

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) การทบทวนวรรณกรรมเทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในถ่านตลอดจนวิธีการเก็บตัวอย่างถ่านในดินที่ความลึกระดับต่างๆ และอิทธิพลของถ่านที่มีคุณสมบัติต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน 2) การทบทวนวรรณกรรมบทบาทของจุลินทรีย์ดินในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างคุณภาพ

#### 2.1 การทบทวนวรรณกรรมเทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในถ่านตลอดจนวิธีการเก็บตัวอย่างถ่านในดินที่ความลึกระดับต่างๆ และอิทธิพลของถ่านที่มีคุณสมบัติต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน

##### 2.1.1 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของถ่านในดิน

ในการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของถ่าน (**charcoal carbon; CC**) ประเด็นหลักที่จะต้องนำมาพิจารณา คือ ระดับความลึกโดยรวมของหน้าตัดดิน และการแบ่งระดับชั้นดินในการเก็บตัวอย่าง (ระดับความลึกของแต่ละชั้นในการเก็บตัวอย่าง เช่น 0-20, 20-40, 40-60 หรือ 0-15, 15-30, 30-60 เซนติเมตร เป็นต้น) ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียด ดังต่อไปนี้

##### 2.1.1.1 ระดับความลึกโดยรวมของหน้าตัดดิน

เช่นเดียวกับ SOC (soil organic carbon) ที่ไม่ได้เพียงสะสมอยู่ที่ระดับหน้าดินเท่านั้น แต่ยังมีการเคลื่อนที่ของถ่านจากหน้าตัดดินลงไปยังดินชั้นล่าง ซึ่งจากการศึกษาของ Sombroek (1966 p. 159) ผู้ซึ่งได้ทำการสำรวจดิน *terra preta* พบว่ามีการสะสมของถ่านถึงระดับความลึก 160 เซนติเมตร หรือมากกว่า ในทำนองเดียวกัน Jobbagy and Jackson (2000) พบว่ามีการสะสมของคาร์บอนที่ระดับความลึก 300 เซนติเมตร ซึ่งเป็นชั้นของหิน เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของถ่านนี้ Glaser et al. (2000) ได้วิจารณ์การที่มีการเคลื่อนที่ของถ่านลงไปตามหน้าตัดดินนั้นอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น กระบวนการชะล้างโดยน้ำลงไปตามหน้าตัดดิน (leaching) กิจกรรมของสัตว์ในดิน เช่น ปลวก และไส้เดือนดิน หรือแม้แต่กิจกรรมของรากพืช ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของถ่านลงไปตามหน้าตัดดินได้

ดังนั้น การที่จะศึกษาว่าในดินมีปริมาณ CC สะสมอยู่ในปริมาณเท่าใด ควรที่จะเก็บตัวอย่างดินที่ดินชั้นล่างด้วย อย่างไรก็ตาม การที่จะศึกษาถึงระดับดินชั้นใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น เป้าหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย และทุนวิจัย เป็นต้น หากเป้าหมายในการวิจัยคือความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพียงอย่างเดียว ผู้วิจัยอาจจะศึกษาเพียงที่ระดับความลึกของเขตรากพืช เกษตร คือ ประมาณ 30 เซนติเมตร หรืออาจจะเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกถึง 100 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นต่อไป เช่น การศึกษาวัฏจักรของคาร์บอน เป็นต้น

ทั้งนี้สิ่งสำคัญที่สุดที่เป็นตัวกำหนดระดับความลึกโดยรวมที่ต้องการศึกษาคือ เป้าหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ระดับความลึกโดยรวมของหน้าตัดดินทำให้ทราบปริมาณ CC ทั้งหมดในความลึกนั้น แต่การที่จะทราบว่า มี CC ในแต่ละระดับความลึกมีปริมาณเป็นเท่าใดนั้น จะต้องมีการแบ่งชั้นดินในการวิเคราะห์ ซึ่งข้อดีและข้อดีของการแบ่งชั้นดินในการเก็บตัวอย่างตามชั้นของดิน (soil horizon) สามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

#### **ข้อดี**

แปลผลได้ง่ายกว่า เนื่องจาก ปริมาณ CC ที่สะสมอยู่ในดิน คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับชั้นดิน (เช่น ชั้น A, B, C เป็นต้น) เนื่องจากแต่ละชั้นดินจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งปริมาณ CC ที่สะสมอยู่ในดินแต่ละชั้นนั้น คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

#### **ข้อด้อย**

เนื่องจากดินชุดหนึ่งๆ (soil series) ในพื้นที่เดียวกัน จะมีความหนาของชั้นดินไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความลาดเอียง โดยเฉพาะในชั้น A เนื่องจากในดินชุดเดียวกันที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน ดินที่อยู่ตำแหน่งต่ำกว่าจะมีชั้น A ที่หนากว่าตำแหน่งที่อยู่สูงขึ้นไป เนื่องจากเกิดกระบวนการกร่อนดิน (erosion) ที่นำพาเอาหน้าดินจากตำแหน่งที่สูงกว่าลงไปสะสมอยู่ยังตำแหน่งที่ต่ำกว่า จากเหตุดังกล่าวจึงทำให้เกิดความยากลำบากในทางปฏิบัติ

### **2.1.1.2 การแบ่งชั้นในการเก็บตัวอย่างตามหน้าตัดดิน**

การแบ่งชั้นในการเก็บตัวอย่างตามหน้าตัดดินของนักวิจัย สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แบบ คือ การแบ่งตามชั้นของดิน (soil horizon) เช่น จากงานวิจัยของ Ota et al. (1992) และการแบ่งชั้นในการเก็บตัวอย่างที่นักวิจัยกำหนดขึ้นเอง เช่น งานวิจัยของ Lichaikul (2004) และ Shrestha and Singh (2007)

ในการเก็บตัวอย่างดินตาม horizon นั้น คาดว่าอาจจะมีเหตุผลมาจากผู้วิจัยต้องการทราบว่าแต่ละ horizon มีถ่านในปริมาณที่มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของแต่ละ horizon อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยถือเอาคุณสมบัติของแต่ละ horizon เป็นพื้นฐาน ส่วนในการแบ่งชั้นดินในการเก็บตัวอย่างโดยที่ผู้วิจัยกำหนดแต่ละระดับความลึกขึ้นเอง อาจมีเหตุผลมาจาก ผู้วิจัยต้องการความสะดวกในการเก็บตัวอย่าง เนื่องจากการเก็บตัวอย่างในแต่ละพื้นที่การใช้ที่ดินที่แตกต่างกันนั้น ความหนาของ horizon จะไม่เท่ากัน ดังนั้นการที่จะเก็บตัวอย่างดินโดยถือเอา horizon เป็นหลัก จะทำให้เกิดความยุ่งยาก เพราะต้องมีการพรรณานหน้าตัดดินทุกๆ ตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่าง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นทำได้ลำบาก

ดังนั้น ในการตัดสินใจในการแบ่งชั้นในการเก็บตัวอย่างดินนั้น แนวทางหนึ่งคือ ผู้วิจัยจะต้องศึกษาและพิจารณาหน้าตัดดินอย่างถี่ถ้วนก่อน ซึ่งข้อมูลหน้าตัดดินนั้นอาจได้มาจากผลงานวิจัยที่เคยมีการศึกษาไว้แล้ว หรือมีการศึกษาหน้าตัดดินก่อนการเก็บตัวอย่าง เพื่อให้มีการกำหนดชั้นดินอย่างเหมาะสม ซึ่งข้อดีและข้อด้อยของการแบ่งชั้นดินเก็บตัวอย่างที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นเองสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

#### ข้อดี

- 1) ทำได้ง่ายกว่า เนื่องจากใช้ระดับความลึกเดียวกันทั้งหมดในการเก็บตัวอย่าง
- 2) เปรียบเทียบปริมาณ CC ระหว่างการใช้ที่ดินได้ เนื่องจากมีระดับความลึกที่เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

#### ข้อด้อย

ในบางครั้งการแบ่งชั้นดินที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นเองนั้น อาจจะไม่สัมพันธ์กับชั้นดิน (horizon) ทำให้แปลผลค่อนข้างยาก

### 2.1.2. การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของถ่านในดิน

ค่าการวิเคราะห์ปริมาณ CC ในปัจจุบันนั้น มีความแปรปรวนสูง โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าการวิเคราะห์มีหลายประการ เช่น ปัจจัยจำกัดความของคาร์บอนในถ่านที่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในขณะเดียวกัน ปัจจัยด้านองค์ประกอบของระบบดินที่เป็นตัวรบกวนการวิเคราะห์ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาปริมาณ CC ได้แก่ ปัจจัยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปัจจัยขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุตัวอย่างในการวิเคราะห์ และปัจจัยการขาดถ่านมาตรฐาน เป็นต้น การเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยดังกล่าว จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพิจารณาและเลือกวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมต่อไป

#### 2.1.2.1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าวิเคราะห์

##### 2.1.2.1(ก) ปัจจัยจำกัดความของคาร์บอนในถ่านที่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในขณะเดียวกัน

สาเหตุประการสำคัญที่ทำให้ค่าการวิเคราะห์ในแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากวิธีการแต่ละวิธีได้วัด CC ในส่วนที่แตกต่างกัน เนื่องจาก CC นั้นประกอบด้วยวัตถุที่คุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่ง Masiello (2004) ได้เสนอแบบจำลองความต่อเนื่องของการเผาไหม้ (combustion continuum model) และอธิบายว่า CC ประกอบด้วยวัตถุที่มีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ระดับ (ภาพที่ 2.1 และ 2.2) คือ

- 1) มวลชีวภาพที่ถูกเผาระดับต้น (slightly charred biomass)

- 2) มวลชีวภาพที่ถูกเผาในระดับปานกลาง (char)
- 3) มวลชีวภาพที่ถูกเผาสมบูรณ์ (charcoal)
- 4) ผงเถ้า (soot)
- 5) ถ่านที่มีคุณลักษณะคล้ายกราไฟต์ (graphitic black carbon; GBC)

เนื่องจากถ่านมีลักษณะของความต่อเนื่องของการเผา (combustion continuum) ทำให้ถ่านมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป จากภาพที่ 2.1 จะเห็นว่ามวลชีวภาพที่ถูกเผาในระดับต้น (slightly charred biomass) จะมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอินทรีย์น้อยที่สุด และถ่านระดับที่มีคุณลักษณะคล้ายกราไฟต์ จะมีโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากวัสดุตั้งเดิมมากที่สุด

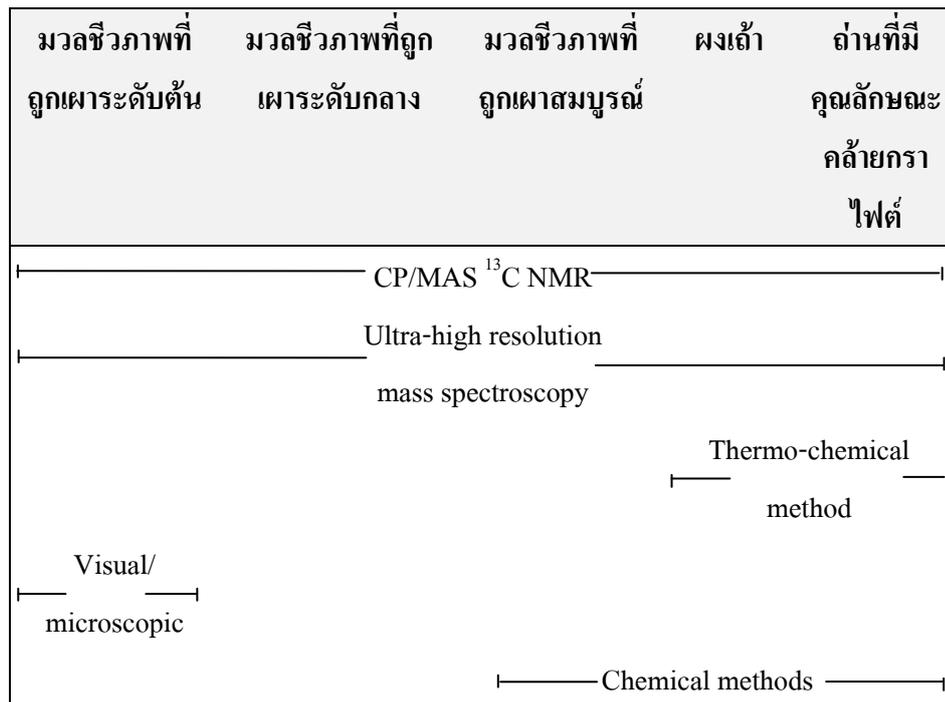
มวลชีวภาพที่มีการเผาไหม้ระดับต้น เป็นถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ความร้อนระดับต่ำ ถ่านจะมีขนาดตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรขึ้นไป โดยส่วนใหญ่แล้วยังมีโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่เป็นโครงสร้างของวัสดุต้นกำเนิด และมีความสามารถในการทำปฏิกิริยามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านระดับอื่นๆ (ภาพที่ 2.1) ซึ่งแหล่งแรกที่มีการสะสมคือ ดิน เนื่องจาก มวลชีวภาพที่มีการเผาไหม้ระดับต้นมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณที่พบถ่านระดับนี้ยังไม่ไกลจากแหล่งกำเนิด กล่าวคือ บริเวณที่พบจะอยู่ที่ระยะทางไม่เกิน 1 เมตรจากแหล่งกำเนิด

ในกรณีของถ่านที่มีคุณภาพคล้ายกราไฟต์ (GBC) เป็นถ่านที่มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอินทรีย์ไปจากวัสดุตั้งเดิมมากที่สุด เนื่องจากได้รับอุณหภูมิสูงจากการเผาไหม้ ทำให้มีขนาดเล็กมากคือ มีหน่วยอยู่ในระดับไมโครเมตร และทำให้มีคุณสมบัติที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา โดยแหล่งแรกที่มีการเก็บสะสมคือ ดินและบรรยากาศ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะสะสมอยู่ในบรรยากาศ ทำให้แหล่งที่พบนี้อยู่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดมาก ซึ่งอาจมีลักษณะทางห่างจากแหล่งกำเนิดหลายพันกิโลเมตรเลยก็ได้

	มวลชีวภาพที่ ถูกเผาระดับต้น	มวลชีวภาพที่ถูกเผา ระดับกลาง	มวลชีวภาพที่ถูก เผาสมบูรณ์	ผงเถ้า	ถ่านที่มี คุณลักษณะ คล้ายกรา ไฟต์
1. อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง	ต่ำ → สูง				
2. ขนาด	มิลลิเมตร หรือใหญ่กว่า		มิลลิเมตร ถึง ไมโครเมตร	ไมโครเมตร	
3. โครงสร้างพืช	มีมาก	พบเป็นโครงสร้างหลัก	พบเพียงเล็กน้อย	ไม่มี	
4. ความสามารถในการทำปฏิกิริยา	สูง → เลี้ยว				
5. แหล่งแรกที่มีการเก็บกัก	ดิน		ดิน และ บรรยากาศ		
6. ระยะทางจากแหล่งกำเนิดของถ่าน	ระยะทางสั้น (เมตร)	ระยะทางสั้น (เมตร-กิโลเมตร)	ระยะทางสั้น (เมตร-กิโลเมตร)	ระยะทางไกล (มากกว่า 1,000 กิโลเมตร)	

**ภาพที่ 2.1** คุณสมบัติของถ่านแต่ละระดับของการเผาไหม้ ของแบบจำลองความต่อเนื่องของการเผาไหม้ (combustion continuum model)  
ที่มา: ดัดแปลงจาก Masiello (2004)

จากสาเหตุที่ถ่านมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ประกอบกับวิธีในการวิเคราะห์หาปริมาณ ได้วัดส่วนของถ่านที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 2.2) เช่น วิธี CP/MAS  $^{13}\text{C}$  NMR ได้วัดส่วนของถ่านตั้งแต่ระดับที่มีการเผาไหม้เพียงเล็กน้อย จนถึงส่วนที่มีลักษณะคล้ายกราไฟต์ แต่ในกรณีการแยกด้วยสายตาหรือแยกภายใต้กล้องจุลทรรศน์ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีสันดาปแห้ง (visual/microscopic) เป็นการหาปริมาณถ่านในส่วนที่ถูกเผาไหม้ระดับต้นเท่านั้น ส่วนวิธีการสันดาปด้วยสารเคมี เช่น การออกซิไดซ์ด้วยไดโครเมต เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณถ่านในส่วนที่มีระดับการเผาไหม้สมบูรณ์ (charcoal) จนถึงส่วนที่มีลักษณะคล้ายกราไฟต์ (ภาพที่ 2.2) จากสาเหตุดังกล่าวนี้ จึงทำให้ค่าวิเคราะห์มีความแตกต่างกันอย่างมาก



ภาพที่ 2.2 ส่วนของถ่านระดับต่างๆ ที่ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Masiello (2004)

### 2.1.2.1 (ข) ปัจจัยด้านองค์ประกอบของระบบดินที่เป็นตัวรบกวนการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ CC โดยใช้วิธีการเดียวกัน โดยนักวิจัยต่างกลุ่มแล้วได้ค่าวิเคราะห์ที่มีความแปรปรวน สาเหตุประการสำคัญ เนื่องจากการกำจัดปัจจัยรบกวนด้านองค์ประกอบของดินที่แตกต่างกัน โดยองค์ประกอบของระบบดินที่ทำให้ค่าวิเคราะห์มีความแปรปรวน คือ โครงสร้างดินหรือเม็ดดิน องค์ประกอบแร่ของดิน และอินทรีย์วัตถุในดิน โดยแต่ละองค์ประกอบสามารถทำให้เกิดความแปรปรวนได้ ดังนี้

1) **โครงสร้างดินหรือเม็ดดิน** โครงสร้างดินจะป้องกัน SOM (soil organic matter) เอาไว้ ด้วยเหตุนี้ การออกซิไดซ์คาร์บอน (carbon; C) ใน SOM ไม่ว่าจะป็นวิธีสันดาปแห้งหรือเปียก ทำได้ไม่หมด เช่น Schmidt et al. (2000) พบว่า เมื่อมีการใช้สารเคมีเพื่อทำการกำจัดอินทรีย์วัตถุออกไป (โดยทั่วไปแล้วจะใช้ 6N hydrochloric acid (HCl) ในการกำจัดส่วนที่เป็นโปรตีน และ 2N trifluoroacetic acid (TFA) ในการกำจัดส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรต) ก่อนการสันดาปเปียก (wet oxidation) หรือสันดาปแห้ง (dry combustion) โดย SOM ส่วนที่ถูกป้องกันจะยังคงเหลือตกค้างอยู่ เมื่อมีการสันดาปเปียกหรือสันดาปแห้ง SOM ที่ยังคงเหลือตกค้างอยู่นี้จะเปลี่ยนไปเป็นถ่านทำให้ค่าการวิเคราะห์ปริมาณ CC สูงขึ้น ในกรณีนี้ Lettens et al. (2007) ได้เสนอว่าควรมีการทำลายโครงสร้างดิน ก่อนที่จะมีการกำจัด SOM ออกไป

2) **องค์ประกอบทางแร่ธาตุของดิน** แร่ในดิน เช่น แร่ดินเหนียว สามารถป้องกัน SOM บางส่วนเอาไว้ ยกตัวอย่างเช่น สารที่ย่อยสลายง่าย เช่น คาร์โบไฮเดรต และ โปรตีน เป็นต้น ถูกคูดยึดอยู่ที่พื้นผิวหรือแทรกตัวอยู่ในหลืบ (interlayer space) ของแร่ในดิน เมื่อนำตัวอย่างดินดังกล่าวมาวิเคราะห์ ไม่ว่าจะด้วยวิธีสันดาปเปียกหรือสันดาปแห้ง โครงสร้างของแร่จะป้องกันสารอินทรีย์เอาไว้ ออกซิเจน ( $O_2$ ) หรือสารที่ทำหน้าที่ไฮโดรไลซิส (hydrolytic agent) จะไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ สารอินทรีย์ดังกล่าวจะอยู่ในส่วนหรือสภาพที่ถูกห่อหุ้มเอาไว้ (enclosed space หรือ capsules) ประกอบกับลักษณะดังกล่าว ทำให้เกิดสภาพพรีดิคซ์และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาcondensation reaction หรือ browning reaction (Gelinis et al., 2001) เปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นถ่านซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์จะได้ค่า CC สูงขึ้น

ดังนั้น ในกรณีนี้ Gelinis et al. (2001) จึงได้ทำการกำจัดแร่ในดินออกไปก่อน โดยใช้ 10% hydrofluoric acid (HF)

3) **คาร์บอเนต (carbonate)** คาร์บอนที่สะสมในดินมีทั้งส่วนที่เป็นอินทรีย์ คาร์บอน เช่น SOM และอนินทรีย์คาร์บอน เช่น คาร์บอเนต เมื่อนำดินที่ไม่มีการกำจัดคาร์บอเนตออกก่อนทำการวิเคราะห์ จะทำให้ได้ค่าที่สูงขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะทำการกำจัดคาร์บอเนตด้วย 1N HCl (Gelinis et al., 2001; Schmidt et al., 2001) อย่างไรก็ตาม คาร์บอเนตจะมีมากในดินต่าง ซึ่งในดินอื่นๆ จะถือว่าไม่มีคาร์บอเนต

#### 2.1.2.1 (ค) ปัจจัยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ในการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน (carbon; C) ในสารอินทรีย์โดยวิธีสันดาปเปียกที่มีไดโครเมต ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์นั้น  $Cr_2O_7^{2-}$  จะทำหน้าที่ในการออกซิไดซ์ C ในสารอินทรีย์ แล้วทำการรีดิวซ์  $Cr_2O_7^{2-}$  ที่เหลือจากกระบวนการออกซิเดชันด้วยตัวรีดิวซ์ ซึ่งส่วนใหญ่คือ เฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) โดยคาดว่าสมมูลของ  $Cr_2O_7^{2-}$  ที่เข้าทำปฏิกิริยากับ C ในสารอินทรีย์จะมีค่าเท่ากับ C ที่ถูกออกซิไดซ์ ซึ่งในการหาปริมาณ CC โดยวิธีสันดาปเปียกนั้น  $Cr_2O_7^{2-}$  จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ C ส่วนที่สามารถถูกย่อยสลายได้ง่าย (labile carbon) โดยคาดว่าส่วนที่เป็น CC จะไม่ถูกออกซิไดซ์ เนื่องจาก CC มีคุณสมบัติเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Gelinis et al., 2001; Simpson and Hatcher, 2004a) โดยปริมาณ CC คำนวณได้จากปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในดิน (ประเมินโดยวิธีสันดาปแห้ง หัวข้อ 2.1.2.2 (ก-2)) ลบด้วย C ในส่วนที่ถูกออกซิไดซ์ด้วย  $Cr_2O_7^{2-}$  แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่า CC จะเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา แต่จากผลการทดลองของ Knicker et al. (2007) พบว่าการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง CC กับ  $Cr_2O_7^{2-}$  เพิ่มขึ้น จะทำให้มีการสูญเสียคาร์บอนจากถ่านเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีเขาได้เลือกใช้ สารผสมระหว่าง 0.1M  $K_2Cr_2O_7$  กับ 2M  $H_2SO_4$  ในปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม

### 2.1.2.1 (ง) ปัจจัยขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุตัวอย่างในการวิเคราะห์

ในการเลือกอุปกรณ์ เช่น ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ในการย่อยและไตเตรตตัวอย่าง (วิธีสันดาปเปียก) ควรเลือกขวดที่มีขนาดเท่ากัน เนื่องจาก ขณะที่ทำการย่อยหรือไตเตรตนั้น ขวดที่มีขนาดเล็กกว่าจะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้ (Skjemstad et al., 2000 อ้างตาม Lettens et al., 2007)

### 2.1.2.1 (จ) ปัจจัยการขาดถ่านมาตรฐาน

Schmidt and Noack (2000) แนะนำว่าในการวิเคราะห์ CC ไม่ว่าจะใช้วิธีใดก็ตาม ในการวิเคราะห์แต่ละครั้งควรมีถ่านมาตรฐาน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้อง (accurate) มากขึ้น

จากเหตุดังกล่าวทำให้เราทราบว่า สาเหตุความแปรปรวนของค่าวิเคราะห์ปริมาณ CC เกิดจากสาเหตุใดบ้าง ซึ่งจะช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงปัจจัยที่จะทำให้ค่าวิเคราะห์มีความแปรปรวน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ CC ในแต่ละวิธีดังต่อไปนี้ มีความถูกต้องมากขึ้น

### 2.1.2.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของถ่านในดิน

ในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในถ่าน (charcoal carbon-CC) สามารถใช้วิธีการที่แตกต่างกันออกไป เช่น การสันดาป (combustion) และวิธีการแยกด้วยมือภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีสันดาป ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การสันดาปเปียก (wet oxidation) และวิธีสันดาปแห้ง (dry combustion) โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป

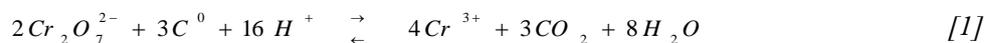
### 2.1.2.2 (ก) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในถ่านด้วยวิธีสันดาป

การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนโดยวิธีการสันดาป (combustion) เป็นการเปลี่ยนรูปของคาร์บอนที่อยู่ในรูปของอินทรีย์คาร์บอนและอนินทรีย์คาร์บอน เช่น คาร์บอนเนต เป็นต้น ให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{CO}_2$  ที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิค gravimetric, titrimetric, volumetric, spectrophotometric หรือ gas chromatographic (คณะกรรมการปรับปรุงคู่มือการวิเคราะห์ดินทางเคมี, 2552) ซึ่งวิธีการสันดาป แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีสันดาปเปียก (wet oxidation) และสันดาปแห้ง (dry combustion) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.2 (ก-1) การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกซิไดซ์ด้วยไดโครเมต (modified dichromate oxidation)

Nelson and Sommers (1982) ได้อธิบายเอาไว้ว่าเป็นเทคนิคการประเมินปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon; OC) โดยการออกซิไดซ์ (oxidized) OC ด้วยสารผสม

ระหว่างโปตัสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) กับกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ที่มีปริมาณมากเกินพอ ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 1



หลังจากทำปฏิกิริยา จะยังคงเหลือ  $Cr_2O_7^{2-}$  ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับ OC หลังจากนั้นรีดิวซ์  $Cr_2O_7^{2-}$  ที่เหลือด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต หรือเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต [ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ] โดย  $Cr_2O_7^{2-}$  และ OC ที่ทำปฏิกิริยากันจะมีปริมาณสมมูล (equivalent) เท่ากัน

อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์หาปริมาณ CC นั้น ไม่สามารถนำเทคนิคการออกซิไดซ์ด้วยไดโครเมต (dichromate oxidation) ในการวัด CC ได้โดยตรง เนื่องจากในดินนอกจากจะมี CC แล้วยังมีคาร์บอนในรูปแบบอื่นๆ ด้วย เช่น SOC และ อนินทรีย์คาร์บอนในดิน (soil inorganic carbon; SIC) เป็นต้น จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์หาปริมาณ CC โดยทางอ้อม

Knicker et al. (2007, 2008) จึงได้เสนอวิธีการประเมินปริมาณ CC กล่าวโดยสรุปคือ ใช้ปริมาณ TOC (total organic carbon) ลบด้วย SOC ค่าที่ได้จะเป็นค่าของ CC (สมการที่ 2)

$$CC = TOC - SOC \quad [2]$$

ปริมาณ TOC วิเคราะห์โดยใช้วิธีการสันดาปแห้ง (dry combustion) เนื่องจากถือว่าการ recovery ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสันดาปแห้ง มีค่าเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ (Letten et al., 2007) ดังนั้น C ที่วิเคราะห์โดยวิธีสันดาปแห้ง จะเป็นค่าของ TOC

ในส่วนของ SOC จะวิเคราะห์ด้วยเทคนิค dichromate oxidation โดยค่า recovery ของเทคนิค dichromate oxidation นั้นขึ้นอยู่กับชนิดการใช้ที่ดิน แร่วิทยา และระดับความลึกตามหน้าตัดดิน (Letten et al., 2007) แต่โดยทั่วไปแล้ว ในการวิเคราะห์ SOC ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยใช้ค่า recovery เท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์

สาเหตุที่ใช้ dichromate oxidation ในการวิเคราะห์หาปริมาณ SOC อื่นที่ไม่ใช่ CC (non-CC) เนื่องจากมีการคาดว่า  $Cr_2O_7^{2-}$  จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ non-CC เช่น อินทรีย์วัตถุที่มีการย่อยสลายบางส่วน (partially organic matter; POM) และสารฮิวมิก (humic substances) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจาก C ในส่วนดังกล่าวสามารถถูก oxidized ด้วย  $Cr_2O_7^{2-}$  ได้

อย่างไรก็ตาม  $Cr_2O_7^{2-}$  จะทำปฏิกิริยาเฉพาะกับ non-CC ส่วนที่ไม่ถูกป้องกันไว้เท่านั้น ซึ่งส่วนที่ถูกป้องกันเอาไว้ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นถ่านในระหว่างที่ทำการวิเคราะห์

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดส่วนที่ถูกป้องกันออกก่อนทำการวิเคราะห์ (Schmidt et al., 2001; Simpson and Hatcher, 2004b)

แต่ในกรณีของ CC นั้นมีคุณสมบัติเป็น C ที่เกี่ยวข้องการทำปฏิกิริยา (Gelinas et al., 2001, Simpson and Hatcher, 2004a) การใช้  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ในการออกซิไดซ์ charcoal-C ค่าการวิเคราะห์จะมีความแปรปรวนอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ในการเผาไหม้ (combustion continuum) (Gelinas et al., 2001, Masiello, 2004) วัสดุดั้งเดิม และขนาด (ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว) ของถ่าน (Skjemstad and T aylor, 1999) และเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  กับ CC (Knicker et al., 2007)

ถึงแม้ว่า CC จะเกี่ยวข้องการทำปฏิกิริยา ไม่ได้หมายความว่าไม่สามารถถูก oxidized ด้วย  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ได้ ซึ่งในขณะที่มีการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  กับ SOC ในดินนั้น CC บางส่วนจะสูญเสียไป (Knicker et al., 2007) เมื่อนำค่าที่วิเคราะห์ได้ไปคำนวณหาปริมาณ CC (สมการที่ 2) จะได้ค่าที่ต่ำลง ดังนั้น Knicker et al. (2008) จึงได้พยายามพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้คำนวณ CC เพื่อให้การวิเคราะห์หา CC ซึ่งพบว่าค่า CC ที่ได้ครอบคลุมตั้งแต่ส่วนที่มีการเผาไหม้ระดับต้น (slightly charred biomass) จนถึงส่วนที่มีคุณลักษณะคล้ายกราไฟต์ (GBC) (อ้างอิง combustion continuum model หัวข้อ 2.1.2.1 (ก)) ซึ่งถือว่าครอบคลุมทุกส่วนของถ่าน

อย่างไรก็ตาม Knicker et al. (2007) เสนอว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณ CC ไม่สามารถใช้วิธี dichromate oxidation เพียงอย่างเดียวได้ จำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นประกอบด้วย เช่น solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy เพื่อให้สามารถแปลผลได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการผสมผสานระหว่างเทคนิค modified dichromate oxidation กับเทคนิคอื่นๆ จะขอล่าไว้ในลำดับต่อไป การวิเคราะห์ปริมาณ CC โดยการประยุกต์ใช้วิธีออกซิไดซ์ด้วยไดโครเมต เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น มีข้อดีและข้อด้อยดังนี้

#### ข้อดี

1. สามารถวิเคราะห์ CC ครอบคลุมตั้งแต่ส่วนที่เป็นมีการเผาไหม้ระดับต้น (slightly charred biomass) จนถึง GBC (ภาพที่ 2.1) ซึ่งครอบคลุม CC มากกว่าวิธีสันดาปแห้ง
2. ใช้เวลาปฏิบัติการน้อยกว่าวิธีสันดาปแห้ง

#### ข้อด้อย

1. ค่าวิเคราะห์จะมีความแปรปรวนมาก หากไม่เลือกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  กับ CC อย่างเหมาะสม
2. ปริมาณ CC ที่วิเคราะห์ได้อาจเพิ่มขึ้นระหว่างปฏิบัติการหากไม่มีการกำจัดส่วนที่ไม่ใช่ถ่านออกก่อนทำการออกซิเดชัน (oxidation)

### 2.1.2.2 (ก-2) สันดาปแห้ง (dry or thermal oxidation)

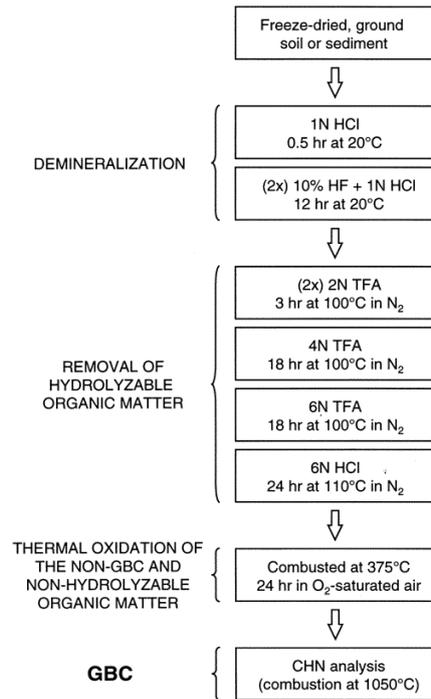
การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนโดยวิธีสันดาปแห้ง (dry combustion) เป็นวิธีการใช้ความร้อนสูง คือ ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ในการออกซิไดซ์อินทรีย์คาร์บอน และเป็นการย่อยคาร์บอนที่อยู่ในตัวอย่าง ที่บรรจุอยู่ในเตาเผาที่มีความทนทานต่อความร้อนสูง เมื่อให้ความร้อนสูงแล้ว คาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบในตัวอย่าง ทั้งที่อยู่ในรูปอินทรีย์คาร์บอนและอนินทรีย์คาร์บอน จะถูกเปลี่ยนให้ไปอยู่ในรูปของ CO<sub>2</sub> แล้วใช้สารที่ทำหน้าที่ในการจับ CO<sub>2</sub> เช่น แอสการ์ไรต์ (Ascarite: HNaO) เป็นต้น เป็นตัวจับ CO<sub>2</sub> แล้วนำตัวจับ CO<sub>2</sub> นั้นไปทำการชั่ง เพื่อหาปริมาณคาร์บอนในตัวอย่างที่ทำกรวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์หาปริมาณ CC โดยวิธีสันดาปแห้ง เป็นการวัดคาร์บอนในส่วนที่มีคุณลักษณะคล้ายกราไฟต์ (graphitic black carbon; GBC) ซึ่งไม่ได้เป็นการวัด CC ทั้ง 5 ระดับ (ดู combustion continuum model ของ Masiello (2004) ในภาพที่ 2.1 และ 2.2 ประกอบ) เนื่องจากในดินหรือตะกอนน้ำพา มีคาร์บอนหลายชนิด ทั้งในรูปของอนินทรีย์และอินทรีย์คาร์บอน นอกจากนี้ในส่วนของอินทรีย์คาร์บอนยังประกอบไปด้วยอินทรีย์คาร์บอนที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ อีกทั้งองค์ประกอบทางแร่วิทยาของดินก็อาจก่อให้เกิด CC ขึ้นมาเพิ่มเติมในระหว่างที่ทำการวิเคราะห์ ดังนั้นการกำจัดปัจจัยรบกวนเหล่านี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้ค่าการวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำที่สุด ดังนั้นในวิธีการของ Gelin et al. (2001) จึงได้กำจัดปัจจัยรบกวนต่างๆ ออกไปก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ GBC ดังแสดงในภาพที่ 2.3

ในขั้นตอนของการกำจัดแร่ในดินหรือในตะกอนน้ำพาออกไป (demineralization) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid; HCl) และไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid; HF) (ภาพที่ 2.3)

หลังจากนั้น จะทำการกำจัดอินทรีย์วัตถุที่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ (hydrolysable of organic matter) ด้วยกรดไตรฟลูออโรอะซิติกที่ปราศจากออกซิเจน (O<sub>2</sub>-free trifluoroacetic acid, TFA: C<sub>2</sub>HF<sub>3</sub>O<sub>2</sub>) และกำจัด CC ส่วนอื่นที่ไม่ใช่ GBC (non-GBC) ด้วยความร้อนที่ 375 องศาเซลเซียส เป็นการขจัด C ที่อาจเปลี่ยนจาก non-GBC มาเป็น GBC และเป็นการป้องกันการเกิด browning reaction ด้วย ซึ่งเป็นการลดปัญหาค่าการวิเคราะห์ที่สูงขึ้น

โดยค่าการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหา %GBC ที่อยู่ในดินหรือในตะกอนน้ำพา และ %GBC ต่อ TOC วิธีการคำนวณแสดงในสมการที่ 3 และ 4



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณ GBC โดยสรุป ของ Gelinas et al. (2001)  
ที่มา: Gelinas et al. (2001)

$$\% \text{GBC} = \left( \frac{\text{measured GBC mass}}{\text{initial dry soil or sediment mass}} \right) \times 100 \quad [3]$$

$$\text{GBC} / \text{TOC} = \left( \frac{\text{measured GBC mass}}{\text{OC mass in the initial dry soil or sediment}} \right) \times 100 \quad [4]$$

เมื่อ

- %GBC คือ เปอร์เซ็นต์ของ GBC ในดินหรือในตะกอน
- TOC คือ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในดินหรือในตะกอน
- %GBC/TOC คือ เปอร์เซ็นต์ของ GBC ต่อ TOC
- measured GBC mass คือ มวลของ GBC ที่วัดได้จากกระบวนการสันดาปแห้งที่ 1050 องศาเซลเซียส (ดูภาพที่ 2.2)
- initial dry soil or sediment mass คือ น้ำหนักดินแห้ง หรือน้ำหนักตะกอนแห้งที่ใช้ในการวิเคราะห์
- OC mass in the initial dry soil or sediment คือ มวลของ OC (organic carbon) ทั้งหมดในดินแห้งหรือในตะกอนแห้ง

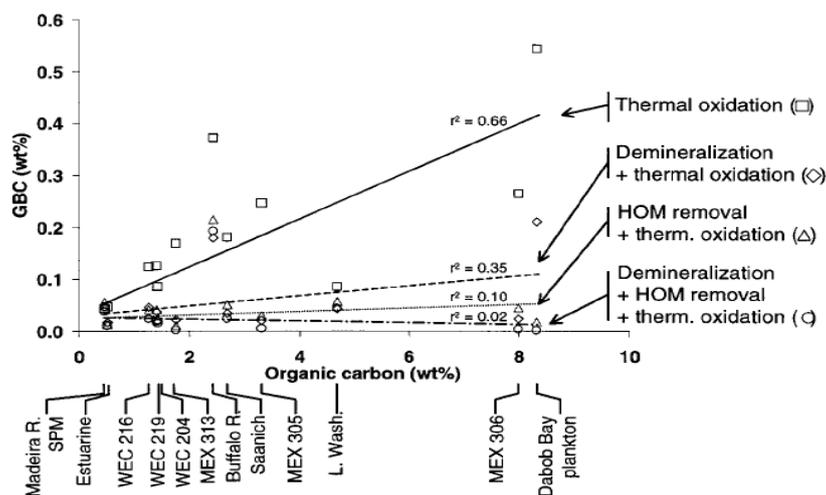
อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ปริมาณ GBC ในวิธีการนี้ มีการใช้เวลามากในการปฏิบัติการ ดังนั้น Gelinas et al. (2001) ได้พยายามลดขั้นตอนการวิเคราะห์ลง (ภาพที่ 2.4) พบว่า มีความจำเป็นต้องกำจัดปัจจัยรบกวนค่าการวิเคราะห์ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.4 โดยปกติแล้ว GBC จะไม่มีความสัมพันธ์กับ OC ในดินหรือในตะกอน เนื่องจาก GBC มีขนาดเล็กมากและส่วนใหญ่แล้วจะมีการแพร่กระจายในอากาศ ดังนั้นบริเวณรอบๆ ที่ แหล่งของกระบวนการเกิด GBC จะต้องมีความเข้มข้นของ GBC ที่ใกล้เคียงกัน ไม่ว่า OC ในดินจะมากหรือน้อย ดังนั้นจึงเป็นไปได้ น้อยมากที่ปริมาณของ GBC จะสัมพันธ์กับ OC กล่าวโดยสรุปคือ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการกำจัดปัจจัยรบกวนค่าการวิเคราะห์ GBC ข้อดีและข้อด้อยของวิธีสันดาปแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น มีดังนี้

### ข้อดี

หากเปรียบเทียบข้อได้เปรียบกับวิธีสันดาปเปียกวิธีนี้จะไม่ครอบคลุมทุกส่วนของถ่าน แต่หากเปรียบเทียบกับการใช้มือแยกแล้ว วิธีสันดาปแห้งเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือมากกว่า เนื่องจากมีการกำจัดปัจจัยรบกวนต่างๆ ออกไปก่อนทำการวิเคราะห์

### ข้อด้อย

1. ใช้เวลาในการปฏิบัติการมาก
2. เนื่องจากค่าวิเคราะห์ครอบคลุมเฉพาะส่วนที่เผา (soot) และ GBC (ภาพที่ 2.1) อาจเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ CC ในดิน วิธีการนี้อาจจะเหมาะสมกับการวิเคราะห์ CC ในตะกอนมากกว่า (Schmidt and Noack, 2000)



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง GBC กับอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนที่มีการกำจัดปัจจัยรบกวนด้วยวิธีต่างๆ (Madeira R., SPM, Estuarine, WEC 216, WEC 219, WEC 204, MEX 313, Buffalo R., Saanich, MEX 305, L. Wash., MEX 306) และในแหล่งตอนทะเล (Dobob Bay plankton)

ที่มา: Gelinas et al. (2001)

### 2.1.2.2 (ข) การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในถ่านโดยการใช้มือแยก

ในการหาปริมาณ CC โดยการใช้มือแยก เป็นวิธีการที่ผู้ปฏิบัติการต้องใช้ประสาทสัมผัส เช่น ตา และการสัมผัสด้วยมือ เป็นต้น ในการจำแนกวัตถุภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งผู้ปฏิบัติการต้องมีความเข้าใจก่อนว่า คุณสมบัติของถ่านนั้นแตกต่างจากวัตถุอื่นๆ อย่างไร เช่น ถ่านจะมีสีดำ และแข็งกว่าวัตถุอื่น เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่เป็นประเภทอะโรมาติกคาร์บอน (aromatic carbon, Knicker et al., 2005) ทำให้ถ่านมีโครงสร้างทางกายภาพที่แข็งแรง เป็นต้น ซึ่งปริมาณ CC ที่วิเคราะห์ได้ ขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้ปฏิบัติการในการจำแนกถ่านออกจากวัตถุอื่นๆ และ CC ที่ได้ เป็น CC ที่อยู่เฉพาะในส่วนที่มีการเผาไหม้เบื้องต้น (slightly charred biomass) และส่วนที่มีการเผาไหม้ปานกลาง (char) เท่านั้น

อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์หาปริมาณ CC โดยการใช้มือแยกนั้น ยังมีผู้ที่พยายามพัฒนาวิธีการวิเคราะห์เช่นกัน เช่น Quénéa et al. (2006) ได้เปรียบเทียบการวิเคราะห์ปริมาณ CC โดยวิธีการแยกด้วยมือภายใต้กล้องจุลทรรศน์ด้วยการสันดาปแห้งในพื้นที่ป่าและพื้นที่เกษตร ในการแยกนั้นได้นำดินมาร้อนผ่านตะแกรงในน้ำขนาด 350 ไมโครเมตร ชิ้นส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จะลอยขึ้น โดยแยกส่วนนี้ออกมา แล้วนำไปแยกส่วนที่เป็น CC ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 40 เท่า โดยคัดเลือกเฉพาะชิ้นส่วนสีดำที่มีขนาดตั้งแต่ 500 เท่าขึ้นไป แล้วนำส่วนที่แยกได้ไปวิเคราะห์ปริมาณ CC ด้วยวิธีสันดาปแห้ง

จากการทดลองนี้พบว่า ปริมาณ CC ที่ใช้วิธีแยกด้วยมือสูงกว่าการใช้วิธีสันดาปแห้ง ที่มีการกำจัดปัจจัยรบกวนออกก่อน ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจาก CC ที่ได้นั้นมาจาก CC ที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดปัจจัยรบกวน ซึ่งประกอบด้วย CC ตั้งแต่ที่เป็น CC ที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้เล็กน้อยจนถึงส่วนที่เป็นถ่าน แต่ในการใช้วิธีสันดาปแห้งนั้นปริมาณ CC นั้นส่วนใหญ่มาจากส่วนที่เป็น GBC ที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร (ตารางที่ 2.1) ข้อดีและข้อด้อยของวิธีการแยกด้วยมือ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นมีดังนี้

#### ข้อดี

1. ทำได้ง่าย

#### ข้อด้อย

1. ค่าวิเคราะห์ที่ได้อาจจะไม่ใช่ CC ทั้งหมด เนื่องจากเป็นการแยก CC ด้วยสายตา
2. ไม่มีการกำจัดปัจจัยรบกวน ทำให้ปริมาณ CC มีค่าสูงมาก (ตารางที่ 2.1)
3. ค่าการวิเคราะห์ปริมาณ CC ที่ได้ไม่ครอบคลุมทุกส่วนของคาร์บอนในถ่าน กล่าวคือ เป็น CC เฉพาะในส่วนที่มีระดับการเผาไหม้ระดับต้น และระดับปานกลางเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ปริมาณ CC ภายใต้อินทรีย์วัตถุและพื้นที่เกษตรกรรม โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีสันดาปแห้งที่มี การกำจัดปัจจัยรบกวนออกก่อน และการแยกด้วยมือ

วิธีวิเคราะห์	ปริมาณ CC (%CC/ TOC)	
	พื้นที่ป่า	พื้นที่เกษตร
สันดาปแห้ง	0.016	0.008
แยกด้วยมือ	4.6	2.5

ที่มา: คัดแปลงจาก Quénéa et al. (2006)

จากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยระหว่างการวิเคราะห์ปริมาณ CC ทั้ง 3 วิธี ทำให้เราทราบว่า วิธีสันดาป (ทั้งสันดาปเปียกและสันดาปแห้ง) นั้นน่าเชื่อถือมากกว่าการแยกด้วยมือ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าวิเคราะห์อาจจะไม่ใช่ส่วนที่เป็นองค์ประกอบของ CC ทั้งหมด เพราะฉะนั้นในการยืนยันว่า ค่าที่วิเคราะห์ได้เป็นองค์ประกอบของ CC อย่างแท้จริง จะต้องมีเทคนิคมาช่วยอธิบาย ซึ่งเทคนิคที่เป็นที่นิยมในการยืนยันองค์ประกอบของ CC คือ เทคนิคคาร์บอน-13 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนสเปกโทรสโกปี

จากการปริศน์วิธีการหาปริมาณคาร์บอนในรูปของถ่านในดิน (soil charcoal carbon) พบว่าในปัจจุบัน มีวิธีในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในถ่านอยู่หลายวิธี เช่น ทัศนวิธี (optical methods) วิธีทางเคมี (chemical methods) และการใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางเคมี (thermal-chemical methods)

ทัศนวิธีเป็นการหาปริมาณคาร์บอนในถ่าน โดยอาศัยของความแตกต่างระหว่างชนิดถ่านที่มีคุณสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์แตกต่างกัน แบ่งเป็น 2 วิธี คือ เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (microscopic techniques) และเทคนิคการส่องผ่านและการสะท้อน (transmission/reflection techniques) (Poot et al., 2009) ในขณะที่วิธีการวิเคราะห์ด้วยความร้อน เป็นการอาศัยความแตกต่างของความร้อนในการแยกสาร เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดินแต่ละชนิดจะมีความเสถียรที่ต่างกัน เช่น การวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Makoto et al. (in press) ที่คัดแปลงมาจากวิธี CTO-375 (chemothermal oxidation methods) โดยใช้สูตร

$$\begin{aligned} \text{นน. ถ่านในดิน} &= (\text{นน. ดิน} + \text{นน. อินทรีย์วัตถุ} + \text{นน. ถ่าน}) - (\text{นน. ดิน} + \text{นน. อินทรีย์วัตถุ}) \\ &= \text{นน. ดินเริ่มต้น} - (\text{นน. หลังเผาที่ } 450^{\circ}\text{C} + (\text{นน. เริ่มต้น} - \text{นน. หลังเผาที่ } 375^{\circ}\text{C})) \end{aligned}$$

สูตรด้านบนตั้งอยู่บนฐานคิดที่ว่า 99.85% ของอินทรีย์วัตถุในดิน (ที่ไม่ใช่ถ่าน) จะระเหยไปเมื่อได้รับอุณหภูมิ 375°C และที่อุณหภูมิ 450°C จะทำให้ถ่านสูญเสียไปและยังคงเหลือถ่านในดินน้อยกว่า 10%

ส่วนวิธีการใช้ความร้อนกับวิธีทางเคมี (thermal-chemical methods) เป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยากเพราะมีขั้นตอนมาก โดยจะต้องกำจัดอินทรีย์คาร์บอนด้วยสารเคมีก่อน (Song et al., 2002) แล้วใช้ความร้อนในการแยกส่วนที่เป็นถ่านออกจากอินทรีย์วัตถุที่ไม่ใช่ถ่าน (Kuhlbusch, 1995; Nguyen et al., 2004) ในขณะที่วิธีการทางเคมี จะเป็นการใช้สารเคมีในการแยกถ่านออกจากอินทรีย์วัตถุชนิดอื่น (Song et al., 2002; Masiello, 2004; Kurth et al., 2006) แล้ววิเคราะห์ปริมาณถ่านที่ยังเหลือในดินด้วยเทคนิคพิเศษ เช่น การใช้ตัวชี้ระดับโมเลกุล (molecular markers) เช่น benzenepolycarboxylic acids (BPDA) (Glaser et al., 1998; Elias et al., 2001; Knicker et al., 2007) หรืออาจเป็นการใช้เครื่องมือพิเศษ เช่น nuclear magnetic resonance spectroscopy เป็นต้น (Smernik et al., 2000; Simpson and Hatcher, 2004a,b)

อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าว เป็นวิธีการที่ใช้เวลามาก และการวิเคราะห์ที่มีขั้นตอนดำเนินการมากจะให้สูญเสียถ่านบางส่วนในระหว่างขั้นตอนวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ค่าวิเคราะห์ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ยังมีการค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงด้วย

วิธีการที่จัดว่าน่าสนใจ เป็นวิธีการที่เรียกว่า  $H_2O/weak-HNO_3$  digestion method ซึ่งเสนอโดย Kurth et al. (2006) ซึ่งเป็นวิธีในกลุ่มของการใช้สารเคมี วิธีการนี้เป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจาก เป็นวิธีที่กำจัดวัสดุที่ไม่ใช่ถ่านออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีค่าความแปรปรวนของค่า charcoal C recovery ต่ำมาก นั่นหมายความว่ามีความสามารถในการทำซ้ำสูง (high repeatability) ตลอดจนเป็นวิธีการที่ไม่สลับซับซ้อนและวิเคราะห์ได้รวดเร็ว

### 2.1.2.3 การทดสอบความเป็นถ่านจากค่าวิเคราะห์ที่ได้รับ:

**การใช้เทคนิคคาร์บอน-13 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนสเปกโทรสโกปี เพื่อช่วยยืนยันคาร์บอนดำที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสันดาปเปียกและสันดาปแห้ง**

คาร์บอน-13 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนสเปกโทรสโกปี ( $^{13}C$  nuclear magnetic resonance spectroscopy หรือ  $^{13}C$  NMR spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ โดยอาศัยความสามารถในการสปิน (spin) ของนิวเคลียสของอะตอมธาตุแต่ละชนิด ในธาตุชนิดหนึ่งๆ คุณสมบัติการสปินไม่ได้เกิดขึ้นในทุกๆ ไอโซโทป กล่าวคือ ไอโซโทปที่สามารถมีคุณสมบัติการสปินนั้นจะต้องมีมวลอะตอม (atomic mass) เป็นเลขคี่เท่านั้น (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 แสดงเลขนิวเคลียร์สปินและสภาวะของนิวเคลียร์สปิน โดยไอโซโทปของธาตุที่มีเลขนิวเคลียร์สปินเป็น 0 จะไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR spectroscopy ได้ และไอโซโทปที่มีเลขนิวเคลียร์สปินเป็น 1/2 จะให้ค่าการสปินได้ดีที่สุด นั่นหมายความว่าสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR spectroscopy ได้ดีที่สุด โดยในการหาองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์นิยมใช้  $^1H$  และ  $^{13}C$  เนื่องจากธาตุทั้งสองเป็นธาตุหลักของสารอินทรีย์ (สมเดช, 2534)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างไอโซโทป และเลขนิวเคลียร์สปินของธาตุชนิดต่างๆ

ธาตุ	$^1_1\text{H}$	$^2_1\text{H}$	$^{12}_6\text{C}$	$^{13}_6\text{C}$	$^{14}_7\text{N}$	$^{16}_8\text{O}$	$^{17}_8\text{O}$	$^{19}_9\text{F}$	$^{31}_{15}\text{P}$	$^{37}_{17}\text{Cl}$
เลขนิวเคลียร์สปิน (I)	1/2	1	0	1/2	1	0	5/2	1/2	1/2	3/2
สภาวะของนิวเคลียร์ สปิน (2I + 1)	2	3	0	2	3	0	6	2	2	4

ที่มา: สมเดช (2543)

วัตถุประสงค์ในการนำเทคนิค  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy มาใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านในดินนั้น เพื่อต้องการทราบองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของถ่านและเพื่อยืนยันว่าปริมาณ C ที่วัดได้จากถ่าน ทั้งจากการสันดาปเปียกและสันดาปแห้งนั้น เป็น CC ในส่วนที่ต้องการวิเคราะห์อย่างแท้จริง เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของ CC จะเป็นสารประกอบพวกอะโรมาติก (aromatic compound) (Knicker et al., 2005) ที่มีช่วง spectrum อยู่ระหว่าง 110-145 ppm (Simpson and Hatcher, 2004b) ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงสันนิษฐานว่าช่วง spectrum ดังกล่าวอาจจะเป็นองค์ประกอบทางเคมีของ CC ซึ่งช่วง spectrum ของสารประกอบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3 โดยสารประกอบอินทรีย์ที่สำคัญของ CC คือ aryl C

ตารางที่ 2.3  $^{13}\text{C}$  CPMAS NMR spectra ของสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ

		Chemical shift (ppm)	คำอธิบาย
Alkyl C		0-45	lipids, waxes, cutin, suberin และ aliphatic อื่นๆ, biomacromolecules
O-alkyl C		45-110	polysaccharides, methoxyl groups in linin, N-alkyl C derived from proteins
Aryl C	C substituted	110-140	aromatic C-C and C-H of lignin, CC and other aromatic compounds
	O substituted	140-160	aromatic C-O and C-N of lignin, CC and other aromatic compounds
Carboxyl C		160-220	carboxyl, carbonyl, amide

ที่มา: Rumpel et al. (2006)

อย่างไรก็ตาม นอกจากสารอะโรมาติกจะเป็นองค์ประกอบของถ่านแล้ว ยังเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากต่างๆ เช่น ลิกนิน และ โพลีฟีนอล เป็นต้น (ตารางที่ 2.3) ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้จะกำจัดออกไปได้ยากมาก ถึงแม้จะมีการใช้สารเคมีต่างๆ เช่น TFA หรือ HCl ก็ตาม (Simpson and Hatcher, 2004b) อีกทั้งสารประกอบอินทรีย์ทั้งสองชนิดนั้น

สามารถเกิด browning reaction กลายเป็นถ่านในระหว่างที่ทำการวิเคราะห์ได้ (Gelinas et al., 2001) ดังนั้นวิธีการกำจัดลิกนินและโพลีฟีนอลออกก่อนการวิเคราะห์ CC จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

นอกจากนี้ การใช้  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy ในการยืนยันความเป็นถ่านนั้น จะต้องกำจัดปัจจัยรบกวนออกไปเพื่อที่จะทำให้ค่าสเปกตรัม (spectrum) ที่แสดงออกมาเป็น CC ที่แท้จริง โดย Gonçalves et al. (2003) ได้ใช้ 10% HF ในการกำจัดเหล็กออกไซด์ (iron oxide) ซึ่งเป็นแร่ในดินออกไป และเพื่อให้ SOC มีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจาก iron oxide จะไปรบกวน spectrum ที่แสดงออกมา และเทคนิค NMR spectroscopy จะให้ค่าที่ไม่เที่ยงตรงหากความชื้นของ SOC ต่ำ จากการทดลองนี้พบว่า การใช้ 10% HF ในการกำจัดเหล็กออกไซด์และเพิ่มความเข้มข้นของ SOM ทำให้ค่าสัญญาณ (signal) ของสารประกอบในตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ดีพอที่จะนำไปแปลผลได้

กล่าวโดยสรุปคือ ถึงแม้การพัฒนาเทคนิค  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ CC จะเป็นที่ยอมรับมากแล้ว แต่ spectrum ของ aryl C ที่วัดได้นั้นอาจไม่ได้มาจาก CC ทั้งหมด นั่นก็หมายความว่า CC ที่วิเคราะห์ทั้งจากวิธีสันดาปเปียกและสันดาปแห้ง อาจไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ให้เป็นมาตรฐาน โดย Schmidt et al. (2001) ได้แนะนำว่า ควรมีถ่านมาตรฐานที่ใช้ร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการ และเปรียบเทียบดินหรือตะกอนจากหลายแหล่งและวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ โดยห้องปฏิบัติการต่างๆ ควรร่วมมือกันเพื่อเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ โดยมีการใช้ตัวอย่างและวิธีการเดียวกัน แล้วนำค่าวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

### 2.1.3 ส่วนของดิน (soil fractions) ที่เป็นแหล่งสะสมถ่าน

เม็ดดินเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของดินประการหนึ่งที่มีบทบาทต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน ดินที่มีโครงสร้างดินดีหรือมีการเกิดเป็นเม็ดดินมาก จะทำให้มีช่องว่างในดินมากขึ้น ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้การที่อินทรีย์วัตถุ (รวมทั้งถ่านด้วย) ซึ่งเป็นสารเชื่อม (binding agent) แร่ในดินให้เกิดเป็นเม็ดดินขนาดเล็ก (microaggregate) และที่เชื่อมเม็ดดินขนาดเล็กเป็นเม็ดดินขนาดใหญ่ (macroaggregate) (Edwards and Bremner, 1967; Tisdall and Oades, 1982; Six et al., 2000) จะถูกป้องกันเอาไว้โดยโครงสร้างของเม็ดดินไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่าย คาร์บอนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์นี้จะสะสมไว้ในเม็ดดิน ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลาย ที่จะปลดปล่อยไปสู่บรรยากาศลดน้อยลง ซึ่งการเก็บกักอินทรีย์คาร์บอนไว้ในเม็ดดิน เป็นส่วน (pool) หนึ่งของวัฏจักรคาร์บอนในระบบชีวภาค (biosphere) ซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการลดปัญหาโลกร้อน การทำความเข้าใจเกี่ยวกับแหล่งของการสะสมถ่านในดิน จะทำให้ทราบว่าถ่านมีอิทธิพลต่อการเกิดเป็นเม็ดดินหรือไม่ และยังช่วยให้สามารถอธิบายได้ว่า การที่ถ่านสามารถสะสมในดินได้เป็นระยะหลายพันปีนั้น (Masiello, 2004; Preston

and Schmidt, 2006) เกิดจากคุณสมบัติของถ่านที่เมื่อทำการทำปฏิกิริยา หรือเกิดจากการที่ถ่านถูกป้องกันไว้โดยเม็ดดิน หรือมีสาเหตุจากทั้งสองประการ

ถ่านที่สะสมในดิน สามารถจำแนกได้ 3 แหล่ง คือ ถ่านที่อยู่อย่างอิสระในดิน ถ่านที่ถูกป้องกันไว้ในโครงสร้างของเม็ดดิน และถ่านที่ทำปฏิกิริยากับแร่และอินทรีย์วัตถุ (Brodowski et al., 2005; Brodowski et al., 2006)

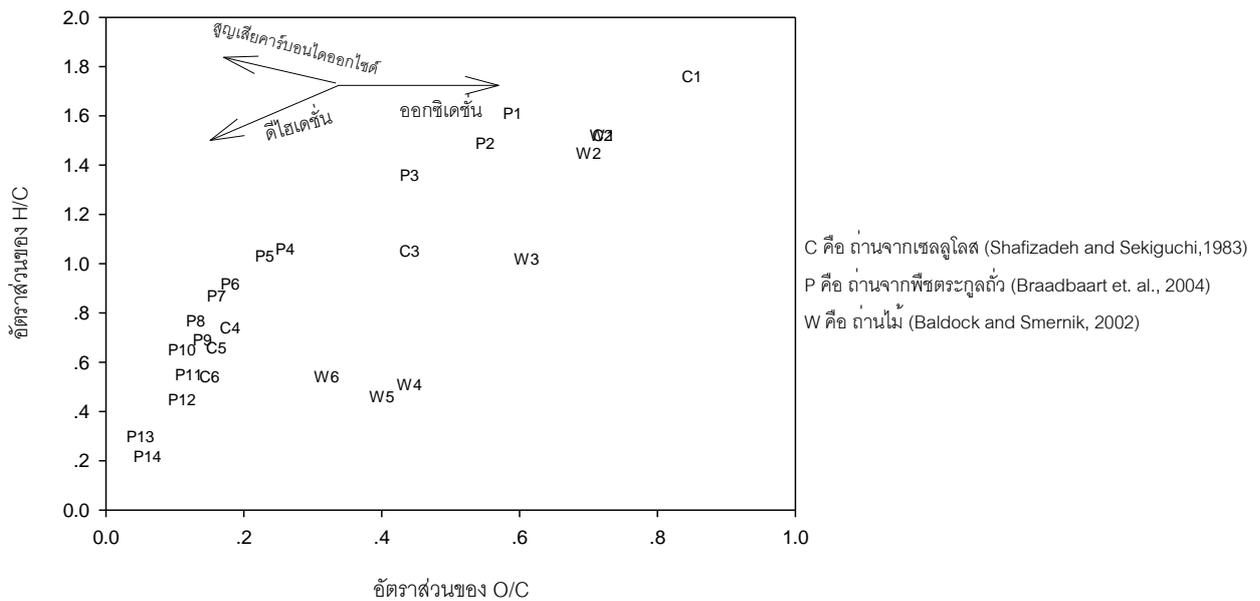
### 2.1.3.1. ถ่านที่อยู่อย่างอิสระในดิน

ถ่านที่อยู่ในส่วนนี้ เป็นถ่านที่แขวนลอยอยู่ในช่องว่างในดิน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือถ่านที่ไสลงไปในดินได้ไม่นาน (Brodowski et al., 2005; Brodowski et al., 2006) และถ่านที่เมื่อทำการทำปฏิกิริยา เช่นถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลาในการเผาานาน (Masiello, 2004)

1. ถ่านที่ไสลงไปในดินได้ไม่นาน พวกนี้พื้นผิวจะยังไม่ถูกออกซิไดซ์มาก ทำให้ยังไม่มีหมู่ฟังก์ชัน (Liang et al., 2006; Liang et al., 2008) ที่จะไปจับกับแร่เพื่อเกิดเป็นเม็ดดิน ดังนั้นจึงอยู่อย่างอิสระในช่องว่างในดิน

2. ถ่านเมื่อทำการทำปฏิกิริยาจากการผลิตที่อุณหภูมิสูง การย่อยสลายของจุลินทรีย์จะทำให้ยาก เนื่องจากโครงสร้างของถ่านประเภทนี้เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน (Preston and Schmidt, 2006) ดังนั้น จึงไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ผิว หรือมีอยู่น้อย จึงยังไม่สามารถทำปฏิกิริยากับแร่ในดิน ดังนั้นจึงแขวนลอยอยู่ในช่องว่างในดินเช่นเดียวกับถ่านที่มีอายุน้อยๆ

ภาพที่ 2.5 และ 2.6 แสดงอิทธิพลของการผลิตถ่านภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน การผลิตถ่านที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้มีอัตราส่วนของอะตอม H/C และ O/C สูงกว่าถ่านที่ผลิตโดยใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า (Shafizadeh and Sekiguchi, 1983; Baldock and Smernik, 2002; Braadbaart et al., 2004) เช่น ถ่านของพืชตระกูลถั่วที่ได้รับอุณหภูมิ 190°C (P1; ภาพที่ 2.5) จะมีอัตราส่วนของอะตอม H/C และ O/C สูงกว่าถ่านของพืชตระกูลถั่วที่ได้รับอุณหภูมิ 700°C (P14) ในทำนองเดียวกัน ถ่านของไม้เรดไพน์ (*Pinus resinosa*) ที่ได้รับอุณหภูมิที่ 70°C (ภาพที่ 2.6) ก็จะมีสัดส่วนของอะตอม H/C และ O/C สูงกว่าถ่านไม้เรดไพน์ที่ได้รับอุณหภูมิ 350°C ซึ่งชี้ว่าถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิสูงจะมีความเข้มข้นของคาร์บอนเพิ่มขึ้น นั่นคือมีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนมากขึ้น ซึ่งคาร์บอนเหล่านี้เป็นองค์ประกอบของหมู่แอโรคาร์บอน และองค์ประกอบของแผ่นกราฟีน ซึ่งยากต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน



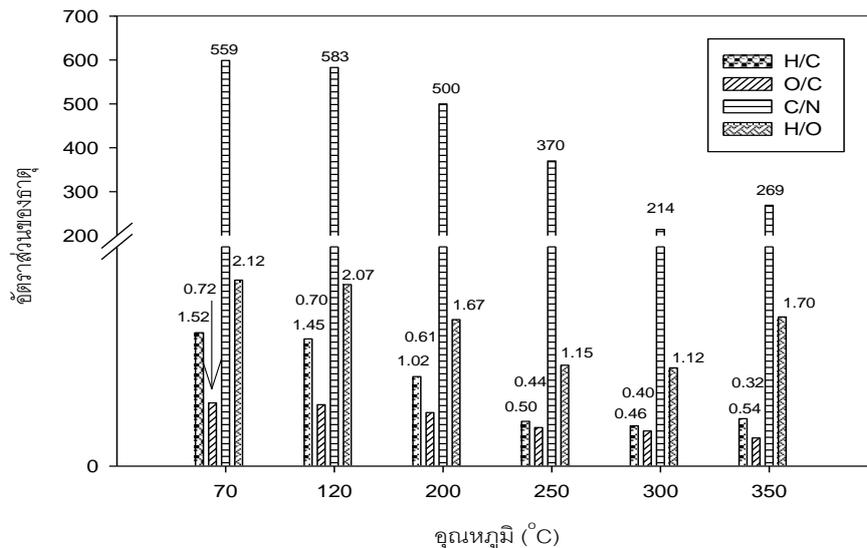
**ภาพที่ 2.5** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ O/C กับ H/C ของถ่านที่ผลิตจากเซลลูโลส (C), จากพีชตระกูลถั่ว (P), และจากไม้ (W) ที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ ถ่านเซลลูโลสที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิ 300, 325, 350, 400, 450, และ 500°C (แทนด้วยสัญลักษณ์ C1 - C5); ถ่านของพีชตระกูลถั่วที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิ 190, 220, 235, 250, 270, 310, 340, 370, 400, 440, 500, 600, และ 700°C (แทนด้วยสัญลักษณ์ P1 - P14); และถ่านไม้ที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิ 70, 120, 200, 250, 300, และ 350°C (แทนด้วยสัญลักษณ์ W1 - W6)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Shafizadeh and Sekiguchi (1983); Baldock and Smernik (2002) และ Braadbaart et. al. (2004)

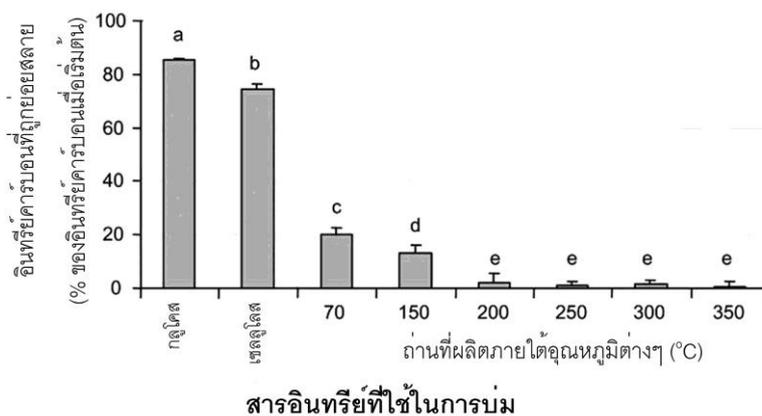
ลูกศรในภาพที่ 2.5 หมายถึง เส้นทางการเกิดกระบวนการออกซิเดชันดีไฮเดรชัน และการสูญเสียบรรบอนไดออกไซด์ โดยถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำ (กลุ่มด้านขวามือ) จะมีความเข้มข้นของออกซิเจนมากกว่า นั่นหมายความว่ามีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านมากกว่า ในขณะที่ถ่านที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า (กลุ่มด้านซ้ายมือ) จะมีกระบวนการดีไฮเดรชันมากกว่า ซึ่งหมายถึง มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นถ่านมากกว่า

Baldock and Smernik (2002) ได้ศึกษากระบวนการย่อยสลายของถ่านที่ผลิตภายใต้ อุณหภูมิที่ต่างกัน เป็นระยะเวลา 120 วัน (ภาพที่ 2.7) พบว่า ถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิ 150 °C จะถูกย่อยสลายน้อยกว่ากลูโคสและเซลลูโลสอยู่ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถ่านที่ได้รับอุณหภูมิในการผลิตตั้งแต่ 200°C ขึ้นไป จะถูกย่อยสลายน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การย่อยสลายของกลูโคสและเซลลูโลส

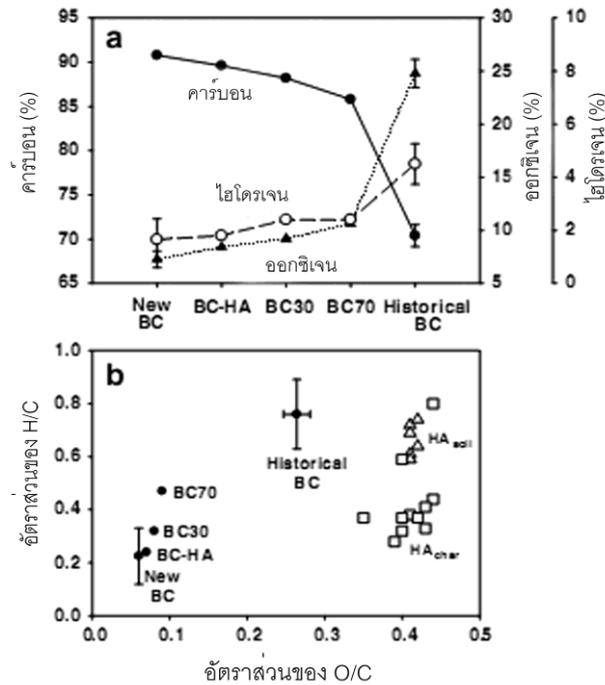
เกี่ยวกับอายุของถ่านที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายและการเกิดหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการทำปฏิกิริยากับแร่ในดิน Cheng et al. (2008) ได้ศึกษาพบว่าถ่านที่มีอายุมากจะมีอัตราส่วนของ H/C และ O/C สูงกว่าถ่านที่มีอายุน้อยกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มในการย่อยสลาย ซึ่งทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนสำคัญในการทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุในดิน ดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.8 ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นไปได้ว่า ถ่านที่อยู่อย่างอิสระในดิน คือ ถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิสูง และ/ หรือเป็นถ่านที่มีอายุน้อย



ภาพที่ 2.6 อัตราส่วนของ H/C, O/C, C/N, และ H/O ในถ่านที่ผลิตจากต้นเรดไพน์ (*Pinus resinosa*) ที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน  
ที่มา: คัดแปลงจาก Baldock and Smernik (2002)



ภาพที่ 2.7 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนของถ่านที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของกอโคสและเซลลูโลสในวันที่ 120 ของการบ่ม  
ที่มา: Baldock and Smernik (2002)



**ภาพที่ 2.8** เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ในถ่าน [a] และ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ O/C กับ H/C ของถ่านที่สุ่มมาจากดินป่าที่ถูกเผามาตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2413 (Historical BC), ถ่านที่สุ่มมาจากดินในป่าที่ถูกเผาไม่นาน (New BC), ถ่านที่เคลือบผิวด้วยกรดฮิวมิก (BC-HA), ถ่านที่บ่มที่อุณหภูมิ 30°C (BC30), ถ่านที่บ่มที่อุณหภูมิ 70°C (BC70) [b] โดยที่ BC30 และ BC70 ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 12 เดือน ที่มา: Cheng et al. (2008)

เมื่ออายุของถ่านในดินเพิ่มมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน ถ่านจะถูกย่อยสลายเพิ่มขึ้นด้วย ไม่ว่าจะเป็นถ่านที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์หรือถ่านที่เกิดจากการรวมตัวกันใหม่ของผงเถ้าในอากาศ (พวกที่เนื่องต่อการทำปฏิกิริยา) (Liang et al., 2006)

ถึงแม้จะเป็นถ่านที่เนื่องต่อการทำปฏิกิริยา แต่ไม่ได้หมายความว่าเชื้อโดยสมบูรณ์ ด้านผิวนอกของถ่านจะยังคงถูกออกซิไดซ์ได้ กระบวนการออกซิไดซ์จะเริ่มที่ผิวด้านนอกก่อน ทำให้ผิวของถ่านมีหุ้มฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับแร่ในดินและอินทรีย์วัตถุในดิน เกิดเป็นโครงสร้างของเม็ดดินต่อไป

### 2.1.3.2. ถ่านที่ถูกป้องกันไว้โดยโครงสร้างของเม็ดดิน

เมื่อถ่านถูกย่อยสลายเพิ่มขึ้น โดยการย่อยสลายเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกก่อน (Brodowski et al., 2005; Brodowski et al., 2006; Cheng et al., 2006; Liang et al., 2006; Chen et al., 2008; Cheng et al., 2008; Liang et al., 2008) ที่ผิวด้านนอกจากมีหุ้มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็น

องค์ประกอบเพิ่มขึ้น เช่น หมูคาร์บอกซิล และหมูไฮดรอกซิล (Brodowski et al., 2005; Nguyen et al., 2008; Nguyen and Lehmann, 2009) ซึ่งสามารถเกิดพันธะเคมีกับแร่และอินทรีย์วัตถุเกิดเป็นเม็ดดิน ซึ่งกลไกที่ถ่วงถูกป้องกันไว้ในเม็ดดินนั้น ขณะนี้ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนนัก อาจเป็นกลไกเดียวกับอินทรีย์วัตถุอื่นในดินที่จับกับแร่ในดินเกิดเป็นเม็ดดิน ตามทฤษฎีการเกิดเป็นเม็ดดินขนาดใหญ่จากการดูดยึดกันของเม็ดดินขนาดเล็ก โดยมีอินทรีย์วัตถุทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมเม็ดดินขนาดเล็กเข้าด้วยกัน หรือที่เรียกว่าทฤษฎีลำดับชั้น (hierarchical theory) (Edwards and Bremner, 1967; Tisdall and Oades, 1982) หรือทฤษฎีการเป็นเม็ดดินใหญ่จากการที่เม็ดดินขนาดเล็กล้อมรอบอินทรีย์วัตถุเอาไว้ โดยที่อินทรีย์วัตถุจะทำหน้าที่เป็นแกนกลางของเม็ดดินขนาดใหญ่ หรือที่เรียกว่าทฤษฎีแกนกลาง (core หรือ concentric theory) (Santos et al., 1997) ในที่นี้อินทรีย์วัตถุที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือเป็นแกนกลางของเม็ดดินขนาดใหญ่คือ ถ่าน Brodowski et al. (2006) ได้อธิบายเอาไว้ว่าการที่ถ่านถูกป้องกันไว้ในเม็ดดิน อาจเกิดจากการที่มีเม็ดดินขนาดเล็กห่อหุ้มถ่านเอาไว้ ลักษณะเช่นนี้เป็นไปตามทฤษฎีแกนกลางของ Santos et al. (1997)

การที่ถ่านถูกป้องกันไว้ในเม็ดดินจะทำให้จุลินทรีย์เข้าถึงได้ยาก ทำให้อัตราการย่อยสลายของถ่านลดลง (Lützwow et al., 2006) Liang et al. (2008) ได้ศึกษาพลวัตของถ่านในดินดำอินเดีย ในระยะเวลา 532 วัน พบว่าอัตราการย่อยสลายจะสูงในช่วงหนึ่งวันแรก หลังจากนั้นในวันที่สองอัตราการย่อยสลายจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นหนึ่งสัปดาห์ของการทดลองอัตราการย่อยสลายค่อนข้างคงที่ และจะคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งเขาอธิบายว่า การที่ช่วงแรกมีการย่อยสลายสูง เนื่องจากถ่านอยู่อย่างอิสระในดิน ทำให้จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายได้ง่าย หลังจากนั้นเมื่อผิวของถ่านถูกออกซิไดซ์ ทำให้หมูฟังก์ชันต่างๆ เกิดขึ้น หมูฟังก์ชันเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับแร่และอินทรีย์วัตถุในดินเกิดเป็นเม็ดดิน หรือถูกห่อหุ้มไว้ในเม็ดดิน ทำให้จุลินทรีย์เข้าถึงได้ยาก อัตราการย่อยสลายจึงลดลงในวันที่สอง ตั้งแต่วันที่เจ็ดจนถึงสิ้นสุดการทดลอง คือวันที่ 532 อัตราการย่อยสลายจะคงที่ ด้วยเหตุนี้ถ่านจึงสามารถเก็บกักในดินได้เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากมีกลไกการป้องกันไว้โดยโครงสร้างของเม็ดดิน แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองนี้ทำในดินที่ไม่มีกรรบกวน แต่หากมีการรบกวนดินอัตราการย่อยสลายอาจเพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

นอกจากถ่านที่อยู่อย่างอิสระ และถ่านที่ถูกป้องกันไว้โดยเม็ดดินแล้ว ยังมีถ่านอีกรูปหนึ่งคือ ถ่านที่ทำพันธะกับอนุภาคดิน ซึ่งยังไม่ได้มีการพัฒนาไปเป็นเม็ดดิน ซึ่งนับเป็นส่วน (fraction) ที่มีความสำคัญเช่นกัน

### 2.1.3.3. ถ่านที่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคดิน

เมื่อผิวของถ่านถูกออกซิไดซ์จะมีหมูฟังก์ชัน เช่น หมูคาร์บอกซิล และหมูไฮดรอกซิล เป็นต้น ซึ่งหมูฟังก์ชันเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคดิน ได้ทั้งอนุภาคทราย (sand particle), อนุภาคทรายแป้ง (silt particle) และอนุภาคดินเหนียว (clay particle) การที่ถ่านสามารถดูดยึดที่ผิว

ของอนุภาคทรายได้อาจเกิดจากแรงทางฟิสิกส์ ส่วนกรณีที่ถ่านดูดซับที่ผิวของอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวนั้นอาจเกิดจากแรงทางเคมี ทั้งนี้ยังไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจนนัก ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไป (Brodowski et al., 2005)

Brodowski et al. (2005) ได้ทำการแยกส่วนดิน (soil fractionation) พบว่าถ่านที่มีขนาดใหญ่จะดูดซับอยู่กับอนุภาคทรายแป้ง อนุภาคดินเหนียว และอนุภาคแร่ออกไซด์ ส่วนถ่านที่มีขนาดเล็กจะไปดูดซับที่ผิวของอนุภาคทราย ซึ่งการดูดซับกันระหว่างถ่านกับอนุภาคดินนี้ สามารถป้องกันถ่านจากการถูกย่อยสลายได้

#### 2.1.4 อิทธิพลของถ่านต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน (คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ)

ถ่านเมื่อใส่ลงไปในดินแล้ว มีความสำคัญในการปรับปรุงทั้งทางกายภาพ เคมี และชีววิทยาของดิน โดยในทางกายภาพนั้น ถ่านมีจะลดความหนาแน่นรวมของดิน ทั้งในทางตรงและทางอ้อม อิทธิพลในทางตรงนั้น เนื่องจากถ่านเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงมากเมื่อเทียบกับดิน (Verheijen et al., 2010) เมื่อคลุกเคล้าลงไปดิน จึงเป็นการลดความหนาแน่นรวมของดิน ส่วนในทางอ้อมนั้น ถ่านจะทำหน้าที่คล้ายกับอินทรีย์วัตถุอื่นๆ กล่าวคือ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการปรับปรุงการจัดเรียง (สถาปัตยกรรม) ของดิน หรือการเกิดเป็นเม็ดดิน (Brodowski et al., 2005) โดยที่พื้นผิวทั้งภายนอกและภายในของถ่าน เมื่อถูกออกซิไดซ์จะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Brodowski et al., 2005; Chen et al., 2008; Cheng et al., 2008; Liang et al., 2008) เช่น หมู่ carboxylic (-COOH), hydroxyl (-OH), phenolic, carboxyl (-C=O), และ quinone (Joseph et al., 2009) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมเข้ากับเม็ดดิน นอกจากนี้ ถ่านอาจมีบทบาทสำคัญในการเป็นสารตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคดินขนาดใหญ่เข้าด้วยกัน ในกระบวนการเกิดเป็นเม็ดดิน ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการเกิดเป็นโครงสร้างดิน (Edwards and Bremner, 1967; Tisdall and Oades, 1982; Six et al., 2000; Six et al., 2002) นอกจากนี้ ถ่านยังอาจเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ทั้งทางคุณสมบัติด้านความพรุนและบทบาทของถ่านในการเกิดเป็นเม็ดดิน Glaser et al. (2002) พบว่าความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน Terra preta ซึ่งเป็นดินที่มีการใส่ถ่านมานานของแถบลุ่มน้ำอะเมซอน มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าดินบริเวณรอบๆ ที่ไม่มีการใส่ถ่าน

ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของดิน เช่น เพิ่มพีเอช (pH) ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange capacity) ธาตุอาหารพืชบางชนิด เช่น Ca, Mg, และ K เป็นต้น ในการเพิ่ม pH นั้น เนื่องจากถ่านซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของถ่าน ประกอบขึ้นด้วยสารประกอบพวกแคลไซต์ (calcite:  $\text{CaCO}_3$ ) โดโลไมต์ (dolomite:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) และซิลิไต์ (sylvite:  $\text{KCl}$ ) (Yuan et al., 2011)

สารประกอบเหล่านี้มีความสำคัญในการเพิ่มค่า pH ของดิน (Sposito, 2008) ตลอดจนเป็นแหล่งธาตุอาหารให้แก่พืช

ในแง่ชีววิทยาของดิน ถ่านทำหน้าที่เป็นทั้งอาหารและแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ เนื่องจากในถ่านจะมีสารประกอบที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ดินด้วย อาทิ สารจำพวกน้ำมัน (bio-oil) (Diebold, 2000), กรดไพโรลิกเนียส (pyrolyigneous acid) (Steiner et al., 2008) สารระเหย (Deenik et al., 2008; Deenik et al., 2009; McClellan et al., 2009), และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ชนิดต่างๆ เป็นต้น ซึ่งปริมาณของสารเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและเทคนิคในการเผา (Antal and Gronli, 2003; Bourke et al., 2007; Mészáros et al., 2007) ในแง่ของการเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ (Kim et al., 2007; Thies and Rillig, 2009) เนื่องจากถ่านเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง รวมทั้งเป็นแหล่งของอาหารให้กับจุลินทรีย์ (Diebold, 2000; Steiner et al., 2008) จึงทำให้ถ่านเป็นแหล่งอาศัยที่ดีสำหรับจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะมีบทบาทอย่างมากในการปลดปล่อยธาตุอาหารและฮอร์โมนบางชนิดให้แก่พืช (Noguera et al., 2010)

### 2.1.5 อิทธิพลของถ่านที่มีคุณภาพแตกต่างกันในการเป็นแหล่งของสารระเหยได้ ซึ่งมีบทบาทในการยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช

ปริมาณสารที่ระเหยได้ในถ่าน (volatile matter; VM) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการผลิต (Antal and Gronli, 2003; Antal et al., 2003; McClellan et al., 2009) ถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำจะมี VM สูง ในทางตรงกันข้ามถ่านที่ใช้อุณหภูมิสูงในการผลิตจะมีปริมาณ VM ต่ำ (Antal and Gronli, 2003; Antal et al., 2003) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการใช้อุณหภูมิสูงในการผลิต VM จะระเหยออกไป ทำให้ VM ตกค้างอยู่น้อย VM นี้ อาจเป็นสารทาร์ (tarry vapor;  $C_{28}H_{34}O_9$ ) (Antal and Gronli, 2003) ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้ (Deenik et al., 2008) Deenik et al. (2009) และ McClellan et al. (2009) พบว่า ข้าวโพดที่ได้รับถ่านที่มีสารระเหยได้ปริมาณต่ำ (low volatile matter; LVM) จะมีการเจริญเติบโตดีกว่าข้าวโพดที่รับถ่านที่มีสารระเหยได้สูง (high volatile matter; HVM) การที่ HVM ไปยับยั้งการเจริญเติบโตของข้าวโพด อาจมีสาเหตุมาจาก HVM ไปกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ดิน ในการย่อยสลายถ่าน แต่เนื่องจากถ่านมีอัตราส่วนระหว่างธาตุคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) สูงทำให้เกิดกระบวนการ N immobilization จึงทำให้ข้าวโพดขาดไนโตรเจน (Gundale and DeLuca, 2007; Deenik et al., 2008; Deenik et al., 2009) แต่อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของ HVM ต่อการเจริญเติบโตของพืช จะมีผลเมื่อไม่มีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน หรือไม่มีแหล่งของไนโตรเจนรูปอื่นที่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที (เช่น ไกลซีน) เท่านั้น แต่หากมีการให้ไนโตรเจนแก่พืชแล้ว HVM จะไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชมากนัก ซึ่งขณะนี้ยังไม่ทราบแน่ชัดว่ามีกลไกใดที่ทำให้ HVM มีผลในด้านลบต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งควรที่จะมีการศึกษาต่อไป

## 2.2 การทบทวนวรรณกรรมบทบาทของจุลินทรีย์ดินในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างคุณภาพ

### 2.2.1 คุณภาพและระบบการจำแนกสารอินทรีย์ที่ใช้ปรับปรุงดิน

สารอินทรีย์ที่ทำได้ในระบบฟาร์มของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น ส่วนเหลือจากการเก็บเกี่ยวของพืชเกษตรหลัก เช่น ตอซังข้าว ไร่ ใบ ตอและรากอ้อย, ไร่และต้นมันสำปะหลัง และส่วนต้นของถั่วลิสง รวมทั้งซากใบไม้จากต้นไม้ที่ขึ้นในไร่นา และสารอินทรีย์ที่ได้รับการส่งเสริมให้ใช้เป็นปุ๋ยพืชสดโดยกรมพัฒนาที่ดินหลายชนิด เช่น ปอเทือง, ถั่วมะแฮะ, ถั่วพรี, โสนอัฟริกัน, โสนคางคก, โสนอินเดีย และแอสซิโนมิน เป็นต้น สารอินทรีย์เหล่านี้มีคุณภาพ (ส่วนประกอบทางเคมี) ต่างกัน (Vityakon and Dangthaisong, 2005)

ได้มีเสนอระบบการจำแนกสารอินทรีย์ในด้านศักยภาพที่จะสลายตัวและปลดปล่อยธาตุอาหาร ในโตรเจนโดยใช้เกณฑ์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน ในโตรเจน อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน, ลิกนิน และโพลีฟีนอล (Palm et al., 2001) ระบบนี้แบ่งสารอินทรีย์เป็น 4 ประเภท และได้เสนอแนะการจัดการสารอินทรีย์ที่เหมาะสมควบคู่ไปกับสารอินทรีย์แต่ละประเภทด้วย ดังต่อไปนี้

- 1) สารอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงสุดเป็นสารอินทรีย์ที่มี N สูง ( $> 25 \text{ g/kg}$ ) มีลิกนินต่ำ ( $< 150 \text{ g/kg}$ ) และมีโพลีฟีนอลต่ำ ( $< 40 \text{ g/kg}$ ) ซึ่งสามารถใส่ในดินได้เพื่อให้ปลดปล่อย N ได้อย่างรวดเร็ว
- 2) พวกที่มี N สูง, แต่ลิกนินและโพลีฟีนอลสูงด้วย แนะนำให้ผสมกับปุ๋ยหรือสารอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงก่อนใส่ลงดิน
- 3) พวกที่มี N ต่ำ และมีลิกนินต่ำ ให้ผสมกับปุ๋ยหรือทำปุ๋ยหมัก
- 4) สารอินทรีย์คุณภาพต่ำที่สุด ได้แก่ พวกที่มี N ต่ำ และลิกนินสูง ซึ่งแนะนำให้ใส่คลุมดินเพื่อป้องกันการกร่อนดิน

### 2.2.2 การศึกษาระยะยาวเกี่ยวกับอิทธิพลของสารอินทรีย์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงและการสะสมอินทรีย์วัตถุในดิน

นอกจากการปลดปล่อยไนโตรเจนแล้ว การสลายตัวของสารอินทรีย์ยังนำไปสู่การสะสมอินทรีย์วัตถุในดินซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านความอุดมสมบูรณ์ของดินในระยะยาว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการสะสมอินทรีย์วัตถุในดินเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ยาวนาน ดังนั้น การศึกษาอินทรีย์วัตถุในดินที่สามารถทำอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่ยาวนาน เป็นแบบที่ 1 หรือสามารถเปรียบเทียบการสะสมอินทรีย์วัตถุที่ระยะเวลาต่าง ๆ (แบบที่ 2) ได้จะทำให้ได้ข้อมูลเหล่านี้ที่มีประโยชน์มาก เช่น ปีทมา (2534) ทำการศึกษาในแบบที่ 2 คือ ศึกษาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินทรายในระบบการใช้ที่ดินต่าง ๆ ที่มีการให้กลับคืนอินทรีย์วัตถุในปริมาณและระยะเวลาที่ต่างกัน เช่น ระบบป่าไม้ ระบบพืชไร่ (มันสำปะหลัง) และระบบพืชผัก เป็นต้น ผลการศึกษาแสดงว่าระบบ

การใช้ที่ดินหรือระบบนิเวศที่ได้รับอินทรีย์วัตถุกลับคืนสม่ำเสมอ เช่น ดินป่าไม้ หรือดินในระบบที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์อย่างต่อเนื่องจะมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดินที่มีการให้กลับคืนสารอินทรีย์น้อยกว่า พืชริ และคณะ (2536) พบว่าดินเนื้อทรายต่าง ๆ ได้แก่ ดินนาซุคร้อยเอ็ด (Aeric Paleauult), ดินซุดคัมบง (Udic Paleustalf) ในป่าดิบแล้ง และดินทุ่งหญ้าซึ่งเป็นดินซุดโคราช (Oxic Paleustult) ที่ได้รับอินทรีย์วัตถุกลับคืนต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปีทำให้ปริมาณ C ในดินเพิ่มขึ้น Kanchikerimath and Singh (2001) ศึกษาในอินเดีย ในแบบที่ 1 ถึงการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุและคุณสมบัติทางชีวภาพในดิน Cambisol ที่มีเนื้อดิน sandy clay ที่ได้รับอิทธิพลจากการใส่ปุ๋ยคอกและปุ๋ยเคมีในระยะยาว (26 ปี) ในระบบการปลูกพืชข้าวโพด-ข้าวสาลี-ถั่วพุ่ม เขาพบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยคอกอย่างสมดุลจะทำให้มีการสะสมอินทรีย์วัตถุในดินและกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน (โดยพิจารณาจากเอนไซม์ยูรีเอส ฟอสเฟเตส และดีไฮโดรจีเนส) ซึ่งอินทรีย์วัตถุและกิจกรรมจุลินทรีย์ดินซึ่งมีความสำคัญต่อการหมุนเวียนธาตุอาหารและผลิตภาพในระยะยาวของดิน ได้รับอิทธิพลจากการใส่ธาตุอาหารและปุ๋ยอินทรีย์อย่างสมดุล Zhang and He (2004) ศึกษาในประเทศจีนในแบบที่ 2 ถึงการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์คาร์บอนในดิน Typic Plinthudults ซึ่งเป็นดินนาที่เปลี่ยนแปลงมาจากที่ดอนที่เคยใช้ปลูกพืชไร่ โดยศึกษาในช่วงเวลา 2-100 ปีหลังการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน เขาพบว่าคาร์บอนอินทรีย์, N ทั้งหมด และ P ในชั้นไทรอปโซลเพิ่มขึ้นในช่วง 30-40 ปีแรกของการเปลี่ยนมาทำนา ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การทำนาในระยะยาวช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินโดยพิจารณาจากการลดลงของความเป็นกรดของดิน, การเพิ่มของความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก, คาร์บอนอินทรีย์ และอัตราส่วนกรดฮิวมิกต่อกรดฟัลวิก อย่างไรก็ตามการทำนาระยะยาวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ลงของอินทรีย์คาร์บอน, N และ P ซึ่งอาจมีผลต่อสิ่งแวดล้อมได้

การศึกษาระบบการเปลี่ยนแปลงสภาพของอินทรีย์วัตถุของดินในระยะยาวนั้นสามารถทำได้ในหลายแง่มุมด้วยกัน อย่างไรก็ตามแง่มุมหนึ่งที่สำคัญคือ การศึกษาคุณสมบัติของส่วนของอินทรีย์วัตถุ (SOM pool) ที่เป็นชิ้น (particulate organic matter – POM) และอินทรีย์วัตถุส่วนที่เสถียร (stable pool of SOM) ซึ่งส่วนที่เสถียรนั้นได้แก่ สารฮิวมิก และบางส่วนของ POM ที่สามารถคงอยู่ในดินได้อย่างยาวนานและจะเป็นส่วนที่ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้าน buffering capacity เช่น CEC ของดิน และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน เช่น ทำให้โครงสร้าง (เม็ดดินหรือ soil aggregate) ดีขึ้น สมญา (2545) ศึกษาเปรียบเทียบดินทราย (ซุดโคราช) ที่อยู่ในพื้นที่ป่าไม้ และดินชนิดเดียวกันที่ปลูกมันสำปะหลังอย่างต่อเนื่อง พบว่า นอกจากดินป่าไม้จะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (หรืออินทรีย์ C) โดยรวมมากกว่าดินที่ปลูกมันสำปะหลังแล้ว ยังมีปริมาณ C ในส่วนที่เป็นสารฮิวมิก และ POM มากกว่าด้วย แสดงว่าระบบป่าไม้ที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบดินอย่างต่อเนื่องและดินไม่ถูกรบกวน ทำให้เกิดการสะสมอินทรีย์วัตถุในส่วนดังกล่าว ในขณะที่ดินที่ปลูกมันสำปะหลังมีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยและมีการรบกวนดิน เช่น ด้วยการไถพรวนอยู่เสมอ นอกจากนี้สมญา (2545) ยังพบว่าดินป่าไม้มีขนาดเม็ดดิน (aggregate size) ใหญ่กว่าและความคงทนของเม็ดดิน

(aggregate stability) สูงกว่าดินที่ปลูกมันสำปะหลัง ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่ดี จากการมีอินทรีย์วัตถุในดินสูง Vityakon (2005) ได้แสดงให้เห็นว่าคุณภาพของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ดินมีอิทธิพลต่อการสะสมอินทรีย์วัตถุด้วย กล่าวคือ ในการวิเคราะห์ข้อมูลของ Adulprasertsuk et al. (1997) เขาพบว่าสารอินทรีย์ที่สลายตัวช้า กล่าวคือมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต้านทานการสลายตัว เช่น ลิกนิน อยู่มาก เช่น ไบร่วรงของพลวง จะทำให้เกิดสารฮิวมิกที่มีการพัฒนาตัวไปไกลกว่า สารอินทรีย์ที่สลายตัวเร็วกว่า เช่น ไบร่วรงของจามจรี โดยศึกษาจากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารฮิวมิก การศึกษาคุณสมบัติของสารฮิวมิกจะให้ข้อมูลในรายละเอียดถึงโครงสร้างสารฮิวมิกอีกวิธีหนึ่งคือ วิธีใช้แสงช่วงคลื่นอินฟราเรด (infrared หรือ IR spectrometry) อย่างไรก็ตามจะต้องอาศัยเครื่องมือ IR spectrometer ซึ่งมีราคาแพงและมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ

การศึกษาผลกระทบการเก็บกักอินทรีย์วัตถุเสถียรเป็นทางหนึ่งที่ทำให้ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับศักยภาพของดินในการเป็น sink หรือแหล่งเก็บคาร์บอนไว้ ทำให้ลดปริมาณคาร์บอนในบรรยากาศ ช่วยแก้ปัญหาภาวะเรือนกระจกและโลกร้อนได้ทางหนึ่ง ในระยะหลังจึงมีผลงานวิจัยด้านการกักเก็บคาร์บอนของดินที่มีศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกดังกล่าว เช่น ที่ปริทัศน์ไว้โดย Goh (2004)

การศึกษานินทรีย์วัตถุระยะยาวทำให้เราสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านนิเวศวิทยาของจุลินทรีย์ดินได้ ทำให้เกิดความเข้าใจในกลไกการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดินได้ลึกซึ้งขึ้น เช่น การวิเคราะห์โปรไฟล์ของ phospholipids fatty acid (PLFA) จะเป็นตัวชี้ทางชีวภาพ (biomarker) ของชนิดของประชากรจุลินทรีย์ในดินได้ ซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจถึงอิทธิพลของชนิดสารอินทรีย์และสภาพแวดล้อมที่มีต่อนิเวศวิทยาของจุลินทรีย์ดินที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้น งานวิจัยในลักษณะนี้เช่น การศึกษาในสหรัฐถึงการเปลี่ยนแปลงประชากรจุลินทรีย์ในระบบการปลูกข้าวสาลีที่ได้รับสารอินทรีย์ได้แก่ ฟางข้าวสาลี และเปรียบเทียบดินที่มีการไถและไม่ไถ พบว่าตัวชี้ชีวภาพ PLFA มีความแตกต่างกันระหว่างเขื่อกับแบคทีเรีย ซึ่งแสดงว่าสามารถใช้เป็นตัวชี้ชนิดของจุลินทรีย์ได้ดี (Petersen et al., 2002)

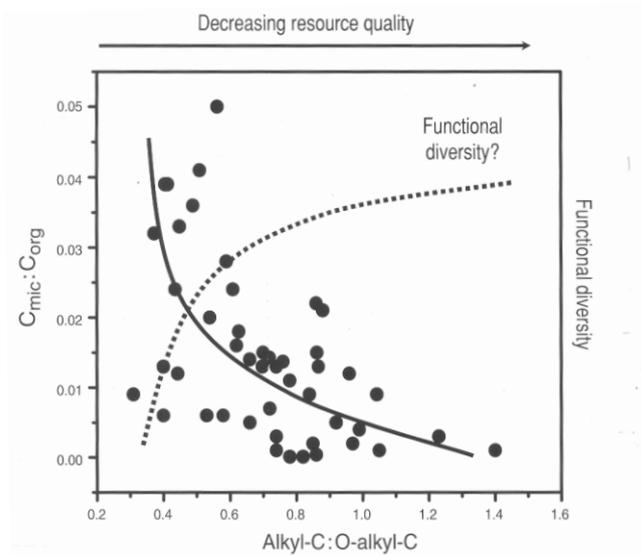
### 2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมี (คุณภาพ) ของสารอินทรีย์และการสลายตัว

สารอินทรีย์ที่พบปริมาณมากในซากพืช (plant litter) ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน เป็นต้น เซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 glucosidase เป็นสายยาว พบในซากพืชราว 10-50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวโดยมีน้ำตาลอื่นเป็นองค์ประกอบ การเรียกชื่อจึงขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ เช่น mannose ซึ่งมีน้ำตาล mannan เป็นองค์ประกอบ หรือ xylose ซึ่งมีน้ำตาล xylan เป็นองค์ประกอบ เป็นต้น (Berg and McClaugherty, 2003) ความแตกต่างของ

องค์ประกอบทางเคมีในสารอินทรีย์ดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบดินเกิดได้หลายแบบได้แก่ การย่อยสลายทางกายภาพ เช่นการกัดแทะโดยสิ่งมีชีวิตขนาดปานกลางและขนาดใหญ่ในดิน การย่อยสลายโดยการชะล้างซึ่งธาตุอาหารที่ละลายน้ำได้ในสารอินทรีย์จะละลายออกมาพร้อมกับน้ำ และการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์เป็นสำคัญ ดังนั้นการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินจึงมีความสัมพันธ์กับมวลชีวภาพและกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบในดิน โดยจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กหรือสลายตัวได้ง่ายก่อน เช่น น้ำตาล อย่างไรก็ตามเมื่ออาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์มีจำกัด จุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์ที่มีความจำเพาะเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุล โครงสร้างซับซ้อนที่เหลืออยู่ เช่น ลิกนิน (lignin) และ โพลีฟีนอล (polyphenol) เป็นต้น ซึ่งการย่อยสลายโมเลกุลที่ซับซ้อนนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆและกลายเป็นส่วนที่ให้กำเนิดสารฮิวมัส (Harder and Dijkhuizen, 1983)

ในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของอินทรีย์วัตถุในดิน เทคนิคหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายคือ Carbon-13 NMR โดย Webster et al. (2001) ใช้เทคนิคดังกล่าวเพื่อศึกษาคุณภาพของสารอินทรีย์และพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ alkyl-C ต่อ O-alkyl-C ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมวลชีวภาพจุลินทรีย์ในดิน ทั้งนี้เนื่องจาก alkyl-C บ่งชี้ถึงส่วนของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่เปิด (aliphatic compounds) ซึ่งมีทั้งแบบโซ่ตรง (straight chain) และโซ่แขนง (branch chain) รวมถึงไขมันชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นตัวแทนของส่วนที่มีความเสถียร ขณะที่ O-alkyl-C ( $-OCH_2$ ) บ่งชี้ถึงปริมาณของโพลีแซคคาไรด์ซึ่งเป็นตัวแทนของส่วนที่ย่อยสลายได้ง่าย ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของ alkyl-C ต่อ O-alkyl-C เพิ่มขึ้น นั่นคือคาร์บอนในสารประกอบอินทรีย์ส่วนที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายลดลง จึงส่งผลให้มวลชีวภาพในดินลดลง แต่กลับส่งผลให้ความหลากหลายในหน้าที่ของจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดความหลากหลายและซับซ้อนขององค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ (ภาพที่ 2.9) เช่นเดียวกับ Allison and Vitousek (2005) ที่ศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารอาหารต่อการหายใจและการเปลี่ยนแปลงมวลชีวภาพจุลินทรีย์ในดิน พบว่าสารอาหารที่มีโครงสร้างอย่างง่าย (simple substrate) คือ แอมโมเนียม, ฟอสเฟต, และอะซิเตต ส่งผลให้การหายใจและมวลชีวภาพจุลินทรีย์สูงกว่าสารอาหารที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน (complex substrate) คือ เซลลูโลส และคอลลานเจน โดยกรรมวิธีทดลองที่มีการใส่อะซิเตตมีมวลชีวภาพคาร์บอนสูงกว่าทุกกรรมวิธีทดลอง เนื่องจากอะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ในขณะที่กรรมวิธีทดลองที่มีการใส่แอมโมเนียมและฟอสเฟตส่งผลให้มวลชีวภาพในโตรเจนและมวลชีวภาพฟอสฟอรัสสูงสุด เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้แอมโมเนียมและฟอสเฟตเพื่อเป็นแหล่งของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสตามลำดับ (ตารางที่ 2.4)



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของสารอินทรีย์ศึกษาโดยใช้เทคนิค Carbon-13 NMR และมวลชีวภาพ และบทบาทหน้าที่ของจุลินทรีย์

ที่มา: Webster et al., (2001)

ตารางที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงมวลชีวภาพและการหายใจของจุลินทรีย์ที่ได้รับสารอาหารที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

กรรมวิธี (ต่อกลีโกรัมน้ำหนักดินแห้ง)	การหายใจ สะสม (มก./กรัม)	มวลชีวภาพ คาร์บอน (มก./กรัม)	มวลชีวภาพ ไนโตรเจน (มก./กรัม)	มวลชีวภาพ ฟอสฟอรัส (มก./กรัม)
ควบคุม (ไม่มีการเติมคาร์บอน)	6.40	3.68	195.2	96.1
ควบคุม (ไม่มีการเติมไนโตรเจน)	6.54	3.52	178.5	87.6
ควบคุม (ไม่มีการเติมฟอสฟอรัส)	6.58	3.45	180.2	79.7
อะซิเตด (8 มิลลิกรัมคาร์บอน)	<b>11.52</b>	<b>4.38</b>	171.7	103.5
แอมโมเนียม คลอไรด์ (1.6 มิลลิกรัมไนโตรเจน)	5.00	3.60	<b>690.7</b>	89.4
โซเดียม ฟอสเฟต (320 ไมโครกรัมฟอสฟอรัส)	7.10	3.46	173.3	<b>217.2</b>
เซลลูโลส (8 มิลลิกรัมคาร์บอน)	7.31	3.64	189.2	72.5
คอลลาลาเจน (1.6 มิลลิกรัมไนโตรเจน)	8.54	3.45	214.3	87.5
เซลลูโลส ฟอสเฟต (320 ไมโครกรัมฟอสฟอรัส)	8.25	3.33	180.2	79.7

ที่มา: Allison and Vitousek (2005)

ระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ จุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการวัดการหายใจ (respiration) ดังนั้นมวลชีวภาพจุลินทรีย์และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมา

จึงมีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายของสารอินทรีย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tejada และคณะ (2008) ที่ศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยพืชสดที่มีคุณภาพแตกต่างกัน คือ 1) *Trifolium pretense*, L. (TP); 2) *Brassica napus*, L. (BN) และ 3) วัสดุผสมระหว่าง TP+BN ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลชีวภาพคาร์บอนและการหายใจของจุลินทรีย์ในดิน ผลจากการศึกษาพบว่าการหายใจของจุลินทรีย์ในดินของกรรมวิธีที่เติม TP มีอัตราการหายใจสูงสุด ตามด้วย TP+BN และ BN ตามลำดับ การหายใจของจุลินทรีย์สูงสุดในกรรมวิธีที่ใส่ TP เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุอินทรีย์ที่มีส่วนที่ต้านทานต่อการย่อยสลายต่ำสุด คือกรดฮิวมิก และลิกนิน เท่ากับ 1.3 และ 5.3 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น กรรมวิธี TP จึงส่งผลให้จุลินทรีย์มีกิจกรรมสูง ดังนั้นการหายใจจึงสูงด้วย คุณภาพบางประการของสารอินทรีย์แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณภาพบางประการของสารอินทรีย์

คุณภาพ	ชนิดของสารประกอบอินทรีย์									
	O <sup>†</sup>	OB <sup>†</sup>	Rice straw <sup>††</sup>	Groundnut <sup>††</sup>	Sesbania <sup>††</sup>	Dipterocarp <sup>††</sup>	Tamarind <sup>††</sup>	TP <sup>†††</sup>	BN <sup>†††</sup>	TP+BN <sup>†††</sup>
อินทรีย์คาร์บอน*	45.5	84.0	39	39	42	42	42	35.9	40.6	68
ไนโตรเจน*	1.8	1.9	0.49	1.73	1.5	0.68	1.23	4.08	0.85	3.74
(C/N ratio)	25	19	79	23	28	62	31	8.8	47.7	18.2
Humic acid-C*	1.9	1.5	-	-	-	-	-	0.13	6.96	5.95
Fulvic acid-C*	1.7	1.2	-	-	-	-	-	5.14	0.25	5.48
ลิกนิน*	29.4	22.3	3.6	9.9	11.1	24.9	16.9	0.53	2.8	3.0
เซลลูโลส*	26.6	15.0	-	-	-	-	-	0.4	2.04	1.83
เฮมิเซลลูโลส*	18.1	12.8	-	-	-	-	-	0.98	3.46	3.05

\*เปอร์เซ็นต์; O, dry olive cake; OB, dry olive cake+biosolids; TP, *Trifolium pretense*, L.; BN, *Brassica napus*, L.

<sup>†</sup> Benitez และคณะ (2005); <sup>††</sup> Vitayakon และคณะ (2000); <sup>†††</sup> Tejada และคณะ (2008)

ทั้งนี้ในกรรมวิธีที่มีการเติม TP+BN มีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 18.2 ซึ่งจัดว่าเหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ แต่มีส่วนที่ต้านทานต่อการย่อยสลายคือ ลิกนิน และกรดฮิวมิก สูงกว่าในกรรมวิธีที่มีการเติม TP เพียงอย่างเดียว ดังนั้นกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกรรมวิธี TP+BN จึงต่ำกว่า TP (ตารางที่ 2.5) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vitayakon และคณะ (2000) ที่ศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์คุณภาพแตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในดิน พบว่าสารอินทรีย์ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง และ C/N ratio ต่ำ เช่น ซากถั่วลิสง (Groundnut) มีการปลดปล่อยไนโตรเจนในช่วงแรกได้ทันทีและรวดเร็วกว่าสารอินทรีย์ที่มี C/N ratio สูง เช่น ฟางข้าว (Rice straw) พลวง (Dipterocarp) และใบมะขาม (Tamarind) อย่างไรก็ตามผู้ที่ทดลองได้ตั้งข้อสังเกตว่าถึงแม้ใบมะขาม

และพลวง มีค่า C/N ratio เท่ากับ 31 และ 62 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าฟางข้าวซึ่งมี C/N ratio เท่ากับ 79 แต่กลับมีการย่อยสลายและปลดปล่อยไนโตรเจนต่ำกว่าฟางข้าว อาจเนื่องจากปริมาณลิกนินและโพลีฟีนอลที่พบในไบโอมะขามและพลวงสูงกว่าฟางข้าว ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าคุณภาพของสารอินทรีย์ที่ใส่ลงในดินมีผลต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

เมื่อสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบดินจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จนมีขนาดและมวลลดลงจนกลายเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน อินทรีย์วัตถุเหล่านี้สามารถแบ่งได้ตามความยาก-ง่ายในการย่อยสลาย โดยการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารเช่นไนโตรเจนส่วนใหญ่ได้มาจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ ส่วนที่ยังคงความเป็นชิ้น (particulate organic matter) ซึ่งจัดเป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงง่าย โดยเฉพาะส่วนที่มีน้ำหนักเบา (light fraction, LF) ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยไนโตรเจนมากกว่าส่วนที่ได้รับการป้องกันจากแร่ธาตุในดินปานกลาง (intermediate fraction, IF) และส่วนที่ได้รับการป้องกันสูง (heavy fraction, HF) ตามลำดับ โดย Hassink (1995) พบว่าอินทรีย์วัตถุส่วน LF เป็นส่วนที่มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยธาตุคาร์บอน ( $r^2=0.79$ ) และไนโตรเจน ( $r^2=0.77$ ) ในดินทุ่งหญ้า ซึ่งค่าที่ได้สูงกว่าส่วน IF และ HF ทั้งนี้เนื่องจาก LF เป็นส่วนที่มีระดับการสลายตัวต่ำกว่าส่วน IF และ HF ดังนั้น LF เป็นส่วนของเศษซากพืชที่ยังคงความเป็นโครงสร้างดังนั้นจึงยังประกอบด้วยส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย

จากงานวิจัยข้างต้นเห็นได้ว่าคุณภาพหรือองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ที่ใส่ลงในดินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของสารอินทรีย์เริ่มต้นเหมาะสม และมีส่วนที่ต้านทานต่อการย่อยสลายคือฮิวมิกและลิกนินที่ต่ำ จะช่วยให้อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงด้วย

#### 2.2.4 อิทธิพลของสารอินทรีย์คุณภาพแตกต่างกันต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน

คุณภาพของสารอินทรีย์จัดเป็นปัจจัยทางสภาพแวดล้อมระดับจุลภาค (microenvironmental level) ที่สำคัญระหว่างกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ คุณภาพของสารอินทรีย์แต่ละชนิดกระตุ้นและส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ได้แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะต่อ substrate แต่ละชนิด โดย Tejada et al. (2008) ศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยพืชสดที่มีคุณภาพแตกต่างกันคือ 1) *Trifolium pretense*, L. (TP); 2) *Brassica napus*, L. (BN) และ 3) วัสดุผสมระหว่าง TP+BN ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ dehydrogenase,  $\beta$ -glucosidase และ urease โดยอัตราการใส่สารอินทรีย์มี 2 อัตราคือ 5384 กก.ต่อเฮกตาร์ (อัตรา 1) และ 8973 กก.ต่อเฮกตาร์ (อัตรา 2) พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับคุณภาพและอัตราการใส่สารอินทรีย์ดังนี้ กิจกรรมของเอนไซม์ dehydrogenase, กิจกรรมของเอนไซม์  $\beta$ -glucosidase และกิจกรรมของเอนไซม์ urease เพิ่มสูงขึ้นในกรรมวิธีทดลอง TP2 > (TP+BN)2 > BN2 > TP1 >

(TP+BN)1 > BN1 ตามลำดับ กรรมวิธี TP2 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ด้านทานต่อการย่อยสลายคือ ลิกนิน และกรดฮิวมิกที่ต่ำ และยังมีอัตราการใส่สารอินทรีย์สูงสุดคือ 8973 กก.ต่อเฮกตาร์ จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์สูงด้วย (ตารางที่ 2.6) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Benitez et al. (2005) ที่ศึกษาผลของคุณภาพสารอินทรีย์ต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และไส้เดือนดิน พบว่าการผสมกากของเสียเหลือทิ้งโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกร่วมกับกากตะกอนสกัดจากระบบน้ำเสีย (dry olive cake + biosolid, OB) ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และกิจกรรมของเอนไซม์ dehydrogenase,  $\beta$ -glucosidase, phosphatase, และ urease สูงกว่ากรรมวิธีที่ใส่ dry olive cake (O) เพียงอย่างเดียว (ภาพที่ 2.10 a-d) เนื่องจากวัสดุผสม OB มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) เท่ากับ 19 ซึ่งต่ำกว่ากรรมวิธี O ซึ่งมี C/N ratio เท่ากับ 25 นอกจากนี้กรรมวิธี OB ยังมีปริมาณลิกนิน และกรดฮิวมิกเริ่มต้นของกระบวนการหมักเท่ากับ 223 กรัมต่อกิโลกรัม และ 15 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ากรรมวิธี O ที่มีปริมาณลิกนิน และกรดฮิวมิกเริ่มต้นของกระบวนการหมักเท่ากับ 25, 294 กรัมต่อกิโลกรัม และ 19 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิดในกรรมวิธี OB สูงกว่ากรรมวิธี O

ตารางที่ 2.6 กิจกรรมของเอนไซม์ dehydrogenase,  $\beta$ -glucosidase และ urease ในกรรมวิธีทดลองที่มีการเติมวัสดุอินทรีย์แตกต่างกันในดิน

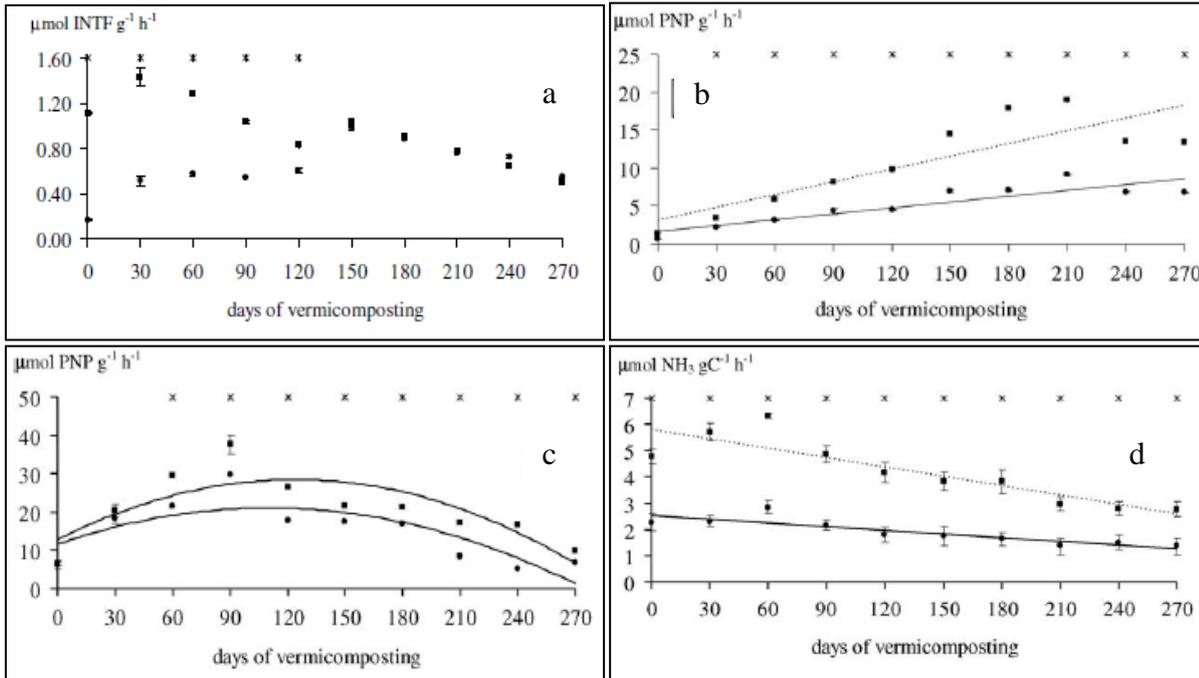
ตัวชี้วัด / กรรมวิธีทดลอง	การเพิ่มขึ้นของกิจกรรมเอนไซม์ (เปอร์เซ็นต์) ในกรรมวิธีทดลอง					
	TP2 <sup>**</sup>	(TP+BN)2 <sup>**</sup>	BN2 <sup>**</sup>	TP1 <sup>*</sup>	(TP+BN)1 <sup>*</sup>	BN1 <sup>*</sup>
กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส ( $\mu\text{g INTF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )	92.1	90.9	90.1	88.9	87.6	84.4
กิจกรรมเอนไซม์ $\beta$ -glucosidase ( $\mu\text{mol PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )	99.3	99.1	99	99	98.9	98.6
กิจกรรมเอนไซม์ยูรีเอส ( $\mu\text{mol NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )	93.9	92.8	95.2	94.4	93.4	92

TP, *Trifolium pretense*; BN, *Brassica napus*,

\*ใส่สารอินทรีย์ 5384 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์; \*\*ใส่สารอินทรีย์ 8973 กิโลกรัมคาร์บอนต่อเฮกตาร์

INTF; 2-p-iodo-3-nitrophenyl formazan; PNP, P-nitrophenol

ที่มา: Tejada et al., (2008)



**ภาพที่ 2.10** (a) กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส (dehydrogenase); (b) กิจกรรมของเอนไซม์  $\beta$ -glucosidase; (c) กิจกรรมของเอนไซม์ฟอสเฟเตส (phosphatase); (d) กิจกรรมของเอนไซม์ยูรีเอส (urease) ระหว่างกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์และไส้เดือนดิน (Vermicomposting); (■) dry olive cake + biosolid, OB (●), dry olive cake, O; (x), มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ  
ที่มา: Benitez (2005)

จากงานวิจัยข้างต้นเห็นได้ว่าคุณภาพของสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพและกิจกรรมของเอนไซม์ระหว่างการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงคือ มีปริมาณสารที่ต้านทานต่อการย่อยสลายเช่น ลิกนิน และโพลีฟีนอลที่ต่ำ รวมถึงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม ส่งผลให้มวลชีวภาพและกิจกรรมของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ซึ่งได้แก่ กิจกรรมของเอนไซม์ dehydrogenase,  $\beta$ -glucosidase, phosphatase, และ urease เป็นต้น มีกิจกรรมสูงด้วย

## 2.2.5 บทบาทของจุลินทรีย์ดินในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างคุณภาพ

มีงานศึกษาเป็นจำนวนมากที่ชี้ให้เห็นถึงองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ที่มีผลต่อกิจกรรมจุลินทรีย์ดินที่วัดจากการปลดปล่อย  $\text{CO}_2$  และเอนไซม์จุลินทรีย์ (exoenzymes) เป็นต้น ระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ จุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานและปลดปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  ออกมาซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการวัดการหายใจ (respiration) ดังนั้นมวลชีวภาพจุลินทรีย์

และปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ปลดปล่อยออกมาจึงมีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายของสารอินทรีย์ เช่น งานของ Allison and Vitousek (2005) ที่ศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารอาหารต่อการหายใจและการเปลี่ยนแปลงมวลชีวภาพจุลินทรีย์ในดิน พบว่าสารอาหารที่มีโครงสร้างอย่างง่าย (simple substrate) คือ แอมโมเนียม ฟอสเฟต และอะซิเตต ส่งผลให้การหายใจและมวลชีวภาพจุลินทรีย์สูงกว่าสารอาหารที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน (complex substrate) คือ เซลลูโลส และคอลลาลเจน โดยกรรมวิธีทดลองที่มีการใส่อะซิเตตมีมวลชีวภาพคาร์บอนสูงกว่าทุกกรรมวิธีทดลองเนื่องจากอะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ในขณะที่กรรมวิธีทดลองที่มีการใส่แอมโมเนียมและฟอสเฟตส่งผลให้มวลชีวภาพไนโตรเจนและมวลชีวภาพฟอสฟอรัสสูงสุด เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้แอมโมเนียมและฟอสเฟตเพื่อเป็นแหล่งของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสตามลำดับ งานศึกษาของกลุ่มวิจัยนี้ในการศึกษาระยะยาวของการเปลี่ยนแปลงและการสะสม SOM ในดินทรายที่ได้รับการใส่สารอินทรีย์ต่างคุณภาพทุกปีอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 13 ปี พบว่าการปลดปล่อย CO<sub>2</sub> สะสมตลอดช่วงการย่อยสลาย 1 ปี มีสูงที่สุด (70-90 % ของ C ในสารอินทรีย์ที่ใส่) ในสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบเป็นสารประกอบด้านทานการย่อยสลาย (ลิกนินและโพลีฟีนอล) ต่ำ ได้แก่ ซากต้นถั่วลิสง และฟางข้าว แต่การปลดปล่อยมีต่ำ (38%) ในสารอินทรีย์ที่มีลิกนินและโพลีฟีนอลสูง ได้แก่ ใบพลวงร่วงและใบมะขามร่วง (Puttaso et al., 2011) ดังนั้นสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนยากแก่การย่อยสลายจึงลดกิจกรรมจุลินทรีย์

คุณภาพของสารอินทรีย์แต่ละชนิดกระตุ้นและส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ได้แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะต่อ substrate แต่ละชนิด จุลินทรีย์จะหลั่งเอนไซม์เพื่อทำการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กหรือสลายตัวได้ง่ายก่อน เช่น น้ำตาล เป็นต้น แต่เมื่ออาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์มีจำกัด จุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์ที่มีความจำเพาะเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุล โครงสร้างซับซ้อนที่เหลืออยู่ เช่น ลิกนิน (lignin) และ โพลีฟีนอล (polyphenol) เป็นต้น ซึ่งการย่อยสลายโมเลกุลที่ซับซ้อนนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และกลายเป็นส่วนที่ให้ออกซิเจนสารฮิวมิก (Harder and Dijkhuizen, 1983)

## 2.2.6 การใช้เอนไซม์เพื่อตรวจวัดกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน

เอนไซม์หลายชนิดที่ถูกศึกษาเพื่อบ่งชี้ถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน สามารถแบ่งตามระดับความจำเพาะของการทำงานดังนี้ คือ (Sinsabaugh, 1994)

1) **เอนไซม์ที่มีระดับความจำเพาะต่ำ (low specificity assay)** เป็นเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่ำ หรือไม่เน้นกิจกรรมจำเพาะ เพื่อใช้เป็นตัวชี้กิจกรรมโดยรวมของจุลินทรีย์ ได้แก่ เอนไซม์ dehydrogenase, esterase, และ phosphatase เป็นต้น โดยเอนไซม์ dehydrogenase เป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนระหว่างการย่อยสลายสารอาหาร (substrate) การ

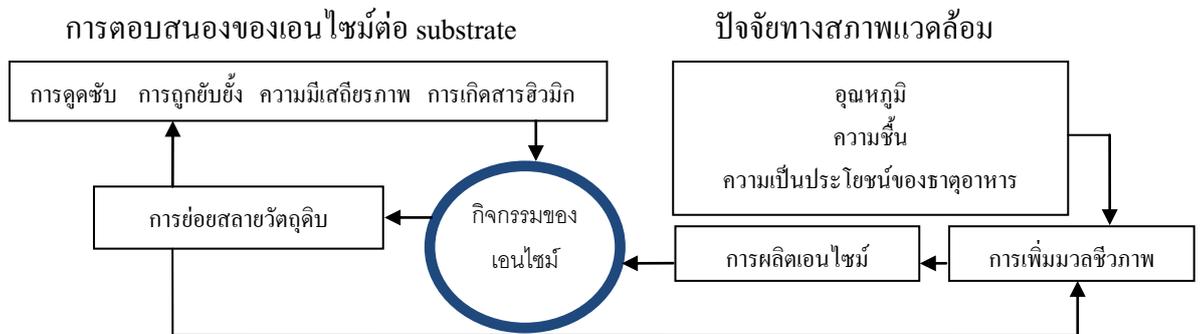
วัดกิจกรรมของเอนไซม์ชนิดนี้จึงบ่งชี้ถึงการออกซิเดชันระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ (Gajda and Martyniuk, 2005)

2) **เอนไซม์ที่มีระดับความจำเพาะปานกลาง (medium specificity assay)** เป็นเอนไซม์ที่มีความจำเพาะสูงขึ้นหรือระดับปานกลาง ได้แก่เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรธาตุอาหารหลัก ตัวอย่างเช่น เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เอนไซม์ chitinase, protease, peptidases, amidases, deaminases, nuclease และ urease เป็นต้น โดยเฉพาะกิจกรรมของเอนไซม์ urease ที่ได้รับความสนใจในการศึกษาเนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนไปเป็นแอมโมเนียมและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Benitez et al., 2005; Tejada et al., 2008) ส่วนเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรธาตุอาหารฟอสฟอรัส ได้แก่ phosphomonoesterase, phosphodiesterase และ phospholipase เป็นต้น ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายพันธะในสารอินทรีย์ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ขณะที่เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายพันธะในสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เอนไซม์ในกลุ่ม lignocellulase ซึ่งมี 5 ตัวคือ  $\beta$ -glucosidase, endocellulase, exocellulase, phenoloxidase และ  $\beta$ -xylosidase โดยเอนไซม์  $\beta$ -glucosidase ได้รับการศึกษามากที่สุด เนื่องจากเอนไซม์ชนิดนี้ทำหน้าที่ตัดพันธะ  $\beta$ -1,4 glucosidase ระหว่างน้ำตาลกลูโคสสองโมเลกุล (disaccharide) ที่เชื่อมต่อกันเป็นสายสั้นๆที่พบในซากพืช นอกจากนี้เอนไซม์ในกลุ่ม hemicellulase ที่ได้รับความสนใจในการศึกษา เช่น เอนไซม์ไซเลเนส (xylanase) ซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายไซแลน (xylan) ที่พบในผนังเซลล์พืช (Permonen et al., 2007) ขณะที่เอนไซม์ Invertase ทำหน้าที่ย่อยสลายน้ำตาลซูโครส (sucrose) ที่พบในซากพืชไปเป็น กลูโคส (glucose) และ ฟรุกโตส (fructose) เนื่องจากเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรธาตุอาหารทำหน้าที่สลายพันธะในตำแหน่งที่จำเพาะในสารอินทรีย์ ดังนั้นการวัดเอนไซม์ประเภทนี้จึงจัดเป็นการวัดที่มีความละเอียดปานกลาง (medium resolution applications)

3) **เอนไซม์ที่มีระดับความจำเพาะสูง (high specificity assay)**เป็นการศึกษาเอนไซม์ที่มีระดับความละเอียดหรือจำเพาะสูง เช่น การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเอนไซม์กับ substrate (enzyme-substrate interactions)

การผลิต extracellular enzyme จากจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอก ทั้งสภาพแวดล้อมในระดับมหภาค (macroenvironmental level) ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้น และสภาพแวดล้อมในระดับจุลภาค (microenvironmental level) ได้แก่ อุณหภูมิ, ความชื้น, และความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่าง substrate และเอนไซม์ (enzyme-substrate interactions) ซึ่งการตอบสนองของเอนไซม์ต่อ substrate ได้แก่ การเกิดการยับยั้ง (inhibition) ของการทำงานของเอนไซม์, การเกิดการดูดซับ (adsorption) เอนไซม์บนพื้นผิว และการเกิดสารประกอบอิมิก

(humification) เป็นต้น โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าวส่งผลต่อเนื่องไปยังการเปลี่ยนแปลงของ pH, พลังงานกระตุ้น (activation energy) และจลนศาสตร์ (kinetics) ของเอนไซม์ และสามารถตรวจวัดได้จากอัตราการหมุนเวียน (turnover rate) ที่เปลี่ยนไป ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการผลิตและกิจกรรมของเอนไซม์ระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ แสดงในภาพที่ 2.11



**ภาพที่ 2.11** อัตราการย่อยสลายของวัตถุคิบโดยกิจกรรมของเอนไซม์ถูกควบคุมโดยสภาวะแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ, ความชื้น และความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร ขณะเดียวกันกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุส่งผลกลับต่อการผลิต กิจกรรม และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการของเอนไซม์  
ที่มา: Sinsabaugh (1994)