ถ่านชีวภาพกับ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน

รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดชา กมลมานิทย์

ถ่านชีวภาพกับ
ความอุดมสมบูรณ์ของดิน

รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุเดชา กมลมานิทย์

ถ่านชีวภาพกับความอุดมสมบูรณ์ของดิน

รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุเดชา กมลมานิทย์

ราคา **450** บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1 เดือนกันยายน พ.ศ. 2565 จำนวน 200 เล่ม
พิมพ์ครั้งที่ 2 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2567

หนังสือเล่มนี้สงวนสิทธิ์ตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2558
ห้ามผู้ใดพิมพ์ซ้ำ ลอกเลียน ส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรเท่านั้น

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ
National Library of Thailand Cataloging in Publication Data
ภาณุเดชา กมลมานิทย์.
ถ่านชีวภาพกับความอุดมสมบูรณ์ของดิน.--พิมพ์ครั้งที่ 2.-- กรุงเทพฯ : โอ. เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์, 2567.
334 หน้า.
1. ถ่านชีวภาพ. 2. ความสมบูรณ์ของดิน. I. ชื่อเรื่อง.

662.88
ISBN 978-616-594-156-3

พิมพ์ที่ โอ. เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์
113/13 ซอยวัดสุวรรณคีรี ถนนบรมราชชนนี
แขวงอรุณอมรินทร์ เขตบางกอกน้อย
กรุงเทพมหานคร 10700

กิตติกรรมประกาศ

หนังสือ **ถ่านชีวภาพกับความอุดมสมบูรณ์ของดิน** เล่มนี้สามารถดำเนินการกระทั่งสำเร็จเป็นผลงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ มีส่วนสำคัญมาจากงานวิจัยที่ต้องมีการใช้ทรัพยากรจากหลายแหล่งทั้งในด้านทรัพยากรธรรมชาติ และทรัพยากรบุคคล นอกจากนี้ยังมีแหล่งทุนต่าง ๆ ที่ได้สนับสนุนด้านการวิจัย ตลอดจนคณะกรรมการผู้กลั่นกรองทุกท่านที่ได้กรุณาตรวจอ่าน และให้ความอนุเคราะห์ปรับแก้ไข ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้หนังสือมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้เขียนมีความซาบซึ้งเป็นอย่างมาก จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาส นี้

หนังสือเล่มนี้เกิดขึ้นจากการศึกษาค้นคว้าทำวิจัย ประสบการณ์จากการสอน การลงพื้นที่เพื่อถ่ายทอดแลกเปลี่ยนองค์ความรู้กับชุมชน รวมถึงการเป็นวิทยากรในหลายพื้นที่ หนังสือเล่มนี้จึงมีความทันสมัย และถูกต้องตามหลักวิชาการเพื่อให้สามารถนำไปใช้ประกอบการสอนสำหรับอาจารย์และเหมาะสมสำหรับนักศึกษา รวมถึงบุคคลทั่วไปที่ต้องการใช้เพื่อศึกษา หรือนำไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติจริง

หนังสือเล่มนี้เกิดขึ้นได้ด้วยแรงบันดาลใจที่ได้รับจากบิดา และมารดาของผู้เขียน ครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอนให้ผู้เขียนได้เป็นผู้มีวิชาความรู้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ภูสิทธิ พลายชมภู ดร. ศิวพร แพงคำ และคุณสุกฤตยา ด่านณรงค์ ผู้เป็นตัวอย่างของแรงผลักดันในการทำงาน เพื่อนร่วมงานหลายท่านทั้งในแวดวงวิชาการ และหลากหลายสาขาที่ต่างออกไปสำหรับความช่วยเหลือในการตรวจทาน และให้ข้อเสนอแนะ อีกทั้งผู้เขียนยังได้รับแรงบันดาลใจจากบุคคลอีกมากมายในการสร้างสรรค์ผลงานเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างหนังสือที่มีคุณค่าให้แก่ประเทศชาติสืบไป

รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุเดชา กมลมานิทย์

คำนำ

แนวทางสำคัญในการปรับปรุงดินที่เสื่อมโทรมให้มีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มอินทรียวัตถุให้กับดิน ซึ่งทำได้โดยการใส่วัสดุอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม และหาแนวทางรักษาให้คงอยู่ไม่หมดไปจากดินอย่างรวดเร็ว ถ่านชีวภาพแตกต่างไปจากวัสดุอินทรีย์ทั่วไป เนื่องจากมีส่วนที่ต้านทานต่อการย่อยสลายสูง ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเปลี่ยนรูปโดยความร้อน แต่ถ่านชีวภาพก็มีศักยภาพในการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินได้เช่นเดียวกับอินทรียวัตถุ ถ่านชีวภาพมีรูพรุนจำนวนมากจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสูง เป็นทั้งที่อยู่อาศัย และแหล่งอาหารให้กับสิ่งมีชีวิตในดิน ถ่านชีวภาพยังมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุเป็นลบจำนวนมาก จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชประจุบวกให้กับดิน ได้เช่นเดียวกับอินทรียวัตถุในดิน ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินจำนวนมากขึ้น สำหรับบริบทของการผลิตและใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพในประเทศไทย อาจต้องพิจารณาในแง่มุมที่มีความหลากหลาย ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ของเสียจากฟาร์มสัตว์เพื่อเป็นแนวทางลดการใช้ไม้ในการผลิต อีกทั้งควรมุ่งเน้นการเพิ่มศักยภาพของถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเสื่อมโทรม ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของดินในหลายพื้นที่ของประเทศไทย จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจตั้งแต่พื้นฐานของวัสดุอินทรีย์ รูปแบบของการผลิตถ่านชีวภาพ กระทั่งแนวทางใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพได้อย่างเหมาะสม

หนังสือ **ถ่านชีวภาพกับความอุดมสมบูรณ์ของดิน** เล่มนี้ จึงมีกรอบแนวคิดที่ช่วยให้ผู้อ่านมองเห็นภาพรวมได้อย่างชัดเจนมากขึ้น เนื้อหาในหนังสือได้กล่าวถึงการค้นพบถ่านชีวภาพในดิน “เทอร์รา เพรตา” เชื่อมโยงมาถึงการใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินในท้ายที่สุด ในแต่ละบทได้สอดแทรกข้อมูลความรู้พื้นฐาน และงานวิจัยเกี่ยวข้องที่มีความเป็นปัจจุบัน โดยมีรูปประกอบจากงานวิจัยเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น ผู้เขียนได้เสริมแนวคิดให้เหมาะสมกับบริบทสังคมและท้องถิ่น เพื่อให้ผู้อ่านสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง มีคำถามเพื่อทบทวนในตอนท้ายของทุกบท มีการใช้หน่วยภาษาอังกฤษในบางกรณี ซึ่งผู้เขียนได้เขียนภาษาไทยกำกับเอาไว้ตอนต้น

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะก่อเกิดประโยชน์ให้แก่ผู้ศึกษาทุกท่าน ผู้เขียนน้อมรับคำติชมอันจะก่อให้เกิดประโยชน์เกิดแก่หนังสือเล่มนี้ทุกประการ

รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุเดชา กมลมานิทย์

สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		I
คำนำ		iii
สารบัญ		v
สารบัญภาพ		ix
สารบัญตาราง		xiii
อักษรย่อและหน่วยที่ใช้		xv
บทที่ 1	**บทนำ**	**1**
	ความหมายและความเป็นมาของถ่านชีวภาพ	1
	การค้นพบถ่านชีวภาพในแถบลุ่มน้ำแอมะซอน	3
	เทอร์รา เพรตา	13
	โฉมหน้าแอมะซอนที่เปลี่ยนไปในปัจจุบัน	16
	สรุป	19
	คำถามท้ายบท	20
	เอกสารอ้างอิง	20
บทที่ 2	**องค์ความรู้ทางดิน**	**27**
	องค์ประกอบของดินและการกำเนิด	27
	การกำเนิดดิน	28
	กระบวนการสร้างตัวของดิน	34
	นิยามและคำจำกัดความด้านดิน	41
	ระบบสารแขวนลอยดิน	50
	ความโดดเด่นของดินแถบลุ่มน้ำแอมะซอน	51
	การศึกษาดินเพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตร	53
	สรุป	56

	คำถามท้ายบท	57
	เอกสารอ้างอิง	57
บทที่ 3	**สมบัติของวัสดุอินทรีย์และแนวทางใช้ผลิตถ่าน**	**63**
	โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของพืช	64
	สมบัติของถ่านชีวภาพและแนวทางการศึกษา	70
	ถ่านชีวภาพจากแหล่งชีวมวล	82
	สรุป	86
	คำถามท้ายบท	87
	เอกสารอ้างอิง	88
บทที่ 4	**โครงสร้างถ่านและวัสดุนาโนคาร์บอน**	**97**
	การจำแนกชนิดของถ่าน	98
	การไพโรไลซิส	99
	คาร์บอไนเซชัน	101
	การกำเนิดและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถ่าน	103
	โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชัน	112
	แนวทางใช้ประโยชน์จากวัสดุนาโนคาร์บอน	116
	สรุป	121
	คำถามท้ายบท	121
	เอกสารอ้างอิง	122
บทที่ 5	**ถ่านชีวภาพกับความอุดมสมบูรณ์ของดิน**	**129**
	แนวคิดการใช้ถ่านชีวภาพเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน	130
	ความหมายและประเภทของอินทรียวัตถุในดิน	131
	อินทรียวัตถุในดินกับความอุดมสมบูรณ์ของดิน	137
	บทบาทของถ่านชีวภาพต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน	141
	สรุป	153

	คำถามท้ายบท	153
	เอกสารอ้างอิง	154
บทที่ 6	**ถ่านชีวภาพกับการแก้ปัญหาดินเค็ม**	**161**
	ดินเค็มและแหล่งที่พบ	161
	ประเภทของดินเค็ม	164
	ดินเค็มและดินโซดิก	165
	การวัดระดับความเค็มของดิน	167
	แหล่งดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	170
	การจำแนกพื้นที่ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	175
	ผลกระทบจากความเค็มต่อสมบัติของดิน	178
	การใช้วัสดุอินทรีย์ปรับปรุงดินเค็ม	181
	สรุป	187
	คำถามท้ายบท	188
	เอกสารอ้างอิง	188
บทที่ 7	**ถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์และแนวทางประยุกต์ใช้**	**195**
	การผลิตถ่านชีวภาพเพื่อเป้าหมายปรับปรุงบำรุงดิน	195
	การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์	201
	ปุ๋ยหมักกับถ่านชีวภาพ	208
	ปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพต่อกลไกการสร้างเม็ดดิน	214
	ประโยชน์ของการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์แบบองค์รวม	216
	สรุป	217
	คำถามท้ายบท	218
	เอกสารอ้างอิง	218
บทที่ 8	**เอนไซม์กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน**	**227**
	ความหมายของเอนไซม์และการตรวจวัด	227

	ประเภทของเอนไซม์และตำแหน่งที่พบในดิน	231
	เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการหมุนเวียนคาร์บอนในดิน	237
	แนวทางใช้ประโยชน์จากการตรวจวัดเอนไซม์หมุนเวียนคาร์บอน	254
	สรุป	257
	คำถามท้ายบท	257
	เอกสารอ้างอิง	258
บทที่ 9	**การสร้างและสลายอินทรียวัตถุในดิน**	**265**
	คาร์บอนที่เข้าสู่ระบบดินโดยพืช	266
	พลวัตของอินทรียวัตถุในดิน	269
	เอนไซม์กับพลวัตของอินทรียวัตถุในดิน	275
	ปรากฏการณ์ไพรมิ่ง	280
	การปรับปรุงคุณภาพวัสดุอินทรีย์เพื่อการสะสมคาร์บอนในดิน	286
	สรุป	289
	คำถามท้ายบท	290
	เอกสารอ้างอิง	290
ภาคผนวก		**291**
ดัชนี		**301**
Index		**305**
ประวัติผู้เขียน		**309**

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	สัดส่วนป่าดิบชื้นแอมะซอนที่ครอบคลุมพื้นที่ 9 ประเทศในทวีปอเมริกาใต้	5
1.2	พื้นที่ลุ่มน้ำและชีวนิเวศแอมะซอน (ซ้าย) และเส้นทางทางไหลของสายน้ำ (ขวา)	7
1.3	ข้อเท็จจริงบางประการของพื้นที่ลุ่มน้ำแอมะซอน	13
1.4	แนวคิดการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยหมักเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน	15
1.5	หน้าตัดดิน “เทอร์รา เพรตา” ที่มีสีดำกว่าดินบริเวณโดยรอบ	16
1.6	รูปแบบการใช้ประโยชน์จากป่าในพื้นที่แถบลุ่มน้ำแอมะซอน	19
2.1	ดินในทางอุดมคติของนักปฐพีศาสตร์	29
2.2	ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการกำเนิดดิน	33
2.3	ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อกระบวนการกำเนิดดิน	34
2.4	การพัฒนาตัวของดินตามระยะเวลาจนกลายเป็นชั้นดิน	35
2.5	กระบวนการสร้างตัวของดิน	36
2.6	หน้าตัดดินที่แสดงชั้นดิน	40
2.7	ขนาดของกรวดและอนุภาคดินแต่ละขนาด	43
2.8	การประเมินเนื้อดินจากสามเหลี่ยมแจกแจงประเภทเนื้อดิน	45
2.9	ดินทรายที่ไม่มีโครงสร้างมีลักษณะเป็นอนุภาคเดี่ยว	47
2.10	ภาพจำลองระบบคอลลอยด์ดินในหน้าตัดดิน	51
3.1	โครงสร้างสามมิติของเซลลูโลส	66
3.2	โครงสร้างลิกนิน	68
3.3	โครงสร้างพอลิฟีนอลส์	69
3.4	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน	70
3.5	ความหนาแน่นรวมของดินเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพ	71
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า H/C กับ O/C ตามอุณหภูมิในการไพโรไลซิส	76
3.7	ภาพใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของถ่านชีวภาพขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่อุณหภูมิต่างกัน	84
3.8	การผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลและแนวทางใช้ประโยชน์	86

4.1	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสเป็นลีโวกลูโคเซโนน	105
4.2	การเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในถ่านที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	106
4.3	หน่วยฟูลเลอรีนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมที่ต่างกัน	109
4.4	ผู้ค้นพบฟูลเลอรีนและท่อนาโนคาร์บอน	110
4.5	โครงสร้างระดับนาโนของโมเลกุลคาร์บอน (ศูนย์ถึงสามมิติ) ที่ได้มาจากแกรฟีน	110
4.6	โครงสร้างจำลองเขม่าดำที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคนาโนคาร์บอน	111
4.7	โครงสร้างถ่านแบบหัวหอม ตัวเลขที่ห้อยท้ายแสดงจำนวนคาร์บอน	112
4.8	โครงสร้างกรดฮิวมิกและหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏ	114
4.9	ข้อมูลแถบสเปกตรัมของถ่านชีวภาพไม้โอ๊ก (a) และฟางข้าว (b)	115
4.10	การเปลี่ยนแปลงสมบัติของถ่านชีวภาพตามช่วงอุณหภูมิ	116
4.11	การเจริญเติบโตและการแสดงออกของยีนเซลล์ยาสูบ	118
4.12	การกระจายตัวของฟูลเลอรอลในพืช	119
5.1	ปัจจัยสามประการที่ควบคุมการสลายตัวของวัสดุอินทรีย์ในดิน	131
5.2	การแบ่งสัดส่วนของอินทรียวัตถุในดินตามการมีชีวิต	132
5.3	การสร้างตัวของเม็ดดิน	134
5.4	โครงสร้างทางเคมีของกรดฮิวมิก	135
5.5	วัฏจักรคาร์บอนที่มีการดึงคาร์บอนเข้าสู่ปฐพีภาค	141
5.6	ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH	145
5.7	การดูดยึดธาตุอาหารพืชประจุบวกบนถ่านชีวภาพที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบ	147
5.8	กลไกที่ถ่านที่สามารถดูดซับธาตุอาหารพืชกลุ่มโลหะ	147
5.9	เส้นใยรา (ซ้าย) และแบคทีเรีย (ขวา) บนผิวและในรูพรุนของถ่าน	148
5.10	อิทธิพลของถ่านชีวภาพต่อสิ่งมีชีวิตในดิน	151
6.1	โซเดียมไบคาร์บอเนตในดินโซดิกเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ	167
6.2	แอ่งที่พบในพื้นที่ราบสูงโคราช	172
6.3	หมวดหินในกลุ่มหินโคราช (Khorat Group)	174
6.4	ค่าการนำไฟฟ้าสัมพัทธ์หลังการใส่ถ่านชีวภาพในดินเค็ม	185

6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EC และ CEC ของดินเค็ม	186
7.1	ปัจจัยด้านอุณหภูมิต่อผลผลิตถ่านชีวภาพ	198
7.2	อุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในถ่านชีวภาพ	199
7.3	แบบจำลองเตาดินก่อ (ซ้าย) และเตาดินเหนียวก่อ (ขวา)	203
7.4	แบบจำลองเตาหลุมกลบ (ซ้าย) และเตาหลุมกลบ (ขวา)	204
7.5	ปริมาณธาตุอาหารในถ่านชีวภาพที่ผลิตด้วยเตาพื้นบ้านสองแบบ	205
7.6	ธาตุอาหารในถ่านชีวภาพที่ผลิตด้วยเตาดินเหนียวก่อและเตาสมัยใหม่	207
7.7	มูลแพะสด (a) และถ่านชีวภาพมูลแพะเตาสมัยใหม่ (b)	208
7.8	การหมักปุ๋ยร่วมกับถ่านชีวภาพ (ซ้าย) และปุ๋ยหมักถ่านชีวภาพ (ขวา)	212
7.9	เส้นผ่านศูนย์กลางน้ำหนักเฉลี่ยเม็ดดิน	215
7.10	การแจกกระจายของขนาดเม็ดดินจากการใส่วัสดุอินทรีย์ต่างชนิด	215
7.11	กรอบแนวคิดการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์แบบองค์รวม	217
8.1	กราฟเส้นโค้งของ Michaelis-Menten (Km)	228
8.2	แนวคิดของการเคลื่อนที่ของเอนไซม์ออกสู่ภายนอกเซลล์	233
8.3	ปัจจัยควบคุมกิจกรรมของเอนไซม์ที่ส่งผลต่ออินทรียวัตถุในดิน	234
8.4	การทำงานของเอนไซม์ในกลุ่มเซลลูเลสในการย่อยสลายเซลลูโลส	238
8.5	การทำงานของบีตา-กลูโคสิเดสในการย่อยซับสเตรต	239
8.6	กิจกรรมของบีตา-กลูโคสิเดสในดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์ต่างชนิด	241
8.7	การทำงานของอินเวอร์เทสในการย่อยสลายซูโครสให้ได้กลูโคสและฟรักโทส	243
8.8	กิจกรรมของอินเวอร์เทสในดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์ต่างชนิด	244
8.9	การทำงานของเอนไซม์ไซลาเนสในการย่อยสลายไซแลน	245
8.10	สารประกอบที่เป็นซับสเตรตของฟีนอลออกซิเดสและเพอร์ออกซิเดส	251
8.11	การทำงานของเอนไซม์ในกลุ่มฟีนอลออกซิเดส	252
8.12	ขั้นตอนการทำงานของเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดส	253
8.13	การแสดงออกของเอนไซม์แต่ละชนิดในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์	256
9.1	แนวคิดการนำเข้าและหมุนเวียนคาร์บอนในระบบดิน	268
9.2	วงจรคาร์บอนโดยทั่วไป (ซ้าย) และในระบบการผลิตถ่านชีวภาพ (ขวา)	269
9.3	กลไกการสร้างและสลายเม็ดดิน	272

9.4	เส้นทางของคาร์บอนในระบบดิน	277
9.5	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพจุลินทรีย์และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์	280
9.6	การเกิดไพรมิ่งในดิน	281
9.7	กลไกการเกิดไพรมิ่งในดิน	284
9.8	การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์ต่างชนิด	288

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจำแนกดินตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	43
2.2	ค่าความจุการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกในดินแต่ละประเภท	49
3.1	พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ตามมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม	77
3.2	สมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพจากพืชและมูลสัตว์	83
4.1	ข้อจำกัดของนาโนคาร์บอนต่อผลผลิตทางการเกษตร	117
5.1	การสลายตัวของถ่านชีวภาพแบบเอกซ์โพเนนเชียลลำดับที่หนึ่ง	137
5.2	คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในดินจากแปลงทดลองเดียวกันหลังใส่วัสดุอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง	140
5.3	สมบัติทางกายภาพของดินที่ได้รับถ่านชีวภาพในอัตราที่แตกต่างกัน	144
6.1	การตอบสนองของพืชต่อค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดิน	168
6.2	การจำแนกดินภายใต้อิทธิพลของเกลือและโซเดียม	169
6.3	ปริมาณธาตุอาหารประจุบวกสองชนิดที่พบในถ่านชีวภาพ	183
6.4	การเจริญเติบโตของกวางตุ้งฮ่องเต้ในดินเค็มที่ใส่วัสดุอินทรีย์ต่างชนิด	185
7.1	สภาวะการไพโรไลซิสต่อผลผลิตถ่านชีวภาพและผลพลอยได้	197
7.2	ปริมาณคาร์บอนและธาตุอาหารที่พบในถ่านชีวภาพแต่ละประเภท	201
7.3	สมบัติของถ่านชีวภาพมูลแพะที่ผลิตด้วยเตาหลุมกลบและเตาดินเหนียวก่อ	204
7.4	สมบัติบางประการของถ่านชีวภาพมูลแพะที่ผลิตด้วยเตาดินเหนียวก่อและเตาสมัยใหม่	207
7.5	กรรมวิธีศึกษาในการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุร่วมในการหมักปุ๋ย	212
7.6	ตัวชี้วัดความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่มีถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสม	213
8.1	ประเภทของเอนไซม์แบ่งตามการเร่งปฏิกิริยา	235
8.2	ความสัมพันธ์ระหว่างบีตา-กลูโคสิเดสกับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอินทรีย์	242
8.3	จำนวนอะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างสารประกอบฟีนอลิก	250
8.4	สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ในวัสดุอินทรีย์	255

9.1 ปริมาณคาร์บอนต่อปีและคาร์บอนที่ถูกกักเก็บจากการใส่วัสดุอินทรีย์ต่างชนิด 273
9.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation, r) ระหว่างตัวชี้วัดทางดินและกิจกรรมเอนไซม์ 279
9.3 ทิศทางของการเกิดไพรมิ่งในดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์แตกต่างกัน 286
9.4 การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์ต่างชนิด 288

อักษรย่อและหน่วยที่ใช้

%	เปอร์เซ็นต์
>	มากกว่า
<	น้อยกว่า
≈	เท่ากันโดยประมาณ
aPE	ลักษณะปรากฏของไพรมิ่ง
bar	บาร์ (หน่วยวัดความดัน)
cmol(+)/kg	เซนติโมลของประจุบวกต่อกิโลกรัม
carbon to nitrogen (C/N) ratio	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
°C	องศาเซลเซียส
CO_2	คาร์บอนไดออกไซด์
DOC	คาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายได้
DOM	อินทรียวัตถุในรูปที่ละลายได้
DON	ไนโตรเจนอินทรีย์ที่ละลายได้
equivalent diameter	เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล
Gt	กิกะตัน
g/kg	กรัมต่อกิโลกรัม
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
km^2	ตารางกิโลเมตร
kDa	กิโลดาลตัน
mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
min	นาที
mm	มิลลิเมตร
mmhos/cm	มิลลิโมห์ต่อเซนติเมตร
µm	ไมโครเมตร
nm	นาโนเมตร
nM	นาโนโมลาร์

qCO_2	การหายใจของจุลินทรีย์ต่อมวลชีวภาพจุลินทรีย์คาร์บอน
rPE	ไพรมิ่งที่แท้จริง
Siemens/m	ซีเมนส์ต่อเมตร

บทที่ 1
บทนำ

ถ่านชีวภาพ (biochar) เป็นวัตถุสีดำที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (carbonaceous compounds) มีลักษณะเป็นของแข็งที่มีรูพรุน และปรากฏหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากบนพื้นผิว ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับ และแลกเปลี่ยนประจุกับธาตุ หรือสารประกอบอื่น ๆ ได้อีกหลายชนิด ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพได้หลายทาง อาทิ ด้านเกษตรวิศวกรรม การแพทย์ รวมถึงการประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดสารพิษจากสภาพแวดล้อมทั้งในดิน และในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ่านชีวภาพมีประวัติความเป็นมายาวนานหลายพันปี แต่การศึกษาอย่างจริงจังได้เป็นรูปร่างชัดเจนมากขึ้น เมื่อนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบว่าดินบางพื้นที่ในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนมีสีดำ ซึ่งสืบเนื่องมาจากสีของถ่านชีวภาพที่ผสมคลุกคล้ากับดินที่ขุดพบ ถึงแม้ว่าดินที่พบในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนส่วนใหญ่จัดอยู่ในลำดับออกซิซอลส์ (Oxisols) ซึ่งจัดเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำเนื่องจากวัตถุต้นกำเนิดของดินชนิดนี้ปริมาณธาตุอาหารพืชที่ต่ำ แต่กลับกลายเป็นว่าดินบริเวณที่พบถ่านชีวภาพคลุกเคล้านั้นกลับมีความอุดมสมบูรณ์แตกต่างจากดินที่ไม่มีถ่านชีวภาพปะปน อีกทั้งยังมีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ยืนยันว่าถ่านเหล่านี้อยู่ในดินมาแล้วนานนับพันปี ประเด็นดังกล่าวจึงจุดประกายให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกได้เริ่มทำการสำรวจ ศึกษาถึงการกำเนิด แนวทางการผลิต และการใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพอย่างจริงจัง โดยเฉพาะในแง่มุมการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดิน ทั้งนี้เนื่องจากถ่านชีวภาพนอกจากสามารถปรับปรุงสมบัติของดินทั้งด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพแล้ว ถ่านชีวภาพยังสามารถเพิ่มผลผลิตพืชให้มีคุณภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีบทบาทที่โดดเด่นในการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับลดปัญหาโลกร้อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบันได้อย่างมีนัยสำคัญ

ความหมายและความเป็นมาของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ หรือ biochar เป็นคำภาษาอังกฤษที่เกิดจากการสร้างคำขึ้นมาใหม่ (neologism) ในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 มีที่มาจากภาษากรีก คำว่า “bios” หมายถึง ชีวิต และ “char” มีความหมายว่าถ่าน โดย Lehmann and Joseph (2009) ได้นิยามคำว่าถ่านชีวภาพไว้ดังนี้ว่า “ถ่านชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุดมด้วยคาร์บอนเกิดขึ้นเมื่อมวลชีวภาพ เช่น ไม้ มูลสัตว์ หรือใบไม้

ถูกทำให้ร้อนในภาชนะปิดที่มีอากาศน้อย หรือไม่สามารถใช้งานได้” “*biochar is the carbon-rich product when biomass, such as wood, manure or leaves, is heated in a closed container with little or no available air*” (Lehmann and Joseph, 2009) ภายหลังจากนั้น Shackley *et al.* (2012) ได้พรรณนาถึงสมบัติของถ่านชีวภาพไว้ว่า “เป็นของแข็งที่มีรูพรุนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ผลิตโดยการเปลี่ยนรูปทางอุณหเคมีของวัสดุอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน มีสมบัติทางเคมีกายภาพที่เหมาะสม และมีความปลอดภัยสำหรับการใช้ในระยะยาวเพื่อกักเก็บคาร์บอนในสภาพแวดล้อม” “*the porous carbonaceous solid produced by the thermochemical conversion of organic materials in an oxygen depleted atmosphere that has physicochemical properties suitable for safe and long-term storage of carbon in the environment*” แต่จากนิยามของ HTPA Science Committee ได้ให้ความหมายของถ่านชีวภาพในทางความอุดมสมบูรณ์ของดินไว้ว่า “ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีเป้าหมายของการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ในรูปแบบของการกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน” (HTPA Science Committee, 2015) ซึ่งคำจำกัดความทั้งหมดที่ยกตัวอย่างมานี้ล้วนเกี่ยวข้องโดยตรง หรือโดยอ้อมกับการผลิตถ่านชีวภาพ และแนวทางการประยุกต์ใช้ทางดิน ทั้งนี้สำหรับการใช้คำว่า “ถ่าน” หรือ “ถ่านชีวภาพ” ในบทนี้และบทถัดไป ผู้เขียนได้เลือกใช้คำให้สอดคล้องกับบริบทเนื้อหา ตัวอย่างกรณีศึกษา และวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้เป็นสำคัญ

การผลิตถ่านชีวภาพในปัจจุบันเป็นการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเผามวลชีวภาพจากแบบเดิม คือ การเผาวัสดุเชื้อเพลิงในที่โล่ง หรือการฝังกลบ มาเป็นวิธีการเผาในระบบปิดที่ช่วยในด้านการจัดการวัสดุชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าถ่านชีวภาพหมายรวมถึงมวลชีวภาพที่ผ่านการเผาไหม้ หรือการคาร์บอไนซ์ (carbonization) จากแหล่งผลิตที่ยั่งยืน โดยเฉพาะมวลชีวภาพจากไม้ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ที่มุ่งเน้นการกักเก็บไว้ในดิน และใช้ดินนั้นเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรที่เป็นแนวทางการรักษาสภาพแวดล้อมอย่างยั่งยืนทั้งในปัจจุบัน และอนาคต ภายใต้การจัดการด้วยวิธีที่เหมาะสม ประเด็นนี้คือสิ่งที่ถ่านชีวภาพมีความแตกต่างจากถ่านที่ใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน หรือใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ หรือแม้แต่การใช้เพื่องานวาดเขียน (Lehmann and Joseph, 2015) ทั้งนี้ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ทางหน่วยงาน International Biochar Initiative (IBI) ได้เผยแพร่ “ข้อกำหนดผลิตภัณฑ์มาตรฐานและแนวทางการทดสอบผลิตภัณฑ์สำหรับถ่านชีวภาพที่ใช้ในดิน” เวอร์ชัน 2.1 (IBI, 2015) ซึ่ง “มาตรฐานถ่านชีวภาพของ IBI” เป็นไปเพื่อให้คำแนะนำถึงความปลอดภัยในการผลิต และการใช้งานถ่านชีวภาพ แต่ไม่ได้กำหนดตัวชี้วัดสำหรับการ

ผลิต และการจัดการวัตถุดิบ และไม่ได้กำหนดเกณฑ์ในด้านความยั่งยืนของแหล่งวัตถุดิบ หรือผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพแต่อย่างใด ทั้งนี้ผู้ที่สนใจสามารถเข้าดูข้อกำหนดมาตรฐานของถ่านชีวภาพจากเว็บไซต์ “http://www.biochar-international.org/characterizationstandard”

จากหลักฐานการค้นพบถ่านชีวภาพในชีวนิเวศแถบลุ่มน้ำแอมะซอน (Amazon biome) เมื่อไม่นานมานี้ ทำให้เราทราบว่ามีถ่านชีวภาพถูกกักเก็บอยู่ในดินมาเป็นระยะเวลานานหลายร้อยปี กระทั่งถึงหลายพันปี อีกทั้งยังถือได้ว่าเป็นรูปแบบของการสะสมคาร์บอนในดินมาเป็นระยะเวลานาน (long-term carbon sink) รูปแบบหนึ่ง ถึงแม้มีหลักฐานการค้นพบที่บ่งชี้ว่ามนุษย์รู้จักใช้ไฟเพื่อการเผาไหม้ไม้มาราว 3,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช ดังเช่น การปรากฏภาพวาดตามผนังถ้ำ หรือการใช้ถ่านในการวาดรูปโดยศิลปินในหลายยุคสมัย (Lehmann and Joseph, 2015) แต่เมื่อมีการกล่าวถึงการค้นพบถ่านชีวภาพในดินแล้ว ผู้คนส่วนใหญ่ยังคงนึกถึงดินแถบลุ่มน้ำแอมะซอนซึ่งเป็นแหล่งที่มีการค้นพบถ่านชีวภาพสะสมอยู่ภายใต้ชั้นดินจำนวนมาก ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วยังมีพื้นที่อีกหลายแห่งทั่วโลกที่ถูกค้นพบว่ามีถ่านชีวภาพในลักษณะเดียวกันนี้ เช่น สาธารณรัฐเบนิน และสาธารณรัฐไลบีเรียในแอฟริกาตะวันตก (USBI, 2020) อีกทั้งดินที่ปรากฏยังจัดว่าเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงเช่นเดียวกัน การพบถ่านชีวภาพในดินหลายแห่งทั่วโลกส่วนใหญ่เกิดจากเหตุการณ์ทางธรรมชาติ เช่น การเกิดไฟไหม้ผืนป่า แต่ยังพบรายงานว่าไฟที่ไหม้ทุ่งหญ้าในบางสภาวะอาจส่งผลให้เกิดเป็นถ่านสะสมในดินได้เช่นกัน (Krull *et al.,* 2008) ในขณะที่วัสดุอินทรีย์ที่ได้จากการเผา (burning) มีความต่างจากถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากการเผาทำให้ได้ผลผลิตหลัก คือ เถ้า (ash) นอกจากนี้ยังพบแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) รวมถึงสารประกอบคาร์บอเนต (Lehmann and Joseph, 2009) แต่ความน่าสนใจอย่างมากของดินในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนที่จะได้กล่าวถึง ว่ามีลักษณะพิเศษแตกต่างจากดินโดยทั่วไป นั่นคือเป็นดินที่มีคาร์บอนที่สะสมในปริมาณที่สูงอย่างมากแตกต่างจากดินบริเวณโดยรอบที่ไม่พบถ่านชีวภาพ ข้อมูลทางประวัติศาสตร์ในรายละเอียดต่อจากนี้ยังช่วยไขปริศนาการค้นพบดินดำในบริเวณลุ่มน้ำแอมะซอนนั้นว่าเกิดจากสาเหตุใด

การค้นพบถ่านชีวภาพในแถบลุ่มน้ำแอมะซอน

ย้อนกลับไปราว 15 ล้านปีก่อน ทวีปต่าง ๆ ได้รวมตัวกันจากการชนกันของแผ่นเปลือกโลกอเมริกาใต้กับแผ่นเปลือกโลกนัซกาของพื้นที่แถบลุ่มน้ำแอมะซอน และเมื่อราว 10 ล้านปีต่อมาจึงเริ่มเกิดแม่น้ำไหลผ่านจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกของทวีป ภายหลังจากการถือกำเนิดของ

เทือกเขาแอนดีสที่เชื่อมโยงของชั้นแผ่นหินของบราซิล และกายอานา จึงทำให้แม่น้ำถูกปิดกั้น และส่งผลให้แอมะซอนกลายเป็นแอ่งทะเลภายในอันกว้างใหญ่ ทะเลภายในแอ่งนี้ค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นบึงน้ำจืดอย่างช้า ๆ สัตว์ทะเลได้ปรับตัวให้เข้ากับการใช้ชีวิตในน้ำจืด ตัวอย่างเช่น ปลากระเบน ซึ่งพบว่ามีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับสายพันธุ์ที่พบในมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งในปัจจุบันยังก็สามารถพบได้ในน้ำจืดของแอมะซอน จากนั้นสายน้ำแอมะซอนเริ่มเกิดการเปลี่ยนทิศทางโดยไหลจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออกแทน ภายหลังผ่านช่วงยุคน้ำแข็ง (Ice Age) เกิดการลดระดับลงของน้ำทะเลในแอ่งทำให้น้ำในทะเลสาบแอมะซอนระบายออกอย่างรวดเร็ว กลายเป็นแม่น้ำสายต่าง ๆ ถือได้ว่าป่าดิบชื้นแอมะซอนได้ถือกำเนิดขึ้นในช่วงนี้ หลังจากนั้นราว 3 ล้านปีต่อมา เมื่อระดับมหาสมุทรโดยรอบลดลงมากพอให้เห็นคอคอดปานามา (Isthmus of Panama) ในอเมริกากลาง จึงเริ่มมีการอพยพของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเข้ามาอยู่อาศัย (Butler, 2020) กระทั่งแอมะซอนมีลักษณะอย่างที่เห็นในปัจจุบัน

ป่าแอมะซอน หรือคำที่ใช้ในภาษาอังกฤษว่า Amazonia เป็นพื้นที่ป่าดิบชื้น (ป่าดงดิบภายใต้สภาพอากาศแบบร้อนชื้น) ในแถบอเมริกาใต้ ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำแอมะซอน (Amazon basin) มีพื้นที่ส่วนที่เป็นป่าราว 5.5 ล้านตารางกิโลเมตร จากพื้นที่ลุ่มน้ำที่มากกว่า 7 ล้านตารางกิโลเมตร ด้วยเหตุนี้ป่าแอมะซอนจึงเปรียบเสมือนตัวแทนของป่าดงดิบราวครึ่งหนึ่งของพื้นที่ป่าบนโลก พื้นที่ป่าแห่งนี้ได้แบ่งออกเป็น “เกาะ” ต่าง ๆ แต่ละละเกาะได้แยกสายพันธุ์สิ่งมีชีวิตที่มีอยู่เดิมออกจากกัน ซึ่งเป็นระยะเวลานานพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างทางพันธุกรรมได้ ป่าดิบชื้นที่คล้ายกันนี้ยังพบได้ในทวีปแอฟริกาเช่นเดียวกัน แต่แนวโน้มของป่าดิบชื้นในแถบอเมริกาใต้ยังคงสภาพทางธรรมชาติได้ดีกว่าป่าในแถบแอฟริกา ส่วนหนึ่งเกิดจากการได้รับแรงกดดันจากนักอนุรักษ์สภาพแวดล้อม และประชากรที่คำนึงถึงสภาพแวดล้อม (Butler, 2006) อย่างไรก็ตามถ้าจะกล่าวถึงขอบเขตที่แท้จริงของแอมะซอนอาจขึ้นอยู่กับการให้คำจำกัดความ เช่น แม่น้ำแอมะซอนมีพื้นที่ระบายน้ำ 6.92 ล้านตารางกิโลเมตร คิดเป็นสัดส่วนราว 40% ของทวีปอเมริกาใต้ เป็นต้น แต่โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึง “แอมะซอน” มักรวมพื้นที่นอกลุ่มน้ำเอาไว้ด้วย ดังนั้นข้อมูลทางชีวภูมิศาสตร์จึงพบว่าพื้นที่แอมะซอนมีขนาดได้ตั้งแต่ 7.76 กระทั่งถึง 8.24 ล้านตารางกิโลเมตร โดยพื้นที่มากกว่า 80% ยังคงสภาพความเป็นป่า จากข้อมูลวิเคราะห์ดาวเทียมแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ป่ามีเขตแดนครอบคลุม 9 ประเทศ โดยประเทศบราซิล (Brazil) ครอบคลุมพื้นที่ป่ามากที่สุด ตามด้วยเปรู (Peru) โคลอมเบีย (Colombia) โบลิเวีย (Bolivia) เวเนซุเอลา (Venezuela) กายอานา (Guyana) ซูรินาม (Suriname) เอกวาดอร์ (Ecuador) และเฟรนช์เกียนา (French Guiana) ตามลำดับ (ภาพที่ 1.1) ป่าแอมะซอนยังจัดเป็นป่าเขตร้อนที่มีความหลากหลายทางชีวภาพมากที่สุด และใหญ่ที่สุดในโลก โดย

มีการประมาณการว่าพื้นที่แห่งนี้มีต้นไม้มากกว่า 390 พันล้านต้น ที่มีความหลากหลายทางสายพันธุ์มากกว่า 16,000 ชนิด (AAAS, 2013)

ภาพที่ 1.1 สัดส่วนป่าดิบชื้นแอมะซอนที่ครอบคลุมพื้นที่ 9 ประเทศในทวีปอเมริกาใต้
ที่มา : ข้อมูลตัวเลขจาก Butler (2020)

1. ชีวนิเวศของพื้นที่ป่า

ข้อมูลที่น่าสนใจทางระบบชีวนิเวศของป่าแถบลุ่มน้ำแอมะซอน มีดังนี้

1.1 ระบบชีวนิเวศของพื้นที่ป่าแอมะซอนมีขนาด 6.7 ล้านตารางกิโลเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับประเทศไทยที่มีขนาดราว 5 แสน 1 หมื่นตารางกิโลเมตร จึงพบว่าพื้นที่ป่าแอมะซอนมีขนาดใหญ่กว่าประเทศไทยถึง 13 เท่า

1.2 แม่น้ำแอมะซอนมีความยาวมากกว่า 6,600 กิโลเมตร ซึ่งหากพิจารณาปริมาณน้ำที่ปล่อยออกมาจะพบว่าเป็นแม่น้ำที่ใหญ่ที่สุดในโลก และอาจเป็นแม่น้ำที่ยาวที่สุดในโลก (Uereyen and Kuenzer, 2019) ทั้งนี้เนื่องจากในการรายงานความยาวของแม่น้ำแอมะซอนมักใช้คำว่า “อย่างน้อย” 6,400 กิโลเมตร (Parsons, 2015) และมักรายงานค่าโดยใช้คำว่า “มีค่าระหว่าง” ดังเช่นในการศึกษาของ Liu *et al.* (2009) ที่รายงานความยาวของแม่น้ำแอมะซอนว่ามีค่าระหว่าง 6,275-7,025 กิโลเมตร ดังนั้นความยาวของแม่น้ำจึงเป็นค่าประมาณการ เนื่องจากมีหลายปัจจัยเป็น

ตัวกำหนดความยาวของแม่น้ำที่คำนวณได้ ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ มาตราส่วนของการวัด และเทคนิคที่ใช้ในการวัดความยาว เป็นต้น

1.3 ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมาได้เกิดข้อถกเถียงอย่างมากถึงความยาวที่แท้จริงของแม่น้ำ 2 สาย เนื่องจากเป็นที่ทราบกันมาว่าแม่น้ำไนล์ (Nile river) เป็นแม่น้ำที่ยาวที่สุดในโลก โดยมีความยาวประมาณ 6,650 กิโลเมตร และแม่น้ำแอมะซอนยาวเป็นอันดับสองโดยมีความยาวอย่างน้อย 6,400 กิโลเมตร แต่จากการศึกษาโดยความร่วมมือของนักวิทยาศาสตร์จากบราซิล และเปรู ในการสำรวจเมื่อ พ.ศ. 2551 ที่ได้เพิ่มระยะทางน้ำออกทางตอนใต้ของแม่น้ำแอมะซอน ผ่านปากแม่น้ำปาราของแม่น้ำโทแคนทินส์ (Pará estuary of the Tocantins) ได้สรุปว่าแม่น้ำแอมะซอนมีความยาวทั้งสิ้น 6,992 กิโลเมตร และยาวกว่าแม่น้ำไนล์ ซึ่งคำนวณระยะทางได้ 6,853 กิโลเมตร (Brazilian National Institute for Space Research, 2011)

1.4 ปลาหลายสายพันธุ์ที่พบในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนนั้น คาดว่าถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยหมักของชนพื้นเมือง หรือมีการใส่เศษซากปลาร่วมกับถ่านชีวภาพลงในดิน เพื่อให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปลาในแถบลุ่มแม่น้ำแอมะซอนจัดเป็นศูนย์กลางความหลากหลายของปลาในเขตร้อนชื้น และยังมีการประมาณการว่ามีสัตว์น้ำจืดในพื้นที่อเมริกาใต้มากถึง 28% ของจำนวนสัตว์น้ำจืดทั่วโลก (Allen *et al.,* 2008) ซึ่งพบว่ายังคงมีการค้นพบสายพันธุ์ใหม่ในแต่ละปี ตัวอย่างปลาที่พบในพื้นที่แห่งนี้ เช่น ปลาไหลไฟฟ้า (*Electrophorus electricus*) ซึ่งมีมากกว่า 100 สายพันธุ์ หรือปลาปิรันยาในวงศ์ *Pristobrycon* sp. *Pygocentrus* sp. และ *Pygopristis* sp. เป็นต้น ซึ่งแยกย่อยได้อีกราว 40 สายพันธุ์ รวมถึงปลาอะราไพม่า (*Arapaima* sp.) ซึ่งเป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งที่ใหญ่ที่สุดในโลก

2. สภาพทางภูมิศาสตร์

ข้อมูลสภาพทางภูมิศาสตร์ ภูมิอากาศ อุทกวิทยา และพืชพรรณที่ส่งผลต่อสภาพความเป็นอยู่ของชนพื้นเมือง และนำไปสู่การกำเนิดถ่านชีวภาพ มีดังนี้

2.1 สภาพภูมิอากาศ พื้นที่ป่าแถบลุ่มน้ำแอมะซอนค่อนข้างอบอุ่น ฝนตกชุก และอากาศชื้น ความยาวของช่วงเวลากลางวัน และกลางคืนเท่ากัน ณ บริเวณแถบเส้นศูนย์สูตร โดยเส้นศูนย์สูตรได้พาดไปทางเหนือเล็กน้อยของทวีปอเมริกาใต้ จึงอยู่ใกล้ปากแม่น้ำมากกว่าต้นกำเนิดจากยอดเขา อุณหภูมิในช่วงเวลากลางวัน และกลางคืนมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นช่วงเวลากลางคืน

อาจถือได้ว่าเป็นช่วงที่อากาศหนาวเย็นของแอมะซอน ความชื้นจากไอน้ำที่พัดเข้าสู่ลุ่มน้ำแอมะซอนส่วนใหญ่มาทางชายฝั่งตะวันออกของทวีป โดยประมาณครึ่งหนึ่งของหยาดน้ำฟ้า (precipitation) ที่เข้าสู่ระบบปฐพีภาคมาจากมหาสมุทรแอตแลนติก และอีกครึ่งหนึ่งมาจากการคายน้ำรวมการระเหย (evapotranspiration) ของป่าที่อยู่ในพื้นที่ รวมถึงพายุหมุนต่าง ๆ (ภาพที่ 1.2) โดยทั่วไปปริมาณน้ำฝนในพื้นที่แห่งนี้มีปริมาณ 1,500-3,000 มิลลิเมตรต่อปี บริเวณขอบด้านตะวันออก และตะวันตกเฉียงเหนือของแอ่งมีฝนตกตลอดทั้งปี ในขณะที่ตรงกลางของทวีปมีช่วงเวลาที่แห้งมากกว่า โดยเฉพาะช่วงเดือนมิถุนายน-พฤศจิกายน จากข้อมูลที่รวบรวมโดย Parsons (Parsons, 2015) ได้ระบุว่าเมืองมาเนาส์ (Manaus city) ซึ่งเป็นเมืองหลวงของรัฐอามาโซนัสของประเทศบราซิล เคยประสบปัญหาฝนตกติดต่อกันนานกว่า 60 วัน ยิ่งกว่านั้นในปี พ.ศ. 2548 มีรายงานว่าภูมิภาคนี้ประสบกับความแห้งแล้งอย่างรุนแรง ซึ่งทำให้บางส่วนของแม่น้ำเหือดแห้ง การขนส่งทางน้ำเป็นไปอย่างยากลำบาก ปลาเน่าตายในแม่น้ำนับล้านตัว ซึ่งส่งผลกระทบต่อชุมชนและสภาพแวดล้อมอย่างมาก

ภาพที่ 1.2 พื้นที่ลุ่มน้ำและชีวนิเวศแอมะซอน (ซ้าย) และเส้นทางทางไหลของสายน้ำ (ขวา)
ที่มา : ดัดแปลงจาก WWF (2020) และ Kmusser (2015)

อย่างไรก็ตามความแห้งแล้งที่รุนแรงถือได้ว่าเป็นเรื่องปกติสำหรับเขตพื้นที่มาเนาส์ เนื่องจากว่าฤดูแล้งไม่ได้รุนแรงถึงขั้นการเจริญเติบโตของพืชถูกยับยั้ง แต่ทั้งนี้ความแห้งแล้งอาจเอื้อให้เกิดการแพร่กระจายของไฟป่าอย่างรวดเร็ว ทั้งจากไฟป่าตามธรรมชาติ หรือการลักลอบวางเพลิง

จากการศึกษาในปัจจุบันยังพบอีกว่าความผันผวนของระดับแม่น้ำในพื้นที่แถบลุ่มน้ำแอมะซอนเกี่ยวข้องกับการตัดไม้ทำลายป่า ซึ่งมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงขั้นวิกฤต (WWF, 2020) อย่างไรก็ตามยังมีกลไกทางธรรมชาติ นั่นคือทางด้านตะวันตกของเทือกเขาแอนดีส (ภาพที่ 1.2) เป็นแนวกั้นธรรมชาติที่ป้องกันไม่ให้ไอน้ำส่วนใหญ่ออกจากพื้นที่ และควบคุมความชื้นในบางพื้นที่ไว้ได้ ปริมาณเมฆที่ปกคลุมบนเทือกเขาคือแหล่งของหยาดน้ำฟ้า ซึ่งถือเป็นจุดกำเนิดแม่น้ำเกือบทุกสายของแอมะซอน โดยปริมาณน้ำฝนสูงสุดที่เคยบันทึกได้ตามแนวของเทือกเขาของประเทศโคลอมเบียสูงถึง 3,500 มิลลิเมตร (Parsons, 2015)

2.2 ภูมิศาสตร์และอุทกวิทยา พื้นที่บริเวณลุ่มน้ำแอมะซอนมีจำนวนสายแม่น้ำมากกว่า 1,000 สาย โดยไหลมารวมบริเวณที่ราบสูงในประเทศกายอานา ที่ราบสูงของบราซิล และเทือกเขาแอนดีส โดยมี 6 สายหลัก คือ 1) จาปูรา (Japurá) 2) จูรูอา (Juruá) 3) มาเดรา (Madeira) 4) ริโอ เนโกร (Rio Negro) 5) พูรัส (Purus) และ 6) ชีงกู (Xingu) ซึ่งแต่ละสายมีความยาวมากกว่า 1,600 กิโลเมตร โดยแม่น้ำมาเดรามีความยาวที่สุดปริมาณ 3,200 กิโลเมตร ซึ่งการเกิดจากการรวมกันของแม่น้ำ 2 สายในประเทศโบลิเวีย เมื่อแม่น้ำแต่ละสายไหลรวมมาบรรจบที่เส้นหลัก ยังจำแนกได้เป็นประเภทน้ำดำ (blackwater) เช่น ริโอ เนโกร ซึ่งเป็นแม่น้ำสีดำที่ใหญ่ที่สุดในโลก (Saint-Paul, 2000) และประเภทน้ำใส (clearwater) เช่น ชีงกู เป็นต้น ลักษณะของน้ำที่ดำเกิดจากการมีสารฮิวมิกปะปนในระดับสูง ขณะที่น้ำใสจะมีแร่ธาตุละลายอยู่ในสัดส่วนที่สูงกว่าฮิวมิก (Parsons, 2015) มีข้อมูลที่น่าสนใจว่านักวิทยาศาสตร์ที่ทำการศึกษาได้ตั้งข้อสังเกตว่าการที่ครั้งหนึ่งแม่น้ำแอมะซอนเคยไหลไปทางทิศตะวันตก บางทีอาจทำให้แม่น้ำแอมะซอนเคยเป็นส่วนหนึ่งของระบบแม่น้ำคองโก ในสาธารณรัฐประชาธิปไตยคองโก (ชื่อเดิม คือ สาธารณรัฐซาอีร์) ของทวีปแอฟริกาในปัจจุบัน

แม่น้ำในพื้นที่แถบลุ่มน้ำแอมะซอนมีความกว้างที่เปลี่ยนแปลงได้ ความผันผวนนี้ขึ้นอยู่กับฤดูกาล ในฤดูแล้งแม่น้ำสายหลักอาจกว้างเพียง 1.6-10 กิโลเมตร แต่ในช่วงเดือนมิถุนายน-ตุลาคมนั้น เขตบริเวณที่มีน้ำท่วมถึง (floodplain) อาจกว้างได้ถึง 48 กิโลเมตร (Dempsey, 2019) ความลึกเฉลี่ยของแม่น้ำส่วนใหญ่มากกว่า 60 เมตร ซึ่งต่ำกว่าระดับน้ำทะเล อีกทั้งน้ำจำนวนมหาศาลยังได้ชะตะกอน และละลายแร่ธาตุปริมาณมากลงสู่ทะเล ตะกอนดินบริเวณแอ่งแอมะซอนสามารถแบ่งตามลักษณะทางธรณีวิทยาได้ 2 กลุ่ม คือ 1) ดินตะกอนน้ำท่วมถึงในยุคโฮโลซีน (Holocene) ซึ่งมีอายุไม่เกิน 11,700 ล้านปี เรียกว่าวาร์เซีย “Várzea” และ 2) ดินพื้นที่สูงยุคไพลโอซีน (Pliocene) ที่มีอายุ 5.33-2.58 ล้านปีก่อนจนถึงปัจจุบัน และยุคไพลสโตซีน (Pleistocene) ที่มีอายุระหว่าง

2.58-11.7 ล้านปีก่อนจนถึงปัจจุบัน โดยมีพื้นที่สูงอยู่เหนือระดับน้ำท่วมสูงสุดที่เรียกว่า “เทอร์รา เฟิร์ม” (Terra firme) หรือดินพื้นแข็ง จากข้อมูลรายงานเมื่อวันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ. 2563 มีการประมาณการจำนวนน้ำที่ไหลจากแม่น้ำแอมะซอนออกสู่มหาสมุทรแอตแลนติกมากถึง 10.8 พันล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือเทียบเท่าสระว่ายน้ำขนาดมาตรฐานโอลิมปิกจำนวน 7 ล้าน 2 แสนสระ (Butler, 2020) นอกจากนี้ยังประมาณการว่าตะกอนจำนวน 1.3 ล้านตันต่อวัน ถูกเคลื่อนย้ายไปทางเหนือโดยกระแสน้ำชายฝั่ง ซึ่งพบการทับถมตะกอนเหล่านี้ได้ตามชายฝั่งทางตอนเหนือของบราซิลและเฟรนช์เกียนา แรงดันน้ำจำนวนมหาศาลยังส่งผลให้น้ำจากปากแม่น้ำยังคงไหลเป็นสายต่อเนื่องในทะเลไปไกลถึง 200 กิโลเมตร ด้วยสาเหตุนี้จึงไม่เกิดการสร้างสามเหลี่ยมปากแม่น้ำขึ้นตรงบริเวณปากแม่น้ำ เมืองที่เป็นท่าเรือที่อยู่ทางตอนเหนือของประเทศบราซิล ชื่อโอบิโดส (Óbidos) พบว่าแม่น้ำบริเวณนี้มีความกว้างที่จำกัด จึงส่งผลให้การไหลของแม่น้ำมีความเร็วสูงถึง 216,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เมื่อน้ำในแม่น้ำไหลเข้าท่วมที่ราบจะกระจายออกไปเป็นวงกว้างประมาณ 55 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ยประมาณ 1.5 ไมล์ต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามการเกิดน้ำท่วมในพื้นที่ราบลุ่มแห่งนี้ยังไม่นับเป็นภัยพิบัติ แต่ถือเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้

2.3 ลักษณะพืชพรรณ พืชที่พบได้มากในป่าแถบลุ่มน้ำแอมะซอนเป็นไม้เรือนยอดโดยทั่วไปลำต้นมีความสูงเฉลี่ย 40 เมตร และอาจพบสูงได้ถึง 60 เมตร (Parsons, 2015) ลักษณะเด่นของพืชแถบนี้ คือ ปลายใบแคบชี้ลงคล้ายปลายหยดน้ำซึ่งช่วยให้น้ำหลั่งลงสู่ด้านล่างได้ง่าย ตัวอย่างเช่น สนพารานา (parana pine) ที่มีลักษณะเด่นคล้ายโคมไฟระย้า ขณะที่ไม้ทรงพุ่มที่สามารถรับแสงแดดเพื่อใช้สังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ไหมฝ้าย (*Ceiba pentandra*) ถั่วบราซิล (*Bertholletia excelsa*) มังกีพอต (*Lecythis* sp.) และซาคูปิรา (*Bowdichia* sp.) เป็นต้น สำหรับไม้ชั้นรองที่ทนต่อร่มเงาในระดับสอง หรือสาม ได้แก่ อินทผลัม นอกจากนี้ยังสามารถพบพืชในกลุ่มมะกอก (laurels) มะเดื่อ (figs) ซีดาร์ (Spanish cedars) มะฮอกกานี (mahogany) โรสวูด (rosewoods) และพืชในวงศ์แคหางค่าง (bignonias) เป็นต้น พืชไม้ดอกที่พบส่วนใหญ่มักมีดอกตามลำต้นมากกว่าที่จะเกิดตรงปลายกิ่งก้าน สำหรับพืชดอกยังไม่ใช่พืชที่มีความโดดเด่นมากนักในพื้นที่แถบนี้

ลักษณะทางธรณีวิทยาของดินตะกอนน้ำท่วมถึง “วาร์เซีย” และดินพื้นที่สูง “เทอร์รา เฟิร์ม” ทำให้ป่าดิบชื้นที่พบในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนมีชื่อเรียกตามลักษณะภูมิประเทศที่ปรากฏ พืชที่พบในป่าวาร์เซีย ได้แก่ อ้อยป่า พืชสมุนไพร และหญ้า รวมถึงพืชบุกรุกที่เข้ามาใหม่ซึ่งเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว เช่น พืชในสกุลซีโครเปีย (*Cecropia peltata*) ซึ่งจัดเป็นพืชเจริญเติบโต

ได้ดีในเขตร้อน นอกจากนี้ยังมีพืชตระกูลไทร-โพธิ์-มะเดื่อ (Ficus) ที่พบได้มากในแถบนี้ พืชที่พบในป่าวาร์เซียเจริญเติบโตได้ดีบริเวณน้ำท่วมถึง ดินส่วนใหญ่เป็นอนุภาคทรายแป้ง (silt) และแม่น้ำ "น้ำใส" ที่มีแร่ธาตุละลายอยู่จำนวนมาก ป่าลักษณะนี้ดึงดูดชนพื้นเมืองให้มาตั้งถิ่นฐานจนถึงปัจจุบัน จึงมีความสุ่มเสี่ยงในการถูกทำลายโดยมนุษย์มากที่สุด ป่าดิบชื้นน้ำท่วมถึงอีกประเภท คือ ป่าอิกาปอ (igapó) ซึ่งพบได้มากบริเวณพื้นที่แม่น้ำ "น้ำดำ" ที่ดินส่วนใหญ่เป็นอนุภาคทราย (sand) ป่าเหล่านี้อาจมีน้ำท่วมสูงสุดได้ถึง 12 เมตร และขังอยู่เป็นระยะเวลานานถึงครึ่งปี ป่าชนิดนี้สามารถพบต้นซิงโคนา (cinchona) ซึ่งครั้งหนึ่งเคยใช้ประโยชน์จากสารควินินส์ในการรักษามาลาเรีย ซึ่งหากรวมพื้นที่ป่าอิกาปอกับวาร์เซียแล้วจะมีสัดส่วนถึง 3% ของป่าดิบชื้นทั้งหมด ปัจจุบันพื้นที่ป่าในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนมีความแตกต่างจากเมื่อครั้งอดีต จึงเป็นการยากที่จะระบุระดับสายพันธุ์พืชอย่างแม่นยำว่าพืชชนิดใดที่ชนพื้นเมืองได้นำมาใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ อย่างไรก็ตามเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลายวิธีได้ถูกนำมาใช้ศึกษาถึงโครงสร้างถ่านชีวภาพที่ถูกค้นพบ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาด้านความอุดมสมบูรณ์ของดินในพื้นที่แห่งนี้

2.4 ความหลากหลายทางธรรมชาติสู่การกำเนิดดินดำ พื้นที่ส่วนใหญ่ของแถบลุ่มน้ำแอมะซอนอยู่เหนือระดับน้ำท่วมถึง ดินมีสัดส่วนอนุภาคทรายสูง โครงสร้างดินมีรูพรุนจึงระบายน้ำดี ดินส่วนใหญ่มีความเป็นกรดสูง ธาตุอาหารของพืชต่ำ ในภาพรวมจึงมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำตามธรรมชาติ จากรายงานของ Schmidt *et al.* (2014) พบว่าดินในเขตพื้นที่ "ชิงกู" มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4 และมีคาร์บอนอินทรีย์ในดินเท่ากับ 35 กรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นจึงมีเพียงบางพื้นที่เท่านั้นที่สามารถพบ "ดินดำอินเดียน" หรือที่เรียกว่า "เทอร์รา เพรตา" (Terra preta) เพราะเป็นดินที่สร้างขึ้นโดยชนพื้นเมืองบางกลุ่มที่เคยตั้งถิ่นฐานในอดีต ซึ่งคาดว่าชนยุคโบราณที่อาศัยอยู่ในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนเริ่มมีการผลิตถ่านชีวภาพจากการเผาชีวมวลในดินหลุม หรือร่องลึก นักสำรวจในอดีตคาดว่าบริเวณลุ่มน้ำแอมะซอนไม่น่าจะเป็นแหล่งทุรกันดารที่พบชนเผ่าอาศัยอยู่กันเพียงไม่กี่กลุ่ม เนื่องจากข้อมูลโดย Organizations of the Amazon Basin (COICA) พบว่าในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนนี้มีประชากรอาศัยราว 30 ล้านคน โดยชนพื้นเมืองคิดเป็น 9% ของประชากรทั้งหมดประกอบด้วยกลุ่มชาติพันธุ์ราว 350 กลุ่ม โดยมี 60 กลุ่มอยู่อย่างอิสระแยกตัวออกจากกันเป็นส่วนใหญ่ (WWF, 2020) จึงเห็นได้ว่าการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงบำรุงดินไม่ใช่แนวคิดใหม่ ถึงแม้ว่าการกระทำนั้นเกิดขึ้นโดยตั้งใจ หรือไม่ตั้งใจก็ตาม แต่ผลลัพธ์นั้นได้กลายเป็นต้นกำเนิดดินดำที่พบในปัจจุบันนี้

รายงานการค้นพบดินดำที่มีถ่านชีวภาพสะสมอยู่นี้มีมาตั้งแต่ พ.ศ. 2413 โดยศาสตราจารย์ Charles F. Hartt และผู้ช่วยวิจัย Herbert H. Smith จากมหาวิทยาลัยคอร์เนล

ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ได้นำตัวอย่างดินดำจากพื้นที่ลุ่มน้ำแอมะซอนมาศึกษาในห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นในช่วงกลาง พ.ศ. 2503 นักปฐพีวิทยาสัญชาติเนเธอร์แลนด์ชื่อ Wim Sombroek ได้ตีพิมพ์หนังสือเกี่ยวกับการกำเนิดดิน สมบัติทางธรณีวิทยาดินในแถบลุ่มน้ำแอมะซอน รวมถึงพืชที่เกี่ยวข้อง (Kammann *et al.*, 2016) โดย Wim Sombroek ได้กล่าวถึงดินในพื้นที่แถบนี้ว่ามีลักษณะการผุกร่อนสูง และความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ซึ่งกลับกลายเป็นว่าได้เกิดข้อถกเถียงกันในเวลาต่อมาว่าดินดำอินเดียนแถบลุ่มน้ำแอมะซอน (Amazonian Dark Earth, ADE) นั้นเกิดจากจากการกระทำของมนุษย์ หรือแท้จริงแล้วเป็นเพียงผลมาจากการสะสมของเศษซากจากการระเบิดของภูเขาไฟ และตะกอนที่อุดมไปด้วยสารอาหารจากแม่น้ำของเทือกเขาแอนดีส (Glaser *et al.,* 2004) ทั้งนี้ Glaser *et al.* (2001b) ให้ข้อสรุปเกี่ยวกับดิน “เทอร์รา เพรตา” ไว้ดังนี้ว่า “ความอุดมสมบูรณ์ของดินเทอร์รา เพรตาที่เพิ่มขึ้นนั้นพิจารณาได้จากระดับของอินทรียวัตถุในดินที่สูงขึ้น ความจุในการกักเก็บธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม และโพแทสเซียม ค่า pH และความจุในการกักเก็บความชื้นที่สูงกว่าดินที่อยู่โดยรอบ ดังมีบันทึกจากเกษตรกรในพื้นที่ระบุว่าผลผลิตทางการเกษตรในดิน “เทอร์รา เพรตา”นั้นสูงกว่าดินสภาพที่ไม่ดีโดยรอบ” “*The enhanced fertility of ‘Terra preta’ soils is expressed by higher levels of soil organic matter (SOM), nutrient holding capacity, and nutrients such as nitrogen, phosphorus, calcium and potassium, higher pH values and higher moisture-holding capacity than in the surrounding soils. According to local farmers, productivity on the ‘Terra preta’ sites is much higher than on the surrounding poor soils.*”

ดินในกลุ่มดินดำอินเดียนยังรวมถึงดินที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจาก “เทอร์รา เพรตา” ด้วย ดินกลุ่มนี้พบว่ามีอินทรียวัตถุในดินมากถึง 130 ตันต่อเฮกตาร์ ที่ระดับความลึก 1 เมตร (Glaser *et al.*, 2001b) อย่างไรก็ตาม Glaser *et al.* (2001b) ตั้งข้อสังเกตว่าดินดำอินเดียนเหล่านี้อาจไม่ได้เกิดขึ้นจากการใส่ถ่านชีวภาพลงในดินเพียงอย่างเดียว แต่เป็นไปได้ว่าดินเหล่านี้มีการใส่วัสดุอินทรีย์เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์อย่างซ้ำ ๆ ซึ่งในภายหลังได้รับการพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์แล้วว่ามีการเพิ่มวัสดุอินทรีย์ตั้งแต่เริ่มต้นของการกำเนิดดิน “เทอร์รา เพรตา” ไม่ว่าจะเป็นของเสียเหลือทิ้งจากครัวเรือน มูลสัตว์ รวมถึงเศษซากพืชต่าง ๆ (Glaser and Birk, 2012; Glaser *et al.,* 2001b) นอกจากนี้จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องหมายโมเลกุล (molecular marker) ยังพบว่ามีมูลของมนุษย์เป็นส่วนผสม (Birk *et al.,* 2011) อีกทั้งนักวิทยาศาสตร์บางส่วนยังคาดการณ์ว่าปุ๋ยหมักที่พบในพื้นที่ของหมู่บ้านอาจเกิดจากการเผาเพื่อกำจัดขยะ หรือเกิดจากการระอุ

ของความร้อนที่เป็นสาเหตุให้เกิดถ่านชีวภาพที่ได้จากการเผาด้วยอุณหภูมิต่ำได้เช่นกัน (Kern *et al.,* 2004) โดยปริมาณคาร์บอนที่สะสมในพื้นที่ลุ่มน้ำแอมะซอนทั้งหมดคาดว่าสูงถึง 150-200 พันล้านตัน (Cerri *et al.,* 2007; Saatchi *et al.,* 2011) แต่ในท้ายที่สุดภายหลังจากการสาบสูญของชนพื้นเมือง ส่งผลให้บริเวณพื้นที่ดินดำอินเดียนแห่งนี้ถูกปกคลุมด้วยป่าที่เติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องด้วยสภาพภูมิประเทศที่เป็นป่าดิบชื้น จากการวิเคราะห์อภิมาน (meta-analysis) ของพื้นที่แถบลุ่มแอมะซอนจำนวน 81 แห่ง โดย Chave *et al.* (2010) ทำให้ทราบว่ามีเศษซากพืชร่วงหล่นทับถมประมาณ 8.6 เมกะตันต่อปี ในช่วง 450 ปีที่ผ่านมา ส่งผลให้เกิดการทับถมถ่านชีวภาพเหล่านี้ไว้เบื้องล่างเศษซากพืชเหล่านั้น ข้อเท็จจริงบางประการของพื้นที่ลุ่มน้ำแอมะซอนแสดงดังภาพที่ 1.3

ภาพที่ 1.3 ข้อเท็จจริงบางประการของพื้นที่ลุ่มน้ำแอมะซอน

ที่มา : ผู้เขียน (2563)

สำหรับแนวทางการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงบำรุงดินพบได้ในรายงานของ Casselman (Casselman, 2007) ที่ระบุว่า ผู้อำนวยการโครงการหมุนเวียนทางชีวภาพ (the Office of Biorenewables Programs) เป็นผู้ริเริ่มใช้คำว่า "Agrichar" สำหรับแนวทางการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อการเกษตร ในรายงานได้เสริมว่าคำดังกล่าวไม่ใช่คำที่เพิ่งคิดค้นขึ้น แต่เป็นความพยายามของคน

ยุคปัจจุบันที่จะสร้างดิน “เทอร์รา เพรตา” หรือดินดำ ขึ้นมาใหม่อีกครั้งตามรอยชนพื้นเมืองยุคก่อน นอกจากนี้ผู้อำนวยการฯ ยังกล่าวว่าวิถีชีวิตในครั้งอดีตเป็นลักษณะของการแผ้วถางป่าแล้วทำถ่าน (slash and char) ซึ่งการปฏิบัติวิธีนี้สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนในดินจาก 0.5% เป็น 9% ได้ ซึ่งแตกต่างจากระบบเกษตรในปัจจุบันที่เป็นแบบแผ้วถางป่าแล้วเผา (slash and burn) แต่วิธีนี้ไม่สามารถเพิ่มคาร์บอนให้กับดินได้ สาเหตุหลักเกิดจากการใช้ประโยชน์จากพื้นที่เพื่อทำฟาร์มปศุสัตว์ขนาดใหญ่ (Feamside, 2001) จากข้อมูลข้างต้นชี้ให้เห็นว่ารูปแบบการผลิตถ่านร่วมกับการใส่เศษซากอาหาร หรือขยะจากครัวเรือนลงในดิน ตามวิถีชนพื้นเมืองในอดีตเป็นการส่งเสริมให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าต้นกำเนิดของดินนั้นจะมีอินทรียวัตถุ และธาตุอาหารที่ต่ำ อย่างเช่นดินส่วนใหญ่ของพื้นที่ลุ่มน้ำแอมะซอน นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการเผา (burn) กับการผลิตถ่าน (char) โดยเห็นได้ชัดเจนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ถ่านชีวภาพ

เทอร์รา เพรตา

คำว่า “เทอร์รา เพรตา” ถูกใช้เรียกลักษณะของดินที่ค้นพบโดยนักปฐพีวิทยาใน พ.ศ. 2503 (Kammann *et al.,* 2016) ความสำคัญของการค้นพบผืนดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ของ Amazonian Dark Earth (ADE) หรือ *terra preta de índio* (Terra preta) หรือ “ดินดำอินเดียน” ในพื้นที่แถบลุ่มน้ำแอมะซอน นั่นคือ การที่ดินนี้มีลักษณะที่โดดเด่นจากการมีปริมาณถ่านหรือคาร์บอนดำ (black carbon) เป็นองค์ประกอบสูงถึง 70% เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ใช่ดิน “เทอร์รา เพรตา” ที่อยู่ใกล้เคียงกัน ดิน “เทอร์รา เพรตา” จึงมีความอุดมสมบูรณ์สูงเมื่อเทียบกับดินต้นกำเนิด (parent soil) ซึ่งมีการผุกร่อนสูง นอกจากดิน “เทอร์รา เพรตา” มีคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon) ในระดับที่สูงแล้ว ยังมีค่า pH ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) แคลเซียม (Ca) และค่าความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, CEC) ที่สูงด้วย อีกทั้งยังมีค่าความอิ่มตัวของเบสสูงกว่าดินโดยรอบ ในขณะที่ดินต้นกำเนิดบริเวณนั้นกลับพบว่ามีเพียงเหล็ก-ออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Fe, Al oxides) ในปริมาณที่สูง (Glaser *et al.*, 2001b; Glaser *et al.*, 2004) จุดเด่นของดิน “เทอร์รา เพรตา” คือ ความสามารถในการรักษาธาตุอาหารพืชไว้ได้มาเป็นระยะเวลานาน ถึงแม้ว่าดินเหล่านี้ไม่มีการใส่ปุ๋ย (fertilizer) แต่อย่างใด จึงถือได้ว่าเป็นความสำเร็จอย่างหนึ่งที่การเกษตรสมัยใหม่จำเป็นต้องศึกษาเรียนรู้ และนำมาปฏิบัติให้สอดคล้องกับยุคสมัยในปัจจุบัน