคราะห์บางวิธีสามารถใช้ทดแทนกันได้ โดยเฉพาะวิธีของ AOAC กับ Faithfull ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงที่สุด เท่ากับ 0.953** รองลงมาคือ วิธีของ Hendershot กับ Lax เท่ากับ 0.707** ขณะที่วิธีของ Black ไม่มีความสัมพันธ์เป็นบวกกับวิธีการวิเคราะห์อื่นๆ

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์แต่ละวิธี

CEC (cmol kg ⁻¹)	AOAC	Faithfull	Black	Hendershot
Faithfull	0.953**			
Black	-0.423	-0.541*		
Hendershot	0.597*	0.546*	-0.077	
Lax	0.597*	0.633*	-0.425	0.707**

หมายเหตุ * และ ** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ 0.01 ตามลำดับ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีของ AOAC และ Faithfull มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (CV) ต่ำที่สุด จัดเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือกว่าวิธีอื่น ๆ ถึงแม้ว่าค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าวิธีของ Black แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (CV) ของวิธี Black และ Hendershot แสดงความแปรปรวนมากกว่า ประกอบกับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่วิเคราะห์ได้โดยวิธีของ Black และ Hendershot ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิกอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่วิธีของ AOAC และ Faithfull มีความสัมพันธ์เป็นบวกกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (0.950** และ 0.932**) และปริมาณกรดฮิวมิก (0.630* และ 0.693**) ตามลำดับ ดังนั้นวิธีของ AOAC และ Faithfull จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของปุ๋ยหมัก แต่หากจะเปรียบเทียบระหว่างวิธีของ AOAC กับวิธีของ Faithfull ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ใช้สารเคมีชนิดเดียวกัน แต่วิธีของ AOAC ใช้ปริมาณตัวอย่างปุ๋ยหมักสำหรับการวิเคราะห์มากกว่าวิธีของ Faithfull ถึง 10 เท่า ทำให้ค่าความแปรปรวนต่ำกว่า ประกอบกับมีวิธีการที่สะดวกและง่าย ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่มีอยู่ทั่วไป ดังนั้นวิธีของ AOAC จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด และเมื่อนำค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของปุ๋ยหมักแต่ละชนิดที่วิเคราะห์โดยวิธีของ AOAC มาหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทำให้ทราบค่าวิเคราะห์ที่แท้จริงของปุ๋ยหมักแต่ละชนิดดังนี้

ค่า CEC ของปุ๋ยหมักเปลือกยูคาลิปตัส	= 62.65 ± 1.24 cmol kg ⁻¹
ค่า CEC ของปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสีย	= 48.66 ± 0.76 cmol kg ⁻¹
ค่า CEC ของปุ๋ยหมักฟางข้าว	= 42.80 ± 1.25 cmol kg ⁻¹
ค่า CEC ของปุ๋ยหมักขาน้อย	= 28.34 ± 0.28 cmol kg ⁻¹
ค่า CEC ของปุ๋ยหมัก filter cake	= 33.15 ± 0.29 cmol kg ⁻¹